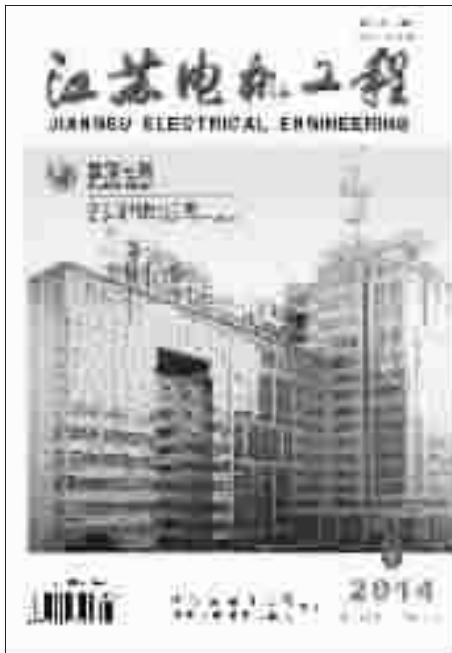


江苏电机工程

JIANGSU DIANJI GONGCHENG

第 33 卷 第 3 期(总第 155 期)

2014 年 5 月 28 日出版



目 次

专论与综述

基于 EPON 和工业以太网的新型配网通信混合组网方案	赵家庆,王 鼎,钱科军,等(1)
660 MW 机组送风机降速改造与变频改造的分析研究	孟庆龙,韦红旗,何长征(6)

故障诊断与检修策略

一起 35 kV 电容式电压互感器二次电压异常升高的故障分析	徐长海,王静君(10)
一例核电站电压互感器三相电压不平衡缺陷的分析与处理	王 略,雷 成,张 钰,等(12)

电网技术

基于 CIM 的配电自动化系统信息交互	费建法,方 泉,王成现,等(15)
电动变桨系统超级电容后备电源测试装置设计	沈 鑫,田 炜,鲁 斌,等(18)
智能变电站中低压母线保护设计	陆玉军,徐 勇,薛 军,等(21)
大容量直流融冰系统在 500 kV 康定变的应用	吴林平,田 杰,李长伟,等(26)
电力二次系统内网安全监视功能的研究与实现	陈茂源,孙 炜,梁 野,等(31)
智能变电站同杆双回路保护功能优化的探讨	申 泉,高 云(35)
高性能的新一代母线保护装置研究和应用	王风光,高兆丽,潘东明,等(37)

《江苏电机工程》 编辑委员会

顾 问	张凤祥 郑健超 严陆光
	单业才 黄其励 薛禹胜
	张 龙 陈 刚
主 任 委 员	沈国荣
副主任委员	鞠 平 王海林 李 群
	崩狄正
委 员	袁晓辉 黄学良 李晓慧
	张兴华 吴军基 张官元
	王作民 费益军 陈云仑
	莫建益 薛一如 叶 辉
主 编	薛一如

江苏省一级期刊

中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊

中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊

中国期刊全文数据库全文收录期刊

中文科技期刊数据库收录期刊

《CAJ - CD 规范》执行优秀期刊

(双月刊)

智能变电站图模一体化设计软件实现方案	叶翔,刘辉,周永忠(41)
一种高性能数字化采样新平台的研制	张吉,谢黎,汪世平(45)
配网抢修移动应用系统的设计与实现	胡扬波,王成现,袁杰(49)
电网设备系统检修策略	汤宗亮,衡思坤,韦海荣(53)
变压器综合试验系统的设计与实现	孙秋芹,周志成,赵科,等(56)
基于罗氏线圈的室内电源负载电流检测电路设计	王鹏宇,王勤(59)
电力管廊顶管施工杆塔保护方法探讨	卞茂斌(62)

发电技术

Caesar II 与 Glif 对高温高压管道静力分析的比较	王静,徐蕾(66)
某 150 MW 机组新投运期间水汽品质异常分析及控制	刘兰平(69)
1000 MW 超超临界锅炉不带炉水循环泵的冲管方式	崔国华,厉富超(72)
防止超超临界锅炉受热面超温的技术措施分析	闫仕军(75)
电厂入炉煤皮带秤的测量精度分析	郭剑锋(78)

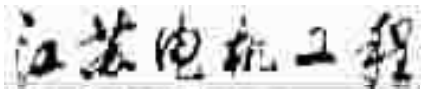
科普园地

大规模海上风电场并网接入方式	陈锋,刘连永,董余凡(81)
----------------	----------------

信息 (48,71)

下期要目 (44)

广告索引 (77)



主管单位:江苏省电力公司
主办单位:江苏省电力公司
江苏省电机工程学会
编辑出版:《江苏电机工程》编辑部
地址:南京市江宁区帕威尔路 1 号
邮政编码:211103
电话:(025)86558772(主编)
(025)86556860(编辑)
(025)86558020(编务)
(025)86558020(广告)
网内:954296903, 954296927
传真:(025)86558020
电子信箱:jsdj@chinajournal.net.cn(电网系统外)
jee@js.sgcc.com.cn(电网系统内)
创刊时间:1982 年
发行范围:公开
国内发行:南京邮政局
邮发代号:28-305
国内定价:16.00 元
订阅:全国各地邮政局(所)
印刷:南京电力印刷厂
广告经营许可证号:3200004000534
中国标准连续出版物号:ISSN 1009-0665
CN 32-1541/TM

封面简介:

常州电力工业起步于 1914 年,1976 年 2 月成立常州供电局。江苏省电力公司常州供电公司于 2001 年 5 月 13 日正式挂牌,营业区辖金坛、溧阳 2 个县级市和天宁、钟楼、武进、新北、戚墅堰等 5 个区,拥有营业客户 195 万户。公司先后荣获“全国电力行业用户满意企业”、“全国文明单位”、“全国精神文明建设先进单位”、“全国和谐劳动关系优秀企业”、“全国安康杯竞赛示范单位”、“国家电网公司文明单位”、“江苏省文明单位标兵”等荣誉称号。常州供电公司将以安全稳定和优质服务为前提,以创先争优和同业对标为抓手,以建设坚强智能电网和深化“五大”体系建设为重点,坚持“制度管人、流程管事、规范管理”,深入推进“两个转变”,持续加强“三个建设”,努力实现公司发展再上新台阶,为常州率先基本实现现代化和省公司争当创建“两个一流”排头兵,开创率先发展新局面而努力奋斗。

CONTENTS

Thesis and Summary

- A New Hybrid Communication Network Scheme for Distribution Networks Based on EPON and Industrial Ethernet ZHAO Jiaqing, WANG Ding, QIAN Kejun, et al.(1)
- Research on Retrofit Through Frequency Conversion or Operation at Lower Speed for Forced Draft Fans of 600 MW Power Unit MENG Qinglong, WEI Hongqi, HE Changzheng(6)

Faults Diagnosis and Maintenance Strategy of Power Apparatus

- Analysis of an Fault of 35 kV Capacitor Voltage Transformer's Secondary Voltage Abnormal Raising XU Changhai, WANG Jingjun(10)
- Analysis and Handling for a Defect of Potential Transformer Three-phase Voltage Unbalance at Nuclear Power Station WANG Lue, LEI Cheng, ZHANG Yu, et al.(12)

Electric Network Technology

- Information Interaction of Distribution Automation System Based on CIM FEI Jianfa, FANG Quan, WANG Chengxian, et al.(15)
- Test Equipment Design of Backup Power of Supercapacitor for Electric Pitch System SHEN Xin, TIAN Wei, LU Bin,et al.(18)
- Design and Analysis of Middle-low Voltage Busbar Protection in Smart Substation LU Yujun, XU Yong, XUE Jun, et al.(21)
- Application of Large-capacity DC Deicing System in 500 kV Kangding Substation WU Linping, TIAN Jie, LI Changwei, et al.(26)
- Research and Implementation of Power System Secondary Network Security Monitoring CHEN Maoyuan, SUN Wei, LIANG Ye, et al.(31)
- Discussion on Protection Optimization for Double Circuit Lines on the Same Tower in Smart Substation SHEN Quan, GAO Yun(35)
- Generation Busbar Protection Research and Application WANG Fengguang,GAO Zhaoli, PAN Dongming, et al.(37)
- Implementation of Graph and Model Integration Software for Smart Substation YE Xiang, LIU Hui, ZHOU Yongzhong(41)
- Design of a New High Performance Digital Sample Platform ZHANG Ji, XIE Li, WANG Shiping(45)
- Design and Realization of a Mobile Application System for Electric Distribution Network Rush Repair HU Yangbo, WANG Chengxian, YUAN Jie(49)
- A Strategy for Power Grid Equipment Maintenance TANG Zongliang, HENG Sikun, WEI Hairong(53)
- Design and Realization of Comprehensive Electrical Test System for Transformers SUN Qiuqin, ZHOU Zhicheng, ZHAO Ke,et al.(56)
- Rogowski Coil Based Current Measuring Circuit Design for Indoor Power Supply Loads WANG Pengyu, WANG Qin(59)
- Discussions on Protection Methods for Transmission Towers on the Tunnels of Power BIAN Mao-bin(62)

Generation Technology

- Static Analysis Comparison of High Temperature and High Pressure Pipelines Between Caesar II and Glif WANG Jing, XU Lei(66)
- Analysis on Abnormal Water-Vapour Quality Encountered in One 150 MW Power Unit Newly Put Into Operation LIU Lanping(69)
- Tube Blowing Mode Not Employing Circulating Pump in 1000 MW Ultra-supercritical Power Unit CUI Guohua, LI Fuchao(72)
- Measures for Preventing Overheating of High Temperature Heating Surfaces in Boilers of Ultra-supercritical Power Plants YAN Shijun(75)
- Analysis on the Measurement Accuracy of Belt Conveyor Scale GUO Jianfeng(78)

Popular Science Field

- Review on Integration Program of Large-scale Offshore Wind Farm CHEN Feng, LIU Lianyong, DONG Yufan(81)

Jiangsu Electrical Engineering(Bimonthly)

Competent Authorities Jiangsu Electric Power Company

Sponsor Jiangsu Electric Power Company

Jiangsu Society of Electrical Engineering

Editor and Publisher Editorial Department of Jiangsu Electrical Engineering

Address No.1 Power Road, Jiangning District, Nanjing, China

E-mail jsdj@chinajournal.net.cn(网外)

jee@js.sgcc.com.cn(网内)

Tel (025)86558772,86558020

Fax (025)86558020

Publication Number ISSN 1009-0665

Post Code 211103

基于 EPON 和工业以太网的新型配网通信混合组网方案

赵家庆, 王 鼎, 钱科军, 赵 慧, 俞 瑜, 秦舒斐
(苏州供电公司, 江苏 苏州 215004)

摘 要:介绍了以太网无源光网络(EPON)技术和工业以太网技术原理,对这2种通信组网方案进行了经济技术对比,在此基础上提出了基于 EPON 和工业以太网的新型配网通信混合组网方案。该方案在系统的可靠性、扩展性、接入便捷性、兼容性等方面均有优越性能,适应实际工作环境能力更强,并通过工程实例进行了验证。

关键词:配电网;无源光网络;工业以太网;混合组网

中图分类号:TM76

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2014)03-0001-05

配网自动化是智能电网的重要组成部分^[1-3],而通信网络是实现配网自动化系统的基础。在电力通信领域^[4],输电网建成了以光纤为主的骨干通信网,配电、用电环节的通信网作为接入网,其通信水平相对输电而言差距较大,呈现“骨干网强、接入网弱”的态势。配电网通信问题在推进一流配电网建设的过程中日渐显露,如何设计适应配电网的通信组网技术成为研究热点。以太网无源光网络(EPON)技术^[5]在此背景下应运而生,其综合了以太网技术及无源光网络(PON)技术的优点,成为目前最具有吸引力的用户接入网的解决方案,并在配电网通信领域中发挥日益重要的作用。从国内外配网自动化系统采用的通信技术看,尚没有一种通信技术可以很好地满足于配网自动化系统所有层次的需要^[6]。在配网自动化系统中,往往由多种通信技术组合成混合的通信系统,各个层次按实际需求采用相应的通信技术^[7]。EPON 技术适合于通信节点众多且分散的应用场景,适用于配电终端等设备通信。但是单纯采用 EPON 组建骨干网,则在可靠性、兼容性等方面存在不足,而工业以太网因其稳定可靠、实时性强等方面的优势,可以弥补 EPON 组网的不足。对于接入网采用工业以太网组网,则在经济性、组网灵活性等方面存在不足,而 EPON 则可以弥补这些不足。采用 EPON 和工业以太网进行混合组网,最大化发挥两种技术的优势,可以构建性能优秀的配网通信网络。文中结合 EPON 与工业以太网的技术原理以及配网自动化对通信系统的要求,研究基于 EPON 和工业以太网的配网自动化系统通信组网体系结构,在此基础上提出相应的解决方案。

1 EPON 组网方案

1.1 EPON 工作原理

EPON 是基于以太网协议的 PON 网络,是一种采用点到多点结构的单纤双向光接入网,其典型拓扑

结构为树形^[8]。EPON 原理如图 1 所示。

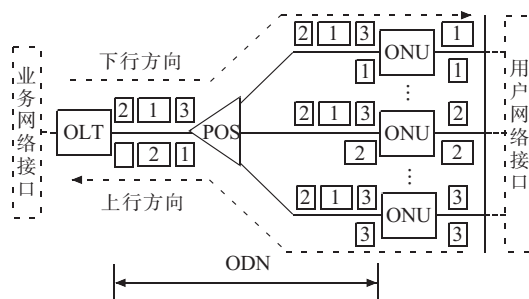


图 1 EPON 原理

EPON 由局侧的光线路终端(OLT)、用户侧的光网络单元(ONU)和光分配网络(ODN)组成^[9,10]。OLT 是局端设备,通常放置在中心机房,是一个多业务提供平台。在下行方向面对无源光网络,要提供光纤接口 PON 口;在上行方向则面对数据传输网,因此要提供电口或光口,接口速率可以是百兆、千兆或万兆。ODN 由光纤和无源光分路器(POS)组成,在 OLT 与 ONU 之间提供光通道,主要负责分发下行数据并集中上行数据,完成光信号功率分配和波长复用等功能。ONU 用于连接用户终端设备,在配电系统中可连接开闭所监控终端(DTU)、集中器等电力设备。ONU 上行接口是 PON 口,通过光纤连接无源光网络,下行接口可根据接入设备性质配置,有电口、RS232/RS485、PSTN 等接口。

EPON 采用波分复用技术同时处理双向信号传输,下行数据以点到多点的广播方式从 OLT 发送到所有的 ONU,上行数据则从各个 ONU 采用时分复用的方式统一汇聚到中心局端 OLT^[11]。

EPON 技术与现有以太网兼容。以太网技术是成熟的局域网技术,EPON 技术只是对现有的 IEEE802.3ah 协议作了一定的补充,基本上与其兼容。因此,EPON 与以太网互联时避免了通信协议的转换,方便管理^[12]。EPON 技术综合了 PON 技术与以太网技术,具有传输带宽高、网络结构灵活、易于扩展、多业务支持能力、易于管理维护、抗干扰性强等优点,可满足各类用户的多种需求。

1.2 EPON 网络结构

EPON 组网方式灵活,具有多种级联模式。多级接入与 1+1 手拉手光纤保护的接入模式如图 2 所示。多级接入是考虑到同一通信路径上的多个站点按同一通道通信,以达到节约光缆及维护简明的目的。1+1 手拉手光纤保护的接入是对多个或者单个重要站点的一种通信上的安全保护,是以通道冗余的方式实现对站点信息通信的保护,具体是将单个 ONU 连接 2 台不同 OLT 实现冗余保护。

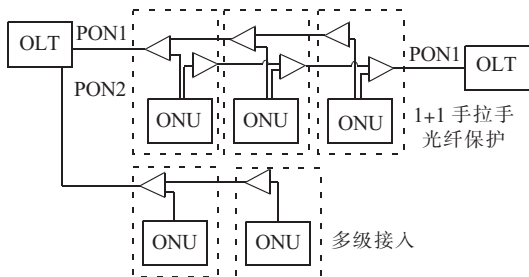


图 2 多级接入与 1+1 手拉手光纤保护接入模式

运用 EPON 设备构成通信主干环,其原理展示见图 3, 根据该原理进行工程建设的 EPON 组网工程如图 4 所示。OLT 设备安装在变电站侧,各 OLT 采用基于 EPON 技术的快速环网保护协议(RRPP)技术构成环网。以双 PON 口 OLT 设备为例进行说明。分光器 POS 级联布置形成树形网络, 开闭所根据距离远近分别接入 EPON 网络。工业级 ONU 布置在开闭所内, ONU 连接馈线终端单元(FTU)、DTU、变压器监测终端(TTU)、抄表集中器等设备。

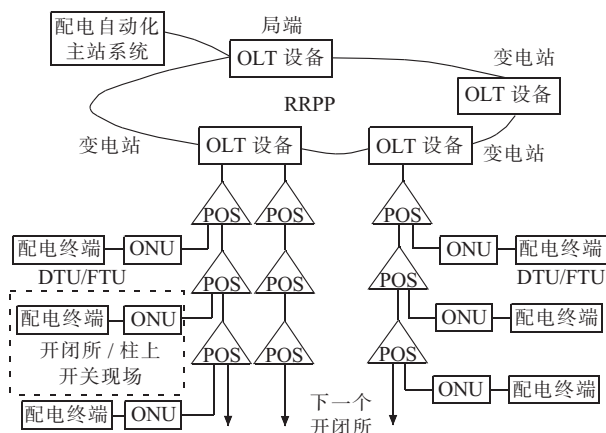


图 3 EPON 组网原理示意

EPON 组网工程大致由配电线路、重合器、分段器、分支开关、变压器、配电终端、通信线路、配电子站等部分构成。OLT 设备安装在 110 kV 变电站,各变电站低压侧有大量的 10 kV、35 kV 配单线路, 根据配电线路辐射状的接线方式,沿途铺设光纤线路,在杆塔等处布置 POS 分光器,采用树形结构级联,构成 EPON 网络。EPON 组网工程示意图中还显示了 1+1 手拉手光纤保护模式。

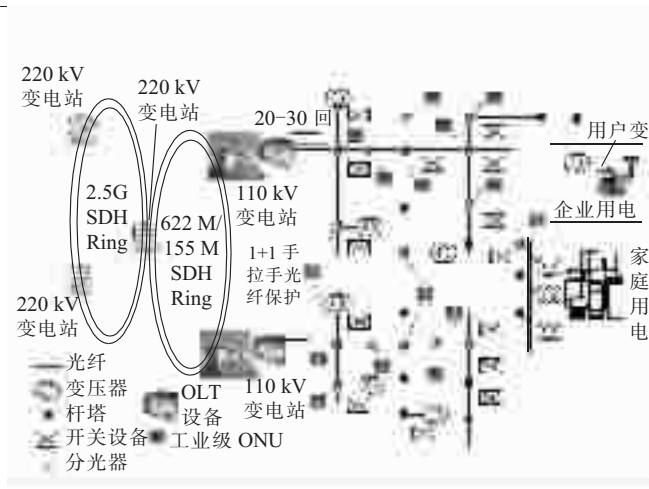


图 4 EPON 组网工程示意

EPON 网络具有成本低、功耗低、维护简单、容易扩展等优势,但是在配网自动化通信中存在实时性、可靠性不强等不足,故有必要对配网通信纯 EPON 组网方案进行一些改进。

2 工业以太网组网方案

2.1 工业以太网技术原理

工业以太网^[13]是在以太网和 TCP/IP 技术的基础上开发出的一种工业用通信网络。在实时性方面,通过采用减轻以太网负荷、提高网络速度、交换式以太网和全双工通信、流量控制及虚拟局域网等技术来提高网络的实时响应速度。在可靠性方面,以太网在逻辑上不支持环形拓扑,但可以通过冗余连接形成物理上的环路,以太网自动保护切换(EAPS)技术将自愈时间缩短到 50 ms^[14]。在开放性方面,以太网适合于解决控制系统中不同厂商设备的兼容和互操作的问题,同时拥有大量的网络管理和故障排除工具,便于维护管理。

2.2 工业以太网网络结构

开闭所内配置以太网交换机, 交换机互联构成 EAPS 光纤自愈主环。开闭所 A 与配电子站配置交换机,通过光纤连接。位置分散的开闭所配置交换机,通过光纤与主环相连。DTU 通过以太网接入开闭所的以太网交换机。FTU 通过 RS232 串口接入开闭所的以太网交换机。以太网交换机组网拓扑如图 5 所示。

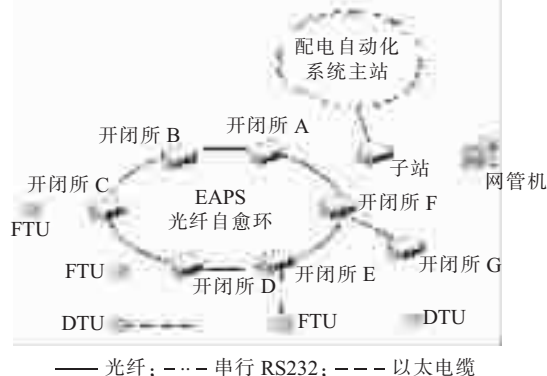


图 5 以太网交换机组网模式

如果单纯采用工业交换机建设配电通信接入网,在网络扩容时,面对配电室等分散的通信节点,需要部署更多的交换机。如果每个节点部署一台多端口交换机,而每个节点连接的配电终端不多,会增加投资成本并造成端口浪费;如果部署端口少的交换机,以后扩容又不方便。有时工业交换机需要级联才能接入范围更广更分散的配电终端。在这种情况下,如果采用EPON进行混合组网扩容,中间部署分光器,在数据终端放置一台ONU设备即可。并且再增加接入终端,只需对原有线路进行分光连接ONU,可实现即插即用,参数设定可由中心OLT设备完成,无需现场对ONU设备进行复杂设置。

可见,工业以太网交换机在电力通信网络中有着较为良好的应用基础,交换机组网有着高带宽、环网保护等优点。但是在配电自动化通信中,点到多点通信、扩容性、抗多点失效等要求使得以太网交换机组网在应对时存在不足。

3 基于EPON和工业以太网的混合组网方案

3.1 EPON和工业以太网技术对比

3.1.1 标准

EPON技术:标准成熟,EPON国际标准为IEEE 802.3ah,国内通信行业也制定了技术和测试标准。

工业以太网:物理层与数据链路层采用IEEE 802.3规范,OSI应用层的标准化制定工作正在进行中,应用层至今没有统一的标准。

3.1.2 链路层

EPON技术:采用波分复用(WDM)方式在1490 nm和1310 nm波长上传输,为单纤双向系统;OLT向ONU广播数据,ONU根据逻辑链路标识(LLID)选择性地接收,ONU发送的数据只能到达OLT,提高了安全性。

工业以太网:一发一收,采用2个光口实现,若实现双环自愈则需4个光口;工业以太网交换机检测从以太网端口来的数据包의源和目的地的MAC地址,依据帧头的信息进行转发。

3.1.3 带宽分配

EPON技术:OLT采用动态带宽分配(DBA)算法为ONU分配时隙,ONU共享上行带宽,ONU没有数据传输时还需向OLT发送报告帧,OLT为ONU分配最小保证带宽。

工业以太网:交换机每个端口为一个冲突域,可使用全部的带宽。

3.1.4 实时性

EPON技术:EPON难以支持实时性要求高的时分复用(TDM)业务。

工业以太网:实时性较高,采用交换机,不受带冲突检测的载波侦听多路访问(CSMA/CD)约束,全双工通信。

3.1.5 冗余保护

EPON技术:采用主干光纤保护和全光纤保护,倒换时间为秒级;抗多点失效。

工业以太网:自愈环采用快速冗余技术,倒换时间为毫秒级;自愈环中只能抗单点失效。

3.1.6 组网方式

EPON技术:适合组成星型网,节省主干段光纤,适用于光纤接入(FTTx)模式;若采用树形或级联方式,需采用不等分光分路器,稳定性存在不足。

工业以太网:可在主干链路上组成单环网、双环网,提高可靠性,在分支链路上可直接点对点接入,组网灵活。

3.1.7 终端设备

EPON技术:ONU之间二层的互通可以配置;OLT支持代理地址解析协议(proxy ARP),即使二层设置了隔离,三层也可以互通。

工业以太网:基于交换式以太网,终端设备可以通信。

3.1.8 传输距离

EPON技术:最远20 km。

工业以太网:单模光纤最远100 km。

3.1.9 工业级产品

EPON技术:生产工业级要求的EPON设备的厂家不多。

工业以太网:为工业级环境应用设计,满足IEC 61850-3电磁兼容标准,支持宽温、防尘防水等,可用于恶劣的环境中。

3.1.10 经济

EPON技术:设备价格低,系统造价较低。

工业以太网:设备价格高,系统造价较高。

综上所述,2种技术各有优势与不足,存在互补之处。在实时性、自愈性方面,工业以太网优于EPON,说明工业以太网适宜构建骨干网以保证可靠性。在冗余保护方面,EPON抗多点失效,优于抗单点失效的以太网;在传输距离方面,EPON适用于短距离传输,工业以太网适用于长距离传输;在经济性方面,EPON造价低于工业以太网;上述三方面说明EPON适宜构建小范围接入网。

3.2 混合组网模式网络拓扑

混合组网模式采用了工业交换机组成骨干环网结合EPON实现最后1 km通信的方案。该方案由主节点、通信主环、子节点、分支链路、配电终端组成。主节点放置工业以太网交换机,采用环网模式连接,形成通

信主环。在有分支链路的主节点配置 OLT,挂在工业交换机下。子节点配置 ONU。通过 ODN 网络连接 ONU 与 OLT,形成分支链路。ONU 接入采集器、DTU 等配电终端设备。EPON 网络是作为工业交换机以太环网的接入层,连接通信主节点和配电终端。混合组网模式网络拓扑如图 6 所示。

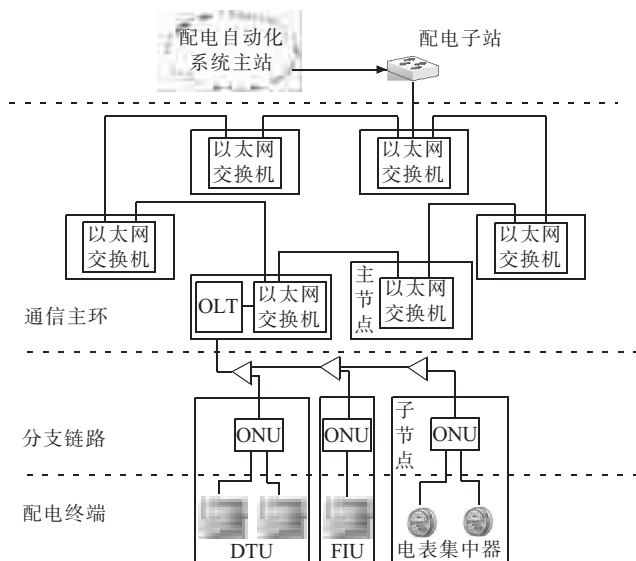


图 6 混合组网模式网络拓扑

3.3 混合组网模式特点分析

混合组网方案既集成了工业交换机在环网保护组网方式上的优势,又结合了 EPON 在最后 1 km 聚合终端的优势。其特点主要体现在以下几个方面。

(1) 可靠性。工业交换机可以灵活实现相切环、相交环等多种复杂的环网结构,实现 50 ms 以内的短切换时间,适用于构建骨干网。在分支链路上,由于其可靠性要求不如环网高,采用 EPON 组网技术是可以保证接入网可靠性的。在工业交换机的环网上,节点的增多,对网络收敛速度的影响较小,而 EPON 组网受限于其通信机制,其能串联的节点数有限。所以将 EPON 用于分支链路,连接数量有限的配电所是合适的,而采用工业以太网组建骨干网,可保证网络收敛速度。

(2) 传输距离。由于通信机制限制,EPON 组网方式的最大传输距离通常为 10~20 km,这个传输距离适用于短距离内的配电终端的接入。而采用工业交换机组成骨干环网,其传输距离大。

(3) 可扩展性。ODN 网络的设计需要考虑光损等诸多因素,复杂度高,扩展不便。但是,EPON 可以在终端侧根据配电网的辐射状、手拉手环网等连接方式,提供树状、手拉手主备光纤等光网络拓扑结构,其在接入网的组网灵活性优于工业以太网。而工业交换机组网则具有较强的可扩展性,采用工业交换机组成千兆骨干环网,为今后扩容预留充足空间。

(4) 应用场景 EPON 技术在密集型终端接入的

网络中能发挥出它的优势,一个 PON 口可以接到 1:32 甚至更高,故 EPON 方案适用于用电信息采集或者光纤到户项目。所以连接数量不多的配电子站采用以太环网,连接数量众多的配电终端采用 EPON 网络。

(5) 兼容性。就目前市场使用情况而言,不同厂商 EPON 设备之间的兼容性存在一定问题,所以应按照统一标准设计,以兼容其他厂商的 EPON 设备。而工业交换机遵循的协议标准成熟,国际通用,交换机兼容性好。所以混合组网模式可以弥补纯 EPON 组网兼容性的不足。

(6) 网管。EPON 系统对网管的要求更高,所以通常不同厂商的 EPON 设备在被网管时会存在管理不便的情况。但是,工业交换机遵循标准的 SNMP 协议,支持 WEB、TELNET、CONSOLE 等多种管理方式,因此网管方便。所以混合组网方案充分发挥以太网的优势,方便用户管理。

(7) 成本。OLT 和 ONU 之间仅有光纤、光分路器等光无源器件,对机房、电源、有源设备维护人员的需求很小,可以有效节省建设和运营成本。所以采用 EPON 作为接入网相比工业以太网,可以免去大量的维护工作。

3.4 工程案例

根据国网公司统一部署,苏州供电公司在苏州工业园区环金鸡湖地区开展一流配电网工程建设。配电通信网共涉及配电所、户外环网室等共 453 座,以及包括 110 kV 湖滨变、南施变等在内的 8 座通信汇聚子站。该配电通信系统方案采用工业以太网技术和 EPON 技术相结合。变电站到配电所划为通信主环,采用工业以太网交换机组成环网。对数量众多且布局分散的配电所以及配电终端采用 EPON 通信方式,作为通信主环的分支链路。工程示意如图 7 所示。

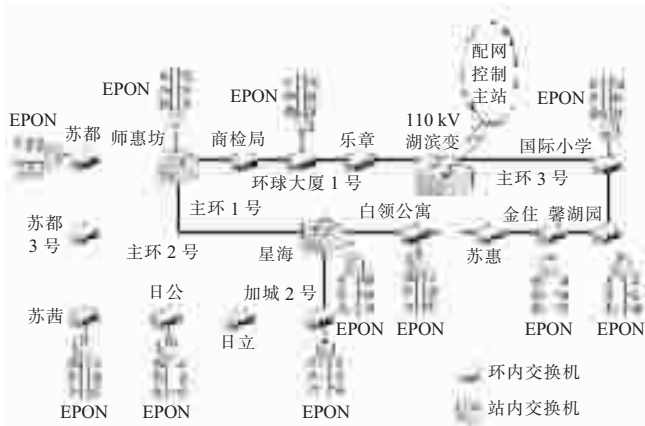


图 7 湖滨变配网通信混合组

湖滨变配电通信网共有 3 个通信主环。通信主环内配置有 2 类交换机:站内交换机、环内交换机。站内交换机位于通信汇聚子站;湖滨变、星海开闭所、青年

公寓配电所内,用于3个主环的信息汇聚。环内交换机安装在主环内的其他配电所,用于环内通信。

湖滨变配网自动化通信网络中共有11个配电所下联了EPON网络作为分支链路。图8为苏都配电所下联的EPON网络。在苏都配电所内配置OLT,在其下联的配电所内配置ONU。ONU下联配电终端。所用OLT发出光功率为2~4 dBm,所用ONU设备接收光功率需小于1 dBm。

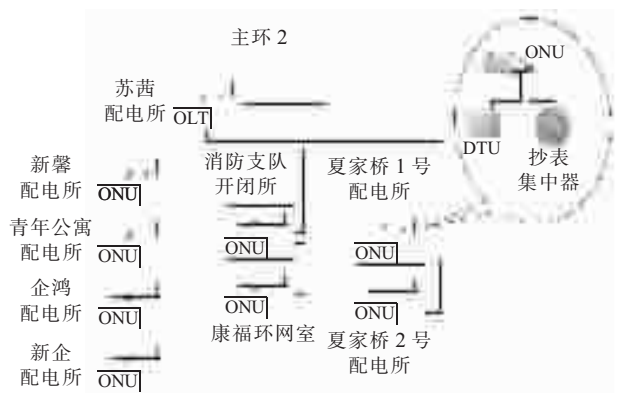


图8 苏都配电所 EPON 分支链路

4 结束语

目前,国内配网改造提升工程即将或正在大量建设,因此亟需设计出一种性能优良的配网通信组网方案。文中提出了一种基于EPON和以太网的配网通信混合组网方案,全面分析了该方案在配网自动化系统中进行数据传输的可靠性、安全性、兼容性、系统扩容能力和经济性等几方面的特点,指出了该方案的优越性。在实际工程应用中实现了EPON网络与工业以太网的融合运行,达到混合组网设计的要求。随着理论研究以及工程建设的不断推进,混合组网方案将得到广泛应用。

参考文献:

[1] 吴晓飞,尹飞.配网设备状态评估验证系统的研制[J].江苏电

机工程,2012,31(6):65-67.

[2] 沈飞飞,吕培强.配网状态巡检手持智能终端的实践与探索[J].江苏电机工程,2012,31(5):53-54.

[3] 刘文,杨慧霞,祝斌.智能电网技术标准体系研究综述[J].电力系统保护与控制,2012,40(10):120-126.

[4] 朱林,陈金福,段献忠.数字化变电站冗余体系结构的改进及其可靠性和经济性评估[J].电工技术学报,2009,24(10):147-151.

[5] 孙毅,骆书剑,吴润泽,等.基于EPON的配电通信网的动态带宽分配方案[J].电力系统保护与控制,2012,40(2):125-130.

[6] 徐国友.配网自动化通信方案选择[J].电力系统通信,2008,29(S1):54-56.

[7] 孙中伟,马亚宁,王一蓉,等.基于EPON的配电网自动化通信系统及其安全机制[J].电力系统自动化,2010,34(8):72-75.

[8] 刘晓胜,张良,周岩,等.低压电力线载波通信新型组网模型性能分析[J].电工技术学报,2012,27(11):271-277.

[9] 戴为,陈虹,徐伟.基于EPON通信技术的智能配电网方案研究[J].电力系统通信,2012,33(9):61-65.

[10] 马韬韬,李珂,朱少华,等.智能电网信息和通信技术关键问题探讨[J].电力自动化设备,2010,30(5):87-91.

[11] 蔡万升,钦佩,覃仁亮.EPON通信技术在用电信息采集系统的应用[J].电力系统通信,2013,34(2):20-23.

[12] 徐光年,马新祥,潘克非.基于EPON技术的配电网通信系统设计和应用[J].电力系统通信,2008,29(5):59-62.

[13] 沈一波.工业以太网快速自愈技术的研究[D].杭州:浙江大学,2010.

[14] 卢文冰,罗应立,闫迎.基于时频分析与互相关技术的工频通信下行解调[J].电工技术学报,2011,26(4):192-199.

作者简介:

赵家庆(1963),男,江苏苏州人,高级工程师,从事调度自动化工作;
王鼎(1986),男,江苏苏州人,硕士,从事调度自动化工作;
钱科军(1981),男,江苏苏州人,博士后,从事智能电网和调度自动化工作;

赵慧(1981),女,江苏苏州人,工程师,从事调度自动化工作;
俞瑜(1982),男,江苏苏州人,工程师,从事调度自动化工作;
秦舒斐(1989),女,江苏苏州人,助理工程师,从事调度自动化工作。

A New Hybrid Communication Network Scheme for Distribution Networks Based on EPON and Industrial Ethernet

ZHAO Jiaqing, WANG Ding, QIAN Kejun, ZHAO Hui, YU Yu, QIN Shufei
(Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China)

Abstract: Communication network plays a crucial role in the development of a first-class power distribution network. This paper introduced in details the principles of Ethernet passive optical network (EPON) and industrial Ethernet technology, and then analyzed EPON network scheme and industrial Ethernet network schemes. By comparing the two network technologies, this paper highlighted the characters and deficiency of the two network schemes if they are used in individual. Based on the comparison, a new hybrid communication network scheme for distribution networks based on EPON and industrial Ethernet is proposed. The scheme has better performances in terms of reliability, extensibility, access convenience, compatibility and ability to adapt to the practical situations. At last, an example of the engineering practice of the proposed network scheme in Suzhou Power Supply Company is introduced.

Key words: distribution network; EPON; industrial ethernet; hybrid network scheme

660 MW 机组送风机降速改造与变频改造的分析研究

孟庆龙¹, 韦红旗¹, 何长征²

(1.东南大学能源与环境学院,江苏 南京 210096;2.南京博沃科技发展有限公司,江苏 南京 210006)

摘要:为提高宁夏京能宁东发电厂 660 MW 机组送风机运行的安全、稳定、经济性,特进行了热态性能试验。针对其电机负载率偏低的问题,通过计算提出了送风机降速和变频调速 2 种改造方案,经过经济性和安全性对比分析,最终采用送风机降速改造方案。改造后的性能试验数据显示,送风机运行效率明显提高,且投资少、可靠性高。

关键词:送风机;降速改造;变频改造;节能降耗

中图分类号:TK223.26

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2014)03-0006-04

送风机是电站锅炉机组的主要辅机,也是保证机组安全和经济运行的关键设备之一。因此,通过对送风机进行热态试验,以了解风机运行性能,并根据实验数据和电厂现场情况,对送风机改造提出不同方案,分析可行性和经济性,选择最优方案,改造后的风机能高效、安全、经济地运行,以保证锅炉机组的长期稳定运行和较低的厂用电率,同时也起到节能降耗的作用。

1 锅炉和风机系统概述

宁夏京能宁东发电有限责任公司(以下简称京能宁电)的一期 2 号机组为 660 MW 燃煤汽轮发电空冷机组,锅炉为超临界参数变压运行螺旋管圈加垂直管直流炉,单炉膛、一次中间再热、采用切圆燃烧方式、平衡通风、固态干式排渣、全钢悬吊结构 II 型锅炉、室内布置煤粉锅炉,锅炉采用紧身封闭。锅炉型号:HG-2210/25.4-YM16,4 只低 NO_x 墙式直流燃烧器,采用四面墙布置,燃烧器一、二次风喷嘴呈间隔排列,顶部设有 SOFA 二次风,底部设有 AA 直吹二次风,6 台 ZGM113G-II 中速磨煤机配正压直吹制粉系统。

宁东电厂送风机选配为沈阳鼓风机集团有限公司 2×50% 动叶可调轴流风机,型号为 ASN-3040/1600 型。其主要参数见表 1。电动机型号为 YKK710-6,其参数为:额定功率 1800 kW;额定电压 6000 V;额定电流 206 A;额定转速 995 r/min;功率因数 0.879。

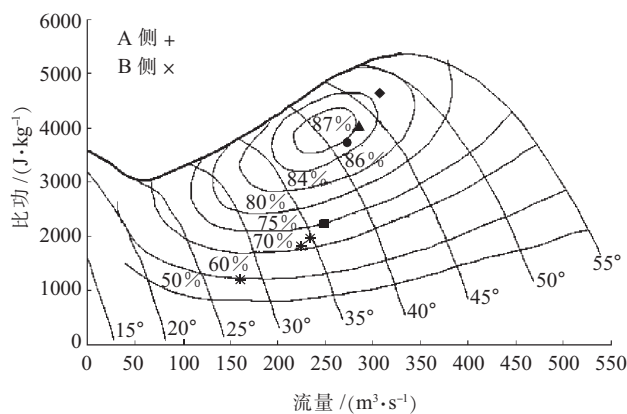
2 性能试验

送风机试验和有关数据的计算是依据 DL/T 469—2004^[1]和 DL/T 5240—2010^[2]进行的。送风机试验分别在机组负荷 644 MW,560 MW,458 MW 下进行,结果见图 1 和表 2。图中的最大蒸发量(推算)工况点是以试验煤质、最大蒸发量(2210 t/h)为条件,通过相关理论计算,得出送风机风量及风机全压。

表 1 送风机设备性能参数表

项目名称	风机设计 工况(TB)	锅炉最大蒸发量 工况(BMCR)	汽机热耗率验 收工况(THA)
进口体积流量/(m ³ ·s ⁻¹)	306.27	283.94	272.98
风机全压/Pa	4555	4142	3837
风机比功/(J·kg ⁻¹)	4575	4032	3751
全压效率/%	85	87	87
风机轴功率/kW	1623	1382	1194
进风温度/℃	28	20	20

注:转速均为 995 r/min。



◆ TB; ● THA; ▲ BMCR; ■ 最大蒸发量(推算)

图 1 2 号炉送风机各试验工况点与最大蒸发量点

通过计算,将 644 MW 实测值换算到最大蒸发量工况点(即试验 BMCR 工况),风机流量为 249.1 m³/s,风机全压为 2276 Pa;而 BMCR 工况的送风机设计流量为 283.94 m³/s,设计压力为 4142 Pa。经对比发现,该工况点的流量及压力均低于 BMCR 设计工况点,其中流量略小于设计值,其原因是由于空预器二次风侧与一次风侧之间的密封装置在试验期间为固定间隙,使得一次风道部分风量串入二次风道,导致送风机风量有所减小,所以送风机风量偏小是正常的。

送风机的实测参数与 TB 点比较,风量裕量 22.95%,风压裕量 100.13%。从风机选型角度出发,则风机的选型较不合理,尤其是风机全压裕量过于偏大。

表 2 送风机性能试验数据

风机编号	工况 1 (560 MW)		工况 2 (644 MW)		工况 3 (458 MW)	
	A 侧	B 侧	A 侧	B 侧	A 侧	B 侧
风机动叶电动 执行阀位 /%	28.7	17.2	31.8	19.9	17.2	17.1
风机流量/(m ³ ·s ⁻¹)	219.0	220.6	235.7	233.1	160.3	160.2
风机比功/(J·kg ⁻¹)	1821	1835	1962	1986	1161	1115
电动机功率/kW	563.0	572.8	658.2	642.9	340.7	348.7
电动机功率因数	0.67	0.67	0.73	0.71	0.50	0.50
风机装置效率 (含电动机)/%	70.3	70.2	71.2	72.8	55.5	52.0
风机轴功率/kW	514.2	523.2	606.2	590.4	303.4	310.5
风机效率/%	76.9	76.9	77.3	77.2	62.3	58.4
2 台风机入口总风量 (实测)/(t·h ⁻¹)	1583		1722		1177	
主蒸汽流量 (计算)/(t·h ⁻¹)	1800		2079		1407	

从风机效率来看,该风机在高负荷(550 MW 以上)运行时,风机效率在 70% 以上,但在低负荷运行(450 MW)时,风机效率(约 60%)相比高负荷工况有明显下降。同时,试验工况下,风机效率在 58%~80% 之间,与性能曲线图中各运行工况点对应效率(约为 57%~73%)略有偏差,而且与该型风机最高效率区的效率(87%)相比,仍有一定节能空间。

试验工况下,2 号机组送风机的电动机功率因数较低,尤其是在 450 MW 机组负荷时,其数值只有 0.50,分析认为主要是电动机的负载率过低所致,3 个试验工况的负载率分别为 32%,36%,19%。电动机的额定功率达到 1800 kW,由此可知电动机的额定功率选型值偏大,致使实际运行中电动机负载率和功率因数偏低,电动机效率低下。

3 送风机改造方案研究

送风机一般有叶轮本体改造、降速改造以及变频调速改造 3 种主要改造思路^[3-6]。根据上述试验结果分析,结合电厂的实际情况和要求,在尽量减少现场改动量的前提下,选择了风机降速和变频调速 2 种节能改造方案进行研究。

3.1 送风机降速改造方案

3.1.1 电机降速改造方案

送风机的降速改造方案主要是对其电机转速进行调整,送风机电机原设计为 6 极电机,同步转速为 1000 r/min,工作转速为 990 r/min,转差率为 1%,由于电机变极降速要求,改后送风机电机极数只能为 8 极,对应同步转速为 750 r/min。取 1%~5% 的转差率范围,所以风机转速范围为 710~740 r/min。同时通过计算得知转速从 996 r/min 降到 740r/min 后能满足锅

炉各种运行工况的需要,而且降速后各个运行工况点都位于高效区,各运行工况点也都远离失速区。图 2 给出了降速改造后的性能曲线和各运行工况点的位置(因 2 号机组 A 侧与 B 侧情况大致相同,故以后分析皆以 B 侧为例)。表 3 给出了改造后节能量的估算。改造后 2 台风机年节电量为 1 235 000 kW·h。

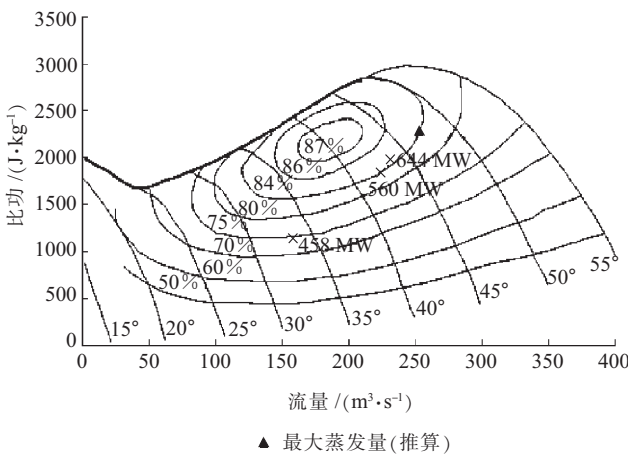


图 2 送风机各试验工况点与最大工作点在 740 r/min 转速下性能曲线中的位置

表 3 送风机降速改造后的节能量分析

参数名称	工况 1	工况 2	工况 3
机组负荷 /MW	560	644	458
风机效率 /%	84.0	84.5	74.5
运行效率提高 /%	7.1	7.3	16.0
风机耗功减少量 /kW	70	88	89
年节电量 / (kW·h)	175 000	220 000	222 500

注:以年运行 7500 h 计,各负荷年平均运行 2500 h,下同。

3.1.2 送风机电机功率的确定

与宁东公司的技术人员交流及试验得知,其空预器一、二次风间漏风量较大,而且也准备进行改造。进行电机功率确定时考虑到此问题,假设其改造后的空预器性能达到设计值,届时在维持最大入炉二次风量的情况下,送风机流量将要增加。为确定送风机改造后的最大工作点,从宁东公司收集并统计了 2 号机组在冬季、夏季不同典型负荷下的送风机运行参数,在 660 MW 工况下,2 台送风机最大合计流量为 1890 t/h;同时,由试验、计算可大致算得空预器一次风侧至二次风侧的漏风量比其设计值大 160 t/h 左右,建议最大工作点流量取 1025 t/h(1890/2+160/2),送风机进口空气密度为 1.0 kg/m³,则送风机进口体积流量 284.7 m³/s,由表 2 试验数据推算,最大工作点的比功为 2643 J/kg(即送风机的全压约为 2643 Pa)。取改造后送风机的最大工作点流量为 284.7 m³/s,全压为 2643 Pa,此工况点风机运行的效率为 80%。则单台送风机运行时的轴功率为 931 kW,此时电机的负载率为 51.7%,同时考虑

机械传动效率为 98%、电机效率为 94%,电机输入功率为 1011 kW,电机裕量取为 5%,电机功率则为 1062 kW。考虑到 TB 点的工况,电机功率的选取应在 1062 kW 以上。

3.2 送风机变频改造方案

3.2.1 变频改造的基本原理

变频调速的改造也是对电机方面的改造,是通过增加变频器,使风机实现变速运行。变频效果主要依据风机相似定律,由相似定律可得到同一工况点在不同转速下的风机效率及各转速下的风机性能曲线。在相似工况下运行的风机其流量、压力、功率与转速之间的关系,可由如下简化公式表示:

$$\begin{cases} \frac{q_1}{q_2} = \frac{n_1}{n_2} \\ \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \\ \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: q 为风机流量, m^3/s ; p 为风机压力, Pa ; P 为风机功率, W ; n 风机的转速, r/min 。当机组负荷变化使送风量减小时,扬程随着转速下降而降低,可以大幅度减少节流损失;采用变频调速时风机的工作效率 η 总是处于高效区;而且变频改造后,变频器具有根据负载轻重情况调节输入电压的功能,提高了电动机的工作效率和功率因数。

3.2.2 变频改造效果分析

通过计算分析可知,现有风机动叶在 45° 开度时,风机的运行效率最高。风机的出力也能满足其最大蒸发量工况点的运行需求。图 3 给出了动叶固定在 45° 时的转速调节性能曲线和各运行工况点的位置。表 4 给出了风机变频改造前后节能量的估算。改造后 2 台风机年节电量为 1 280 000 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

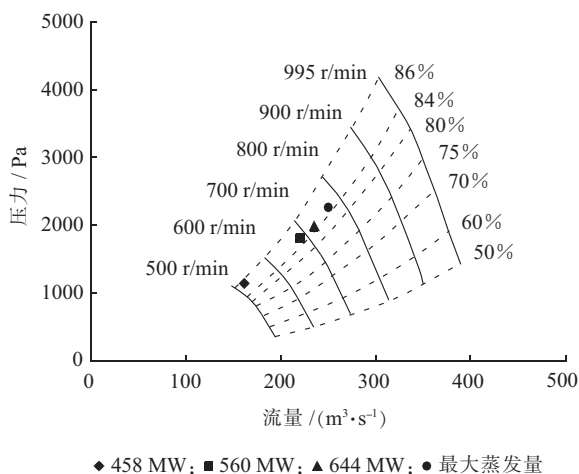


图 3 送风机动叶角度 45° 变频后的性能曲线及设计参数的位置

表 4 送风机变频改造后的节能分析

参数名称	工况 1	工况 2	工况 3
机组负荷 /MW	560	644	458
风机效率 /%	84.5	84.5	74.5
运行效率提高 /%	7.6	7.3	27.0
风机耗功减少量 /kW	81	75	100
年节电量 / ($\text{kW}\cdot\text{h}$)	202 500	187 500	250 000

4 2 种改造方案比较

4.1 经济性分析对比

由上述分析可知,在高中负荷时,2 种方案的风机效率提高差不多;而在低负荷时,变频改造方案的节能效果稍微明显一些。从节电量上来看,送风机的变频改造比降速改造每年多节约 45 000 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。2 种方案的投资回收比较分析见表 5。

表 5 2 种改造方案投资、回收的对比

项目	降速改造	变频改造
节电量 /kW	1 235 000	1 280 000
节约费用 / 万元	49.4	51.2
投资设备费用 / 万元	86	223
回收年限 / 年	1.74	4.35

注:上网电价按 0.4 元 / ($\text{kW}\cdot\text{h}$) 计。

由表 5 可以看出,2 种方案的年节省费用基本相同,但变频改造前期投资大,回收期达 4 年多,而降速改造仅不到 2 年就可以收回投资,由于变频改造的控制系统相对复杂,可能需要更多的投入,而降速改造则简单很多,几乎和改造前一样,而且如果再算上维护、检修费用,两者的投资费用差距更为明显。由此考虑,送风机降速改造的经济性更为理想。

4.2 安全性分析对比

送风机的降速改造,本体以及其他设备不需进行改动,只要对电机改动即可,改动量极少,安全性较高。

送风机的变频改造,也不用对风机本体改造,但送风机的热工控制系统、电气保护系统等需要进行改造,还要加装变频设备柜。同时,为了防止送风机在较低转速时风机本体与其构件、风道导流叶片等发生共振(比如叶片共振和轴系扭振,可能会造成叶片疲劳折断和主轴断裂等)或是相邻风机机组产生的拍振危险,所以电厂还需对变频后可能的共振或拍振频率进行测量,以避免危险运行频率,确保风机的安全运行。同时,在控制系统方面,变频器的控制系统比较复杂,可靠性没有原来的系统高。

综上所述,从经济性、运行维护及产出比与安全性等方面的对比可知,将现有送风机电动机的转速由

995 r/min 降到 740 r/min 的降速方案更优。

5 改造后的效果评估

宁东电厂 2 号机组在大修间实施了送风机电机降速节能改造,风机转速从 995 r/min 降至 747 r/min(电动机从 6 级改为 8 级),能够满足各个工况的运行要求,机组运行中送风机效率在各个工况点都有不同程度的提高。表 6 给出了改造前后电机参数对比。

表 6 电机改造前后参数对比

项目	改造前	改造后
电机型号	YKK710-6	YKK710-8
额定功率/kW	1800	1250
额定转速/(r·min ⁻¹)	995	747
额定电流/A	206	88.23

送风机改后试验结果表明,风机降速改造后,其运行开度明显增大(增大约 40%~80%),运行效率明显提高(提高约 4%~15%),如果按年运行 7500 h,年平均三个工况点各运行 2500 h 算,每台机组(2 台送风机)可以节约耗电量 1 534 000 kW·h,上网电价每千瓦时按 0.4 元计算^[7],每年可节约 61.36 万元。表 7 给出了改造前后送风机性能对比及节电量分析。

表 7 送风机改造前后性能参数对比及节电量分析

项目	试验工况(B 侧送风机)					
	改造前	改造后	改造前	改造后	改造前	改造后
机组负荷/MW	458	465	560	550	644	630
动叶开度/%	17.1	24.1	17.2	31	19.9	41
风机入口流量/(m ³ ·s ⁻¹)	160.2	168.6	220.6	198.0	233.1	245.2
比功/(J·kg ⁻¹)	1115	1170	1835	1355	1986	1737
电动机功率因数	0.50	0.36	0.67	0.44	0.71	0.56
效率/%	58.40	73.79	76.90	80.83	77.20	87.16
效率提高/%	15.40		3.93		9.96	
风机轴功率/kW	310.5	269.7	523.2	354.6	590.4	493
轴功率减少/kW	40.8		168.6		97.4	
各负荷年节电量/(kW·h)	102 000		421 500		243 500	

6 结束语

通过试验可知,送风机出力较大,选型不合理且电动机的额定功率选择也过大,有很大的节能空间。确定降速改造方案时,最大蒸发量工况点的确定十分重要,需根据电厂实际情况及试验数据来计算。试验工况下送风机的效率与性能曲线中各运行工况点对应效率,由图可知略有偏差,这与制造、安装、测量误差都有一定关系。通过对 2 种改造方案的对比分析可知,对于宁东电厂的送风机而言,送风机降速改造的经济性以及安全性等更为理想。改造后,2 台风机在高负荷运行时,风机效率在 86%以上,高于设计值($\geq 85\%$),两侧阻力平衡,2 台风机运行稳定,可靠。综合考虑,对送风机而言,降速改造方案改动少,投资小,且改造的经济性十分理想,值得推广。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 469—2004 电站锅炉风机现场性能试验[S]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 国家能源局. DL/T 5240—2010 火力发电厂燃烧系统设计计算技术规程[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [3] 刘家钰. 我国电站风机节能的途径探讨[J]. 风机技术,2007(3):50-55.
- [4] 卫运钢. 变频技术在热电厂风机节能改造中的应用[J]. 风机技术,2010(5):57-61.
- [5] 冒士平,丁平,赵启明. 330 MW 机组送风机电机降容改造及节能分析[J]. 电力科学与工程,2009,25(8):62-64.
- [6] 宓洪武,李智娟,许凤玲,等. 浅谈火力发电厂风机节能改造[J]. 风机技术,2010(3):53-57.
- [7] 严加发. 650 MW 燃煤机组引风机和增压风机合并节能分析[J]. 江苏电机工程,2013,32(4):74-76.

作者简介:

孟庆龙(1990),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为电站风机改造选型以及优化运行;
韦红旗(1966),男,安徽霍山人,副教授,从事电厂各设备性能试验、分析研究及性能优化研究;
何长征(1978),男,江西新余人,工程师,从事热能动力系统与设备的性能测试、分析、优化工作。

Research on Retrofit Through Frequency Conversion or Operation at Lower Speed for Forced Draft Fans of 600 MW Power Unit

MENG Qinglong¹, WEI Hongqi¹, HE Changzheng²

(1.School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Bowo Science and Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210006, China)

Abstract: In order to improve the safety, stability, and operational economy of the forced draft fans, performance tests were performed in the 600 MW power unit of Ningdong Power Generation Company. Based on the acquired test data, two retrofit schemes were proposed for the draft fans, including frequency conversion and operation at lower speed. According to the contrast results, the latter scheme was adopted finally. The test results after retrofitting showed that the efficiency of forced draft fans had been greatly improved, and very satisfactory energy-saving results were achieved.

Key words: forced draft fan; retrofit at lower speed; frequency conversion; energy saving and consumption reduction

一起 35 kV 电容式电压互感器二次电压异常升高故障分析

徐长海¹, 王静君²

(1.南京供电公司,江苏 南京,210000;2.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏 南京 211103)

摘 要:介绍了一起 35 kV 电容式电压互感器由于电磁单元一次绕组匝间短路引起二次电压异常升高的故障案例,结合电容式电压互感器的特点分析了导致该故障的原因,并提出通过在线监测电容式电压互感器二次电压、红外精确测温等方式,及时发现电容式电压互感器缺陷,预防设备事故的发生。

关键词:电容式电压互感器;电磁单元;二次电压升高;故障

中图分类号:TM451⁺2

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0010-02

电容式电压互感器兼有电压互感器和电力线路载波耦合装置中的耦合电容器的功能,主要用于测量、继电保护、同步检测、长距离通信、遥测和监控等。电容式电压互感器在实际应用中不仅具有可靠的阻尼铁磁谐振性能、优良的瞬变响应,而且绝缘性能好、价格便宜,因此近几年在电力系统中得到广泛应用。电容式电压互感器除了在变电站线路出线侧广泛使用外,还代替电磁式电压互感器大量应用在母线侧和变压器出线套管侧。然而受设计制造经验、工艺水平及原材料等因素的限制,电容式电压互感器存在较多的质量问题,在实际运行过程中发生了不少故障。其最常见的故障主要有:中间电压电磁单元的中压端限压避雷器击穿、二次电压异常升高或降低等^[1-3],威胁了电网的安全稳定运行。文中介绍了对 1 台 35 kV 电容式电压互感器在运行中出现二次电压升高的分析过程,为类似故障的分析处理提供参考。

1 结构介绍

电容式电压互感器在结构上一般由电容分压器和电磁单元两部分组成。电容分压器包括高压电容器 C_1 (主电容)和中压电容器 C_2 (分压电容),电磁单元包括中间变压器、补偿电抗器、阻尼装置及保护装置等元件,它利用电容分压器将输电电压降到中压(10~20 kV),再经过中间变压器降压到 100 V 或 $100\sqrt{3}$ V 供给计量仪表和继电保护装置^[4-6]。电容式电压互感器工作原理可以概括为耦合电容器分压、中间变压器降压、电抗器补偿、阻尼器保护。其接线原理如图 1 所示。

电容式电压互感器由 1 组瓷套外壳的电容分压器(包括主电容 C_1 ,分压电容 C_2)以及安装在下部油箱中的电磁单元组成,电容器的芯子由若干元件串联组成, C_1 、 C_2 的电容量均为 20 000 pF 左右,电磁单元中间变压器的一次端 A 在 C_1 与 C_2 的中间抽头处,3

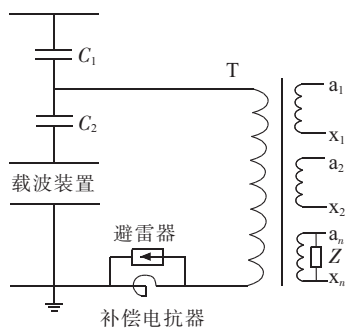


图 1 电容式电压互感器接线原理

组二次绕组的接线端子 a_1x_1 、 a_2x_2 、 a_nx_n 从分压器底部的油箱侧面引出到外部。

2 故障现象

2013 年 7 月 19 日,某变电站 35 kV 母线 C 相电容式电压互感器在电网正常运行条件下发生故障,二次电压显示值偏高。该电容式电压互感器型号为 TYD 35/ $\sqrt{3}$ -0.01FH。

发现上述异常后,首先对故障现象进行初步判别:由图 1 可知,二次电压的大小与中间变压器的变比和分压电容的大小有关,从故障现象来看,电容式电压互感器的二次电压仅是升高并未完全失压,因此不可能是电磁单元变压器一次引线断线或接地、分压电容器 C_2 短路等故障所致。由此分析,引起二次电压异常升高的故障原因可能会有以下 3 个方面:(1) 电容单元损坏,引起分压比变化, C_1 变大或者 C_2 变小;(2) 分压电容接地端未接地,引起悬浮电位升高;(3) 电磁单元损坏,电压比发生变化。中间变压器一次线圈匝数变小或者测量线圈匝数变大。

3 原因分析

3.1 试验检查

为了查清该电容式电压互感器内部存在的问题,将此间隔的电容式电压互感器退出运行后,首先在现场进

行了外观检查和绝缘电阻测量、介质损耗及电容量测量等试验。

3.1.1 外观检查

拆除一次引线后,该电容式电压互感器外观无损伤痕迹,分压电容接地引出端接地良好。

3.1.2 绝缘电阻测量

检测电磁单元二次出线端对地绝缘、绕组间的绝缘性能,A、B、C 三相二次出线端的绝缘电阻均大于 5000 M Ω ,绝缘性能良好。

3.1.3 电容量及介损测量

采用自激法测量主电容 C_1 和分压电容 C_2 以及介损 $\tan\delta$,检验结果如下表 1 所示。可见 A、B、C 三相的电容量、介损 $\tan\delta$ 检验数值基本一致,可以判定该电容式电压互感器的电容单元 C_1 、 C_2 及介损正常。

表 1 电容量及介损 $\tan\delta$ 检测数据

相别		试验电容量 /pF	$\tan\delta$ 值 /%
A	C_1	20 120	0.07
	C_2	20 510	0.07
B	C_1	20 110	0.06
	C_2	20 490	0.06
C	C_1	20 160	0.06
	C_2	20 550	0.06

3.1.4 变比检测试验

同样采用自激法,对该电容式电压互感器的二次出线端子(a_1x_1 、 a_nx_n)分别进行加压,将一次电压升至额定电压,检查电容式电压互感器的电压比,结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 二次出线 a_1x_1 升压试验数据

相别		一次试验电压 /kV	二次试验电压 /V	二次试验电流 /A
A	C_1	2	6	2.3
B	C_1	2	6	2.3
C	C_1	2	10	1.5

表 3 二次出线 a_nx_n 升压试验数据

相别		一次试验电压 /kV	二次试验电压 /V	二次试验电流 /A
A	C_1	2	10	1.4
B	C_1	2	10	1.4
C	C_1	2	16	0.8

从表 2、表 3 所测的试验数据来看,A、B 相的二次电压试验数据一致,C 相的二次试验电压偏大 60%左右,二次试验电流偏小 30%左右。该电容式电压互感器绝缘电阻、电容量、介损 $\tan\delta$ 等的试验检测结果可以排除电容单元 C_1 、 C_2 存在故障的可能,因此可以确定该电容式电压互感器的电磁单元存在故障。

另外从二次电压升高、二次电流减小的试验情况来看,初步判断 C 相的中间变压器存在一次绕组匝间短路现象。

3.2 解体检查

为了进一步分析故障原因,对该电容式电压互感器进行了解体检查。解体前对故障相 C 相进行了油色谱检测,检测结果如表 4 所示。

表 4 C 相油色谱检测数据 $\mu\text{L/L}$

项目	数值	项目	数值
H_2	2242	C_2H_4	1500+
CO	483.9	C_2H_2	800.8+
CH_4	500	C_2H_6	2850+
CO_2	2712		

根据表 4 的油色谱检测数据,故障相 C 相的绝缘油中 H_2 、 C_2H_4 、 CH_4 、 CO_2 、 C_2H_6 等各种特征气体均已超标。如 H_2 含量为 2242 $\mu\text{L/L}$,远大于规程要求的注意值 150 $\mu\text{L/L}$; C_2H_2 含量为 800.8+ $\mu\text{L/L}$,远大于规程要求的注意值 1 $\mu\text{L/L}$ 。 C_2H_2 及 H_2 等特征气体的大量存在,表明故障相在运行过程中发生了电弧放电。通过三比值法分析, H_2 、 C_2H_4 等气体是由于 C 相的中间变压器存在匝间短路引起油、纸电弧放电,由此产生的高温使绝缘油裂解生成各种特征气体。因此可以判断中间变压器一次绕组存在匝间短路故障。

对中间变压器的二次绕组 a_nx_n 进行空载试验,发现空载电流的实测值是正常值的 2 倍,试验数据如表 5 所示。由此,可以明确肯定这是由于中间变压器的一次绕组存在匝间短路故障,引起二次电压升高。

表 5 中间变压器空载试验数据

电压 /V	空载电流 /A	
	正常值	实测值
50	0.2~0.3	0.5
100	0.6~0.7	1.3

另外,检查电磁单元内部元器件,发现中间变压器二次绕组 a_1x_1 并联的阻尼器电容单元已开路。

3.3 原因分析

根据试验数据的分析和解体检查的情况综合判断,造成中间变压器一次绕组匝间短路的原因是:二次绕组的阻尼器电容单元发生开路,致使阻尼器失去阻尼作用,在运行过程中发生谐振,谐振引起的暂态过电压使得中间变压器一次绕组匝间绝缘击穿烧损。短路电流所产生的热量在短时间内使变压器油分解产生大量的气体。如果故障持续下去,极有可能造成电容式电压互感器的下节油箱油气喷出,或使高压电容 C_1 两端所加电压太高而发生爆炸等极其严重的故障。

一例核电站电压互感器三相电压不平衡缺陷的分析与处理

王 略¹, 雷 成¹, 张 钰², 申雁鹏¹, 王声学¹

(1.中核集团江苏核电有限公司,江苏 连云港 222042;

2.江苏方天电力电力技术有限公司,江苏 南京 211102)

摘 要:某核电站高压备用变压器在某次检修送电后,出现低压侧电压互感器测量的三相电压不平衡现象。采用节点电压法对此现象进行了分析,确定是由于负荷中性点的位移导致了电压不平衡。但在消除了负荷中性点位移后,仍有 1 台电压互感器测量的三相电压不平衡,检查发现是由其熔断器底座的故障所致,消除此缺陷后,电压测量值恢复了正常。

关键词:电压互感器;不平衡;中性点位移

中图分类号:TM451

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0012-03

中核集团某核电站目前运行有 2 台 VVER1000 型的核发电机组,每台机组配备 1 台高压备用变压器,用于在正常厂用电源失去后为机组提供厂用电源。高压备用变压器为分裂绕组变压器,额定容量为 63 MV·A,接线方式为 YN-d11-d11,额定电压比为 220/6.3/6.3 kV,低压侧 2 个绕组分别通过一段封闭母线连接至厂用电母线,每段母线都配有 2 台电压互感器。高压备用变压器在某次检修送电后,出现低压侧电压互感器测量的三相电压不平衡的现象,文中采用节点电压法对此现象进行了分析。

1 事件经过与原因分析

1.1 首次电压不平衡分析

高压备用变压器整体的接线如图 1 所示。

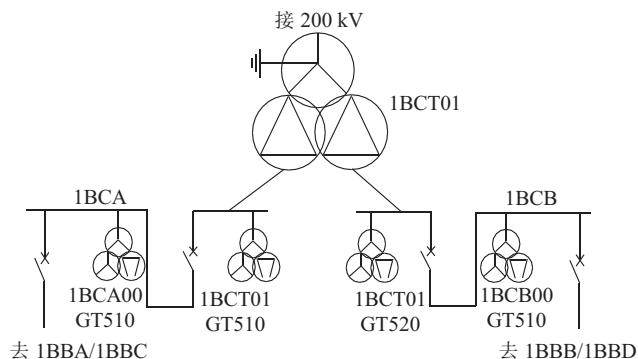


图 1 高压备用变压器整体接线

2013 年 1 月 11 日,1 号高压备用变压器 1BCT01 在年度检修后复役,送电后变压器本体一切正常。在对 1BCA 和 1BCB 母线送电后,发现电压互感器 1BCT01GT520 和 1BCB00GT510 盘柜上显示的三相一次电压不平衡,于是又直接测量了 2 个电压互感器的二次电压值。测量结果如表 1 和表 2 所示。

从表中可看出,将测量的二次电压值乘上电压互感器的变比值,换算值和显示的一次电压值基本相

表 1 1BCT01GT520 测量电压值

项目	A 相	B 相	C 相
一次值/kV	3.5	3.7	3.9
二次值/V	55.2	58.6	51.9

表 2 1BCB00GT510 测量电压值

项目	A 相	B 相	C 相
一次值/kV	3.4	3.6	3.9
二次值/V	54.6	57.3	62.0

等,2 个电压互感器测量的各相电压值大小也对应基本相等,可排除测量显示表计的问题。该变压器本次检修前运行状态一切正常,没有发现电压不平衡的现象,检修过程中仅进行了外部检查处理,检修后的各项常规电气试验结果也都正常,基本可排除变压器本体的问题。而且,检查发现 1BCA 母线上的 2 个电压互感器的测量值也存在不平衡的现象。

根据上述现象,对该次电压不平衡作如下分析:该变压器低压侧为三角形接线,相当于一个中性点没有接地的三相交流电源系统。当仅带上厂用电母线时,三相负载主要为母线对地电容,如图 2 所示。 C_A, C_B, C_C 为每相对地电容, Z_A, Z_B, Z_C 为每相负荷的等效阻抗。采用节点电压法^[1]求解此电路,节点电压 U_{NN} 为:

$$\dot{U}_{NN} = (\frac{\dot{U}_A}{Z_A} + \frac{\dot{U}_B}{Z_B} + \frac{\dot{U}_C}{Z_C}) / (\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C}) \quad (1)$$

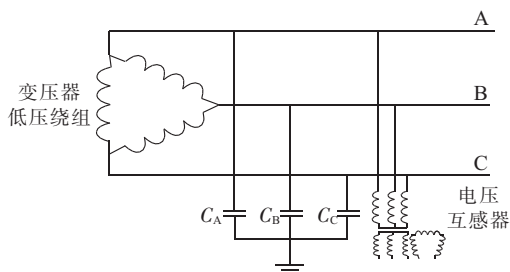


图 2 变压器低压侧接线

由于此时低压侧绕组的负荷仅为厂用母线,基本为纯容性负载,因此 Z_A, Z_B, Z_C 主要由母线的对地电容决定,从而可近似认为:

$$Z_A = 1/j\omega C_A \quad (2)$$

$$Z_B = 1/j\omega C_B \quad (3)$$

$$Z_C = 1/j\omega C_C \quad (4)$$

将式(2—4)代入式(1)可得:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{NN} &= \frac{\dot{U}_A j\omega C_A + \dot{U}_B j\omega C_B + \dot{U}_C j\omega C_C}{j\omega C_A + j\omega C_B + j\omega C_C} = \\ &= \frac{\dot{U}_A C_A + \dot{U}_B C_B + \dot{U}_C C_C}{C_A + C_B + C_C} \end{aligned} \quad (5)$$

此时电源所带三相母线的长度不完全一样,母线长度又较短,因此三相负荷对地电容值之间的相对差异较大,即 C_A, C_B, C_C 之间的相对差异较大,又因为:

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = U \angle 0^\circ + U \angle -120^\circ + U \angle 120^\circ = 0 \quad (6)$$

在一般情况下,负载的中性点和电源中性点不是等电位,中性点发生了相对位移,假设式(5)计算后 $\dot{U}_{NN} = Y \angle$ 。则三相负载上的电压:

$$\dot{U}_{AN'} = \dot{U}_A - \dot{U}_{NN} = U \angle 0^\circ - Y \angle \quad (7)$$

$$\dot{U}_{BN'} = \dot{U}_B - \dot{U}_{NN} = U \angle -120^\circ - Y \angle \quad (8)$$

$$\dot{U}_{CN'} = \dot{U}_C - \dot{U}_{NN} = U \angle 120^\circ - Y \angle \quad (9)$$

其向量图如图3所示, $\dot{U}_{AN'}, \dot{U}_{BN'}, \dot{U}_{CN'}$ 在大小上必然存在差异,某一相会比电源电压高,另一相会比电源电压低,这和表1、表2中的测量值反映的现象是一致的。若继续带上更长的母线或联络电缆等更多的负载后,每相的对地电容量将增大,但每相之间的相对差异将缩小,达到一定程度后,可以认为 $C_A = C_B = C_C$,则:

$$\dot{U}_{NN} = \frac{1}{3} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = 0 \quad (10)$$

即负荷中性点和电源中性点没有电位差,三相负荷的电压大小将相等。

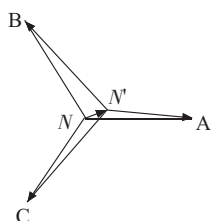


图3 三相电压向量

1.2 再次电压不平衡分析与处理

经过上述分析后,判断此次电压不平衡是一种正常现象,决定向下游继续送电,带上了去下游母线的联络电缆。该电缆每相由3根截面积 800 mm^2 的单芯交

联聚乙烯电缆组成,总长度约 150 m ,对地电容量较大。此时2个电压互感器测量显示的电压如表3所示。

表3 带上联络电缆后的电压测量值 kV

项目	A 相	B 相	C 相
1BCT01GT520	3.7	3.7	3.7
1BCB00GT510	3.7	3.5	3.7

可见,1BCT01GT520 测量的电压值三相之间平衡,且此时1BCA 母线上的2个电压互感器的测量值也达平衡,中性点位移现象已消除,但1BCB00GT510 测量的B相电压仍然偏低,而其他两相的电压值和1BCT01GT520 的测量值一致。根据上述现象判断,1BCB00GT510 电压互感器可能存在问题,于是退出该电压互感器,进行检查和试验。

1BCB00GT510 是由3个单相电压互感器组成,u-x 绕组额定变比为 $(6300/\sqrt{3})/(100/\sqrt{3})$,e-n 绕组额定变比为 $(6300/\sqrt{3})/(100/\sqrt{3})$,3个u-x 绕组为星形连接,3个e-n 绕组连接成开口三角。对3个电压互感器分别进行了电气试验,绕组绝缘电阻正常,电压比与铭牌相符,三相的空载特性也满足要求,各个二次绕组的直流电阻无异常,但在测量一次绕组直流电阻时,发现A、C两相测量值稳定,而B相的测量值忽大忽小,很不稳定。该电压互感器一次绕组通过熔断器和母线相连,熔断器外端用一个带螺纹的触头固定,里端为一有弹性的底座,用于将熔断器压紧。取下外端的触头,用手指按压熔断器发现,A、C两相有明显的弹性,而B相没有感觉到弹性。将熔断器取出进行检查,发现B相内部底座表面上有明显烧黑的痕迹。

由此现象可以断定,由于熔断器里端的底座卡死,失去了弹性,不能对熔断器起到压紧固定的作用,造成其与熔断器接触不良,接触电阻变大,一次回路中在此接触面上的电压降变大,从而导致测量的电压值偏低。熔断器由于未被压紧,在带电运行时由于振动等原因,会在底座的接触面部位发生轻微放电,从而造成底座表面烧黑。

更换B相电压互感器后,将1BCB00GT510 再次投入运行,测量显示三相电压值平衡。

2 后续措施

由于电站内的 6 kV 电压互感器均为此结构,为防止出现类似的问题,利用机组年度停机检修的时间,对全厂的该类型电压互感器进行了全面检查,未发现有类似的缺陷。但从这次事件分析可知,这种弹性结构的底座存在因卡死而失去弹性的隐患,因此该检查项目应作为一个固定的项目在以后该类型电压互感器的检修时执行。

3 结束语

此次某核电站高压备用变压器低压侧电压互感器测量电压不平衡的现象由两种原因引起,一是由于负荷中性点发生位移,这是一种正常的现象,设备可以继续投运;二是由电压互感器一次回路高压熔断器接触不良导致的,开始时由于存在中性点位移现象掩盖了这一缺陷,此时就需要对电压互感器进行维修或更换。因此,对于电压互感器测量电压不平衡的现象,要进行全面分析,根据不同的原因采取行之有效的措施。

参考文献:

[1] 刘耀年,霍 龙. 电路[M]. 北京:中国电力出版社,2006:241-242.

作者简介:

王 略(1972),男,辽宁锦州人,高级工程师,从事核电站电气设备的维修管理工作;
雷 成(1979),男,湖南邵阳人,高级工程师,从事核电站电气设备的维修管理工作;
张 钰(1986),男,江苏南通人,助理工程师,从事高电压试验工作;
申雁鹏(1979),男,贵州遵义人,工程师,从事核电站电气设备的高压试验工作;
王声学(1982),男,江苏连云港人,工程师,从事核电站电气设备的高压试验工作。

Analysis and Handling for a Defect of Potential Transformer Three-phase Voltage Unbalance at Nuclear Power Station

WANG Lue¹, LEI Cheng¹, ZHANG Yu², SHEN Yanpeng¹, WANG Shengxue¹

(1.College of Energy and Environment Southeast University, Nanjing 210096,China;

2.1.Jiangsu Frontier Electrical Power Technology Co. Ltd., Nanjing 211102,China)

Abstract: After the maintenance of backup high-voltage transformer in Tianwan nuclear power station, a three-phase voltage unbalance phenomenon on low voltage side potential transformer appeared. We analyzed this phenomenon by using nodal method, and found that the voltage unbalance is caused by load neutral displacement. After eliminating the load neutral displacement, three-phase voltage unbalance phenomenon still occurred on one potential transformer. A further detailed check is implemented and we found that the unbalance is caused by the fault of fuse base. After eliminated this defect, the three-phase voltage of the potential transformer becomes normal.

Key words: potential transformer; unbalance; neutral displacement

(上接第 11 页)

4 结束语

电容式电压互感器设备故障率较高,通过密切监测电容式电压互感器二次电压的变化情况来判断该设备是否正常是一种简单易行的有效方法。另外,可以通过定期红外测温检测等有效手段,发现一些在线监测装置难以发现的缺陷,保证设备的安全、可靠运行。

参考文献:

[1] 涂光华. 220 kV 电容式电压互感器二次电压降低的原因分析[J]. 江西电力职业技术学院学报,2010,23(3):9-11.
[2] 张希来. 电容式电压互感器(CVT)检测方法[J]. 电工技术,2005(5):5-7.

[3] 陈俊章. 电容式电压互感器的典型故障分析[J]. 电力电容器,2001(3):5-9.
[4] 陈明光,包玉树,张兴沛. 一起电容式电压互感器电磁单元故障分析[J]. 江苏电机工程,2012,31(5):25-31.
[5] 冯 骏,徐 钢. 一起电容式电压互感器二次回路故障诊断分析[J]. 江苏电机工程,2011,30(5):8-10.
[6] 侍海军,汪 飞,连振东. 电容式电压互感器故障实例及分析[J]. 江苏电机工程,2009,28(4):14-15.

作者简介:

徐长海(1963),男,江苏南京人,工程师,从事安全监察质量和管理等工作;
王静君(1980),男,江苏无锡人,工程师,从事高电压试验工作。

Analysis of an Fault of 35 kV Capacitor Voltage Transformer's Secondary Voltage Abnormal Raising

XU Changhai¹, WANG Jingjun²

(1. Jiangsu Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210000, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: A secondary voltage abnormal rising fault of 35 kV capacitor voltage transformer is introduced. This fault is caused by short-circuit of primary coil in the electromagnetic unit. Some feasible measures are proposed to detect potential faults and to take precautions against accident by online monitoring and infrared accurate thermometry.

Key words: capacitor voltage transformer; electromagnetic unit; secondary voltage; fault

基于 CIM 的配电自动化系统信息交互

费建法¹, 方 泉¹, 王成现¹, 郝思鹏², 张仰飞²

(1.江苏省电力信息技术有限公司,江苏 南京 210024;2.南京工程学院,江苏 南京 211167)

摘 要:配电网中包含多个不同系统的功能组件,各组件间数据具有异构性。配电自动化实现需要集成配电网中其他系统的信息。IEC 61970/61968 标准提供了统一的公共信息模型(CIM)和组件接口规范(CIS)。针对配网自动化的模型拼接和实时数据交互进行研究,并在实际工程中加以应用。结果表明,CIM 和 CIS 为解决异构数据的交互,构建标准、开放的配电网集成体系架构奠定坚实的基础,为进一步建设“即插即用”的智能配电网提供良好的支撑。

关键词:公共信息模型;配电自动化;IEC 61968;IEC 61970

中图分类号:TM73

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0015-03

我国电网调度已建成国调、网调、省调、地调和县调(配调)五级体系。随着电网规模越来越大,采用分级调度方式,容易形成信息孤岛,需要建立同级或上下级调度间模型共享和信息交换机制。国际电工技术委员会(IEC)制定了 EMS 应用程序接口的 IEC61970 系列标准,为应用系统提供了一个基于公共信息模型(CIM)、公共体系结构和组件技术的系统集成框架,通过定义标准应用程序接口,使得这些应用或系统能够自由交换信息。IEC 61970 系列标准的两大支柱是 CIM 和组件接口规范(CIS)。CIM 作为一种基于面向对象技术的抽象模型,统一了电力信息模型,为实现电力系统调度应用软件的“即插即用”以及和其他信息子系统的无缝连接提供了统一的数据模型^[1]。配电网中存在多个应用系统,如:配网自动化系统、生产管理系统(PMS)、营销系统、95598 系统、用电信息采集系统、电能质量监控、停电管理系统等。各应用系统相对独立,系统间的信息交互困难。IEC61968 系列标准用于支持配电网内多种应用系统的应用集成,由代理消息的中间件服务实现。配电自动化主站系统设立了支撑平台层,使得主站系统的功能扩展和信息交互更为灵活。提供公共服务、各应用系统以及第三方软件之间规范化的交互机制。基于 IEC61968/IEC61970 标准的信息交互总线(IEB),既支持系统内部各组件的集成,也支持应用系统间的集成。

1 基于 CIM 的配电网络模型

CIM 采用面向对象建模技术。使用统一建模语言(UML)表示法,把 CIM 模型定义为一组包。每一个包包含一个或多个类图,表示该包中的所有类及其关系,以简化应用系统间的互操作。CIM 使用高度精细化的格式,与每一应用兼容,标准格式中包含了电力系统需要的基本数据,同时也支持不影响标准数据格

式前提下的其他自定义数据。CIM 采用类形式来描述各电力系统对象,通过类之间关系描述电力系统各对象之间的关系,包括继承、关联、聚集等。

1.1 配电容器模型

配电网络主要包括配电线路、配电变压器、开关、补偿电容、负荷等元件。这些元件构成了一个容器。其基本架构如图 1 所示。基类设备容器并不建立实体对象,而将其属性和关联扩充到派生类,将派生类的属性和关联、派生类从基类继承的属性和关联都存储在派生类中,并建立相应的实体对象。

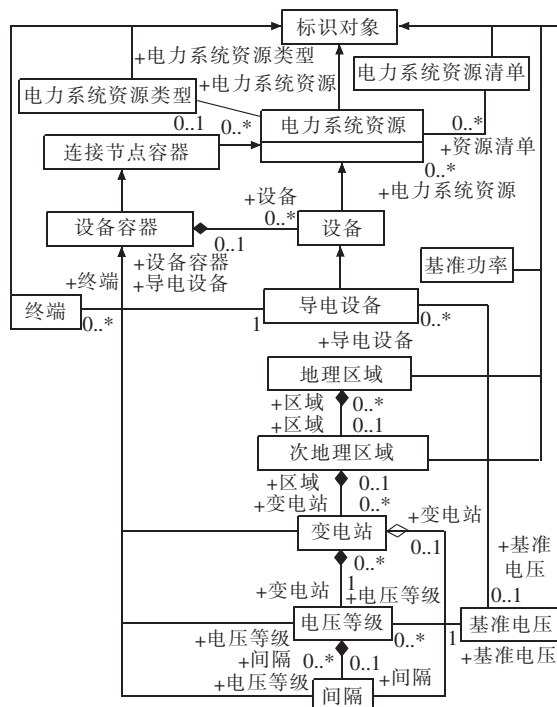


图 1 配电设备容器模型

早期的配电容器类包含在 IEC 61968 WiresExt 包中,作为对 IEC 61970 Wires 包的扩展。最新版的 IEC 61968 已经去除了 WiresExt 包,将其整合进 IEC 61970 Wires 包中,进一步统一了输电网模型以及配电网模型。

1.2 配电设备模型

配电设备主要包含配电变压器、配电线路以及开关等设备。以配电线路为例^[2],其模型如图2所示。所有设备类均从设备基类(Equipment)继承。与设备包容器类类似,设备类的底层建立对象,类中设置各自的属性。由于低压配电线路存在参数不对称,设置了对应的单相单位长度阻抗等子类。

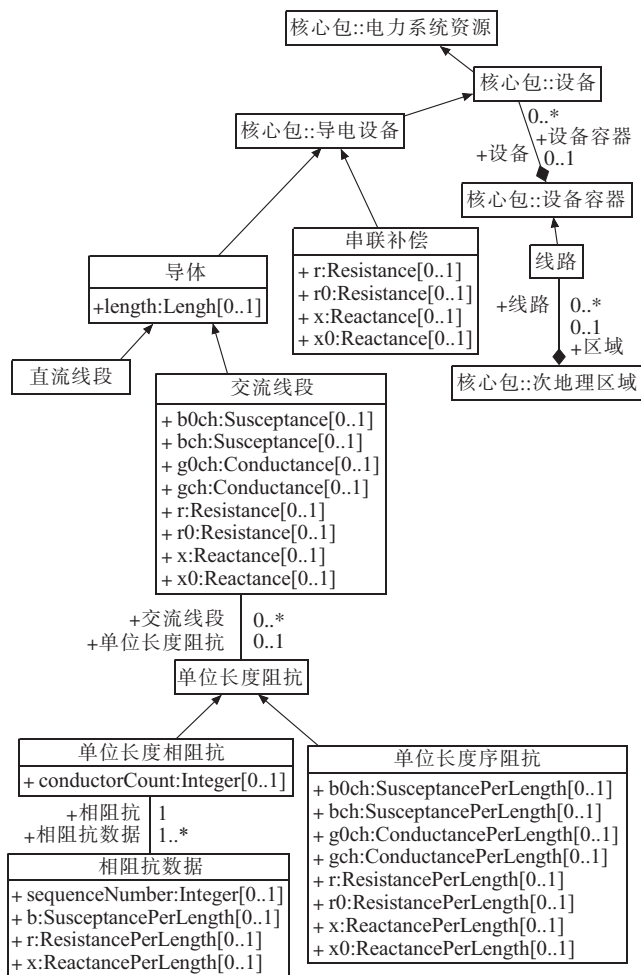


图2 配电线路模型

1.3 配电拓扑模型

配电设备的连接关系通过端点(Terminal)和节点(ConnectivityNode)的关系进行描述。拓扑分析具有2个基本模型,即Switch/Node模型和Bus/Branch模型。Switch/Node模型是基于ConnectivityNode的开关/节点模型。Bus/Branch模型是基于拓扑节点类(TopologicalNode)的节点/支路模型,如图3所示。

和连接性相关的量测类(Measurement),主要为电压、电流、功率等,和终端关联,并通过终端附着于设备。和连接性无关的量测类如温度、重量、大小等,则通过电力系统资源关联到设备。

2 配电网模型拼接和实时数据交互

配电自动化主站系统对电网进行监控需要获取电

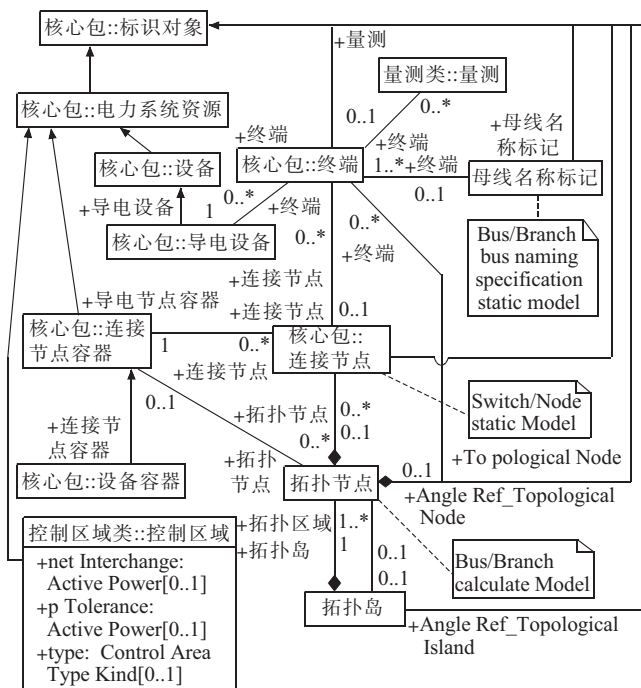


图3 配电拓扑模型

网的拓扑结构和实时监测数据。涉及和上级电网以及末端电网的连接关系以及数据交互。

2.1 模型拼接

配电网模型主要包括上级主网及变电站模型、配电网馈线模型和用户侧模型。主网和变电站模型通过地调EMS系统获取;配电网馈线模型通过用电管理系统(PMS)获取;用户侧模型通过用电信息采集系统获取。构建统一的配电网模型需要拼接不同系统间的模型数据。

配电网和变电站的拼接需要从EMS中导入变电站的CIM模型,从PMS中导入配电网CIM模型。模型的连接点通常为变电站的出线开关,清理EMS出线开关处的其他模型和PMS中出线开关以上的模型。进行开关匹配,合并网络模型。同时根据PMS中配电网信息变化,实现动态更新^[3,4]。

配电网和用户侧的拼接主要实现配变终端和配电台区低压出线对接以及用户和配电变压器关联。目前配电台区具有综合采集功能的智能监控终端安装较少,多数采用负荷模型等值表示。

2.2 实时数据

配电自动化系统实时数据监测也通过不同系统获取。主网和变电站的实时数据一般由地调EMS定时通过符合IEC 61970/61968信息交互总线(IEB)发送到配电主站,配电自动化主站通过EMS实现对变电站的遥控;配电自动化终端采集的信息包括馈线终端(FTU)、配变配电终端(TTU)、开闭所配电终端(DTU)遥测和遥信的实时数据直接发送到配电自动化主站,并接受主站的遥控信息;用户侧实时数据通过IEB由

用电信息采集系统定时发送到主站^[5],部分具有遥控功能的配电台区和负控终端接受主站的遥控信息。完整的数据监测实现对配电网的实时监控。

3 工程应用

3.1 工程概况

2011年,扬州实施智能电网综合示范工程,首先在扬州经济技术开发区建成了配电自动化系统。2013年,进一步扩展到农村区域(公道镇)。扬州配电自动化系统框架如图3所示。其数据采集和传输通过光纤送入主站。和其他系统的数据交互通过信息交互总线(IEB)实现。

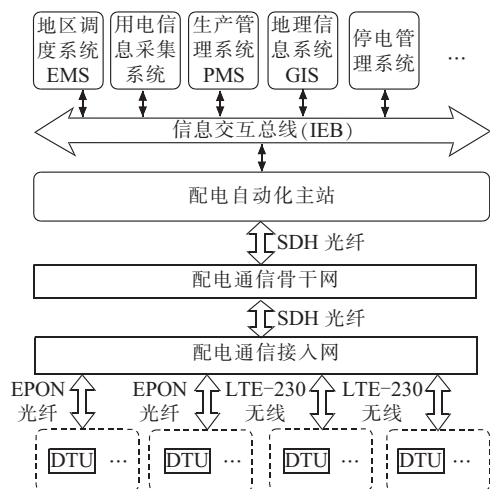


图4 配电自动化系统框架

3.2 配电网建模

配电主站系统通过PMS系统获取10 kV配网图模数据,把配电调度图形系统中的电网模型和图形,按照IEC 61968消息格式,通过配置在通信接口服务器上的适配器发送到信息交互总线,配电自动化主站通过总线获取图模数据并完成数据模型和图形的更新。

变电站内模型由调度EMS系统的主站维护人员在EMS上通过作图工具和数据库维护工具建立电网模型,然后通过与调度EMS系统的接口转换到配电调控一体化系统中。

配电自动化主站系统通过配电调度图形系统数据交换流程获取10 kV配网图模数据,通过上级EMS系统数据交换流程获取了主网图模数据,然后在图模库一体化平台上实现馈线模型与站内模型拼接^[6],从而在配电调配一体化系统中得到110 kV到10 kV完整的配电网模型,为配网调度的指挥管理准备完整的电网模型及拓扑资料。

配电网拓扑分析是配网所有分析应用的基础。用于构建动态的配电网模型,模型体现了设备之间的连接关系、连通关系、配电网的实时状态。根据模型,可进行带电区域划分和动态着色,分析确定配电区

域的供电电源点和各点供电路径。模型结构随着配电接线图的设备变更而变化,状态随着配电实时信息的刷新而相应变动。

3.3 实时数据交互

配电自动化实时数据主要包括配网实时数据以及变电站实时数据两部分,外加部分建有监控终端的配电台区实时数据。

城区配电网和农村集镇配电网实时数据由配电终端采集并通过光纤专网送入配电自动化主站,农村边远地区由于架设专用光纤通信成本较高,采用LTE230无线专网采集并送到配电自动化主站,主站的各种控制命令也是通过通信直接下发到配电终端。变电站实时数据由地调EMS系统每隔5分钟发送到配电主站,主站通过接口与调度自动化系统进行数据交换,实现对变电站出线开关的控制操作。配电台区包括公变、专变等设备量测通过GPRS无线公网通信送至用电信息采集系统,配电自动化主站通过信息交换总线从SG186系统中的用电信息采集系统获取。

4 结束语

CIM模型为不同系统和应用间的信息交互提供了统一的平台,为构建标准、开放的一流配电网集成体系奠定了基础。新建的配电自动化主站系统中一般都建设了符合IEC 61970/61968标准的信息交互总线,为实现异构数据下的信息共享提供了支撑。随着配电自动化系统逐步扩展配电管理自动化功能,需要加强配电网和上级系统的信息交互以及配电网内各系统间的信息集成。文中在CIM模型和CIS交互规范的基础上,研究了配电网跨平台的模型拼接以及信息交互,为后续高级应用功能的开发奠定了基础。

参考文献:

- [1] 张迪思,吕广宪,刘鹏,等.面向IEC 61968信息交换总线的即插即用技术研究[J].华东电力,2013,41(6):1246-1251.
- [2] 陆一鸣,刘东,黄玉辉,等.基于CIM的馈线建模和应用[J].中国电机工程学报,2012,32(28):157-163.
- [3] 董朝霞,戴琦,杨峰,等.基于CIM和SVG的电网建模技术[J].电力系统及其自动化学报,2006,18(5):58-61.
- [4] 王志南,吴文传,张伯明,等.基于IEC 61970的CIS服务与SVG的研究和实践[J].电力系统自动化,2005,29(22):60-63.
- [5] 钱立军,李新家.用电信息采集系统中数据比对功能的实现及应用[J].江苏电机工程,2013,32(2):64-65,70.
- [6] 宋鑫,曹阳,黄海峰,等.基于电力系统规则的CIM-XML模型校验[J].电力信息化,2006,4(12):35-37.

作者简介:

费建法(1963),男,江苏常州人,高级工程师,从事电力系统研究工作;

(下转第20页)

电动变桨系统超级电容后备电源测试装置设计

沈鑫, 田炜, 鲁斌, 刘剑
(国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要:针对目前广泛应用的电动变桨系统超级电容后备电源性能难以测试的问题,设计了一种简单可行的厂内后备电源测试装置,并利用某种具体型号的电容进行了测试,根据测试结果进行后备电源的设计,能满足变桨系统的顺桨要求,进而确保风力发电机组的安全运行。

关键词:变桨系统;超级电容;后备电源测试装置

中图分类号:TM316

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0018-03

随着风力机大型化的发展,风力发电技术取得了很大的进步,其中变桨距控制是国际主流风力机组的关键技术。电动变桨距系统作为大型风电机组的核心部分对机组安全、稳定、高效的运行有十分重要的作用^[1,2],该系统以伺服控制器控制电机驱动齿轮实现变桨距调节,每个桨叶由单独的伺服控制器来控制,这样可以使 3 个叶片独立实现变桨距^[3]。基于变桨系统对风机安全运行的重要性,变桨系统通常都配有后备电源,当出现电网供电中断时,变桨系统可自动切换到后备电源供电,并顺桨停机,确保风机的安全运行^[4]。由此可见后备电源是否满足顺桨要求,是否有足够的能量保证安全顺桨,是风力发电机组安全方面的核心问题之一。论文目的在于提供一种电动变桨系统的后备电源测试装置设计方案,无需上塔架测试就能方便可靠测试所使用的后备电源是否满足要求,进而保证风力发电机组的安全运行。

1 后备电源工作原理

正常运行时,变桨系统以电网供电作为动力电源,变桨控制器通过某种通信方式接受来自主控的角度、速度等控制指令,并发出控制指令给伺服驱动器;伺服驱动器收到控制指令后驱动变桨电机,从而带动叶片变换角度,并将桨叶角度、变桨速度等信号实时反馈给控制器,实现高精度实时变桨^[5]。

轴柜中的充电器轮流对 3 个电池柜充电,当变桨系统有故障或电网供电因故中断时,变桨系统自动切换至后备电源供电,同时启动紧急顺桨,将桨叶关至限位开关处,并将变桨系统电网供电中断故障反馈给主控系统,主控系统根据故障反馈采取相应安全措施,确保风电机组的安全可靠运行^[5]。

2 后备电源测试装置设计

整个后备电源变桨系统的测试装置如图 1 所示。

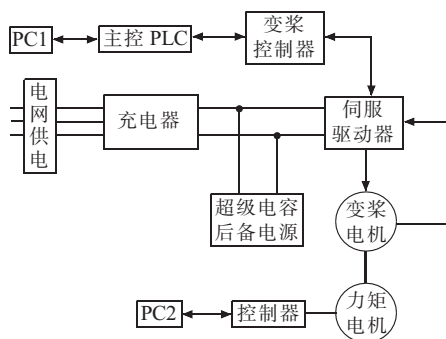


图 1 超级电容后备电源测试装置

PC1 与主控 PLC 连接,通过上位机软件及时向变桨控制器发出桨叶角度和变桨速度等指令,变桨控制器接受到这些指令后向伺服驱动器发出同样的指令,而伺服驱动器则直接驱动变桨电机按照该指令进行变桨,同时变桨电机上面的编码器则将角度、速度状况反馈给伺服驱动器,实现了实时高精度的变桨。

当整个变桨系统合上开关开始启动时,电网 AC400 V 供电给充电器,充电器有两个作用,一是给超级电容后备电源充电,保证后备电源的电压达到稳定值;二是正常运行时,给伺服驱动器供电,保证变桨的顺利进行。

该测试装置设计中,变桨电机为异步电机,工作于位置闭环状态,用来控制整个测试平台的转速,实现位置跟踪。力矩电机为永磁同步电机,PC2 与控制器连接,通过上位机界面施加特定力矩,力矩电机工作于转矩闭环状态,通过控制电机的电流给定来改变负载电机的转矩大小,进而模拟变桨电机的负载变化。

3 利用装置测试分析超级电容

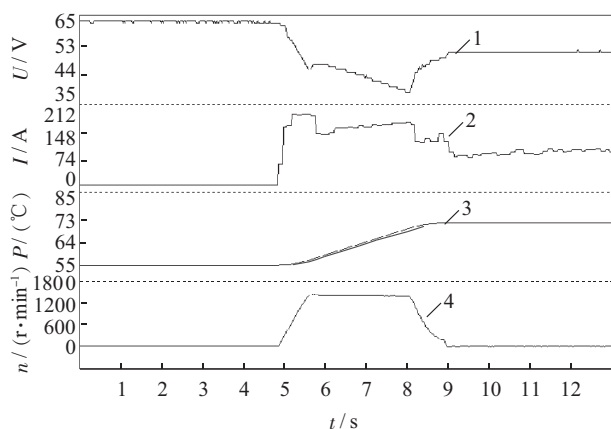
基于上述设计方案,以某型号的 2 MW 超级电容后备电源电动变桨系统为例,测试其放电特性,评估该装置能否满足测试需要。测试所用超级电容部分参数:超级电容模组参数 75 V,30 F;超级电容数量 3 个;采用并联连接方式;连接后电压 75 V;连接后电容 90 F。

变桨电机部分参数:电机型号 G1602500;额定转速 1500 r/min;额定力矩 82 N·m;抱闸力矩 112 N·m;额定功率 6 kW;额定电流 135 A;额定电压 75 V。

3.1 放电测试

使用充电器对超级电容充电,充电完成后断掉外接电源,使用上位机界面发送电机运动指令,可指定电机运动范围。采用电机放电消耗能量的方式测试超级电容的放电能力,根据电容特性,超级电容释放一半储能时其电压约为额定电压的 0.707 倍,电压下降到额定电压的一半时,储能释放 3/4。超级电容放电测试条件及结果如下。

(1) 首先将电机运动范围设置为 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$,通过 PC2 的上位机软件界面将施加力矩设置为 30 N·m,电机额定转速为 1500 r/min。在小角度范围里测试电机的运行以及释放能量收桨情况如图 2 所示。



1 为超级电容电压;2 为电机电流;3 为电机位置;4 为电机转速

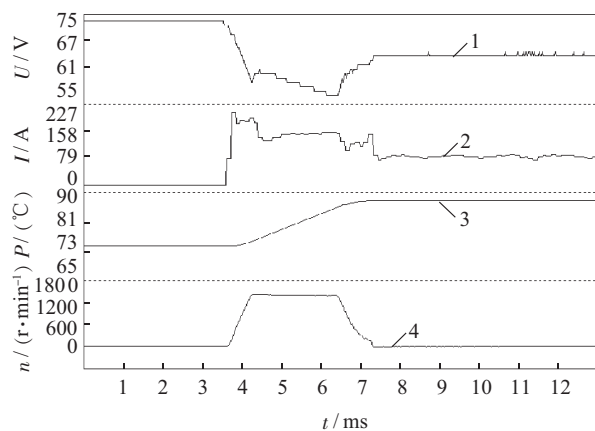
图 2 超级电容供电条件下第 1 次测试

超级电容给电机供电情况下,电压从 64 V 跌落至 53 V,最低 39 V,只跌落了 11 V,电机电流基本稳定,电机转速开始启动到截止,运行曲线平稳,属于正常。

(2) 将电容充满电,在上位机软件上将电机运动范围设置为 $75^{\circ} \sim 88^{\circ}$,力矩 30 N·m,电机额定转速为 1500 r/min。由图 3 所知,超级电容给电机供电情况下,电压从 74 V 跌落至 66 V,最低 57 V,电容电压降低 8 V,电机电流基本稳定,有较小的跳变现象,电机转速曲线平稳正常。

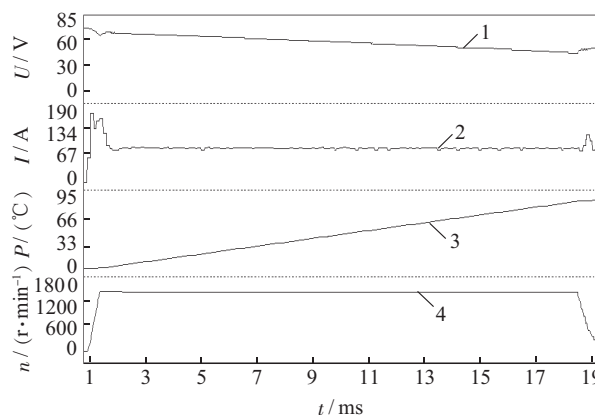
(3) 将电容充满电,在上位机软件上将电机运动范围设置为 $0^{\circ} \sim 85^{\circ}$,力矩 20 N·m,电机额定转速为 1500 r/min。由图 4 所知,超级电容给电机供电情况下,电压从 75 V 跌落至 51 V,最低 46 V,电容电压在电机运行的整个 85° 范围内只降落 24 V,满足变桨收桨时的电容电压要求,电机电流平稳正常,电机转速曲线也是平稳正常的。

(4) 将电容充满电,电机运动范围 $0^{\circ} \sim 85^{\circ}$,增大力矩到 30 N·m,电机额定转速为 1500 r/min。由图 5 所知,超级电容给电机供电情况下,电容电压从 75 V



1 为超级电容电压;2 为电机电流;3 为电机位置;4 为电机转速

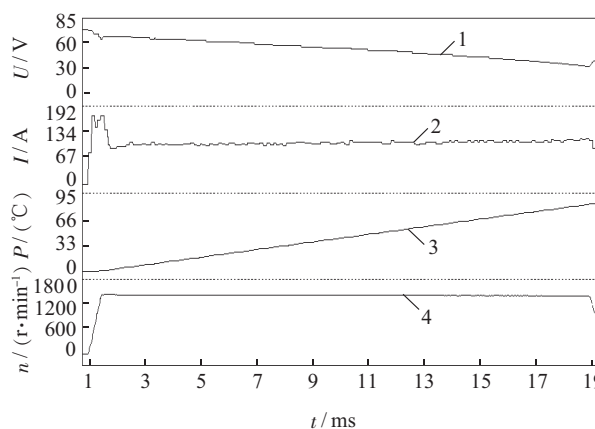
图 3 超级电容供电条件下第 2 次测试



1 为超级电容电压;2 为电机电流;3 为电机位置;4 为电机转速

图 4 电容供电条件下第 3 次测试

跌落至 36 V,最低 34 V,当增大力矩时,电容电压掉落更快,跌落了 39 V,这个更符合实际现场的风机情况,满足变桨收桨时的电容电压要求,电机电流和电机转速曲线均平稳正常。



1 为超级电容电压;2 为电机电流;3 为电机位置;4 为电机转速

图 5 电容供电条件下第 4 次测试

3.2 测试分析

变桨系统超级电容容量选择的依据是风机顺桨过程中的力矩,电容储存的能量应能满足在主电源断电或电压跌落的情况下驱动桨叶回到安全位置。

根据 NBT 31018-2011, 电容组的容量应满足桨叶在规定载荷情况下完成一次以上顺桨动作要求^[6]。依据 2 MW 风力发电机组变桨驱动系统规范要求得出整个顺桨过程需要的力矩和为 256.2176 N·m, 对照实验得出的曲线, 可以将测试的超级电容与 2 MW 机组顺桨需求能量做个对比, 如表 1 所示。

表 1 测试用电容与 2 MW 机组顺桨需求能量对比

	电压 /V	电容 /F	能量计算	能量 /kJ
2 MW 机组 顺桨需求能量	—	—	$W = P \times t = \frac{T \times n \times t}{9.55}$	56
测试电容模组	75	90	$E = \frac{1}{2} \times C (U_{\max}^2 - U_{\min}^2)$	198

所测试的电容测试过程中放电至 35 V, 根据电容能量公式可计算出电容释放出的能量为 198 kJ, 远大于 2 MW 机组顺桨需求能量 56 kJ, 由此可见, 该电容满足 2 MW 风电机组变桨系统顺桨需求。

4 结束语

针对电动变桨系统的超级电容后备电源现场上塔架测试难度较大的情况下, 设计了一种电动变桨系统后备电源测试装置, 在变桨系统发生故障或电网跌落要求顺桨, 该测试装置能够测试出后备电源是否有足

够能力保证变桨系统安全顺桨, 降低变桨系统故障率, 减少风机维护成本, 改善风电机组经济效益。

参考文献:

- [1] 汪海波, 田 炜, 鲁 斌, 等. 兆瓦级风机直流和交流电动变桨距技术[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(4): 42-44, 47.
- [2] 叶杭治. 风力发电机组的控制技术[M]. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006, 83-85.
- [3] 姚兴佳, 宋 俊. 风力发电机组原理与应用[M]. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 128-129.
- [4] 叶杭治. 风力发电系统的设计、运行与维护[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 113-115.
- [5] 鲁 斌, 田 炜, 刘 剑, 等. 基于超级电容的变桨系统后备电源设计[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(5): 46-48.
- [6] 国家能源局. NB/T 31018—2011 风力发电机组电动变桨控制系统技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

作者简介:

- 沈 鑫(1987), 男, 江苏盐城人, 助理工程师, 从事风力发电控制技术研究工作;
- 田 炜(1978), 男, 湖北应城人, 高级工程师, 从事风力发电控制技术、电力电子在电力系统中的应用研究工作;
- 鲁 斌(1984), 男, 浙江衢州人, 工程师, 从事风力发电控制技术研究工作;
- 刘 剑(1983), 男, 江苏徐州人, 工程师, 从事风力发电控制技术研究工作。

Test Equipment Design of Backup Power of Supercapacitor for Electric Pitch System

SHENXin, TIAN Wei, LU Bin, LIU Jian

(NARI Technolngy Development Co. Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to tackle the difficulty in the test of backup power of supercapacitor of electric pitch system, we designed a simple and feasible test equipment for factory-inside backup power. With the test equipment, a test on a specific type of supercapacitor is implements. Based on the test, a design of backup power is provided. The design can meet the demand of feathering of pitch system, and guarantee the safe operation of wind turbine generator system.

Key words: pitch system; supercapacitor; backup power; test equipment

(上接第 17 页)

方 泉(1968), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 从事配电网自动化研究工作;

王成现(1967), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 从事电力信息技术研究工作;

郝思鹏(1971), 男, 江苏宝应人, 副教授, 从事配电网自动化研究工作;

张仰飞(1970), 男, 江苏射阳人, 教授, 从事电力系统参数辨识等方面研究。

Information Interaction of Distribution Automation System Based on CIM

FEI Jianfa¹, FANG Quan¹, WANG Chengxian¹, HAO Sipeng², ZHANG Yangfei²

(1. Jiangsu Electric Power Information Technology Co. Ltd., Nanjing 210024, China;

2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: A distribution network usually contains many various functional components. The implementation of distribution system automation needs to integrate information from all components. In IEC61970/61968 standard, the CIM and CIS are recommended. Based on the CIM and CIS, the splicing data from different components and the real-time interaction between data are studied in practical engineering. The result shows that the CIM and CIS benefit heterogeneity data exchange, lay out a foundation for heterogeneity data exchange, standard establishment and open architecture of distribution power grid, and can provide supports to establish "plug and play" smart distribution power grid.

Key words: CIM; distribution automation; IEC61968; IEC61970

智能变电站中低压母线保护设计

陆玉军¹, 徐勇², 薛军³, 蒋莹³, 陈颢¹

(1.江苏方天电力技术有限公司,江苏南京 211102;2.扬州供电公司,江苏扬州 225000;

3.扬州仪征县域检修分公司,江苏仪征 211400)

摘要:根据变电站中低压母线实现故障快速切除的需要,提出了采用电流闭锁式的中低压母线保护;通过母线典型故障分析,结合 GOOSE 网络传输闭锁信号的优势,设计了基于 GOOSE 的中低压母线快速保护,给出了详细的设计过程和解决 GOOSE 中断的处理方案;该设计方案在智能变电站中的实际应用验证了其可靠性。

关键词:智能变电站;中低压母线保护;闭锁元件;启动元件

中图分类号:TM773

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0021-05

变电站内 35 kV/10 kV 母线(以下称中低压母线)长期运行中由于绝缘击穿、主回路触头过热老化、局部放电、小动物进入而出现接地与相间故障,中低压母线常见的短路故障形式有:单相接地、两相短路、三相短路,同一地点的两相接地短路和不同地点不同相别的两点接地故障^[1]。出现短路故障的设备有:开关(触头故障、真空泡故障)、电流互感器 TA(绝缘击穿)、电压互感器 TV、母排(绝缘击穿接地)、及其他附件。由于出线间隔多、进出线支路 TA 变比差异大,配置常规的母线保护不仅支路多、成本高昂、施工接线复杂,母线故障时导致的 TA 饱和问题也突出,存在保护设计和动作配合的困难。基于上述因素,变电站的中低压母线设计时一般不配置专用保护,而利用主变低后备保护切除母线故障。但后备保护按逐级配合设计、动作时间长达 1~2 s,往往导致故障切除后母线变形、金属部件熔融、有机绝缘炭化燃烧、开关柜内设备损毁严重。用后备保护做母线的保护时不仅损失巨大,而且运行恢复困难。文中讨论了智能变电站中低压母线快速保护设计及相关问题。

1 中低压母线保护方案

中低压母线保护按保护原理可分为:电弧光保护、电流差动保护、电流相位比较式母线保护、方向过流比较式母线保护、电流闭锁式母线保护^[2-5]。

电弧光保护:是利用中低压母线短路时会产生电弧并发出弧光、及故障电流增大为特征判据而设计的保护,整个保护由弧光传感器、弧光检测单元和主单元组成,因开关小室多,需要配置的弧光传感器多,无论工程量和投资均较大,国内应用较少。

电流差动保护:利用各支路 $\sum I \neq 0$ 的原理而设计,在高压保护中普遍应用,而中低压保护中由于需接入支路多、工程施工复杂、电缆用量大、运行维护工

作量大,应用很少。

电流相位比较式和方向过流比较式保护:也因为需要接入的支路数多、判别机制易失效、工程实施复杂、运行维护繁琐而得不到应用。

电流闭锁式母线保护:利用母线发生短路故障时,主变低压侧检测到故障电流启动、线路间隔检测不到故障电流不会启动;出线保护范围内故障时,主变低压侧检测到故障电流,线路也检测到故障电流启动为特征而设计,即由出线保护装置闭锁元件发出的闭锁信号控制主变低后备保护装置中的启动元件的启动或闭锁实现。其保护逻辑如图 1 所示。

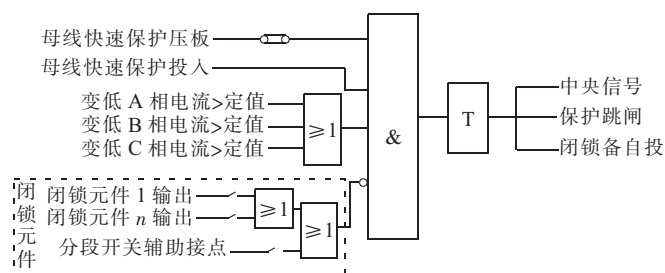


图 1 电流闭锁式母线保护逻辑

该保护的的优势是:在回路上改动小,不需改变 CT/PT 回路,只需实现闭锁接点在保护间传输。在保护功能配置实现上,甚至可以做到不增加装置即可在低后备保护实现母线保护功能。智能变电站中用 GOOSE(通用面向变电站事件对象)传输闭锁信号还可省去保护间的信号传输电缆,进一步降低了实现成本,具有原理简单、容易实现的特点^[6,7]。

2 中低压母线故障分析

以“2 台主变+单母线分段”典型变电站接线(如图 2 所示)为例,根据分段投退的运方,开展母线区内、出线区内、保护死区范围内典型故障分析,在发生故障时保护动作行为如下。

(1) 分段 3DL 分位、1DL 合位、2DL 合位,1 号、2

号主变分别带负荷运行时:

d1 点故障,1 号变低后备保护检测到故障电流启动,由 1 号变低后备保护动作切除母线故障;

d2 点故障,2 号变低后备保护检测到故障电流启动,由 2 号变低后备保护动作切除母线故障;

d3 点故障,分段保护和 2 号变低后备保护均检测到故障电流,属于分段死区故障,由 2 号变低后备保护动作切除母线故障;

d4 点故障,1 号变低后备保护检测到故障电流,由 1 号变低后备保护动作切除母线故障;

d5 点故障,II 段母线出线保护和 2 号变低后备保护检测到故障电流,属出线保护区内故障,由出线保护动作切除故障;

d6 点故障,1 号变低后备保护检测到故障电流,但低侧开关动作后无法切除故障,属变低死区故障,需跳高侧开关才能切除;

d7 点故障,1 号变低后备保护检测到故障电流,但低侧开关动作后无法切除故障,属变低死区故障,需跳高侧开关才能切除。

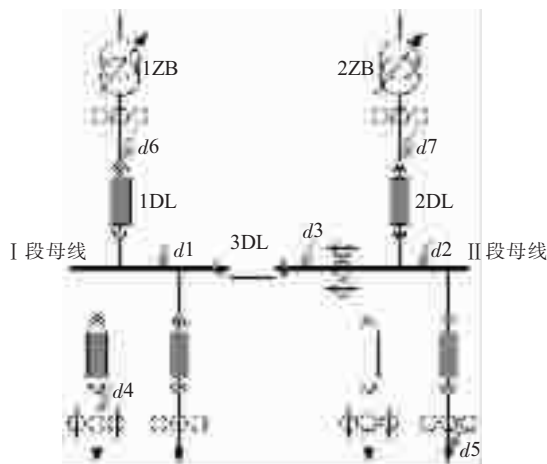


图 2 中低压母线故障

(2) 当分段 3DL 合位、1DL 合位、2DL 分位,1 号变带全站负荷运行时:

d2 点故障,分段保护和 1 号变低后备保护均检测到故障电流,1 号低后备不能动作,需由分段保护动作切除;

d3 点故障,1 号变低后备保护检测到故障电流,分段保护检测不到故障,由 1 号变低后备动作切除。其他故障动作方式同 1)。

(3) 当分段 3DL 合位、1DL 分位、2DL 合位,2 号变带全站负荷运行时:

d1 点故障,分段保护和 2 号变低后备保护均检测到故障电流,2 号变低后备不能动作,需由分段保护动作切除;

d3 点故障,分段保护和 2 号变低后备保护均检测到故障电流,分段保护动作无法切除,属分段死区故

障,由 2 号变低后备保护动作切除。

d4 点故障,分段保护和 2 号变低后备保护均检测到故障电流,由分段保护动作切除。

根据上述故障分析,可总结中低压母线区内故障与区外故障的特点有:

(1) 发生母线区内、或出线区内故障时,主变低后备保护均可检测到故障电流,可设计以低后备为启动元件的保护。为保证区内故障动作、区外故障闭锁,需以线路/分段间隔的启动信号作闭锁条件;

(2) 母线带分段运行时,分段以外的母线发生故障时,需要分段保护动作切除;

(3) 故障发生在分段死区、主变低侧死区内时,通过分段保护动作或低后备保护动作跳低侧开关可能无法切除,该故障不同于其他类型故障;

(4) 故障发生对应于保护所动作开关,无论线路开关、分段开关、低侧后备开关均存在动作失灵的问题,需考虑开关失灵的保护处理;

(5) 当有多个电源进线同时存在时,需要考虑将多个电源隔离,需同时切除电源进线开关。

3 基于 GOOSE 的母线保护分析

基于 GOOSE 的母线保护如图 3 所示:由闭锁元件所在的保护、启动元件所在的保护、传输闭锁信号的 GOOSE 网络组成。

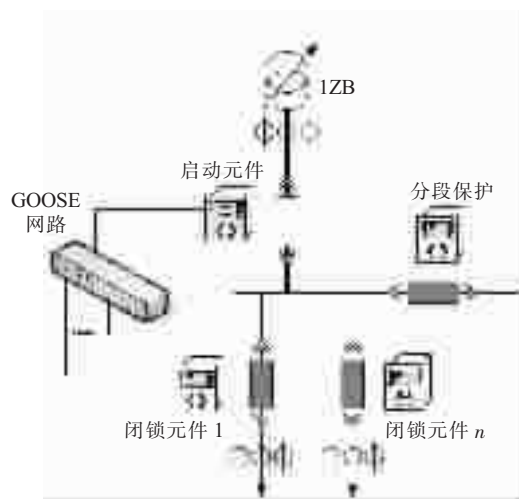


图 3 基于 GOOSE 的母线保护

根据保护实现的可靠性、选择性、速动性、灵敏性的特性要求,由于闭锁元件与启动元件不在一个装置内,这 3 个部分均会对保护的动作为产生影响,甚至闭锁信号的正确传输对启动元件产生决定性影响,决定了母线快速保护的动作为。

3.1 闭锁信号传输的要求

与电缆传输信号不同,以通信网络传输信号时主要存在传输延迟、通信异常导致的传输信号错误、报文丢失等问题。

(1) GOOSE 信号传输延迟:主要有发送设备的延迟、以太网传输的延迟、和接收设备处理的延迟,保护设备发送 GOOSE 报文和接收处理报文均可满足 $<4\text{ ms}$ 的要求,而网络传输的延迟,经模拟网络风暴的测试其延迟时间 $<2\text{ ms}$,因此,GOOSE 传输闭锁信号的总延迟 $<10\text{ ms}$,完全可以满足保护速动性的要求。

(2) GOOSE 信号传输错误丢失:由于 GOOSE 报文是链路层单向多播传输报文,通信报文会由于链路干扰、转发设备异常、接收装置异常丢失。但 GOOSE 报文有严格的校验和重发机制,一般错误或丢失、通信中断反应到接收设备侧均是收不到报文,因此 GOOSE 通信最大的问题是通信中断。引起通信中断的原因主要有通信介质断开、通信转发设备故障或断电、发送设备故障或断电等原因。因此,影响 GOOSE 传输闭锁信号可靠性的关键因素是实时监测通信、防止通信中断,只要保证装置正常时 GOOSE 通信不中断或 GOOSE 通信中断被快速识别,保护的可靠性就自然得到解决。

3.2 闭锁元件的要求

闭锁元件是出线(含电容器、接地变)保护、分段保护中的反应故障过流启动,指示故障位于母线保护范围外的逻辑模块。

对于出线保护而言,闭锁信号反应的是电流速断、零序速断、反时限过流保护的启动信号;而对于电容器保护而言,闭锁信号反应的是电流速断、反时限过流保护的启动信号、接地变反应的是电流速断、反时限过流保护的信号。对分段保护,反应的是电流速断保护的启动信号。而其他保护模块的启动信号不能做闭锁元件。如发生过流故障时,闭锁元件发出动作信号时,最好启动元件同时也会产生过流启动信号,否则闭锁元件的闭锁信号对于闭锁启动元件实际意义不大。

3.3 启动元件的要求

能反应母线保护区内区外的全部短路故障,故障点位置的不同,会形成区外故障、区内一般故障、区内死区等不同类型故障。区外故障主要指:出线区域故障、电容器内部故障、接地变内部故障、分段带母线及出线故障;区内一般故障主要指:一般母线故障、母设(PT)故障、站用变故障、出线开关与 CT 间的故障;区内死区故障指:变低死区故障、分段死区故障。

而当上述故障发生时,启动元件跳令发出后开关拒动导致无法切除的故障,有变低开关故障、分段开关故障、出线开关故障。

启动元件在实际故障发生时通过接收闭锁元件的闭锁信号,准确区分出母线区内或区外故障,迅速闭锁和开放母线保护功能,并根据故障发展情况,对区内的死区故障、开关失灵故障做出响应并能够利用跳上一级开关的方式切除全部故障。

4 基于 GOOSE 的母线保护设计

4.1 闭锁元件的设计

闭锁元件应满足故障电流 $I_{\max} > I_{dz}$ 并产生保护启动的条件,而门槛值可根据设计要求作为定值整定,出线保护逻辑如图 4 所示。

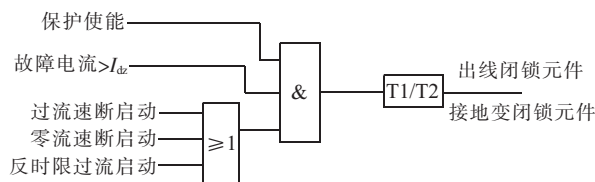


图4 出线闭锁元件逻辑

闭锁元件输出加一可设定的延时,主要考虑当出线发生 TA 穿越性故障时,出线和母线同时或相继发生故障,为减少停电范围,此时应按出线先动、母线后动的原则完成,待出线故障切除后延时开放母线保护。

4.2 启动元件的设计

母线保护需要实现的逻辑功能有:区内故障的快速切除、死区故障的处理、开关失灵故障的处理。因此启动元件是母线保护的核心。

4.2.1 区内故障的快速切除

为防止母线保护在采样异常复归、GOOSE 异常复归、压板投退后立即动作,设充电环节确保避免保护误动的可能。

变低的启动电流按相过流启动,同时加入电压跌落判据,确保是真正的母线故障时动作。快速母线保护设两段控制,可分别用于切除变低、变高(或主变三侧)等开关及闭锁备投功能。区内故障快速动作逻辑如图 5 所示。

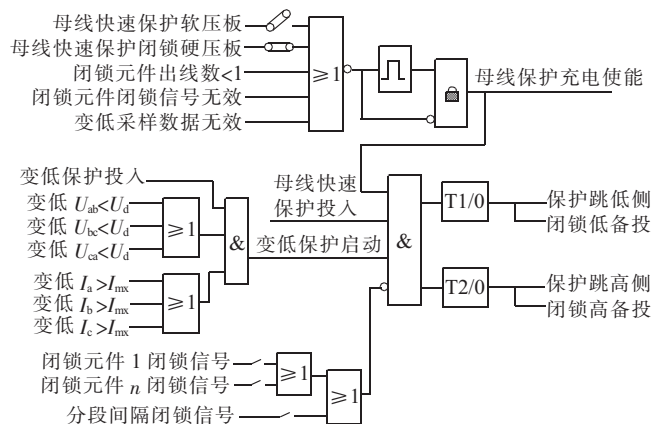


图5 区内故障快速动作逻辑

4.2.2 变低死区及开关失灵逻辑

当发生变低死区故障或变低开关失灵故障时,在等待 4.2.1 的动作逻辑发出并延时后仍无法切除故障,采用如图 6 所示的逻辑切除故障。如开关是分位,则表明低侧开关跳开后故障仍在判为死区故障,如开关没

有跳开,则判作失灵故障。两者均启动跳高侧(或主变三侧)开关。

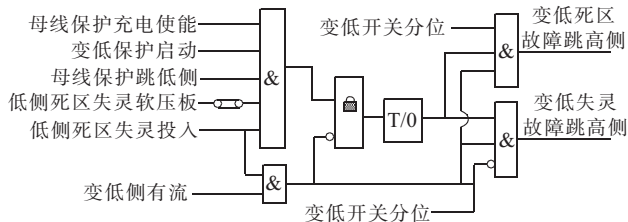


图 6 变低死区开关失灵动作逻辑

4.2.3 分段死区及开关失灵逻辑

分段死区故障或开关失灵故障时,因故障续存期间一直满足分段闭锁条件,无法执行 4.2.1 的动作逻辑,需要以分段是否有流及分段动作后的延时条件判别,如果此时分段开关跳开仍有流则判为死区故障,如分段未跳开仍有流则判作开关失灵故障,这 2 个故障均跳变低侧开关。分段死区开关失灵动作逻辑如图 7 所示。

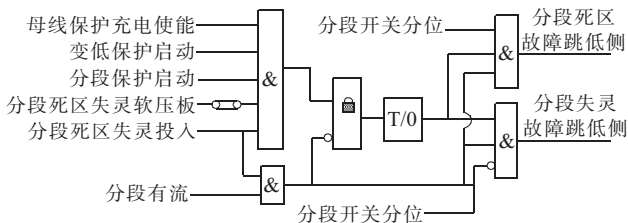


图 7 分段死区开关失灵动作逻辑

4.3 保护的整定

母线速动保护的定值整定包括:启动元件的动作值,闭锁元件的动作值,及启动元件与闭锁元件间的时间配合^[5]。

4.3.1 启动元件的整定

启动元件按下式整定:

$$I_{\text{act}}=K_r \frac{K_M}{K_{\text{ret}}} I_{\text{ldm}} \quad (1)$$

其中: K_r 为可靠系数,一般取 1.25~1.5; K_M 为自启动系数,一般取 1.0; K_{ret} 为返回系数,一般取 0.9~0.95; I_{ldm} 为最大负荷电流。启动元件的动作值按躲过最大负荷电流设计,对主变而言,最大负荷电流即为额定电流,对于 110 kV 变压器小容量的可能经常满载运行,不同容量主变的启动元件动作值如表 1 所示。

分析以上数据,母线保护的启动动作值取值应不低于 6000 A。

4.3.2 闭锁元件的整定

母线保护启动元件在外部故障时不误动,完全依靠闭锁元件能正确发出闭锁信号,而闭锁元件发闭锁信号时,启动元件最好也达到启动值。

为防止线路 TA 断线引起误启动信号,即闭锁元件的电流判别条件必须躲过线路最大负荷电流。一般

表 1 不同主变容量的启动元件定值

额定容量 / (MV·A)	额定 电流 /A	可靠 系数	返回 系数	动作值 /A
20	1100	1.5	0.95	1737
31.5	1732	1.5	0.95	2735
40	2199	1.5	0.95	3472
50	2749	1.5	0.95	4341
63	3464	1.5	0.95	5469

出线按额定电流 600 A 计,考虑可靠系数、母线保护启动等因素,闭锁元件的电流门槛值应不低于 1000 A。

4.3.3 启动与闭锁元件的时序配合

根据闭锁元件实现闭锁的条件看,闭锁信号有效后经通信传输传递到母线保护启动元件时,存在有明显的延迟时间 T_D ,延迟时间由以下部分组成:

$$T_D=T_s+T_c+T_r \quad (2)$$

其中: T_s 为发送设备的发送延迟; T_c 为通信链路传输的延迟; T_r 为接收设备的接收延迟。从 GOOSE 的机制可看出 T_s 的时间可长达 4 ms, T_c 为通信链路及交换机的总延迟时间,一般不超过 2 ms,而 T_r 一般不超过 2 ms,上述延迟时间总计在 10 ms 内。启动元件的动作延时 T_D 还需考虑与主变差动保护的配合、躲开线路故障的暂态过程,因此,为防止保护误动、确保动作可靠,启动元件速动模块延迟时间内部设定应不小于 100 ms。

5 影响母线保护的可靠性因素及解决措施

闭锁式母线保护需启动元件与闭锁元件配合完成的分散式保护,影响母线保护速动的可靠性有以下几个主要因素:闭锁信号的可靠性、故障穿越时的保护可靠性、出线有联络线时的可靠性。

5.1 GOOSE 闭锁信号的可靠性

GOOSE 报文是以太网链路层多播 MAC 通信报文,由 GOOSE 数据集管理的对象数据通过 GOOSE 控制块控制发送节奏,当发送侧在信号发生变位后,保证能在最快(4 ms)的时间内将变化后的值传输出来(如图 8 所示)。

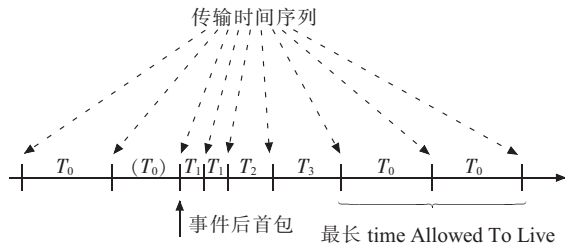


图 8 GOOSE 报文发送机制

由于 GOOSE 报文是单向发送的,接受侧在规定的允许存活时间 timeAllowToLive 内没有收到 GOOSE 报文,则接收方判相应的 GOOSE 报文通信断

链,当未发生信号变位期间,识别通信断链的最大延迟时间可达 $2 \times T_0$,若 $T_0 = 5 \text{ s}$,则判 GOOSE 闭锁信号异常的延迟将长达 10 s 以上,如上图,这无法满足在发生 GOOSE 通信断链后 10 s 内发生出线间隔故障出线保护启动闭锁母线保护的要求,此情况下母线保护的启动元件可能误启动而致误动。

为避免上述异常出现,设计了一种母线保护启动元件过流启动时的 GOOSE 握手方案:在母线保护启动元件过流启动后,由启动元件发送“握手”信号报文给闭锁元件,闭锁元件收到后立即发送回答报文,启动元件根据在规定的延迟时间内是否收到闭锁元件的“握手”信号判别闭锁元件的 GOOSE 通信有无断链,如未收到回答报文则认为对应的闭锁元件 GOOSE 通信中断,立即闭锁母线保护,并等待 GOOSE 通信正常后再次开放启动元件。该方法充分利用了 GOOSE 通信的特点,又不明显增加 GOOSE 通信流量,具有实际可操作性。

5.2 故障穿越时的可靠性

故障穿越指在母线保护范围的 CT 附近发生的转移性故障,即母线区外故障转区内故障,或区内故障转区外故障的形式。故障穿越时闭锁元件与启动元件均可能动作,其动作顺序关系到母线保护的可靠性。

当发生母线区外故障转区内故障时,对于出线分段间隔的转移故障,已发出闭锁信号的出线保护、分段保护会返回闭锁信号,此时要求母线保护在闭锁元件的闭锁返回后能母线保护能快速实现启动元件出口;对于主变低侧区外故障转区内故障时主变差动保护会动作,即使差动保护未动作,母线保护仍能正常启动不会闭锁。

当发生母线区内故障转区外故障时,如故障发生在线路/分段侧,在启动元件动作前闭锁元件的闭锁信号会闭锁母线保护,增加母线保护动作时间;如故障发生在主变低侧,则主变差动保护会动作,对母线保护的動作影响也不大。

5.3 出线有联络线的可靠性

当出线作为电源联络线使用时,如发生线路侧保护动作范围内(母线区外)故障时,出线保护会启动而发出闭锁信号,如发生母线区内故障时,出线保护仍会检测到故障电流而启动,如允许出线保护发出闭锁信号,则可能误闭锁母线快速保护。因此,对于联络线的保护应采取投入方向过流判别条件的措施,当方向指向区外时出线保护发闭锁信号,方向指向区内时不发闭锁信号。或由闭锁元件发送方向判别 GOOSE 信号给启动元件,由启动元件根据是否是电源联络线判别是否需要方向闭锁。

当发生母线区内故障时,母线保护启动元件动作

时,应在切除主变低侧的同时,发令切除联络线,否则将无法彻底切除母线故障。

6 工程应用

该设计的中低压母线保护于 2013 年 11 月在扬州仪征供电公司 110 kV 仪征智能浦西变电站内进行了安装、试验调试和试运行应用。

浦西变有 110 kV/10 kV 两个电压等级,1 台 2 号主变,10 kV I 段出线通过分段由 2 号变供电,为本站配置 10 kV II 段母线保护 1 台,闭锁元件为 II 段 12 个出线(电容器)间隔、分段间隔,启动元件位于母线保护内,利用站控层网络的 GOOSE 服务获得了闭锁元件的闭锁信号,大大减少了改造的工作量。

母线保护通过 9-2 从 2 号主变低压侧合并单元获取采样数据、低侧和分段开关位置等信号从过程层 GOOSE 网获取,出口跳闸也经过过程层 GOOSE 网络实现,现场通过出线间隔的程序升级构建了完整的 10 kV II 段母线的快速保护和死区保护,实现了全站的速度保护。

配置母线速动、低侧死区失灵、分段死区失灵软压板,可灵活投退相关的保护功能。考虑线路检修或间隔退出运行等工况,设置识别线路检修的硬压板,母线保护根据压板状态自动判别相应的间隔是否需作为闭锁元件,符合实际需要,简便可行。

7 结束语

针对变电站中低压母线保护缺少配置、事故损失严重的问题,利用智能变电站保护网络化通信的优势和支持 GOOSE 通信的能力,给出了智能变电站中低压母线快速保护的设计方案,该方案降低了保护配置的成本,减少了工程施工量,解决了闭锁信号可靠性的问题。

参考文献:

- [1] 金雄飞. 微机型中低压母线保护研究[D]. 南京: 河海大学硕士学位论文, 2004.
- [2] 刘宏波. 微机型母线保护的研究[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2008.
- [3] 刘艳芬. 中低压电网母线保护的研究和应用[D]. 北京: 华北电力大学工程硕士专业学位论文, 2009.
- [4] 王风光, 张祖丽, 张 艳. 分布式母线保护在智能变电站中的应用[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(2): 37-43.
- [5] 王惠蕾. 变电站 10 kV 母线保护方案研究[D]. 广州: 华南理工大学工程硕士专业学位论文, 2010.
- [6] 陈杰明. 基于 GOOSE 的 10 kV 简易母线保护研究和应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 96-99.
- [7] 余南华, 代仕勇, 梁晓兵. 一种网络化 10 kV 母线快速保护系统的试验分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 168-171.

大容量直流融冰系统在 500 kV 康定变的应用

吴林平, 田 杰, 李长伟, 吴 俊, 李 敏
(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211100)

摘 要:研制了 12 脉动整流融冰方式、额定输出直流电流 5000 A 下容量最大的直流融冰系统。根据融冰交流线路参数, 对 PCS-9590 融冰系统设计研制过程中几个比较重要的方面, 包括融冰方案、主电路设计、过电压和绝缘配合、控制保护系统等进行较为详细的论述。现场应用表明, 直流融冰是解决线路覆冰、缓解冰雪灾害的有效方案。

关键词:直流融冰; 直流融冰系统; 融冰方案; 主电路设计; 零功率试验

中图分类号: TM726

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)03-0026-05

目前, 国内外输电线路的防冰、除冰大致有以下几类技术手段: 通过调度改变潮流, 自藕变压器加多分裂导线, 交流短路融冰法, 直流电流融冰法和阻性线融冰法等^[1,2], 其中, 直流融冰在融化线路覆冰方面效果显著, 目前已有多套直流融冰系统在四川、湖南、云南、贵州等地区投入了实际运行^[3-6]。已投运的系统有 12 脉动晶闸管带整流变结构、6 脉动晶闸管带整流变结构、6 脉动晶闸管不带整流变结构、6 脉动二极管带整流变等多种结构形式, 有纯融冰和融冰兼 SVC2 种系统, 存在一相进一相出、一相进二相出两种运行方式^[7-12]。直流融冰系统需要根据不同站的线路型号、长度等因素具体设计, 确定具体的设备参数。四川 500 kV 康定变是一座枢纽变电站, 站内有 10 条 500 kV 线路在冬季有融冰需求。2012 年 12 月, 一套大容量的直流融冰系统在康定变成功投运。文中结合 500 kV 康定变电站内的直流融冰系统的研制情况, 对直流融冰设计开发过程中几个比较重要的方面作一论述, 为今后类似工程的开发建设提供参考。

1 融冰方案

1.1 融冰容量

康定变交流线路参数见表 1, 其中最长的 500 kV 线路——康定—崇州(I, II 回)型号为 LGJ-630/45, 长度约 202.5 km, 按环境温度为 -5 °C, 风速 5 m/s, 覆冰厚度 10 mm, 融冰时间为 1 h 计算, 最小融冰电流达 5000 A, 最小融冰功率 117.27 MW^[1]。

取康定变融冰系统的额定直流电压为 24.54 kV, 直流融冰容量为 122.7 MW, 该参数满足所有出线的融冰需要。

1.2 主回路结构

从康定变电站 35 kV 母线引入电源, 直流融冰系统接在 35 kV 母线上, 经由 1 台三相三绕组整流变压器, 2 组 6 脉动整流阀组接在变压器的低压侧, 待融

表 1 康定变 500 kV 交流线路参数

线路名称	线型	线路长度 /km	直流电阻 (20°C) /(Ω·km ⁻¹)	融冰电流 /A	直流电压 /kV	融冰直流容量 /MW
康定—崇州 (I, II 回)	LGJ-630/45	202.5	0.046 33	5000	23.45	117.27
康甘线(康崇 I 回线一段)	LGJ-630/45	35	0.046 33	5000	4.05	20.27
康定—崇州 (III, IV 回)	LGJ-630/45	200	0.046 33	5000	23.17	115.83
康定—丹巴 (I, II 回)	LGJ-500/45	109	0.059 12	4500	14.50	65.25
康定—猴子岩 (I 回)	LGJ-400/50	50	0.072 32	4000	7.23	28.93
康定—长河坝 (I, II 回)	LGJ-630/45	30	0.046 33	5000	3.47	17.37
康定—黄金坪 (I 回)	LGJ-400/50	10	0.072 32	4000	1.45	5.79

冰交流线路通过 S1~S4 四把隔刀实现自动切换。主回路结构图如图 1 所示。

融冰时, 2 组 6 脉动阀组在直流侧串联成 12 脉动阀组, 阀组之间连接处接地, 可以降低直流融冰系统的绝缘需求。12 脉动阀组与三相三绕组整流变压器一起运行, 通过一次设备的优化设计使换流阀组可以长期大角度运行, 直流电压调节范围很广, 满足康定变不同长度 500 kV 交流线路的融冰需求。

康定变直流融冰系统额定输出直流电流为 5000 A, 容量为 122.7 MW, 这是目前双 6 脉动阀组串联结构下, 同等电流时输出容量最大的直流融冰系统。

1.3 谐波的考虑

融冰系统在运行时, 主要产生 5, 7, 11, 13 次谐波, 康定变直流融冰采用 12 脉动整流方案, 5, 7 次谐波分量很小。选取滤波器参数见表 2, 采用电力系统电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 进行谐波电压计算, 结果见表 3。电压谐波总畸变率($THDu$)反应了电压波形畸变的程度。康定变加装了直流融冰系统之后, 500 kV 母线电压 $THDu \leq 2\%$, 220 kV 母线电压 $THDu \leq 2\%$, 35

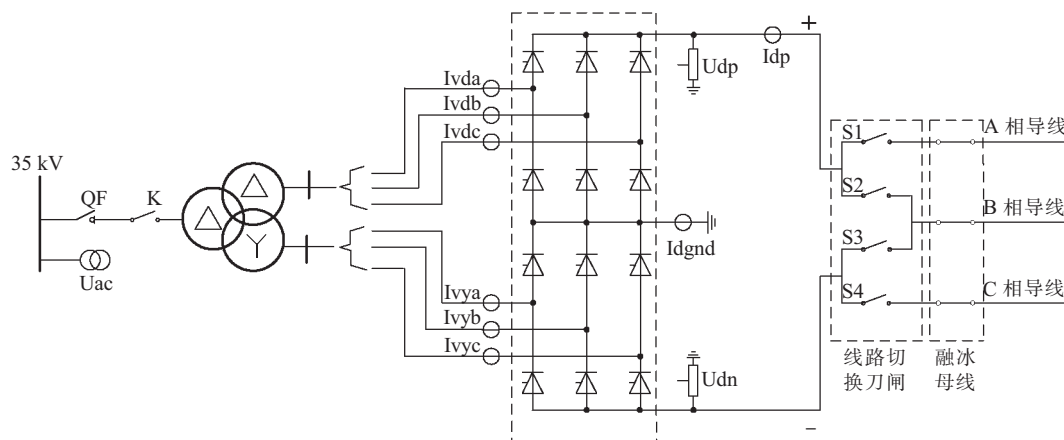


图 1 康定变直流融冰系统结构

表 2 滤波器 LC 参数

谐波	L/mH	C/ μ F
5 次	37.76	11.3
7 次	18.91	11.3
11 次	2.48	33.9
13 次	2.67	22.6

表 3 滤波仿真结果

融冰线路	滤波器是否投入	500 kV 电压 THDu/%	220 kV 电压 THDu/%	35 kV 电压 THDu/%
康定—崇州 (I, II 回)	否	0.046 1	0.728	6.554
	是	0.004 5	0.071	0.612
康定—崇州 (III, IV 回)	否	0.047 2	0.748	6.72
	是	0.005 3	0.084 7	0.789
康定—丹巴 (I, II 回)	否	0.065 9	1.044	9.497
	是	0.014 0	0.222	1.998
康定—猴子岩 (I 回)	否	0.064 9	1.022 7	9.275
	是	0.041 82	0.235	2.103
康定—长河坝 (I, II 回)	否	0.074 6	1.18	10.874
	是	0.015 8	0.250 6	2.287
康定—黄金坪 (I 回)	否	0.065 0	1.026	9.301
	是	0.014 6	0.231	2.078

kV 母线电压 $THDu \leq 12\%$, 从表 3 可见, 不论是否配置交流滤波器组, 母线 $THDu$ 都满足要求。

因此康定变采用如图 1 所示的不加装滤波器组的主回路结构, 能够满足线路融冰的需要, 也不影响原站内设备安全稳定运行。

2 主电路设计

2.1 整流变压器

一般变压器采用有载调压, 由于变电站需要融冰的交流线路长度相差极大, 变压器调压范围有限, 因而通过变压器调压难以解决换流器大角度运行的问题, 部分线路融冰时, 融冰系统的运行触发角仍然较大, 而且变压器设置分接头, 将增加成本和后期维护工作量。

PCS-9590 直流融冰系统通过优化阀组设计, 可以不需要变压器分接调节, 通过触发的控制就能够满足站内所有出线的融冰需要。

康定变直流融冰所用整流变的参数。额定容量 $150 \text{ MV} \cdot \text{A}$; 接线方式 D/d0/y11; 额定电压 $35 \pm 2 \times 2.5\% / 10.5 / 10.5 \text{ kV}$; 短路阻抗 21% ; 调压方式不调压。

2.2 避雷器配置与设备绝缘水平设计

根据系统过电压和设备绝缘配合的结果来配置避雷器。避雷器保护水平的确定需考虑 2 个因素, 其一为正常情况下的最高持续运行电压, 其二为故障情况下的过电压水平。正常运行情况下, 直流融冰系统换流变阀侧、直流侧电压包含大量的谐波、纹波分量; 同时, 还需要考虑交流系统电压的波动。因此, 这两处避雷器的参考电压需高于其最大电压, 并采用合适的荷电率计算得到避雷器的参考电压。

过电压水平需考虑操作过电压和雷击过电压。使用 PSCAD/EMTDC 搭建仿真模型, 结果表明: 在短路故障情况下, 系统的操作过电压并不严重。如直流融冰系统发生 35 kV 母线单相短路、融冰变阀侧单相接地故障、直流单极接地故障时, 未出现操作过电压。然而, 在融冰线路断线故障下, 整流变压器网侧、阀侧, 换流器直流侧出口上都产生较为严重的过电压, 因此需要配置避雷器, 以保护变压器、晶闸管等设备。

康定变避雷器配置如图 2 所示, 避雷器参数见表 4。康定变配置了 3 处避雷器: 换流变网侧, 配置相对地避雷器 A, 保护换流变网侧绕组; 换流变阀侧, 配置相对地避雷器 AF, 保护换流变阀侧绕组; 直流出口侧, 配置 D 避雷器, 防止雷击过电压传入阀厅, 保护阀厅设备和穿墙套管, 同时, 在故障情况下, 降低晶闸管两端、变压器阀侧过电压。

考虑到设备绝缘老化、避雷器自身的老化、环境污染等诸多因素, 在确定设备的绝缘水平时, 对操作波考虑 15% 的绝缘裕度, 对雷电波考虑 20% 的绝缘裕度, 以保证受到过电压应力时设备的安全性。

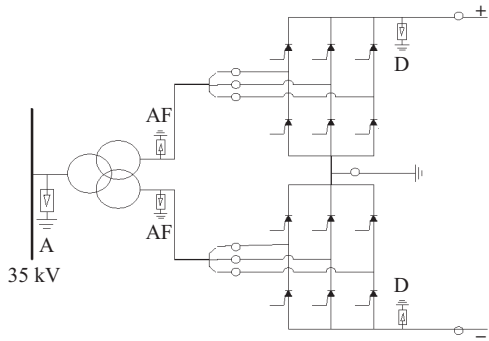


图2 直流融冰系统避雷器配置

表 4 避雷器参数 kV

避雷器	A 型	AF 型	D 型
额定电压	54.0	19.0	18.0
雷电波保护水平	134.0	44.3	38.4

3 控制保护系统

3.1 系统架构

康定变融冰控制保护系统由监控柜(PCP)、阀控柜(VC)和变压器保护柜等组成,其结构如图3所示。

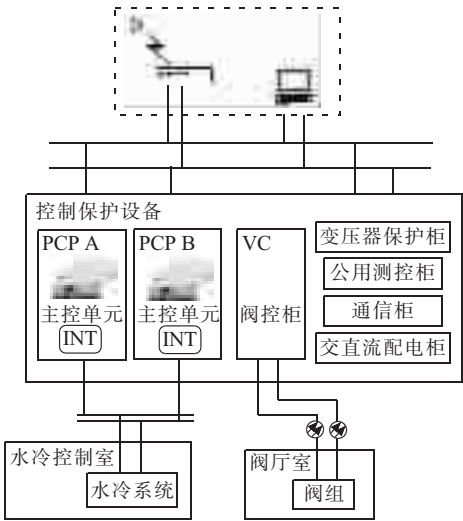


图3 控制保护系统

3.2 控制保护策略

康定变直流融冰系统在融冰模式下采用定直流电流控制,控制保护系统中集成了阀短路保护、桥差动保护、直流过流保护、直流过压保护、直流谐波保护以及交流过电压保护等。另外,对于整流变压器单独配置了变压器保护。

4 零功率试验

直流融冰系统只在冬季线路覆冰的时候使用,其余时间都处于停用状态,为了检测整套系统的可用性,在每年冬季来临之前,需要做相应的定检试验。为此PCS-9590 直流融冰系统提供了零功率试验功能,这是

在不接入融冰线路(即交流线路不停电)的情况下,全面检验直流融冰系统的直流电流控制功能,检验换流阀、直流侧刀闸和融冰母线的电流耐受能力,保证直流融冰系统在需要融冰时能够可靠地投入运行,其控制策略与正常融冰一致。PCS-9590 直流融冰系统提供2种拓扑实现此项功能。

方案一:利用相控电抗器 L 作为负载,其结构如图4所示。PCS-9590 直流融冰系统在不融冰时可以兼做静止无功补偿器(SVC)使用,进行快速无功补偿、改善电能质量,图4所示结构可以通过对 $Q11\sim Q17$ 7次模式转换隔离开关的分、合操作来实现一次系统结构的切换,方便地在融冰、零功率试验和 SVC 3种模式灵活转换。以与换流变压器 Y 绕组连接的6脉动阀组为例,在融冰、零功率试验和 SVC 3种运行模式下,各组隔离开关的分合位置分别如表5所示。

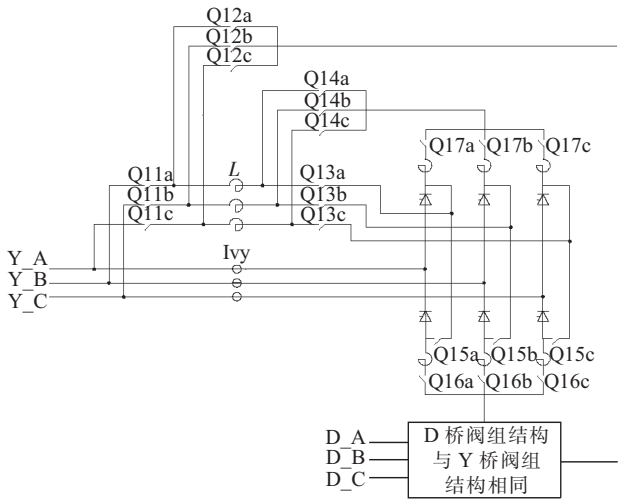


图4 零功率试验方案一

表 5 融冰、零功率试验和 SVC3 种模式下切换隔离刀的位置

刀闸	融冰模式	零功率试验	SVC 模式
Q11	分	分	合
Q12	合	合	合
Q13	分	分	合
Q14	合	合	分
Q15	分	分	合
Q16	合	合	分
Q17	合	合	分

方案二:在直流输出侧加装隔离刀闸和电抗器构成回路,如图5所示。仍然以电抗器 L 为负载,分开 $S2$ 、 $S3$ 、 $S5\sim S7$ (不接入交流线路),合上 $S1$ 、 $S4$ 、 $S8$ 、 $S9$,就可以进行零功率试验了。这种结构不支持 SVC 运行模式。

康定变直流融冰系统可以扩展零功率试验功能。

5 运行情况

康定变直流融冰系统的设计容量是,额定功率

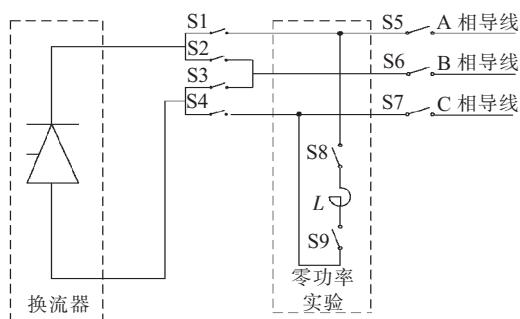
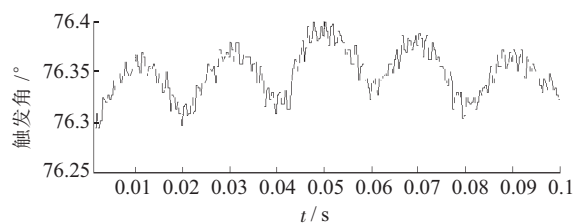


图5 零功率试验方案二

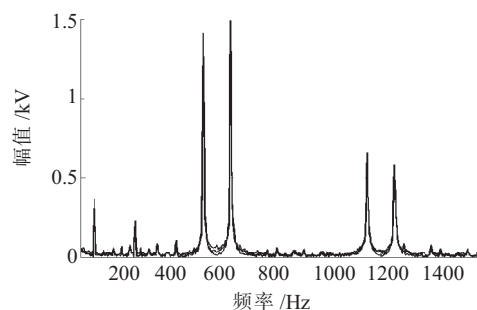
122.7 MW, 额定直流电压 $DC \pm 12.27$ kV, 额定直流电流 5000 A, 额定触发角 15° 。该装置于 2012 年 12 月 27 日对 500 kV 康甘线(康崇线一段)成功进行了大电流融冰试验, 直流电流从 500 A 平稳上升至额定电流 5000 A, 装置累计持续运行将近 2 h。通过直接在站内出线上加探头测量导线温度, 在环境温度 12°C 、风速 3 m/s 的情况下, 导线最高温度 24°C , 温升达到 12°C 。

图 6 所示为康甘线按“一去一回”方式融冰, 直流电流达到额定电流 5000 A 时进线侧 35 kV 母线电压、直流电压、直流电流、触发角的现场录波波形, 其 35 kV 母线电压的频谱分析如图 7 所示。可见, 直流融冰装置输出的直流电压、直流电流等与理论计算结果基本吻合, 符合设计预期, 研制的直流融冰系统满足站内线路融冰需求。12 脉动整流融冰系统工作时交流电源中主要含有 11、13、23、25 等 $(12k \pm 1)$ 次谐波电压; 经计算, 35 kV 母线电压 $THDu$ 为 $9.49 \leq 12\%$, 与 PSCAD 仿真结果相符。

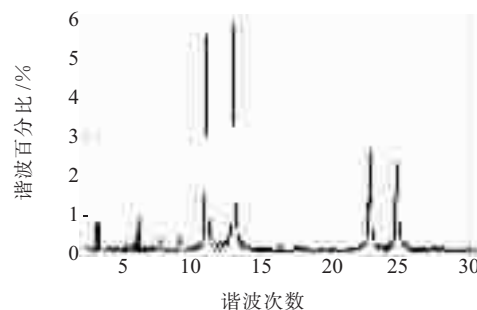


(d) 触发角

图6 康甘线融冰电流达 5000 A 时 35 kV 母线录波波形

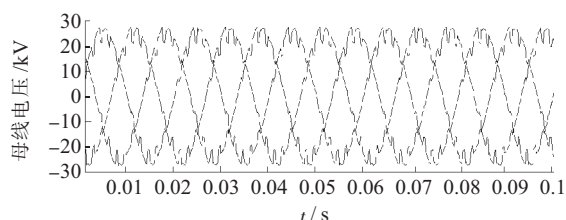


(a) 谐波电压

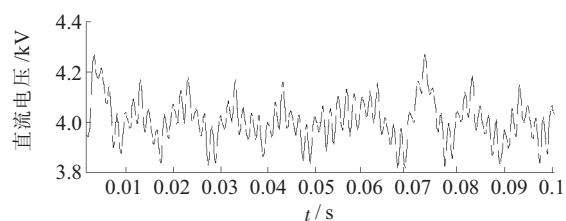


(b) 谐波百分比

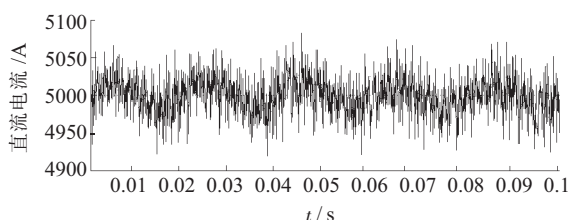
图7 康甘线融冰电流达 5000 A 时 35 kV 母线电压频谱分析



(a) 母线电压



(b) 直流电压



(c) 直流电流

6 结束语

康定变直流融冰系统设计了简洁的主回路结构, 采用 1 台三相三绕组变压器直接从变电站高压母线受电, 中低压侧分别接入 6 脉动阀组, 可以兼顾不同线径和长度的输电线路融冰; 通过 4 把选相隔离开关可以完成多种融冰方式的自动转换, 实现对交流线路的均衡融冰; 具有零功率试验功能, 可以方便地实现对整套设备的定检。该系统基于 5000 A 的输出电流和 122.7 MW 的融冰容量而设计, 可以为直流融冰设备的研制和工程应用提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 杜蕴莹, 邢军, 王澄, 等. 南方覆冰灾害造成输电线路倒塔原因及策略的研究[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(6): 14-17.
- [2] 吴元华. 输电线路覆冰的潜在危害及对策研究[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(6): 18-21.
- [3] 张翔, 丁勇, 朱炳坤, 等. 大容量直流融冰兼静止无功补偿装置的研制与应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 104-108.
- [4] 张庆武, 吕鹏飞, 王德林. 特高压直流输电线路融冰方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 38-42.

- [5] 傅 闯, 饶 宏, 黎小林, 等. 直流融冰装置的研制与应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 53-56, 107.
- [6] 谢 彬, 洪文国, 熊志荣, 等. 500 kV 复兴变电站固定式直流融冰兼 SVC 试点工程的设计[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 182-185.
- [7] 范瑞祥, 孙 旻, 贺之渊, 等. 江西电网移动式直流融冰装置设计及其系统试验[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 67-70.
- [8] 申屠刚, 程极盛, 江道灼, 等. 500 kV 直流融冰兼动态无功补偿系统研发与工程试点[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 75-80.
- [9] 许树楷, 黎小林, 饶 宏, 等. 南方电网 500 kW 直流融冰装置样机的研制和试验[J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 32-36.
- [10] 孙 栩, 王明新. 交直流输电线路大容量固定式直流融冰装置的设计方案[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12): 102-105.
- [11] 陆佳政, 李 波, 张红先, 等. 新型交直流融冰装置在湖南电网

的应用[J]. 南方电网技术, 2009, 3(4): 77-79.

- [12] 马晓红, 赵立进, 李 巍, 等. 直流融冰技术在贵州电网的应用[J]. 南方电网技术, 2009, 3(5): 107-110.

作者简介:

吴林平(1980), 男, 安徽桐城人, 高级工程师, 从事直流输电及直流融冰技术与开发工作;

田 杰(1969), 男, 四川秀山人, 教授级高级工程师, 从事直流输电及柔性输电技术与开发工作;

李长伟(1983), 男, 河南荥阳人, 工程师, 从事直流融冰及无功补偿技术与开发工作;

吴 俊(1979), 男, 江苏东台人, 工程师, 从事柔性输电电气设计工作;

李 敏(1982), 女, 湖南娄底人, 工程师, 从事过电压及绝缘配合研究工作。

Application of Large-capacity DC Deicing System in 500 kV Kangding Substation

WU Linping, TIAN Jie, LI Changwei, WU Jun, LI Min

(Nanjing NARI-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: A new DC deicer system with 12-pulse mode and 5000 A rated current is developed. According to the parameters of AC transmission lines, some of its important aspects of PCS-9590 are introduced, including deicing solution, main circuit design, overvoltage and insulation coordination, control and protection system. Field application shows that the proposed DC deicer is an effective solution for the ice-clad problem of AC lines.

Key words: DC deicer; DC deicing system; main circuit design; zero-power test

(上接第 25 页)

作者简介:

陆玉军(1972), 男, 江苏句容人, 高级工程师, 从事变电站综合自动化系统的开发及工程应用工作;

徐 勇(1970), 男, 江苏仪征人, 高级工程师, 从事电力系统二次技术管理工作及应用研究工作;

薛 军(1980), 男, 江苏仪征人, 工程师, 从事电力系统二次技术管理工作;

蒋 莹(1970), 女, 江苏兴化人, 工程师, 从事变电二次检修维护和管理的工作;

陈 颢(1987), 男, 湖北钟祥人, 工程师, 从事变电站综合自动化系统的开发及工程应用工作。

Design and Analysis of Middle-low Voltage Busbar Protection in Smart Substation

LU Yujun¹, XU Yong², XUE Jun³, JIANG Ying³, CHEN Hao¹

(1. Jiangsu Frontier Electrical Power Technology Co. Ltd., Nanjing 211102, China; 2. Yangzhou Power Supply Company, Yangzhou 22500, China; 3. Yangzhou Yizheng County Maintenance Filiale, Yizheng 211400, China)

Abstract: For satisfying the demand of fast clearing fault on Middle-low Busbar, an over-current block protection approach for is proposed. The typical short circuit faults on middle-low voltage busbar are analyzed. With the advantage of GOOSE networks in the substation, a novel-type middle-low voltage busbar protection is designed. The details of the process of protection design and handling communication interrupt are presented. The effectiveness and reliability of the proposed approach are validated by practical application in a smart substation.

Key words: smart substation; middle-low voltage busbar protection; block component; startup component

欢迎投稿 欢迎订阅

电力二次系统内网安全监视功能的研究与实现

陈茂源¹, 孙 炜², 梁 野¹, 李 勃¹, 谷丰强¹

(1. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192; 2. 国家电力调度控制中心, 北京 100031)

摘 要: 电力二次系统安全监视功能通过对安全防护设备的日志实现标准化采集, 实现对安全设备的实时告警与运行状态监测, 及时发现安全体系中存在的各类安全隐患和异常访问行为。通过研究日志采集技术, 形成电力二次系统安全日志采集规范; 通过研究上下级调度中心监视功能的级联通信, 实现功能分级部署; 通过研究调度主站 D5000 主机的安全状态, 实现对 D5000 的安全监视。

关键词: 内网监视; 网络安全; D5000; 关联分析

中图分类号: TM769

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)03-0031-04

电力二次系统安全监视功能通过对二次安全防护设备的日志实现标准化采集, 实现对安全设备的实时告警与运行状态监测, 及时发现安全体系中存在的各类安全隐患和异常访问行为。电力二次系统安全监视功能实现安全防护设备的资产管理和对各类参数的动态管理, 大幅减少系统管理员的工作量。同时与智能电网调度技术支持系统(简称 D5000)结合, 实现内网安全事件的集中收集、统一管理, 为基础平台提供有效的安全保障^[1-3]。

1 内网安全监视功能的范围

内网安全监视功能通过收集安全日志, 实现安全监视, 监视范围包括电力专用安全防护设备、通用安全防护设备和调度技术支持系统内关键进程。

1.1 电力专用安全防护设备

此类设备包括横向隔离设备和纵向加密装置, 将按照 Syslog 日志规范主动向内网安全监视功能发送其运行状态和告警数据。为便于日志收集分析, 此类设备日志报文采用自定义电力二次系统标准 Syslog 日志格式: <告警级别> <空格> <告警时间> <空格> <设备名称> <空格> <设备类型> <空格> <内容描述>。

1.2 通用安全防护设备

此类设备包括: 防火墙、入侵检测装置、防病毒系统等, 采用 Syslog 与 Agent 相结合方式实现数据采集。由于此类设备涉及厂家众多, 且其工作原理和实现技术差异较大, 无法规定其采用统一的 Syslog 日志格式。因此, 采用日志采集代理 Agent 的方式到达规范其日志格式的目标。在采集 Agent 程序中, 输入内容为上述各类设备的原始 Syslog 日志, 输出内容为电力二次系统定义的标准格式 Syslog 日志。

1.3 调度技术支持系统内关键进程

随着 D5000 的逐步完善和建设, 内网安全监视

功能已纳入智能调度技术支持系统。根据《智能调度技术支持系统总体设计方案》的要求, D5000 的关键进程也将纳入监视范围。由于 D5000 运行环境相对固定, 操作系统主要采用国产安全操作系统, 因此, 将采用 Agent 方式实现关键进程的数据采集功能。

2 内网安全监视关键功能的研究及实现

2.1 日志采集功能

安全监视功能主要使用 Syslog 方式采集安全设备的日志信息。电力系统专用安全设备(横向物理隔离装置、纵向加密认证装置)使用 Syslog 方式直接采集; 通用安全设备(防火墙、入侵监测系统、防病毒系统)经 Agent 代理将日志转换为符合电力系统标准格式的日志后采集; 调度技术支持系统内部的关键设备和应用通过 Agent 代理将日志转换为标准格式发送至安全监视功能。

Syslog 采用用户数据报协议(UDP)作为其底层传输层机制。Syslog 的默认端口是 514 端口, 端口可以根据实际情况重新配置。日志采集流程如 1 所示。

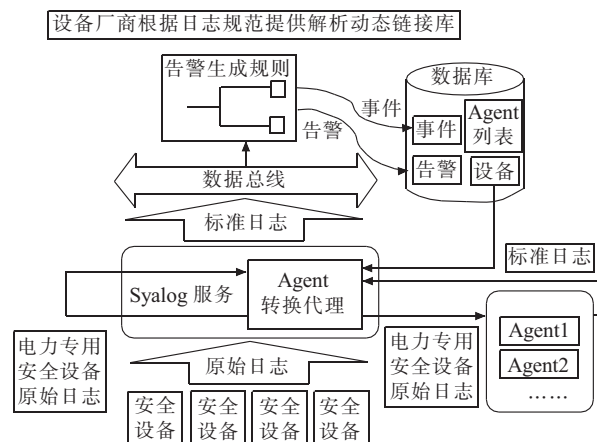


图 1 日志采集流程

2.1.1 广域网日志采集功能

广域网日志采集模块作为安全监视功能重要辅助

模块,可以广泛地部署各级调度机构和变电站,负责采集电力专用安全设备(横向物理隔离装置、纵向加密认证装置)和通用安全设备(防火墙、防病毒系统、入侵检测系统)的运行日志和告警信息,并将处理后的信息发送至电力二次系统内网安全监视功能,进行集中分析和展示。

广域网日志采集模块具有预处理功能,包括事件接收、事件过滤、事件压缩、事件报送等功能。

(1) 事件接收。广域网日志采集模块使用 Syslog 方式接收事件内容,范围包括电力专用安全设备、通用安全设备。

(2) 事件过滤。广域网日志采集模块将接收到大量安全事件,但并非所有事件都需要关注,过滤功能将不重要的事件信息过滤掉。

(3) 事件压缩与归并。对重复事件进行压缩,所有重复事件只显示一次,同时记录重复告警事件的第一次发生时间、最后一次发生时间和发生次数。

(4) 事件报送。广域网日志采集模块将事件处理后得到的重要事件信息报送至安全监视功能。

2.1.2 局域网日志采集功能

局域网安全监视模块负责监视主站 D5000 内部关键设备和应用,采集系统的运行状态和告警信息,并将处理后的告警信息发送至电力二次系统内网安全监视功能。局域网日志采集模块具有如下功能。

(1) 采集系统外接设备。采集主机的外接设备情况(USB 接口、串口、并口),根据安全监视代理的配置文件,当有不符合安全策略的外接设备接入时发出告警。

(2) 采集系统关键进程运行情况。采集系统内主要业务的关键进程的运行情况,当出现非法进程、进程异常或非法退出时发出告警。

(3) 日志发送。当系统内发生异常、非法操作、非法访问或外连时,以 Syslog 格式向监视功能发送告警信息。

2.2 运行状态阈值告警机制

内网监视功能对采集的运行状态数据进行阈值告警处理,主要的告警现象包括:

(1) 越界。规定数值的合理取值范围,当不在该范围,越界条件成立。如某主机的 CPU 负载率超过定义的最大值或动态阈值;硬盘使用率达到 100%,无可用空间等。

(2) 跳变。规定数值在给定时间间隔的变化幅度,如超出,跳变条件成立。如 oracle 数据库的某个表空间增长过快;交换机的流量异常增长等。

(3) 不刷新。规定一个时间间隔,如数值在该时间段结束时,未改变,不刷新条件成立。如 D5000 某个关键值长时间不变化等。

2.3 安全日志数据分析处理

2.3.1 事件标准化

按照管理需要对原始事件中包含的信息进行事件的重定义标准化,具体内容包括:将信息进行相关的修改定义,将事件的内容、描述信息、级别等进行修改,从而标准化事件信息,便于事件的处理。需要对事件的内容,如级别、故障类型、描述等进行标准化定义,如图 2 所示。

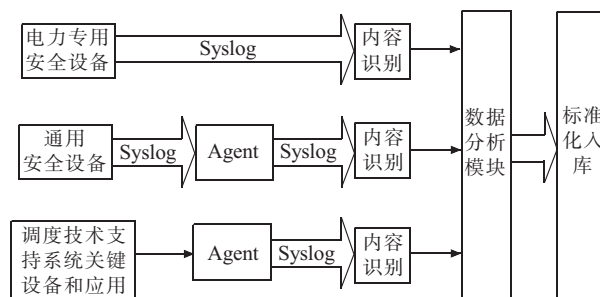


图 2 数据标准化处理流程

2.3.2 事件压缩与归并

对重复事件进行压缩,所有重复事件只记录和显示一条,同时提供告警事件的第一次发生的时间和最后一次发生的时间以及次数。

系统提供按照标准化事件的所有属性进行过滤归并策略设置。按照如下条件进行规则设定:监视对象、事件类型、紧急程度、发生时间、事件刷新的时间间隔。

2.3.3 事件过滤

在采集事件的同时,通过对模板的定义,可以对指定的事件进行过滤,从而提高事件的处理效率和时效性;根据事件采集的规则,将不需要的事件在采集层直接过滤,可以减少管理服务器的处理事件量^[4]。

2.3.4 风险管理

内网安全监视功能具有针对二次系统安全风险的评估指标体系,包括运行类和安全类两类指标。运行类指标体现防护体系中安全设备的总体运行状况,安全类指标体现防护体系中的安全可靠程度。运行类指标包括:设备在线运行率、纵向加密的密通可用率等;安全指标是功能当前风险值。

针对电力二次系统安全防护设备告警日志的特点,采用基于层次式聚类的多特征关联算法,实现告警信息的分类和聚合功能,通过 IP 地址与资产信息的关联,快速定位告警信息来源,同时分析告警内容,按照属性相似度进行关联,有效精简了报警数量,解决了系统中安全事件描述信息过于冗余庞杂的问题。

2.4 监视功能级联管理

安全监视功能可以向上级单位报送高级别的安全事件、本级功能自身运行指标以及统计后的告警信息。上级安全监视功能通过设备统一编码识别安全事件的

来源。根据电力二次系统采用通信专网的特点,监视功能采用 syslog 报文及文件的方式实现功能的级联管理功能。具体系统架构如图 3。

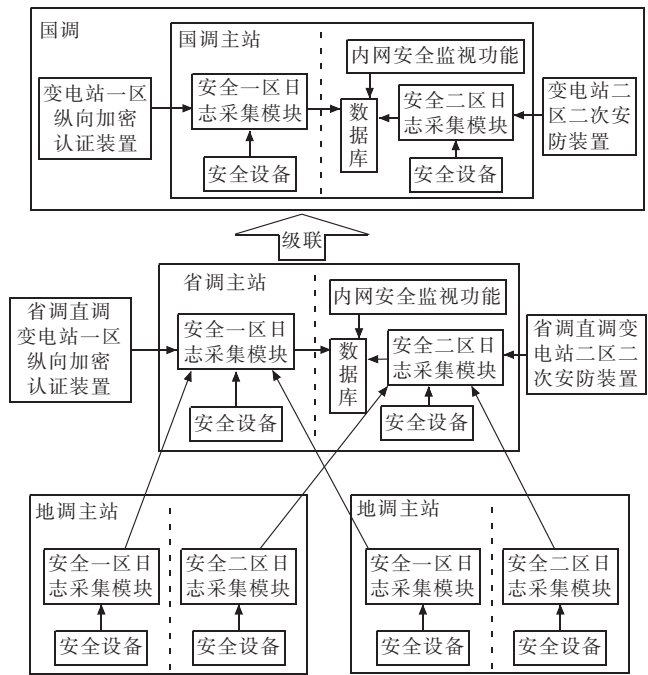


图 3 级联管理架构

2.4.1 高级别安全事件上报

高级别安全事件上报指下级监视功能向上级监视功能转发告警级别为紧急的安全事件。当本级功能发生告警级别为紧急的安全事件后,本级功能除记录该安全事件外,会将该条告警的告警级别降一级后以 syslog 的形式上报给上级功能,上级功能解析并存储该条告警,产生对应的告警事件。

2.4.2 本级功能自身运行指标上报

本级功能自身运行指标上报指每 5 min 以 syslog 形式上报一次运行状态。内容包括:安全指标数值、紧急告警数量、重要告警数量、次要告警数量、通告告警数量、功能数据流量(kb/s)以及按照设备类型分布的告警数量。

2.4.3 本级功能统计分析信息上报

本机功能统计分析信息上报指每天零点以 E 文件的形式向上级功能报送过去一天的运行状态。内容包括:本级功能的告警数量、安全设备统计信息、指定安全事件、安全设备在线运行率、纵向装置密通可用率、按照设备类型和设备厂商划分归并后的告警数量、未归并日志数量。

内网安全监视功能结合电力系统的五级调度机制,以及安全分区特点,实现了适合电力系统的内网安全监视功能级联通信功能。该功能为上级平台及时准确地了解下级功能运行状态提供支持,提供最及时的告警功能。最大限度降低紧急安全事件对全网的安全

威胁,同时也为上级调度单位对下级调度单位的二次安全防护工作提供一个有效的考核方法。

3 内网安全监视功能研究成果

3.1 内网安全监视功能结构

内网安全监视功能的逻辑架构分为 3 层,由下至上依次为数据采集层、数据处理分析层、图形界面展现层三层,架构图如图 4 所示^[5,6],各层功能说明如表 1 所示。

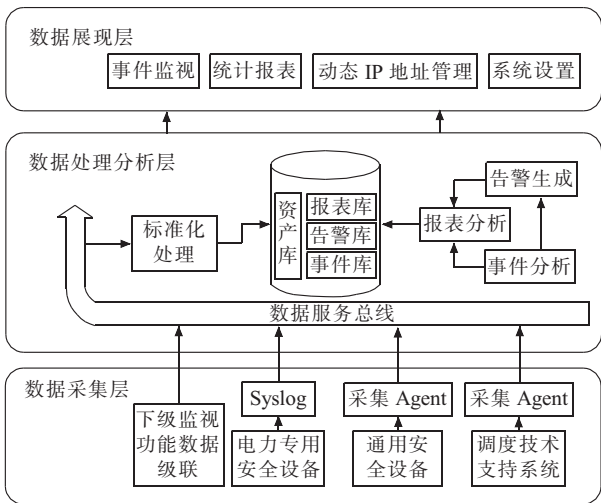


图 4 功能架构

表 1 监视功能结构表

技术结构	主要模块和功能
图形界面展现层	事件监视(事件检索、告警管理) 统计报表(Top10 统计,报表管理) IP 地址动态管理及资产管理 系统管理(系统参数、用户权限)
事件处理和分析层	标准化处理(压缩、归并、标准化入库) 数据存储(事件库、资产库、报表库) 统计分析(实现多种维度的统计分析) 事件告警
数据采集层	电力专用安全设备以 Syslog 方式直接采集 通用安全设备通过 Agent(接收器->转换代理(设备厂商实现)->发送器)转发收集 D5000 关键主机通过 Agent 方式收集

3.2 内网安全监视与 D5000 系统的有机结合

根据《智能调度技术支持系统总体设计》、《智能调度技术支持系统主机安全监视功能规范》要求,结合智能调度技术支持系统的特点,实现 D5000 安全监视功能。该功能充分利用了 D5000 系统的消息总线、服务总线、数据总线的应用机制,结合 D5000 系统人机界面的表格编辑器、饼图、棒图、实时曲线,使用画面浏览器、实时库数据、历史数据库进行内网安全监视功能的展示,如图 5 所示。

4 推广应用情况

该功能可完全应用在国家电网公司二次系统安全

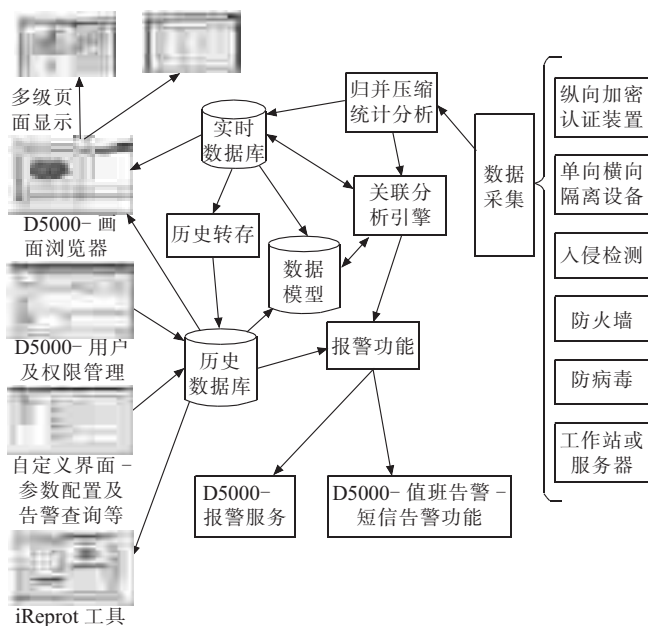


图 5 内网监视功能与 D5000 结合展示

防护体系的建设中,为构建智能电网环境中的智能主动安全防御体系奠定坚实的基础。同时,在电力二次系统安全防御体系基础上,通过对电力二次系统安全监视的研究、开发并实施电力二次系统内网安全监视功能,提高电力二次系统安全运行管理水平,健全完善电力二次系统安全防护体系,保障电力二次系统的安全稳定可靠运行。

电力二次系统内网安全监视功能已经在 2010 年完成江西和陕西试点的建设,并在各分中心、省调中逐步推广建设。2011 年完成国调中心、华北、华中分中心、河北、福建、江苏、重庆、安徽、四川省调等 9 个单位的建设工作,并在 2012 年底完成全公司其他省级及以上调度机构的建设工作。

5 结束语

通过日志数据采集技术、安全日志数据分析处理技术、数据关联分析技术,以及 D5000 安全监视技术的研究,解决了 D5000 对关键安全设备、服务器的日志集中采集和统一管理问题,实现对安全设备的实时

告警与运行状态监测,及时发现安全体系中存在的各类安全隐患和异常访问行为。电力二次系统内网安全监视功能的建设有助于电力二次系统安全防护体系由边界防护向纵深防御发展,解决调度技术支持系统对关键安全设备、服务器的日志集中采集和统一管理问题,实现对电力专用安全设备和通用安全设备在统一的功能下实现实时告警与运行状态监测,为 D5000 提供全面的安全基础支撑,对于及时掌握电力二次系统存在的安全隐患,保障电网安全稳定运行具有重要意义。由于功能收集了大量安全设备告警信息,存在海量信息问题,不能迅速从海量告警信息中发现二次系统安全事件,亟需告警信息二次分析;在日志过程中,一些告警并不合理,告警级别存在过高问题,需要根据紧急程度重新调整。

参考文献:

- [1] 李 澄,陈 颖,宁 艳.二次设备时间同步状态在线监测系统研究[J].江苏电机工程,2012,31(1):9-11.
- [2] 胡 炎,辛耀中,韩英铎.二次系统安全体系结构化设计方法[J].电力系统自动化,2003,27(S21):63-68.
- [3] 陈建亚.现代通信网监控与管理[M].北京:北京邮电大学出版社,2000:56.
- [4] 彭雪娜,闻英友,赵 宏.网络安全信息关联与分析技术的研究进展[J].计算机工程,2006,32(17):1-3.
- [5] 刘金龙. drools 规则引擎模式匹配效率优化研究及实现[D].成都:西南交通大学,2007.
- [6] 金学成,孙 炜,梁 野,等.电力二次系统内网安全监视平台的设计与实现[J].电力系统自动化,2011,35(16):99-104.

作者简介:

陈茂源(1984),男,山东枣庄人,工程师,从事电力二次系统安全防护工作;

孙 炜(1977),男,北京人,高工,从事电力二次系统安全防护工作;

梁 野(1980),男,辽宁沈阳人,北京人,高工,从事电力二次系统安全防护工作;

李 勃(1978),男,辽宁盘锦人,工程师,从事电力二次系统安全防护工作;

谷丰强(1982),男,河南郑州人,工程师,从事电力二次系统安全防护工作。

Research and Implementation of Power System Secondary Network Security Monitoring

CHEN Maoyuan¹, SUN Wei², LIANG Ye¹, LI Bo¹, GU Fengqiang¹

(1. Beijing Kedong Electric Power Control System Co. Ltd., Beijing 100192, China;

2. National Electric Power Dispatching Control Center, Beijing 100031, China)

Abstract: Through standardize the sampling of data of safety equipment, power system secondary security monitoring can achieve real-time warning and operating status monitoring for the safety equipment, and detect the presence of various types of security system risks and abnormal access behavior. With the studying of log collection technology, a norm for power system secondary security log collection is formed. With the research of cascade communications between upper and lower dispatch monitor center, a hierarchical deployment of functions is achieved. Through studying the security state of D5000 host in dispatch center, the security monitoring on D5000 is achieved.

Key words: network security monitoring; network security; D5000; correlation analysis

智能变电站同杆双回线保护功能优化的探讨

申 泉, 高 云

(国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210032)

摘 要:同杆双回线的线路保护一般按单回线路独立配置,在保证可靠性的同时,往往牺牲了保护灵敏度。文中在同杆双回线保护按单回线路独立配置的原则下,通过站内通信网络共享两回线路的交流量和开关量信息,提出了双回线路保护性能优化的具体方法,为双回线跨线故障选相、零序互感影响、故障测距、距离保护等提供了新的解决思路。

关键词:智能变电站;双回线;线路保护;信息共享;故障选相

中图分类号:TM773

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0035-02

出线走廊的限制使得同杆并架双回线路日益增多。与单回线路相比,同杆双回线路结构具有特殊性,不仅可能发生单回线对地故障或者单回线相间故障,还可能发生两回线线间的跨线故障。跨线故障情况复杂,给基于单回线信息的继电保护原理带来了许多新问题,例如故障选相困难,测距不准等。另外,双回线间的零序互感也给常用的纵联零序方向保护、接地距离保护等带来很大的影响。常规变电站中,为简化二次回路,方便调试和维护,双回线继电保护都是按单回线独立配置的,两回线路的继电保护装置之间没有任何联系,一回线的保护装置也不能获取相邻线任何电气量信息。应该说这种配置方案在传统变电站是发挥了积极作用的,降低了因二次回路问题导致保护不正确动作的几率,但由于保护获得的信息有限,限制了双回线路继电保护性能的改进。如今智能变电站建设正如火如荼的展开,站内信息数字化、网络化的特点为信息共享提供了方便,为进一步提高双回线保护性能提供了条件。文中主要在选相元件、距离保护、纵联零序保护和差动保护方面展开探讨。

1 基于电流平衡原理的选相方法

常规的选相原理均是基于单回线路故障特征所提出的,在同杆双回线路发生跨线故障时其选择性和可靠性难以保证^[1,2]。双回线故障选相是双回线路保护的一大难题,文中提出在智能变电站双回线保护中采用基于电流平衡原理的选相方法。

对称双回线区内无故障时两回线对应相电流完全相等,区内故障时两线对应故障相电流不平衡。电流平衡选相原理就基于此特征,判据如下:

$$\left| \dot{I}_{\phi I} - \dot{I}_{\phi II} \right| > 0.1 \times \left| \dot{I}_{\phi I} + \dot{I}_{\phi II} \right| \quad (1)$$

若故障后两回线 ϕ 相电流之间满足式(1)所示关系,则选 ϕ 为故障相。

对于单线故障或异名相跨线故障(IA_II B 等)均能可靠选出故障相别,但是对于含同名相的故障,如 IA_IIAB 这样的故障,A 相可能选不出来,还需要进一步甄别。另外,对于选出的相别也需要通过电流方向、幅值等进一步判别故障线。以 A 相故障为例,初步选相逻辑如图 1 所示。图中 $\dot{I}_{AI}$ 和 $\dot{I}_{AII}$ 分别为 I 线和 II 线的 A 相电流。

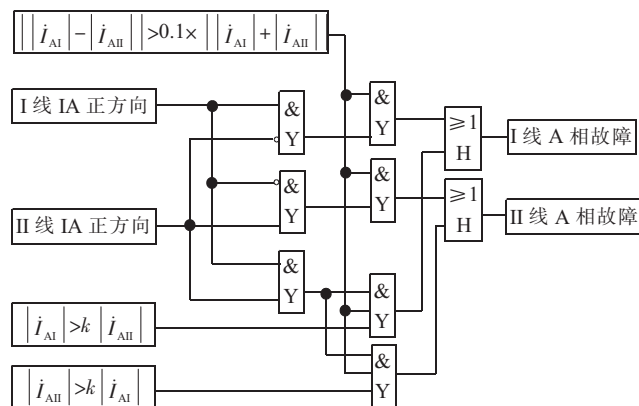


图 1 电流平衡选相逻辑

2 自适应距离保护

2.1 距离 I 段定值自适应

双回线上接地距离保护受零序互感影响容易造成保护拒动或者误动^[3]。最严重的情况在于相邻线路两侧挂地运行,本线路末端母线故障,受零序互感影响,远端距离 I 段保护可能超越动作。为保证距离保护的选择性和安全性,双回线路距离 I 段保护范围整定的都比普通线路要小,这样就影响了双回线正常运行时候距离保护的灵敏度。文中在基于智能变电站双回线路信息充分共享的基础上提出了距离 I 段定值自适应方案。

保护通过 GOOSE 网络不仅采集线路开关的位置接点,同时采集相应接地刀闸位置接点。通过线路开关及接地刀闸位置可以实时判别两回线路运行状况。相邻线路空挂运行或者正常运行时,对本线路影响很小,

本线路距离 I 段保护定值可以按单回线运行考虑,保证其灵敏度;相邻线路两侧挂地运行时,保护自动缩小距离 I 段保护范围,以保证其安全性。

2.2 阻抗继电器自适应

常规的基于单回线电气量的阻抗继电器在双回线发生跨线故障时无法准确反应故障点位置和故障回路阻抗^[4]。智能变电站双回线路保护由于引入了相邻线路的交流量,可以计算基于线间的故障回路阻抗。

线路发生单回线相间故障则采用常规的相间阻抗继电器;若发生异名相跨线故障,则采用基于线间故障回路的阻抗继电器。以 IA_II B 的故障为例,可以根据式(2)计算故障回路阻抗,并判别是否发生区内故障。

$$Z_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B / \dot{I}_{AI} - \dot{I}_{BI} \quad (2)$$

式中: $\dot{U}_A, \dot{U}_B$ 分别为线路 A、B 两相电压; $\dot{I}_{AI}$ 和 $\dot{I}_{BI}$ 分别为线路 I 的 A 相和线路 II 的 B 相电流。其他类型跨线故障类似。该方法解决了基于单回线信息的阻抗继电器在发生跨线不接地故障时失去保护范围的问题。

3 纵联零序方向保护

纵联零序方向保护对于线路高阻故障的快速、可靠切除具有重要意义。但受平行双回线间零序互感的影响,在一回线故障时可能造成另一回非故障线路的纵联零序方向保护不正确动作,这是纵联零序保护最难以解决的问题^[5-8]。

智能变电站中双回线保护新的配置方案下,两回线路的交流量及开关量信息都是共享的,很容易实现单回线故障时对另一回线纵联零序保护的关联闭锁。主要考虑如下几种情况:(1) 相邻线保护有跳闸;(2) 相邻线开关单相跳开;(3) 相邻线零序电流远大于本线零序电流。在满足上述任何一条的情况下短时闭锁线路纵联零序保护,可有效防止相邻线路故障情况下非故障线路纵联零序保护误动。

4 差动保护电容电流补偿方法

长距离、高压输电线路电容电流不能被忽略,对分相电流差动影响很大,尤其是线路单侧合闸容易造成差动保护误动,必须采用电容电流补偿技术^[9,10]。电容电流补偿原理众多,但均需考虑线路高抗的分流,而高抗电流实时估算是个迭代算法,初值问题解决不好会引起很大误差。

智能变电站在采样值组网传输的情况下,线路保护可以在不增加任何接线和设备的情况下通过站内采样值网络引入对应的高抗电流值,无需再用繁琐的迭代算法求取该电流,既简化了保护算法还提高了保护的可靠性。

差动保护需要线路两侧交换信息,可以考虑 2 种方案。其一,各侧均将电感电流和线路电流一并传给对侧,在对侧完成所有算法,需要多传 3 路交流量;其二,各侧都将自身线路电流和电感电流综合后送给对侧。

5 线路故障性质判别

高电压等级输电线路重合于永久性故障可能对机组造成严重损害,甚至威胁系统的稳定运行。近年来许多专家学者提出了多种各样的线路故障性质判别方法,但大多是基于断开相恢复电压特征的^[11,12],算法的适应性有待提高。文献[13]提出利用高压线路并联电抗电流幅值判别线路故障性质,该方法简单有效。但传统变电站中线路保护无法引入高抗电流,算法需在电抗器保护中实现,然后通过接点与线路保护(或断路器保护)的重合闸配合,使得二次接线复杂。

智能变电站采样值组网传输的方式下,线路保护可以通过站内采样值网络方便的采集对应高抗的电流值,利用高抗电流实现线路故障性质的判别。方案简单易行,无需复杂的二次回路,为实现自适应重合闸提供了新的解决思路。

6 结束语

智能变电站全站信息的数字化和信息共享标准化,为改善线路保护性能的新技术提供了可能性。文中所列几点仅为抛砖引玉,线路保护在共享信息的条件下还有许多功能可以优化,智能变电站的发展,必将给保护的功能和原理带来新的变革契机。

参考文献:

- [1] 俞波,杨奇逊,李营,等.同杆并架双回线选相元件研究[J].中国电机工程学报,2003,23(4):38-42.
- [2] 陈福锋,钱国明.基于同杆双回线跨线故障识别的选相方案[J].电力系统自动化,2008,32(6):66-70.
- [3] 刘天斌,张月品.同塔并架线路接地距离保护零序电流补偿系数整定[J].电力系统自动化,2008,32(10):101-103.
- [4] 朱晓彤,郑玉平,张俊洪,等.同杆并架双回线跨线不接地故障的距离保护[J].电力系统自动化,2003,27(19):61-64.
- [5] 赖庆辉,陈福锋,许庆强,等.纵联零序方向元件的特殊问题分析及解决方案[J].电力自动化设备,2010,30(12):88-91.
- [6] 徐振宇,杜兆强,孟岩,等.零、负序方向元件的特殊问题研究[J].电力自动化设备,2008,28(5):21-25.
- [7] 孙文华,袁宇波,黄浩声.一起不同电压同杆双回线纵联零序保护动作分析[J].江苏电机工程,2013,32(6):12-14.
- [8] 兰金波,钱国明,季玮,等.无锡 220 kV 西泾智能变电站关键技术[J].江苏电机工程,2012,31(2):26-29.
- [9] 陈福锋,钱国明,宋国兵.串联电容补偿线路行波差动保护的研究[J].中国电机工程学报,2009,29(28):89-94.
- [10] 苏斌,董新洲,孙元章.适用于特高压输电线路的差动保护分

高性能的新一代母线保护装置研究和应用

王风光¹, 高兆丽², 潘东明², 宣喜文¹

(1.南京南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211102;2. 山东济南供电公司,山东 济南 250022)

摘 要:基于统一、先进的控制保护(UAPC)平台实现,软硬件设计模块化,便于升级维护;采用了新型的面向间隔对象的母线保护设计方法,母线保护的差动构成灵活可靠;分布式母线保护装置同步方案稳定可靠且实时性高;母线保护装置的状态监测技术提高了供电可靠性,降低了检修人员的工作量。

关键词:母线保护;面向对象;分布式;状态监测

中图分类号:TM773

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0037-04

在中国经济高速发展的背景下,电网建设步入飞速发展的时代。母线是电力传输的重要组成部分,母线保护的稳定、安全、可靠直接关系到电力系统的稳定性及供电的可靠性^[1]。微机母线保护现场应用超过 10 年时间,积累了丰富的实际应用经验,南瑞继保电器有限公司结合最新的计算机技术和用户日益复杂的应用需求,研发出了全新一代的母线保护装置,它在继承老一代母线保护优点的基础上,有以下改进:(1) 保护开发平台化、模块化,基于该公司新一代统一、先进的控制保护(UAPC)平台实现,支持使用可视化工具编程,便于升级维护;(2) 模块设计对象化,采用面向间隔对象的母线保护设计方法,母线保护的差动构成灵活可靠;(3) 设备安装灵活化,可满足不同变电站分布式或集中式安装的需求;(4) 状态信息多样化,满足新一代智能变电站继电保护装置状态监测的需求。文中将基于以上 4 点介绍新一代母线保护装置关键技术的研究和应用。

1 UAPC 平台

传统继电保护装置基于单片机开发,一般无操作系统,因此上送信息单一,程序维护复杂。新一代的母线保护装置基于 UAPC 平台开发,具有以下特点。

(1) 结构简单、连接方便:装置硬件结构复杂度低,从而功耗与温度低;插件与背板采用插针,连接简单可靠。高电磁兼容性,抗干扰能力强;

(2) 可扩充性好:采用当今先进的中央处理器(CPU)、数字信号处理器(DSP)、现场可编程门阵列(FPGA)来实现数据处理,运算处理能力强,平台对上层应用提供统一编程接口,维护方便;

(3) 结构清晰,重用性好:模块以功能来划分,模块内数据安全可靠,模块之间数据耦合性低,功能结构划分清晰;

(4) 装置不同板卡之间依托高速数据总线进行通

信,接口统一,数据总线高效、安全可靠;

(5) 适用范围广:除母线保护装置外,线路保护装置、变压器保护装置及稳控装置等一系列保护装置均基于 UAPC 硬件平台开发。

保护装置的平台化开发为不同类型保护装置间的集成提供了便利。新一代智能变电站提出层次化保护的概念,站域保护作为层次化保护的一部分得到推广。站域保护装置集全站的备自投、线路、主变和母差等保护功能于一体,不同类型保护装置之间需要共享电流、电压模拟量,并实时交换开关量信息,以集中分析或分布协同方式判定故障,自动调整动作决策。UAPC 平台数据接口统一,数据总线高效、可靠,在集成站域保护装置中发挥了极大的优势。

2 面向间隔对象的母线保护设计方法

2.1 传统母线保护设计方法介绍

母线保护差动回路包括母线大差回路和各段母线小差回路。母线大差是指除母联开关和分段开关外所有支路电流所构成的差动回路。某段母线的小差是指该段母线上所连接的所有支路(包括母联和分段开关)电流所构成的差动回路。母线大差比率差动用于判别母线区内和区外故障,小差比率差动用于故障母线的选择^[2]。

传统母线保护以母线为对象,在母线主接线确定的基础上,再定义该母线上连接有哪些元件,从而形成母线的大差及各母线的小差^[3]。以主接线形式相对复杂的双母单分段主接线为例,如图 1 所示,母线数量及母线主接线方式固定,母联 1 连接 1、2 母,母联 2 连接 2、3 母,分段连接 1、3 母,间隔 1 和间隔 2 在母线 1 和母线 2 之间切换,间隔 3 和间隔 4 在母线 2 和母线 3 之间切换。间隔 1 到间隔 4 根据各自的刀闸位置决定本间隔电流计入哪条母线差动。大差(DI)及各母线小差(DI_x)的差动构成逻辑如下:

$$DI = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (1)$$

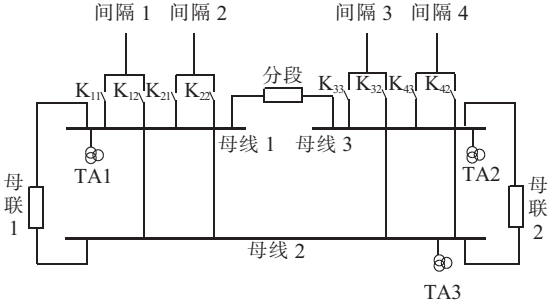


图 1 双母单分段主接线示意图

$$DI_1 = K_{11} \times I_1 + K_{21} \times I_2 + I_{BC1} + I_{FD} \quad (2)$$

$$DI_2 = K_{12} \times I_1 + K_{22} \times I_2 + K_{32} \times I_3 + K_{42} \times I_4 + I_{BC1} + I_{BC2} \quad (3)$$

$$DI_3 = K_{33} \times I_3 + K_{43} \times I_4 + I_{BC2} + I_{FD} \quad (4)$$

其中: K_{xx} 为对应支路刀闸位置, 当刀闸位置闭合, K_{xx} 为 1, 否则为 0。当主接线变成如图 2 所示, 应用于图 1 主接线的母线保护程序就无法适用了。

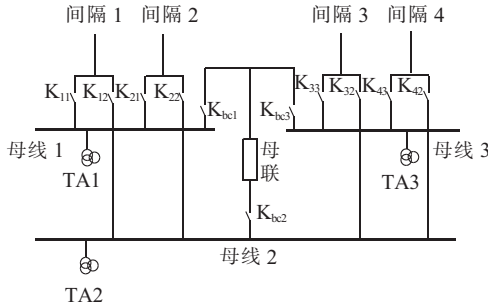


图 2 双母单分段特殊主接线

与图 1 相比, 图 2 虽然只包含一个母联开关, 但是本母联开关可根据刀闸位置来决定本母联电流计入哪条母线差动, 各母线的差动构成逻辑变化如下:

$$DI = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (5)$$

$$DI_1 = K_{11} \times I_1 + K_{21} \times I_2 + I_{BC1} + I_{BC} \quad (6)$$

$$DI_2 = K_{12} \times I_1 + K_{22} \times I_2 + K_{32} \times I_3 + K_{42} \times I_4 + K_{BC2} \times I_{BC} \quad (7)$$

$$DI_3 = K_{33} \times I_3 + K_{43} \times I_4 + K_{BC3} \times I_{BC} \quad (8)$$

由于差动构成逻辑发生变化, 母线保护程序必然需要做出相应改动以适应该特殊主接线, 且修改后的程序也无法满足图 1 主接线的的需求。

综上所述, 以母线为对象的传统母线保护受母线主接线形式的局限性很大, 母线主接线形式稍微发生变化, 保护程序就需要进行相应的改动, 从而无法保证母线保护程序的稳定性。

2.2 面向间隔对象的母线保护设计方法介绍

面向间隔对象的母线保护设计方法 (国家发明专利 CN200910181793.0) 是先确定母线上的各连接元件, 再由保护程序自动构造母线主接线。虽然母线主接线形式千变万化, 但是母线上的连接元件只有可能是母线电压互感器, 母联或分段间隔, 线路或主变间隔,

通过配置文本的形式确定好各连接元件的属性, 再由母线保护程序对元件属性进行解析, 母线主接线即可实现自动构造, 再以母线为对象依照传统的方法完成小差的构成逻辑, 从而实现了母线保护程序不再受制于母线主接线形式的变化。

在上述理论基础上, 设计方法定义了一个通用模型, 此通用模型涵盖了电压互感器、母联或分段间隔、线路或主变间隔的所有属性及开入开出, PCS-915 母线保护程序在此通用模型基础上进行设计以保证母线保护程序的通用性。此通用模型如图 3 所示。

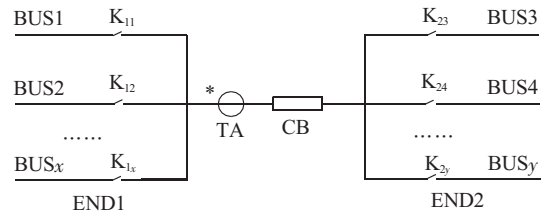


图 3 面向间隔对象的通用模型定义

仍然以图 1 和图 2 主接线为例, 在此通用模型基础上, 图 1 与图 2 主接线的区别只是母线联络开关的数量不同, 支路及各母联刀闸位置定义如表 1 所示 (1, 0 表示该支路刀闸可在母线间进行切换)。

表 1 支路及各母联刀闸位置定义

	BC1	FD	BC2	BC	Fdr11	Fdr2	Fdr3	Fdr4
K ₁₁	1	1	0	1,0	1,0	1,0	0	0
K ₁₂	0	0	1	0	1,0	1,0	1,0	1,0
K ₁₃	0	0	0	1,0	0	0	1,0	1,0
K ₂₁	0	0	0	0	0	0	0	0
K ₂₂	1	0	0	1,0	0	0	0	0
K ₂₃	0	1	1	0	0	0	0	0

大差及各母线小差的差动构成逻辑如下:

$$DI = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (9)$$

$$DI_x = (K_{1x-Fdr1} + K_{2x-Fdr1}) \times I_1 + (K_{1x-Fdr2} + K_{2x-Fdr2}) \times I_2 + (K_{1x-Fdr3} + K_{2x-Fdr3}) \times I_3 + (K_{1x-Fdr4} + K_{2x-Fdr4}) \times I_4 + (K_{1x-Fdr5} + K_{2x-Fdr5}) \times I_5 + (K_{1x-BC1} + K_{2x-BC1}) I_{BC1} + (K_{1x-FD} + K_{2x-FD}) I_{FD} + (K_{1x-BC2} + K_{2x-BC2}) I_{BC2} + (K_{1x-BC} + K_{2x-BC}) I_{BC} \quad (10)$$

其中: K_{1x} 间隔 TA 侧 x 母刀闸位置; K_{2x} 间隔开关侧 x 母刀闸位置。

图 1 主接线无母联开关, 所以 I_{BC} 固定为 0, 图 2 主接线无母联 1、母联 2 和分段开关, 所以 I_{BC1} , I_{BC2} , I_{FD} 固定为 0。通过配置文本修改母联的属性而不需要修改保护程序, 即实现了对图 1 主接线及图 2 主接线的兼容。从而节省了大量的因主接线变化而修改保护程序的时间, 保证了程序的稳定和质量。

3 分布式母线保护

变电站规模的逐渐扩大使母线上的出线数目日益增多,出线间的距离变长。采用集中式母线保护装置将造成二次电缆数量的增多,提高工程造价,且接入间隔数目的增多对母线保护装置的 CPU 处理能力提出了更高的要求。研究面向间隔、分散式安装的分布式母线保护装置成为迫切需要^[4]。

分布式母线保护需要保证主站、子站之间的同步性和实时性,应充分利用各间隔单元的数据处理能力,降低对通讯网络的要求,在简化设备硬件结构、提高母线保护可靠性的同时,为增加母线保护冗余度创造条件^[5]。

分布式母线保护系统采用主从结构,如图 4 所示,图中包含 1 个主站间隔和 4 个子站间隔。主站间隔负责对整个装置的管理如人机界面、通信、录波、打印以及保护逻辑运算功能;子站间隔负责本间隔的采样、跳闸。子站间隔可就地布置,并通过光纤与主站进行点对点通信,实时性高,采用 FPGA 实现硬件通信编码和循环冗余校验(CRC),可靠性高,且不占用保护 CPU 的资源。

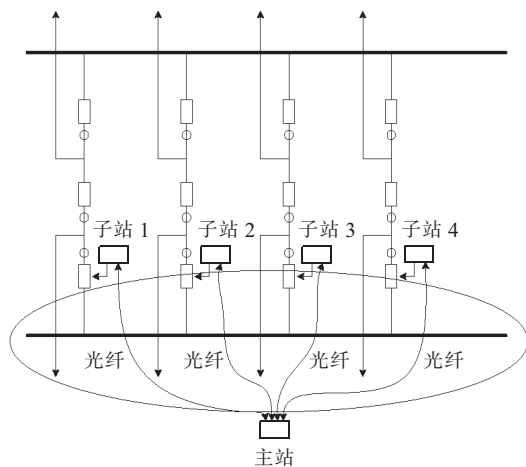


图 4 分布式母线保护系统结构

分布式母线保护装置采用了用于分布式保护系统的时标跟踪的同步采样方法(国家发明专利申请号 201110081966.9),采用此同步技术实现了分散采集分散执行功能,同步算法占用主机和从机计算资源少,无需外接同步源,同步方案稳定可靠且同步精度很高。

此外,分布式母线保护通信链路层完全支持标准协议的电子式互感器标准,只需更换软件便可实现与电子式互感器的对接,满足智能变电站对母线保护装置的需求。

4 母线保护装置状态监测

传统母线保护的检修以人工定检为主,这种检修

方法不可避免会产生“过剩维修”,造成设备有效利用时间的损失,如果因检修失误引发母线误动,将导致变电站损失负荷,并影响电网的安全稳定运行,并且 2 次检修之间装置发生故障不能及时发现。研究保护装置的状态监测技术,实时掌握装置的运行状态并根据装置状态合理安排定检,可减轻检修人员的工作负担并提高供电可靠性和售电量^[6]。

新一代母线保护装置依托于更为强大的微电子、计算机技术和通信网络技术,突破了传统变电站继电保护装置只能发出“正常”或“异常”的状态信息的情况,不仅可以处理和传统变电站继电保护装置相同或类似的基本信息内容,还可以在现有信息传输方式不发生变化的前提下输出一份完整的监视参数状态值报表,该报表包括以下内容:

- (1) 当前时间信息;
- (2) 保护设备所有的自身监视开关量状态;
- (3) 保护设备的电源工作情况,包括 CPU 系统、AD 系统和继电器驱动系统的电源电压值;
- (4) 保护装置内部温度值;
- (5) 保护装置的接收光纤的光强值(智能变电站母线保护提供);
- (6) 过程层网络的统计监视信息(智能变电站母线保护提供);
- (7) 差电流信息。

这份报表可以通过打印的方式进行输出,也可以通过远方系统通过文件服务直接进行读取。

保护装置为以上监视信息设置检修门槛和故障门槛,当达到了检修门槛时,装置发出橙色预警信息,并输出状态参数监视报表,提醒检修人员注意,并提前安排检修计划;当达到了故障门槛时,装置发出红色警告信息,闭锁保护装置^[7]。

智能站的推广使用打破了传统变电站依靠电缆传输模拟量及开关量的方式,取而代之的为 SV 和 GOOSE 网络。应用于智能变电站的母线保护装置接入光纤数量多,任何一根光纤异常都有可能影响母线保护装置的正常运行。

母线保护装置的状态监测功能可以帮助运行人员及时发现母线保护装置异常工况并迅速消除隐患,大大缩短了母线保护的退出运行时间。

5 结束语

新一代母线保护装置继承了老一代母线保护的先进原理与技术,在总结多年运行维护经验的基础上提出并采用了新的原理及技术。相比较老一代母线保护装置,它具有以下优点:(1) 基于先进的 UAPC 硬件平台开发,大大减少了保护程序升级维护工作量,并提

高了同其他类型保护装置的兼容性,满足新一代智能变电站站域保护的需求;(2)采用新型的面向间隔对象的母线保护设计方法,保护装置的适应能力变强,仅需要修改装置配置文件即可适应特殊主接线;(3)分布式母线保护装置使现场保护安装更加灵活;(4)母线保护状态监测技术帮助运行人员实时了解保护装置的运行状态,按需安排保护检修。随着智能变电站的广泛推广和应用,新一代母线保护装置将不断改进完善以更好地服务于电力系统。

参考文献:

- [1] 吕航,王风光,鲍凯鹏. PCS-915 母线保护装置[J]. 电力系统自动化,2012,36(16):118-122.
- [2] 曾铁军,宋艳,侯玉强. 双母接线系统中线路保护、母线保护、线路断路器失灵装置一体化方案的研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(13):77-80.
- [3] 王风光,焦彦军,张新国,等. 一种分布式母线保护的新型通信

方案[J]. 电网技术,2005,29(21):72-74,80.

- [4] 朱林,苏盛,段献忠,等. 基于 IEC 61850 过程总线的分布式母线保护研究[J]. 继电器,2007,35(S1):40-44.
- [5] 邹贵彬,王晓刚,高厚磊,等. 新型数字化变电站分布式母线保护[J]. 电力自动化设备,2010,30(11):94-97.
- [6] 金逸,刘伟,查显光,等. 智能变电站状态监测技术及应用[J]. 江苏电机工程,2012,31(2):12-15.
- [7] 管宜斌,严国平,陈久林,等. 继电保护装置运行失效特性分析与状态检修策略[J]. 江苏电机工程,2013,32(2):1-3.

作者简介:

王风光(1981),男,山东聊城人,工程师,从事电力系统继电保护工作;
高兆丽(1976),女,山东梁山人,工程师,从事电力系统运维工作;
潘东明(1967),男,山东济南人,工程师,从事电力系统运维工作;
宣喜文(1982),男,山西朔州人,助理工程师,从事电力系统继电保护工作。

Generation Busbar Protection Research and Application

WANG Fengguang¹, GAO Zhaoli², PAN Dongming², XUAN Xiwen¹

(1.NanJing Nari-relays Electric Co. Ltd., Nanjing, 211102; 2.Jinan Power Supply Company, Jinan, 250022)

Abstract: The new generation of busbar protection is realized on the unified and advanced UAPC platform, which is with modular-designed hardware and software and convenient for update and maintenance. A new object-oriented interval busbar protection design method is utilized, which makes the configuration of differential section feasible. The synchronization distributed busbar protection devices is with a high-performance on reliability and time. Busbar protection status monitoring technology improves reliability and reduces maintenance personnel's workload.

Key words: busbar protection; object oriented; distributed; status monitoring

(上接第 36 页)

- 布电容电流补偿算法[J]. 电力系统自动化,2005,29(8):36-40.
- [11] 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.
- [12] 朱建红,陈福锋,魏曜,等. 新型同杆双回线自适应重合闸方案研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(4):47-51.
- [13] 索南加乐,孙丹丹,付伟,等. 带并联电抗器输电线路单相自

动重合闸永久性故障的识别原理研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(11):75-81.

作者简介:

申泉(1964),男,江苏南京人,高级工程师,从事电力自动化工作;
高云(1978),男,江苏句容人,工程师,从事电力自动化工作。

Discussion on Protection Optimization for Double Circuit Lines on the Same Tower in Smart Substation

SHEN Quan, GAO Yun

(Guodian Nanjing Automation Co. Ltd., Nanjing 210032, China)

Abstract: Line protection of double circuit lines on the same tower are generally designed with only considering each independent single line. This kind of design sacrifices protection's sensitivity for ensuring its reliability. Based on the principle of independent configuration, the paper proposes an approach that is proposed to optimize the performance of protection for both double circuit lines with sharing the information of two lines through the station communication network. The proposed approach provides solutions for double loop cross line fault phase selection, analyzing the influence of zero sequence mutual inductance, fault distance measurement and distance protection.

Key words: Smart substation, Double circuit lines, Line protection, Information sharing, Fault phase selection

智能变电站图模一体化设计软件实现方案

叶翔¹, 刘辉², 周永忠²

(1.南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102;2.重庆市电力公司,重庆 400015)

摘要:提出一种面向设计的智能变电站图模一体化软件实现方案,通过以智能变电站各一、二次设备为配置对象,通过提供丰富的配置界面,实现智能变电站内从主接线图、装置建模、物理通信连接、虚拟二次回路连接等一整套完整的设计工作;并依托自动计算机辅助设计软件(AutoCAD)二次开发技术,将智能变电站中的配置数据按照用户的需求自动生成各类 AutoCAD 施工图纸。

关键词:IEC 61850;智能变电站;系统配置描述;图模一体;AutoCAD

中图分类号:TM76

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0041-04

智能变电站最核心的技术革新在于使用网络技术代替传统二次接线传递数字和模拟信号,原有直接可观、相互解耦、具象的二次接线由不直接可见、相互高度耦合、抽象的网络数据流代替,并通过 IEC 61850-6 中定义的变电站配置描述(SCL)语言^[1]将全站所有配置信息静态描述在系统配置描述(SCD)文件中,但 SCL 语言基于可扩展标识语言(XML),装置间逻辑关系等配置信息表示得较为晦涩,一般用户很难快速查看和配置智能电子设备(IED)间的逻辑关系。由此,许多基于 IEC 61850 的 SCD 配置软件也应运而生^[2,3],它们部分实现了可视化,对使用者屏蔽了 XML,大大提高了编辑 SCD 文件的效率。目前国内智能变电站系统配置工具多由各生产厂商提供,由担任集成角色设备制造厂商使用,虽已部分实现可视化,但由于功能不完善,且没有充分考虑设计人员的使用习惯,难于向各设计单位推广。随着越来越多的智能变电站投运,并陆续进入运行、维护周期,各网省公司均加大了对智能变电站设计描述方法和运行维护策略的相关研究工作。其中,为设计单位提供符合其使用习惯的配套工具,突出设计单位的设计、集成、配置一体功能显得越来越重要。鉴于此,文中提出一种面向设计的智能变电站图模一体化设计软件实现方案。

1 智能变电站设计需求

1.1 设计现状

在现有的智能变电站建设过程中,其二次设计成果主要包括:系统接线图、屏柜布置图、二次原理图、光缆联系图或表、网络配置图、光缆清册、虚端子联系图或表。其中,系统接线图、屏柜布置图、二次原理图、光缆联系图或表、网络配置图、光缆清册等图纸设计方式和原有的常规变电站基本一致^[4,5]。但由于缺乏配套的设计工具,加之设计人员对 IEC 61850 相关知

识不甚了解,导致目前对于表征系统二次回路交互的虚端子连接关系仍然停留在自动计算机辅助设计软件(AutoCAD)制图、电子表格(EXCEL)制表阶段,不能直接生成 SCD 配置文件,由于依赖集成厂商在后续系统集成工作中将虚端子联系图或表在 SCD 中进行配置,直接导致了重复的配置工作,且无法有效地保证 IEC 61850 模型的一致性。此外,由于虚端子联系图或表一般由设计单位根据设备厂商提供的装置能力描述(ICD)文件单独配置形成,与反映设备物理连接关系的外部光缆联系图相对独立,因此无法有效地建立逻辑回路(虚端子连接)与物理回路(光缆连接)之间的对应关系,直接导致后续调试、运行、维护工作的困难。

1.2 设计要求

理想情况下,设计人员除完成常规的一、二次接线图外,还需要根据各设备厂商提供的 ICD 模型文件及变电站一、二次设备的配置原理完成完整的全站数据模型配置和变电站的数据流连接,并最终生成反映全站模型及逻辑信息交互的 SCD 文件。

完整的设计成果还应反映逻辑回路与物理回路之间的对应关系,具体来说就是某个物理光纤回路中传输的虚端子信号。设计人员要综合考虑物理光纤回路与虚端子连接配置之间的对应关系,改变现有物理回路与逻辑回路单独设计的工作方式,真正做到在设计层面上完善和提升智能变电站的设计深度。

1.3 软件的功能需求

智能变电站图模一体化设计软件需要满足目前智能变电站的设计深度要求,并在充分符合设计人员使用习惯、尽量屏蔽 IEC 61850 模型细节的基础上,着重实现一二次设备对象管理、配置以及 AutoCAD 出图功能。具体包括:

(1) 实现包括小室、屏柜、设备、交换机等在内的二次设备对象建模及各设备对象的创建、修改、删除等维护功能;

(2) 实现包括设备原理信息交互、线缆分配等在内的二次物理通信回路配置功能;

(3) 实现包括虚拟二次回路、逻辑子网、SCD 导入 / 导出在内的 IEC 61850 模型配置功能;

(4) 依托 AutoCAD 环境,实现包括二次原理图、虚端子图、屏柜布置图、光缆联系图、网络配置图、光缆清册等在内的图表生成功能。

2 软件的开发方案

2.1 系统架构

智能变电站图模一体化设计软件旨在为设计人员提供一套实用配置工具软件系统,通过提供专用的配置界面,在完成智能变电站内各一、二次设备对象配置的同时自动生成配套设计图纸,并同时实现 SCD 文件的生成功能。

智能变电站图模一体化设计软件的基本实现原则由“配置”到“出图”,所谓配置是指对智能变电站内的各一、二次设备对象进行数据建模,并在此基础上提供专用的配置界面实现各类一、二次设备对象的配置功能。出图则是指根据智能变电站内各设备对象的配置结果,按照特定的布局原则自动生成 AutoCAD 图纸。

智能变电站图模一体化设计软件首先在系统架构上将配置功能与设计图纸功能进行拆分,即配置功能独立于 AutoCAD,可直接采用各类高级语言开发实现,而与设计图纸相关的功能可通过采用 AutoCAD 平台上面面向对象的开发包(ObjectARX)等二次开发技术,以插件形式嵌套在 AutoCAD 系统中。在此基础上形成的系统架构如图 1 所示,系统由二次配置环境和 AutoCAD 设计环境两部分组成,二次配置环境中主要完成设备对象管理、物理通信配置以及 IEC 61850 模型配置功能,其输出结果为各类报表及 SCD 文件;AutoCAD 设计环节则专注于实现各类设计图纸的生成功能,生成的图纸包括主接线图以及各类二次施工图。二次配置环境和 AutoCAD 设计环境通过专用数据库进行数据交换,在数据库中存储二次配置环境的配置结果,并在 AutoCAD 设计环境中将配置的结果生成导出为各类所需的施工图纸。

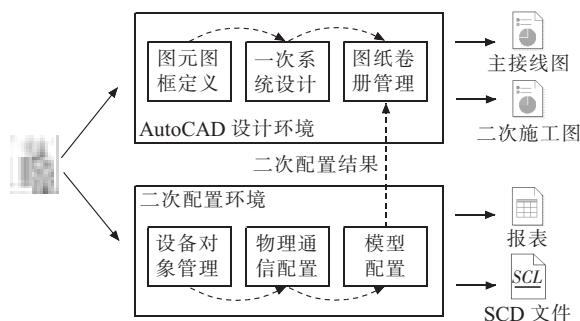


图 1 软件系统架构

2.2 关键技术及难点

2.2.1 AutoCAD 二次开发

AutoCAD 是一种结构高度开放的图形绘制平台软件,提供给用户一个功能强大的二次开发环境。从 AutoCAD R13 版本起,引入了 Object ARX 编程环境,用户可以使用 C++ 来开发 AutoCAD 的应用程序。Object ARX 应用程序与 AutoCAD 在同一地址空间内运行并能直接利用 AutoCAD 的核心数据库和代码,利用 AutoCAD 的开放结构,可以直接访问其数据库结构、图形系统以及 CAD 几何造型核心。由于 Object ARX 具有模块性好、独立性强、连接简单、使用方便、内部功能高效实用、代码可重用性强、支持微软基础类库(MFC)等优点,已愈来愈多地作为 AutoCAD 二次开发的首选。

2.2.2 XML 数据库

在智能变电站的设计应用中,若直接对 XML 文本进行编辑,不利于图形界面的开发,需借助数据库的方式对 XML 数据进行存取和操作,将半结构化数据转化为结构化数据,通过查询数据库来提取,综合和分析 XML 文档的数据。

基于数据库的 XML 存储技术,图形编辑模块和模型编辑模块都能够从数据库中获得需要的信息,如图形编辑模块所需要的扩展属性和模型编辑模块对模型的导入、导出、编辑等各类型操作,但在数据库表的设计上需要充分考虑 IEC 61850 标准的复杂性以及与 AutoCAD 属性结合时的信息耦合,避免从数据库中导出信息时发生信息错误或不完整的情况。

2.2.3 图模一致性

图模一致性的目的在于保证设计人员在完成模型配置、导出符合 IEC 61850 系列标准 SCD 文件的同时,能够自动生成与模型一致的设计图纸用以指导现场的施工调试。

在智能变电站中,装置的 ICD 模型文件反映了装置自身的能力描述,通过对 ICD 文件的建模方式加以规范,则完全可以根据规范化的建模原则建立装置图元。例如,在现有的智能变电站工程实施过程中,要求满足 Q/GDW 396—2009^[6],该标准在一定程度上规范了装置虚端子的描述方式,该规范的修订版本已经上报国网公司,修订版本进一步对装置的物理端口模型进行了规范。

引用或定义各类建模标准、建立标准化的装置模型,是解决图模一致性问题的有效途径。以虚端子为例,标准^[6]规定,以 dsGOOSE 或 dsSV 命名开头的数据集定义装置的输出虚端子,以 GOIN 或 SVIN 开头的逻辑节点中定义了装置的输入虚端子。通过该原则提取出装置的输入 / 输出虚端子,则可以采用图形

化的手段构建出装置的输入/输出端子图元。

2.3 软件实现

2.3.1 功能模块分解

如图2所示,根据系统提供的功能种类的不同,智能变电站图模一体化设计软件分解为项目管理子系统、通信配置子系统、模型配置子系统以及 AutoCAD 子系统,各系统及其进一步的模块划分如下所述。

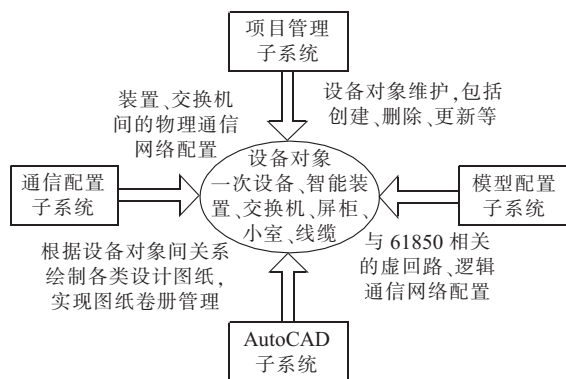


图2 软件系统功能模块

(1) 项目管理子系统。该系统实现工程项目的维护管理功能,并提供对各类设备对象的浏览、创建、删除、修改等维护功能,此外还包括系统设置、用户权限管理、版本管理功能。

① 项目浏览器模块:实现单个工程项目内所有设备对象的浏览功能,并提供针对设备对象的创建、删除、修改的维护功能。

② 用户权限管理模块:实现包括用户创建、删除、修改在内的用户管理功能,并提供用户权限的自定义功能。

③ 装置库管理模块:装置库按照设备装置所属的生产厂商、设备类型、产品型号等,将可被多个工程复用的装置进行分类组织管理。装置库管理模块提供相应配置界面,实现装置库中各类装置的维护管理功能。

(2) 通信配置子系统。该系统实现站内各设备对象的物理通信回路配置浏览功能,并根据配置后的物理通信回路,实现回路间通信线缆的配置管理功能。

① 物理端口连接配置模块:以单个智能装置或交换机为配置对象,根据该设备对象的板卡插件以及物理端口定义,实现该设备对象与站内其他设备对象间的物理端口连接配置。

② 线缆管理模块:根据站内设备对象间的物理端口连接关系,自动生成相应连接线缆,并提供针对线缆类型、长度等属性的修改功能。此外,还应提供包括光纤组缆、光缆拆分、光配端口分配等站内光纤回路的常用维护管理功能。

③ 虚拟局域网(VLAN)配置模块:根据站内设备对象间的物理端口连接关系,并综合考虑设备所属间

隔等情况,自动划分站内 VLAN,并提供相应配置界面允许手动调整 VLAN 划分。

(3) 模型配置子系统。模型配置子系统根据站内智能装置对象的 ICD 模型描述,提供包括虚端子连接配置、端子描述改名、逻辑子网配置在内的与 IEC61850 相关的配置功能,并最终实现 SCD 文件的自动生成。

① 虚端子配置模块:以单个智能装置为配置对象,以接收信号为配置内容,根据智能装置间的物理端口连接关系,自动分析该装置接收端口关联的发送智能装置,建立发送智能装置虚端子信号与该装置接收虚端子信号的关联关系。

② 逻辑子网配置模块:实现 MMS/GOOSE/SMV 逻辑子网的划分,并配置子网内 IP 地址、组播地址等通信参数。

③ SCD 导入/导出模块:SCD 导出将根据站内智能装置对象的 ICD 模型描述,以及相关的虚端子配置、逻辑子网配置,自动生成符合 IEC61850 规范 SCD 文件。

(4) AutoCAD 系统。AutoCAD 系统根据设备对象间的各类配置关系,依托 ObjectARX 二次开发,通过插件形式在 AutoCAD 系统进程中实现各类图纸卷册的绘制、导出及管理功能。

① 图元图框定义模块:实现包括一次设备、二次设备物理背板、端口等在内的自定义图元功能,此外,根据设计出图的需要,实现自定义图框的功能。该模块以单个 AutoCAD 插件实现。

② 图纸卷册管理模块:对站内生成的各类图纸按卷册进行组织管理,提供包括新建、删除、修改等在图纸卷册管理功能。此外,该模块应能读取设备对象间的各类配置关系,根据各类自定义的二次设备图元,按照设计单位要求自动生成各类二次施工图纸。考虑各级设计单位出图的差异性,该模块应能通过模板或其他自定义手段实现不同需求图纸的导出生成功能。该模块以单个 AutoCAD 插件实现。

③ 一次系统设计模块:根据自定义的一次设备图元,绘制系统主接线图,并分析一次设备间的连接关系,自动生成相应的一次设备对象模型。该模块以单个 AutoCAD 插件实现。

2.3.2 数据库实现

智能变电站图模一体化设计软件的数据存储采用开放源码的小型关联式数据库管理系统(MySQL),根据数据应用范围的不同,将数据分为基础数据及工程数据,并采用分数据库的方式将这些数据存储在不同的数据库中。

其中基础数据库用于存储各类与具体工程无关的

且相对固定的基础数据信息,如装置类型、电压等级、用户权限、系统设置、工程模板等,此外基础数据库中还应存储特定工程与下述工程数据库的对应关系。

工程数据库则用于存储与特定工程相关的设计配置数据信息,工程数据库本身亦采用分数据库的方式,将不同工程的设计配置数据存储在不同的数据库中。

智能变电站图模一体化设计软件在启动后首先应读取基础数据库中的数据,初始化系统所需的基础数据信息,检查用户登陆权限,并根据用户选择的具体工程打开与之对应的工程数据库。

3 结束语

进入智能变电站时代,变电站的设计、配置及管理各个环节与传统变电站都有很大的不同。相对传统变电站,智能变电站更加注重统一建模、统一配置、统一管理。但用户仍然保持着传统的使用习惯,这对变电站设计软件提出更高的要求。软件既要充分体现智能变电站的技术特征,又要屏蔽底层复杂的技术细节,能够让用户既能体会到智能化给变电站运行带来的技术优势,又能不改变传统的工作方式和习惯,不增加额外的工作量。针对面向设计的智能变电站图模一体化软件的实现方案,从需求、实现等几个方面进行了阐述,

希望借此能给智能变电站的设计以及配置软件开发者带来一些新的思路,开发出能够满足普通用户需求、更加方便实用的工具软件,推动智能变电站的发展。

参考文献:

- [1] IEC 61850-6: Communication networks and systems in substations – Part 6: Configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs[S].
- [2] 祁忠, 笃峻, 张志学, 等. IEC 61850 SCL 配置工具的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 76-81.
- [3] 陈桥平, 李一泉, 张弛. 面向不同用户的可视化变电站配置语言工具实现方案[J]. 广东电力, 2012, 25(3): 88-92.
- [4] 娄悦, 秦华. 220 kV 西泾智能变电站二次系统设计技术研究[J]. 电力勘测设计, 2011 (2): 61-64.
- [5] 王克祥, 王秀莲, 李响, 等. 智能变电站网络通信引起的二次系统设计变化[J]. 电力勘测设计, 2013 (5): 60-65.
- [6] 国家电网公司. Q/GDW 396—2009 IEC 61850 工程继电保护应用模型[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

作者简介:

- 叶翔(1979),男,湖南湘潭人,工程师,从事电力系统及其自动化专业的应用研究工作;
- 刘辉(1969),男,四川达县人,高级工程师,从事电力系统及其自动化专业的应用研究工作;
- 周永忠(1972),男,甘肃兰州人,工程师,从事电力系统及其自动化专业的应用研究工作。

Implementation of Graph and Model Integration Software for Smart Substation

YE Xiang¹, LIU Hui², ZHOU Yongzhong²

(1. Nanjing NARI-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211100, China;

2. Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400015, China)

Abstract: This paper presents a proposal for the implementation of graph and model integration software for smart substation. The software takes primary and secondary equipment as the configurable objects, provides plenty of user interfaces for configuration, and eventually implements a complete set of design works for smart substation. The functionalities of the software include drawing single line diagram, modeling equipment, physical connection and virtual connection, etc. Additionally, based on the AutoCAD-based development, the software organizes and analyses the configuration data and exports them in various AutoCAD drawings according to user requirements.

Key words: IEC 61850; smart substation; SCD; integration of graphic and model; AutoCAD

下 期 要 目

- 基于直流概率潮流的风电穿透功率极限计算
- 500 kV 线路远方跳闸保护运行分析及改进措施
- 变压器调压区均压环的设计与优化
- 汽轮机通流效率与机组热耗率关系的计算
- 一起直流系统故障引起的新路保护动作分析
- 基于电压补偿原理的避雷器泄漏试验方法研究
- 配电网线路最优分段数算法研究及应用
- 对 2 条线路相机跳闸的保护配置分析
- 新一代继电保护及故障信息管理主站的设计与实现

一种高性能数字化采样新平台的研制

张 吉, 谢 黎, 汪世平
(国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210003)

摘 要:为解决智能变电站数字化装置采样大容量问题,提出一种通用、可配置、高性能装置类平台。此平台采用外设组件互连标准扩展(PCIe)高速总线作为专用采样通道,解决采样瓶颈问题,同时融合直接内存操作(DMA)、低压差分信号(LVDS)等关键技术,提升了整体数据交换能力。实际工程应用表明,该平台能够解决采样大容量及实时数据交换问题,并且使用更方便,应用更广泛,取得了良好的效果。

关键词:外设组件互连标准扩展;直接内存操作;低压差分信号;继电保护平台;一体化

中图分类号:TM76

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0045-04

随着新一代智能变电站的大力推进,继电保护装置数字化、集成化的趋势日益明显,对装置类产品性能的要求越来越高^[1]。GOOSE、采样值(SV)和制造报文规范(MMS)三网合一概念的提出,是对装置类产品平台处理性能的考验,高速、大容量的数据实时采样要求使得传统平台在实时性及数据处理能力上后继乏力。传统的继电保护平台多采用双 CPU 架构或多核架构。双 CPU 架构^[2,3]在数据共享、设备间隔扩展、时钟同步上存在很多技术壁垒,不利于智能变电站的推进和继电保护的发展。多核架构^[4]适合于中低压保护测控装置,成本低、功耗少,但数据采样的实时性和处理能力有限,无法满足大容量、高速数据采样的需求。目前继电保护技术的发展趋势是向网络化、智能化、保护测控一体化、数据通信一体化方向发展,高速数据处理已经成为评价装置类产品重要指标之一^[5,6]。因此需要一种高性能的采样平台,解决高速数据传输、大容量数据采样、保护算法和数据采样同步等问题。文中提出的高性能平台采用外设组件互连标准扩展(PCIe)高速总线技术(传输速度可达 2.5 Gbps)解决了单 CPU 多路、大容量采样数据实时传输问题,并融入了直接内存操作(DMA)技术,使得数据处理更加高效,完全满足三网合一对数据吞吐率的要求;同时将保护采样和保护算法放在一块保护板上实现,提高了 CPU 的利用率,减少了数据传输延时,增强了平台的集成化,是适合于智能变电站推进的高性能数字化采样新平台。

1 高性能平台软硬件架构

该高性能平台软件选择 LINUX 2.6 内核,硬件以高性能处理芯片 P1011 为基础进行扩充,平台总线框图如图 1 所示。

1.1 软件架构

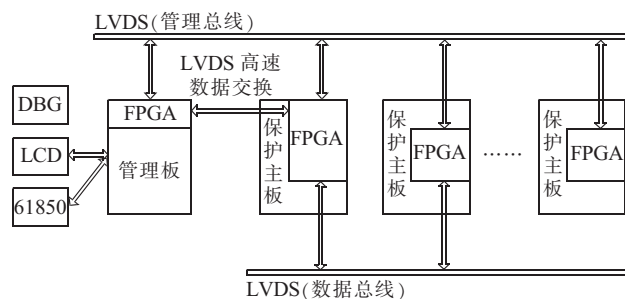


图 1 平台总线框图

软件架构主要采用注册机制,通过管理板统一管理,并随时更新保护主板信息。软件平台作为硬件与应用的接口,设计采用一体化结构,保护程序统一接口,大大提高了保护程序的可移植性。

高速数据交换总线是管理板和保护主板之间实时数据交换的桥梁。管理板负责对外通信、人机接口、运行信息、录波文件、日志管理等功能,信息的调用和获取都需要通过此接口与保护主板进行通信,实时性要求很高。

管理总线负责传送配置信息、注册信息及实时检测等功能,同时采用节点拓扑方式,实时检测是否有新板件加入或原板件移除,以备数据库更新管理。数据总线负责将保护从板信息实时传送给保护主板,由其进行统一管理和逻辑运算,同时保护从板也分担了一些保护主板的运算逻辑,既减少了主板的负担,又降低了数据交换流量。

1.2 硬件架构

新平台保护板硬件上采用一体化平台设计,主从板件硬件统一,兼容性强,且对外接口一致,只需根据工程实际需要进行配置板件数量即可;同时机箱底板硬件采用热插拔技术,可在带电情况下随时插拔板件,与软件架构配合,实现不断电基础上对装置间隔数量进行更改。

现场可编程门阵列(FPGA)在一体化设计上发挥

了重要作用,保护主从板的功能区别通过 FPGA 得以实现。随着其在电力系统中的作用日益加大,高速内部总线、大容量的逻辑门电路,并且集成锁相环,可以对外部时钟进行倍频,主频可达几百兆以上,运算速度快,编程容易,应用灵活,高端 FPGA 芯片内部集成了很多模块,比如串行接口、差分接口、PCIe、介质访问控制层(MAC)等。

保护主从板通过配置不同的 FPGA 程序,实现硬件一体化设计,如图 2 所示。

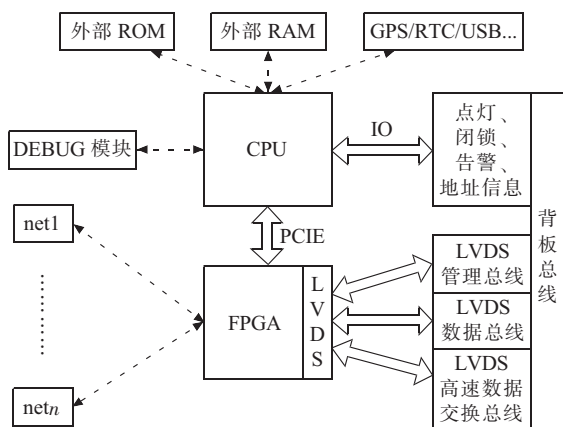


图 2 保护主从板一体化框图

该系统中内部通信主要采用低压差分信号(LVDS)技术,实现开入开出、信号同步等实时性较高的数据传输。LVDS 总线分为发送总线和接收总线,物理上都由一对差分线构成,实现点对点全双工通信,通信速率为 100 Mb/s,其数据交换过程如下。

FPGA 将 LVDS 串行数据经串并转换后写入 FPGA 中的接收缓存区,CPU 通过自身并行总线访问接收缓存区获取接收数据。CPU 通过自身并行总线将要发送的数据写入 FPGA 中的发送缓存区,FPGA 从发送缓存区中取到数据后进行并串转换后通过 LVDS 总线往外发送。其收发过程如图 3 所示。

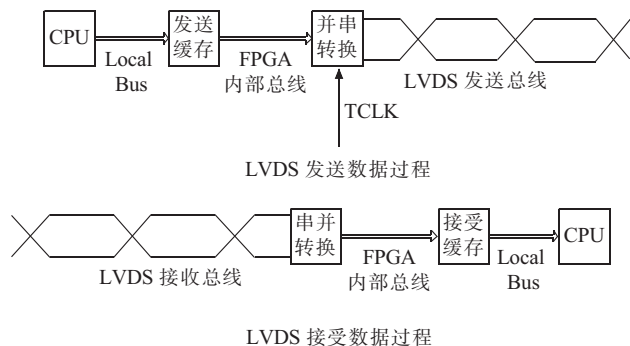


图 3 LVDS 差分信号传送

2 PCIe 高速总线技术

随着现代处理器技术的发展,在互连领域中,使用高速差分总线代替并行总线是大势所趋。与单端并行

信号相比,高速差分信号可以使用更高的时钟频率,使用更少的信号线,完成之前需要许多单端并行数据信号才能达到的总线带宽。

总线结构根本性的变革主要体现在以下两方面:一是有并行总线变位串行总线;二是采用点到点的互连独享带宽。将原并行总线结构中桥下面挂连设备的一条总线变成了一条链路,一条链路可包含一条或多条通路。没有专用的数据、地址、控制和时钟线,总线上各种事务组织成信息包来传送。地址空间、配置机制及软件上均保持与传统 PCI 总线兼容。

PCIe 设备支持 3 种类型的地址空间,分别是存储器、IO 和配置空间。配置成功后,可以直接通过地址对其他设备进行访问,实现数据共享。文中采用 P1011 芯片上的 PCIe 控制器,外接链路一个 Lane,总线规范 1.x,速率 2.5 Gb/s。下面以 LINUX2.6x 为例,介绍其配置过程。

2.1 地址信息传递

LINUX 启动获取板件硬件设备信息是通过设备生成树 DTB 来实现,而 PCIe 空间地址等信息也在其中进行配置,修改 p1011rdb.dtc 中 PCIe 对外空间地址及大小:

```
ranges = <0x2000000 0x0 0xa0000000 0xa0000000
0x0 0x20000000 0x1000000 0x0
0x00000000 0 0xffc30000 0x0 0x10000>;
0xa0000000 代表本板件物理空间
0xa0000000 代表 PCIe 空间地址
0x20000000 代表空间大小
并通过命令:
```

```
dtc -I dts -O dtb p1011rdb.dtc >p1011rdb.dtb
```

生成 dtb 文件,写入指定 ROM 空间,系统启动时将按此配置对 PCIe 进行初始化。

2.2 控制器原理

PCIe 采用数据包传输方式,通过事务层、数据链路层和物理层,将数据报文发送到对端,通常将 PCIe 两端称为源端设备(RC)和终端设备(EP)。在一些复杂系统中,通过桥接芯片可实现 RC 对多个 EP 的访问。

P1011 所提供的 PCIe 控制器,可以更方便地对外设空间地址进行访问。通过配置 Outbound 寄存器可实现 RC 对 EP 的空间直接访问,通过 Inbound 寄存器可让 EP 直接访问 RC 空间。文中将 CPU 侧作为 RC 端,配置 Inbound。

Inbound 包括 3 个基本参数,由于 EP 无法对 RC 进行扫描,故此 RC 端需手动对 Inbound 所有参数进行配置,并要知道 EP 所有配置的 PCIe 空间地址,因此在编写程序前将所有空间进行分配好,统一管理,防止重叠。

PEXITAR:配置本板物理空间地址。

PEXIWBAR:配置 PCIe 虚拟空间地址。与 EP 访问的 PCIe 空间地址相对应。

PEXIWBEAR:Inbound 属性。被访问的大小不能超过 EP 的 Outbound 空间大小,尤其多个 EP 出现后,要对空间地址及大小严格控制。

该平台 CPU 作为 RC 侧,首先对 EP 端进行扫描获取 EP 信息,之后对控制器进行初始化,将配置信息通过配置空间地址写入 EP 端,建立连接。

2.3 提高 PCIe 访问空间速度

UBOOT 启动后初始化 PCIe 接口,建立与 EP 连接的高速通道,同时预留一片 DDR3 空间作为 EP 的访问空间,在传递给内核参数时保留此物理地址,使其不被 MMU 管理,这样 RC 与 EP 之间即可在此物理空间内进行实时数据交换。而在内核驱动中将 PCIe 操作部分删除,重新编写驱动程序,直接访问物理空间,减少中间环节,大大提高了对总线操作效率。

2.4 信号质量采集

测量高速差分信号线噪音,保持良好的信号质量十分重要,文中采用 Lecroy 的高速示波器 SDA 系列,带宽 6 GHz,采样率为 40 GHz;探头 wave-link D620,带宽为 6 GHz。常温下,同步时钟,预加重-3.5dB,取靠近 CPU 侧的引脚,基于 PCIe1.x-RX 眼图模板的眼图测试结果如图 4 所示。可以看出眼图质量很好:眼图比较对称、眼线很细、消光比适中、Q 因子很高。



图 4 PCIe 效果眼图

3 DMA 技术

DMA 是现代 CPU 的重要特色,可对不同速度的外设进行访问,而不需要依于 CPU 的大量中断负载。DMA 传输是将数据从一个地址空间复制到另外一个地址空间,而 PCIe 就是对外设空间的直接访问,将两者融合后,大大提升 CPU 与外设的交换速度,充分利用高速总线,如图 5 所示。

此平台 CPU 内部包含四路 DMA 控制器,采用其中一路作为高速数据传输。当启动 DMA 时,CPU 将系统总线控制权交给 DMA,建立 DDR3 控制器与 PCIe 之间的高速通道,完成数据交换后,DMA 控制器立即将系统总线控制权交给 CPU。

手动控制此过程会增加 CPU 负荷,因此采用链式 DMA 方式,将收发缓冲区按链式指针模式做成环形结

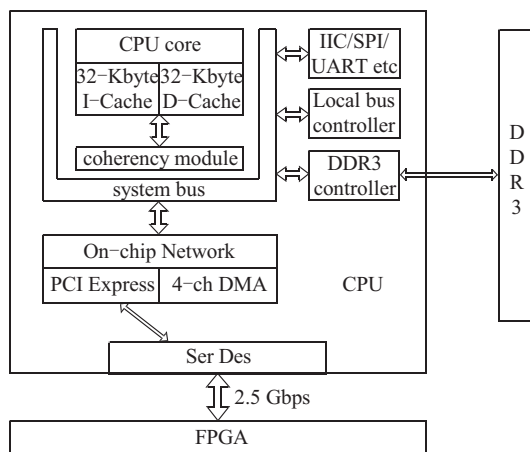


图 5 DMA&PCIe 传输框图

构,只需将待处理数据放入缓冲区,由 DMA 控制器和 CPU 之间自行协商,完成传输过程,提高了程序处理效率。

DMA 技术的引入,不仅提高了总线带宽利用率,还节省了 CPU 负荷,大大增强了平台的数据吞吐能力,实现高速数据的传输。

4 平台性能验证

采用此平台研发的装置顺利通过了国网就地化测试和六统一测试。高速的总线技术、强大的 CPU 处理能力,使 GOOSE、SV 数据共网得以实现,并顺利通过了新一代智能变电站的三网合一测试。尤其在网络风暴测试中,性能体现优越,过程层 8 个共网口接收报文的流量分别可达百兆,处理 800 Mb/s 流量报文的同时,还能正确处理 GOOSE、SV 的有效报文数据,且在此情况下 CPU 的负荷率远远没有达到此平台处理能力的上限,充足证明了此高性能平台的优越性。

基于此平台的保护、测控及数字化装置,已成功应用于现场并已投运,处理能力强、吞吐率高、运行稳定,取得了用户的一致好评。以合并单元装置为例,测试平台采样速率及处理能力如图 6 所示。

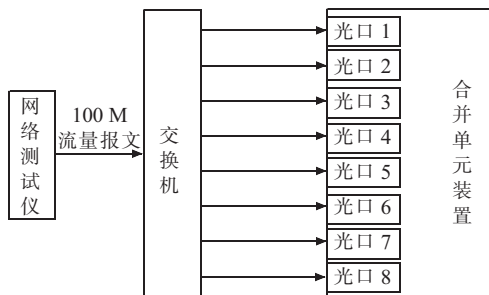


图 6 采集数据测试框图及数据

网络测试仪发送 100 M 流量报文,报文字长 100 字节,发送报文总数为 48 065 480。经测试,8 个光口接收报文总数为 48 065 480 个,丢包率为 0,吞吐率达到 800 Mb/s,达到测试目的。

5 结束语

采用高频差分总线,提高平台数据吞吐能力,是继电保护的发展趋势,文中所提出的高性能采样新平台有以下几大优势:采样容量大幅提升,PCIe技术的引入,使得网络吞吐能力大大加强,同时LVDS高速总线又使数据的实时交互上不存在瓶颈,可满足GOOSE、SV共网等大容量数据吞吐需求;处理速度提高,CPU主频达800 MHz,并支持硬件双精度浮点运算,大大提升保护逻辑处理能力,同时外部采用DDR3存储芯片,使平台整体性能大幅增强;集成化强,平台软件的注册机制可将各保护功能相互隔离,互不干扰,实现不同保护功能共存于同一台装置中,满足集成化的需求;扩展性能好。热插拔技术及软硬件一体化机制的引入,使装置平台对应用间隔的扩展可在线实现,平台的软件设计采用实时注册机制,增加间隔单元只需将配置好的保护从板插入机箱任意插槽,保护从板会向保护主板主动进行注册信息,方便快捷的融入系统;成本降低。由于高速总线的引入,使得板件可配光口数目得到提升,单板可同时处理组网口的最大数可达8个,大大减少板件数量,降低了装置整体功耗。PCIe总线技术和DMA技术的引入,无疑会给继电保护行业

带来一场新的变革;同时,保护主板和保护从板的软硬件一体化设计,可在线实现更改间隔数量,也紧跟着智能变电站发展的步伐。

参考文献:

- [1] 国家电网公司. Q/GDW 393—2009 110(66)kV~220 kV 智能变电站设计规范[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [2] 王海燕,徐云燕. 一种基于DSP+MPC的数字化保护测装置[J]. 电力系统自动化,2010,34(9):112-114.
- [3] 彭志强,张小易,高磊,等. 智能变电站二次系统双重化配置技术应用分析. 江苏电机工程,2012,31(4):34-39.
- [4] 周华良,夏雨,汪世平,等. 多核处理器在中低压保护测控一体化装置中的应用[J]. 电力系统自动化,2011,35(24):84-87.
- [5] 李响,刘国伟,冯亚东,等. 新一代控制保护系统通用硬件平台设计与应用[J]. 电力系统自动化,2012,36(14):52-55.
- [6] 张小飞,李佩娟,王洁松,等. 智能变电站网络应用及测试技术研究. 江苏电机工程,2012,31(4):34-39.

作者简介:

张吉(1979),男,吉林白城人,工程师,从事电力系统嵌入式平台研究工作;

谢黎(1978),男,湖南涟源人,工程师,从事电力系统自动化设备硬件开发工作;

汪世平(1980),男,湖北英山人,工程师,从事电力系统自动化设备硬件开发工作。

Design of a New High Performance Digital Sample Platform

ZHANG Ji, XIE Li, WANG Shiping

(NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: A generic, configurable and high-performance device platform is developed for large capacity sampling of the smart substation digital device. This platform solves the sampling bottleneck problem by using PCIe bus as a special sampling channel, and greatly enhance the overall data exchange capability through the key technology of DMA and LVDS. Engineering application shows that the platform is effective and convenient in large capacity sampling and real-time data exchange.

Key words: PCIe; DMA; LVDS; relay protection platform; integration

为“智慧苏电”开启智能电网钥匙喝彩

最近,国网江苏省电力公司宣布正式启动“智慧苏电·幸福民生”优质服务主题活动,承诺实施五大专题、二十条服务举措,细化、量化了具体的服务目标,举力开启“智能电网”的钥匙,奋力扛起“责任表率央企”的大旗。智能电网就是电网的智能化,它建立在集成的、高速双向通信网络的基础上,通过先进的传感和测量技术、先进的设备技术、先进的控制方法以及先进的决策支持系统技术的应用,实现电网的可靠、安全、经济、高效、环境友好和使用安全的目标。江苏公司的“智慧苏电·幸福民生”优质服务主题活动的内容,共分五大专题,分别是:群众满意在电力、业扩直通助发展、节能环保净蓝天、七彩供电靓青奥、智能互动享便捷。江苏公司的“智慧苏电”这一优质服务主题活动,正是在智能电网大旗下,紧密联系,融入其中,以服务好民生为最终落脚点,不断提升精益化管理水平和智能化服务手段,进一步提高供电能力和供电质量,从而实现规范服务向精细服务、共性服务向个性服务、单向服务向互动服务的大跨越,进而力求服务响应协同快捷,服务手段丰富多样,服务管控实时高效。

摘自《江苏电力信息网》

配网抢修移动应用系统的设计与实现

胡扬波, 王成现, 袁 杰

(江苏电力信息技术有限公司, 江苏 南京 210024)

摘 要:配网抢修效率与供电可靠性直接相关,设计并实现了一种配网抢修移动应用系统。基于移动互联技术,该系统能实现抢修人员移动客户端与主站端的数据实时共享和同步,从而克服传统管理系统的缺点。试用情况表明该系统能有效提高故障抢修效率和保证数据的正确性。

关键词:配网抢修;移动互联;数据完整性;数据一致性;供电可靠性

中图分类号: TM73

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)03-0049-04

随着电力系统的发展,配电系统可靠性已越来越引起人们的重视。配电系统直接与用户相连,是电力系统向用户供应电能和分配电能的重要环节。中压配电网覆盖每条街道,再通过低压配电网延伸至每个用电客户,一旦配电系统或设备发生故障或进行检修、试验,就会造成系统对用户供电的中断,给工、农业生产和人民生活造成不同程度的损失。据不完全统计,我国用户停电故障中的80%是由于配电网故障引起的。因此,如何提高配电网供电可靠性水平具有重要的实际意义。配网抢修速度的快慢,直接影响供电可靠性,因此提高配网抢修效率尤为迫切和重要。

1 现有配网抢修管理系统存在的问题

配网抢修包括故障定位、故障研判和故障处理等子任务^[1]。已有的配网抢修管理系统通过集成地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)、过程管理系统等技术模块,能实现对抢修流程的有效管理^[2-5]。然而,这些系统也存在很多问题,典型的主要有以下几点:

(1) 一线检修人员在现场检修过程中无法与主站人员进行有效沟通,缺乏必要的智力决策支持。大多数情况下现场检修人员只能凭自身经验和现场信息进行工作,虽然能与主站工作人员进行语音交流,但由于语言自身描述的局限性,导致主站人员无法准确了解现场情况,从而也无法给予有针对性的指导和信息支持,而这在一定程度上影响了检修工作的顺利完成。

(2) 一线检修人员在现场支持数据不足,导致判断准确率下降。检修人员只能携带诸如线路拓扑图、设备台账等有限的纸质资料赶往现场,而现场情况多种多样,当需要更丰富的信息支持判断时,有限的纸质资料无法满足需求。

(3) 数据准确性、完整性和一致性无法保证,导致数据价值下降。检修人员检修完成后需要进行记录

存档,而事后的记录与现场数据和信息存在遗漏和不一致的隐患,不准确的数据导致数据的价值大大降低。

基于此,文中使用最新的移动互联网技术,以手持式终端为载体,设计并实现了一种配网抢修移动应用系统。该系统一方面将PC端的配网抢修管理系统移植到移动终端上,另一方面结合移动互联的特点集成了一些诸如故障拍照、移动视频等特色功能,实现对配网抢修更有效的管理。基于移动互联技术,该系统提供对主站的实时图像、数据的上传和下载功能,从而允许检修人员与主站人员进行实时准确沟通及数据交换,能实时提供给现场检修人员更丰富的资料,提高了判断准确率和检修效率,同时也保证了数据的准确、完整和一致性。

2 移动互联网技术与发展现状

移动互联网是指基于移动通信技术与互联网技术所生产的设备与提供的服务。近两年,移动互联网成为信息产业中飞速发展的领域,其技术主要来源于无线网络技术和终端计算技术的发展。3G、4G、Wifi等无线通信技术的发展,无线传输速率大幅提升,数据业务可以随时随地传输。网速提升的深层意义在于把互联网云端的计算能力延伸到了移动终端,终端把复杂的计算处理任务交给云端的服务器处理,自己只需要进行显示与简单的数据交互。而终端计算技术的提升主要体现在两方面:一方面,智能终端产品形式(手机、平板电脑等)的多样化,CPU、内存等计算部件的指标不断抬升,满足了用户多种用途的需要;另一方面,触摸屏、传感器、定位系统等设备植入终端,丰富了终端的功能、改善了用户的使用体验。

随着移动互联网的发展,企业移动应用也蓬勃发展。企业移动应用可以分为两类:第一类是面向客户的,客户可以随时随地浏览企业的所有公开信息并使用企业提供的移动服务;第二类是企业内部业务管理系统的移动端迁移,主要面向企业内部工作人员。文中提出的方案就是属于这类应用。

3 配网移动抢修方案设计

3.1 配网抢修业务

配网具体的流程如图 1 所示。图中单线长方框表示主要业务过程,带左右边线的长方框表示预定义的过程组,带弧线的框表示输入或输出的单据信息,普通平行四边形表示输入或输出的数据信息。

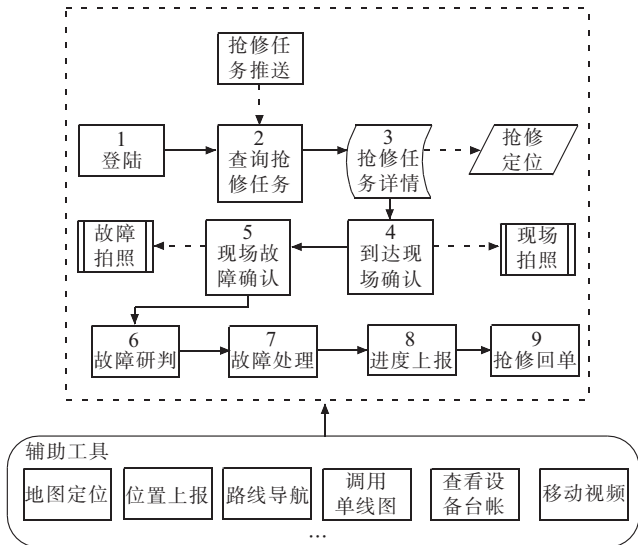


图 1 配网抢修业务流程

抢修人员首先在移动终端上登陆系统,查询任务和详情,接受任务后赶到现场,进行现场确认(包括到达现场确认和现场故障确认)后对故障进行研判,根据研判结果进行抢修处理,处理完后或在处理过程中上报进度,最后进行回单归档工作。在抢修过程中需大量数据支持,如 GIS、GPS 与导航系统、单线图、设备台账、视频等。

3.2 总体架构

方案的总体架构如图 2 所示。配电抢修移动业务应用系统功能主要分为抢修作业和辅助工具 2 个逻辑部分。抢修作业是指每个抢修人员在抢修过程中都必须使用到的功能集合;而辅助工具部分主要提供了抢修过程中的辅助工具。通过这些工具,抢修人员可以实现现场无纸化办公。抢修作业部分包括接收工单、到达现场确认、现场故障确认、抢修进度确认和抢修回单管理。辅助工具包括地图定位、单线图应用、故障拍照、位置上报、设备台账查询和设备台账明细管理。

配电抢修移动业务应用系统依赖于移动作业支撑平台和安全接入平台提供的各种基础功能,如终端设备管理和传输信息安全加密管理等。移动作业支撑平台依赖于国网移动开发平台和安全接入平台实现数据的跨网络传输,实现对各种移动业务的管理和支撑,包括会话管理、业务路由、消息推送、文件传输、档案管理、应用管理、设备管理、配置管理等。而安全接入平台

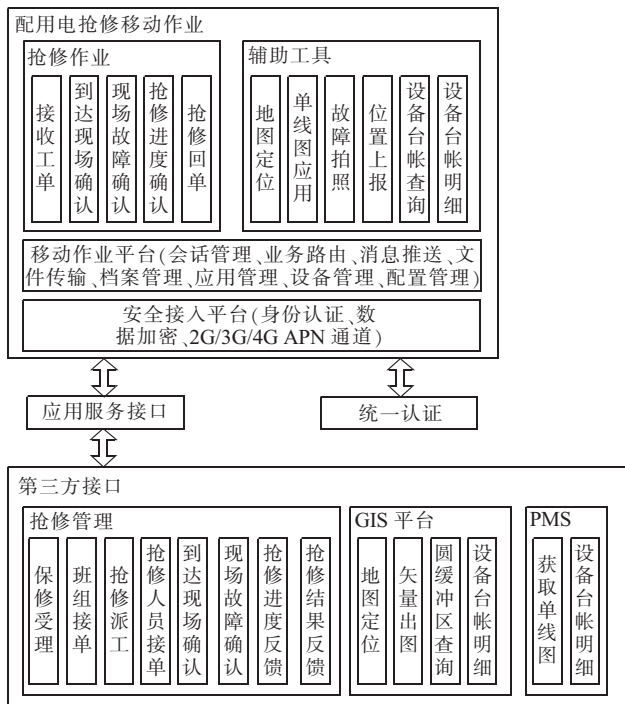


图 2 系统总体架构

负责各种安全事务的包装与处理,包括身份认证、数据加密、移动接入点(APN)传输通道等。

配电抢修移动业务应用系统通过 Web Service 方式实现与第三方系统(包括移动抢修桌面系统及 GIS、生产管理系统(PMS))的信息交互。

3.3 部署架构

系统的部署架构如图 3 所示。部署架构大致可以分成 3 层:电力内网层、接入网络层和无线运营商网络层。电力内网又可分成业务系统、业务接口、存储服务器、应用与通信服务器等 4 个部分,各部分间用防火墙隔开。接入网络将内网与移动 3G 外网相连,而无线运营商网络提供智能手机、平板电脑等智能终端的无线接入功能。系统采用 C/S 结构,主要有以下特点:

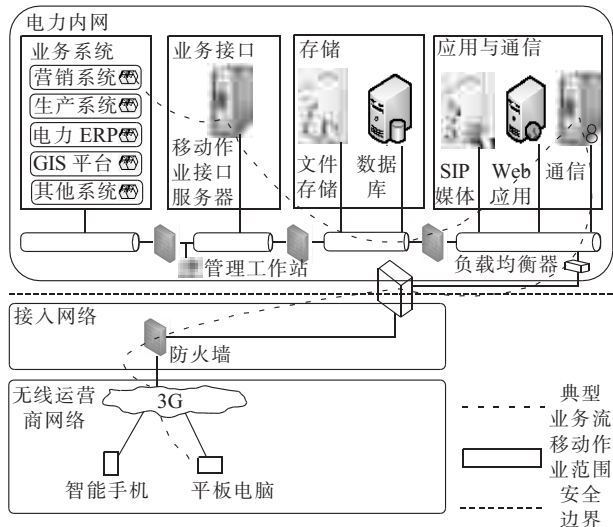


图 3 系统部署架构

(1) 从网络及基础应用层到身份识别与控制、安全通道传输、数据加密等安全防护功能,与业务应用层剥离。分层清楚,耦合度低,可扩充和可移植性好,便于资源复用。

(2) 基本网络使用基于通用分组无线服务技术(GPRS)的APN接入网络,在逻辑层专网专用。通过APN接入网络,移动设备能与主站实时交换数据,实现信息共享。

(3) 在APN网络基础上,采用高级数据标准(AES)数据加密和安全套接层(SSL)通信加密,解决了数据在传输过程安全问题,有效保证了企业商业安全。

(4) 对接入设备进行客户识别模块(SIM)接入点控制,其他未经授权设备在移动网络侧无法通过控制验证,从权限上保证数据安全。对于设备身份采用安全TF卡作为识别信息,配合后台支持平台进行注册登记,做到设备级接入授权。

(5) 设备本地存储数据采用证书加密,在未经服务授权时不可访问和使用,进一步保证数据安全。

上述架构特点由移动业务运营支撑平台、国网移动开发平台和安全接入平台保证,配电抢修移动业务系统只保证业务功能的实现。

4 关键技术实施

系统的设计和实施主要坚持以下几个原则:先进性、开放性与标准化、可扩展性和灵活性以及可执行性和实用性。整个系统使用基于JAVA的技术,保证了系统对硬件平台、操作系统的兼容性;系统使用数据访问中间件,保证了系统对各种不同数据库的兼容性;基于可扩展标记语言(XML)技术的统一数据交换标准保证了系统平台与其他应用系统之间能轻松地进行连接。系统提供了一整套的安全保障措施,为系统的可靠运行提供保证。系统提供了对网络、服务器、数据库性能的监控和故障恢复策略,保证系统物理层的高度可靠。另外,配电抢修移动业务应用系统通过Web Service接口的方式和桌面端故障抢修进行数据集成。

4.1 单线图实现方案

(1) 通过PMS线路ID获取到对应的可缩放矢量图形(SVG)文件或XML文件的通用惟一识别码(UUID),UUID为单线图的唯一标识;

(2) 将获取到的UUID拼接成如下统一资源定位符(URL):

```
http://172.16.1.225:8081/robocop-web/fileDownUp/ ac -  
tion.do?method=fileDownload&sysCode=scgl&sysKey=  
scgl&uId = f9b44c27-0a7a-4888-bc5b-c7bf22fb7621&  
pubNumber=0;
```

(3) 通过以上的URL获得一个解密后的URL,

根据该URL分别下载SVG文件和XML文件。SVG文件包含单线图的图形信息,XML文件包含单线图的设备信息;

(4) 后台将XML信息根据SVG文件规范,统一写入SVG文件,形成包含设备信息的单线图SCVG文件,并传输给终端;

(5) 终端使用WebView功能展示单线图,并且捕获用户的动作,实现相关设备信息的互动。

4.2 GIS地图实现方案

GIS地图是根据抢修现场所在位置画出该地点附近地图以及显示地图范围内设备情况。实现方案分为以下5步:

(1) 使用GPRS定位系统获取当前终端所在的位置,在地图上以显著标记点进行标记;

(2) 根据PMS设备类型和PMS设备逻辑ID,获取设备的坐标信息(GML信息);

(3) 根据设备类型计算定位的坐标信息(如是线路,坐标信息不是一个点,需要计算);

(4) 根据计算得到的坐标信息和比例尺信息,获取图片的URL地址;

(5) 根据获取图片的URL地址,获取图片信息;

(6) 在移动终端上根据图片信息和设备坐标信息,画出对应的图形。

4.3 设备台账实现方案

设备台账用于获取某一设备附近所有设备的多粒度台账信息。分3步进行实施:

(1) 根据设备或其他信息获取地理位置坐标;

(2) 根据地理位置坐标,范围半径获取该设备范围内的设备信息(包括设备ID、设备名称、设备类型)。

(3) 根据用户请求向其提供更细粒度台账信息。

4.4 无线通信方案

配电抢修移动业务应用系统依托于移动业务运行支撑平台,该平台同时依赖于移动开发平台和安全接入平台。移动业务运行支撑平台使用APN无线通信技术,使用接入点名称,并提供用户名、密码等多重安全认证。将移动终端的数据传输到安全接入平台服务器,再通过跨安全区传输技术,将业务数据传输至内网服务器。

4.5 移动终端开发技术实施

当前有2种移动终端开发技术:移动应用程序(App)和HTML5。HTML5开发的应用具有很好的跨平台支持性能,HTML5的Web方案,对开发者来说更为方便。完成一次开发,即可多平台使用。但是在原始App里可以开发出更丰富的功能,拥有更好的效率性能。基于HTML和原始APP的开发模式各有优缺点,该方案在平台模块功能上采用HTML开发为主,辅助

本地 App 的混合开发模式进行开发,这样既可以最大限度屏蔽设备和操作系统差异性,降低开发成本,又可使应用程序界面效果和运行效率保持在较佳的水平。

在终端模块开发中,遵循分层的开发模式。分成三层:UI 层、移动中间层和终端系统。UI 层负责页面布局,可自行实现或使用现有框架,文中使用第三方框架 jQueryMobile。移动中间件处于 UI 层和终端系统之间,封装各系统差异,提供统一的 JavaScript 接口,操作系统资源。文中使用 PhoneGap 作为中间件框架,它是当前一种主流的中间件框架,在开发中可以为项目开发提供优秀的支持。终端系统处于整个应用的最底层,方案实施过程中在终端系统中扩展功能,以插件形式提供给中间件,供开发人员调用,从而达到组件化开发,提高复用性和项目开发效率。

5 配网移动抢修方案实现

基于以上架构和关键技术实施方案,开发实现了配网抢修移动应用系统。系统对移动客户端的要求如下:处理器 1G×2,内存 1G,屏幕尺寸 7.0 英寸(分辨率 1024×600),网络制式 3G 或 4G,操作系统版本 Android4.0+,当前测试终端为三星 PAD。客户端应用系统界面分为三部分:标题区、工作区、进度显示区。标题区位于屏幕顶端第一行,进度显示区位于屏幕底部最后一行,中间部分为工作区。进度显示区当前进度用红色矩形表示。用户也即抢修人员主要在工作区进行操作。主要实现了几类场景。场景 1 是抢修人员接受抢修任务。由主站发来的工单信息有单号、时间、故障位置、客户情况等信息。抢修人员可以接受或退回,系统还能对故障点进行导航。场景 2 是抢修人员到达现场后拍照确认的情况。抢修人员到达现场后对现场进行拍照,并附以备注信息,经 GPRS 无线网络上传给主站,这样主站人员就能把握现场情况并能提出一定的故障处理建议。场景 3 是故障排除后的回单情况。故障排除后抢修人员填写必要的信息并回传给主站,这样能保证数据的准确、一致和完整性。场景 4 是主站信息

系统信息接收情况。主站系统实时接收抢修人员回传的抢修现场图像,从而管理人员和一线抢修人员能进行充分的交流沟通,进而能提高故障研判的准确性和故障处理的效率。

6 结束语

传统的配网抢修管理系统只能对抢修中涉及到的物资台账和抢修流程进行静态管理,无法实现抢修人员与主站工作人员的动态实时交互,也无法在一线抢修人员的现场抢修工作中发挥积极的数据支撑作用,甚至会引入错误和不完整的数据。而文中设计和实现的配网抢修移动应用系统能克服传统管理系统的不足,通过基于移动通信技术的移动终端,能实现与主站的实时数据交换功能,这样在现场数据和主站数据的支撑下,结合主站人员和现场抢修人员的经验知识进行故障研判和处理,大大提高了判断的准确率和故障处理的效率,同时还能保证数据的完整性、实时性和一致性。实际应用情况表明该系统极大地提高了配网抢修的效率,保证了供电可靠性。

参考文献:

- [1] 周同梅,范炜豪. 标准化作业在配电网快速抢修系统中的应用[J]. 中国电力教育,2011,36(3):26-30.
- [2] 袁仲雄. 基于模糊评判法的配网抢修模型[J]. 华东电力,2011,39(2):249-253.
- [3] 周 静,庞腊成,叶卫华,等. 基于信息化平台的配网故障抢修资源智能调度[J]. 电子与封装,2012,12(11):45-48.
- [4] 王 倩,吕 林. 快速排序的 Dijkstra 算法在配网抢修路径中的应用[J]. 四川电力技术,2008,31(2):1-34.
- [5] 蒋锦霞,庄晓丹,梅 峰. 配网生产抢修指挥平台设计及应用[J]. 电力信息化,2013,11(5):57-60.

作者简介:

胡扬波(1964),男,江苏无锡人,高级工程师,从事企业信息化工作;

王成现(1970),男,江苏淮安人,高级工程师,从事企业信息化工作;

袁 杰(1981),男,湖北麻城人,工程师,从事企业信息化工作。

Design and Realization of a Mobile Application System for Electric Distribution Network Rush Repair

HU Yangbo, WANG Chengxian, YUAN Jie

(Jiangsu Electric Power Information Technology Co. Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: The productivity of electric distribution network rush repair is directly related to the reliability of power supply. In this paper, a mobile application system for electric distribution network rush repair is designed and realized. Based on mobile Internet technology, the system provides the service of sharing information between repairing workers and engineers in the master office which can overcome the shortcomings of traditional management systems. Application shows that the proposed system can increase repairing efficiency significantly and guarantee data accuracy.

Key words: electric distribution network rush repair; mobile internet; data integrity; data consistency; power supply reliability

电网设备系统检修策略

汤宗亮¹, 衡思坤¹, 韦海荣²

(1.连云港供电公司,江苏 连云港 222000;2.南京导纳能科技有限公司,江苏 南京 210028)

摘 要:随着输变电设备制造工艺水平的提高和电网设备在线监测技术的日益进步,电网公司的设备检修方式正在由定期检修向状态检修过渡。文中提出了包含电气设备和回路在内的电网设备系统性状态评价方法和检修策略,,并通过工程实例证明了系统检修策略的实用性,基于系统和用户观点考虑的检修策略更加有利于电网企业成本控制和供电可靠性的提高。

关键词:系统;回路;检修策略;状态评价

中图分类号:TM73

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0053-03

电网设备检修方式经历了故障检修、定期检修和状态检修 3 个阶段^[1]。故障检修是根据设备故障报修开展的,是一种失度检修方式。定期检修是基于保守的运行经验和设备使用说明书开展的,是一种过度检修方式。随着在线监测技术的发展和输变电设备制造工艺水平的提高,状态检修方式正在国内外逐步推广。但是目前状态检修仅考虑设备自身的状况,没有充分考虑设备检修对电网系统以及用电客户的影响。因此,设备检修方式需要继续向系统状态检修和面向客户的检修方式迈进^[2]。文中提出输变电设备系统检修策略,重点研究单一设备的状态检修如何向面向客户的系统状态检修过渡。

1 系统状态信息收集

1.1 系统状态信息收集模型

系统状态检修的核心是系统状态评价,而系统状态评价的基础是系统状态信息收集。输变电系统状态信息收集是一个包含管理和技术手段的系统性工程。系统状态信息收集模型如图 1 所示。

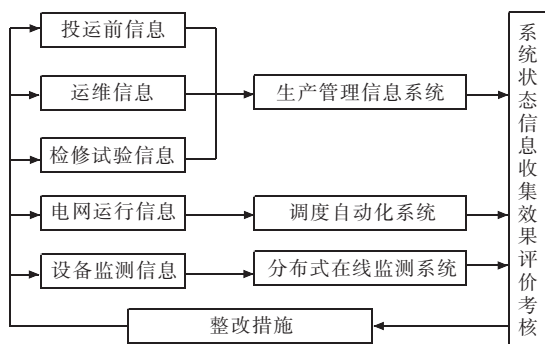


图 1 电网系统状态信息收集模型

1.2 系统状态信息特性分析

基于对某 2000 MW 负荷的地区电网近 10 年来的运行情况和设备缺陷状况分析来看,输变电系统状

态信息有以下几个特点:(1) 系统状态信息包括设备和电网的运行状况;(2) 系统状态量的影响程度不同地区不尽相同;(3) 系统状态信息是时间函数,状态量的变化趋势往往比状态量本身的数值更为重要。

2 系统状态评价

在系统状态信息收集的同时开展系统状态评价。系统状态评价分为单一设备状态评价、回路状态评价和系统状态评价 3 个阶段。状态评价结果分为正常状态、注意状态、异常状态和严重状态^[3]。当评价量化值达到特定区间时,即认为评价结果为某种状态。

2.1 单一设备的状态评价

单一设备的状态评价由设备部件的状态评价构成。当设备各部件的状态量化值达到特定的区间时,则认为设备为某一状态。对一些状态信息量化值没有达到限值但明显差异的,有专门的评价方法。评价结果反应设备整体及所属部件的最严重状态。不同类型的设备应制定不同的评价方法。

2.2 回路的状态评价

单一设备状态评价结束后,进行设备所在的回路状态评价。定义实现同一功能且相互影响的设备群组成一个回路。常见的回路包括母线回路、变电回路和输电回路,见图(2—4)。

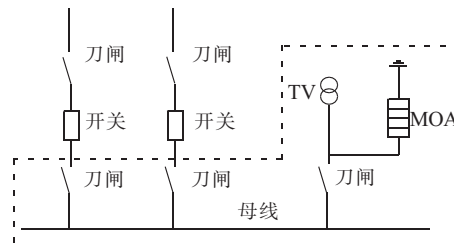


图 2 母线回路

回路的状况评价由回路设备状态评价、回路随机失效性评价、回路风险程度评价和回路技改反措评价四个部分组成。

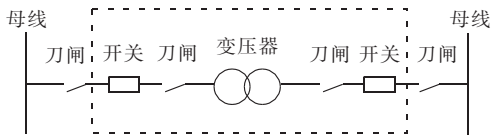


图3 变电回路

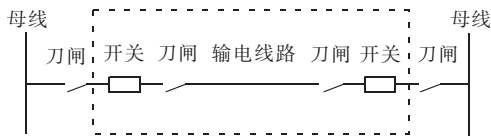


图4 输电回路

回路设备状态评价包括回路内一、二次设备的状态评价,评价结果反应回路内各设备的最严重状态。

回路随机失效性评价根据各类设备统计故障率,按照式(1)、(2)、(3)进行量化。其中单一设备的故障率由历史统计数据获得。

$$r_n(t) = e^{-\lambda_n(t-t_n)} \quad (1)$$

$$R(t) = r_1(t) \times r_2(t) \times K \times r_n(t) \quad (2)$$

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (3)$$

式中: $r_n(t)$ 为评价时刻单一设备的可靠度; n 为回路中设备的数量; λ_n 为单一设备的故障率; t 为评价的时间点; t_n 为设备上一次大修和全校验的时间点; $R(t)$ 为评价时刻回路的可靠度; $F(t)$ 为评价时刻回路的失效率。

回路风险程度评价以设备故障率的浴盆曲线特性为依据,按照式(4)进行量化。

$$Q(t) = \max\{q_1(t), q_2(t), Kq_n(t)\} \quad (4)$$

式中: $Q(t)$ 为回路的风险故障率; $q_n(t)$ 为单一设备的风故障率。回路的技改反措评价根据回路的危险点源及反措执行情况开展。

2.3 系统的状态评价

回路评价结束以后,进行回路所在的系统状态评价。定义为同一客户群供电的所有回路的集合为系统。电网中系统的划分如图5所示,系统内部的环节和断面如图6所示。系统状态评价由系统设备状态评价和系统通流能力评价两部分组成。系统设备状态评价由系统内各回路设备的状态评价构成,评价结果反应系统内回路设备的最严重状态。系统通流能力评价由系统承载力评价和系统结构性评价两部分组成。系统承载力评价反应的是系统各回路在最大潮流情况下的过载能力,系统结构性评价反应的是系统在故障下的自适应能力。系统的通流能力评价见表1。

3 系统检修策略

3.1 系统检修策略

系统状态评价按照设备、回路和系统顺序进行,而

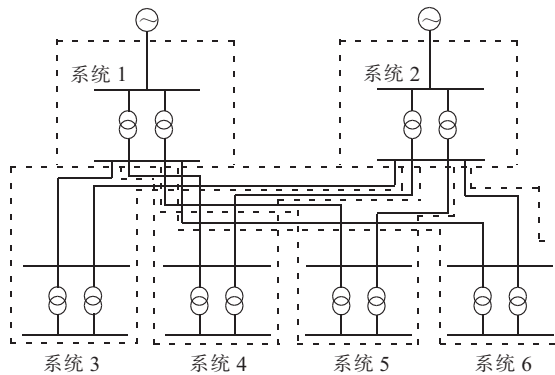


图5 电网系统划分示意

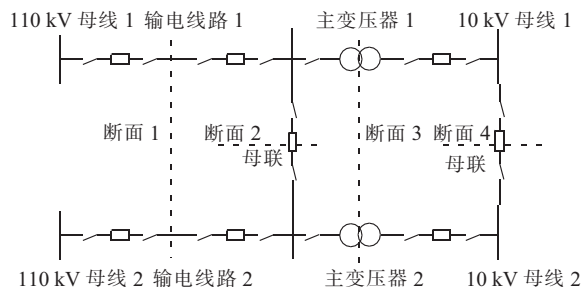


图6 系统环节和断面划分示意

表1 系统通流能力评价标准

评价内容	正常状态	注意状态	异常状态	严重状态
结构性评价	满足N-1,且能自动切换	满足N-1,但需要人工远方操作切换	满足N-1,但需要人工就地操作切换	不满足N-1
承载力评价	最大潮流N-1时,断面设备负载率小于100%	最大潮流N-1时,断面设备负载率最大为100%~120%	最大潮流N-1时,断面设备负载率最大为120%~140%	最大潮流N-1时,断面设备最大负载率超过140%

系统检修策略的制订则正好相反。系统检修策略根据系统状态评价结果,按照系统、回路和设备的顺序逐步明确。系统评价和检修策略工作过程如图7所示。检修策略的制定分为3个步骤:(1)确定系统、回路和设备的检修级别;(2)确定系统的技术改造方案;(3)确定回路的检修方案。

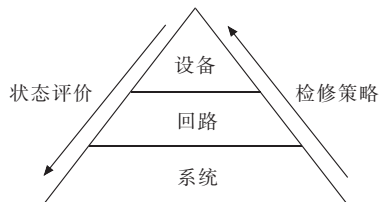


图7 系统状态评价和检修策略工作过程

检修级别分为3种情况:(1)停电检修,根据检修内容的复杂程度细分为A、B、C三类;(2)不停电检修为D类;(3)带电作业和事故抢修为E类。

3.2 系统检修计划

系统检修策略是通过系统检修计划来执行的。检

修计划要明确检修工作的具体执行时间。首先根据回路检修顺序因子来确定各回路的检修顺序。检修顺序的因子越大,回路的检修顺序越靠前。检修顺序因子由回路的状态和回路重要性2个因素决定^[4],其计算方法见图8和式(5)。

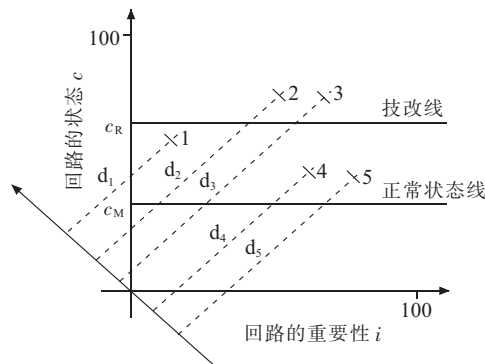


图8 回路检修顺序因子计算方法

$$d = \sqrt{i^2 + c^2} \times \sin\left(\frac{\pi}{4} + \arctg \frac{i}{c}\right) \quad (5)$$

各回路的具体检修时间通常采用启发式算法的优化程序进行优化安排,就是以—个目标函数为方向,考虑各种约束条件,通过不断地尝试来寻找一个最优结果。常见的目标函数是全网各回路检修风险损失电量和最小,回路检修风险损失电量计算见式(6)。

$$W = T \times f \times t \times p \quad (6)$$

式中:W为停电风险损失电量;T为失效修复时间;f为失效频率;t为计划检修天数;p为系统的平均负荷。

4 工程实例

选取港城地区110 kV苍梧变10 kV母线所带客户集合为一个客户群,为该客户群服务的系统定义为苍梧系统,包括风苍735线路、茅凤线717线路、苍梧1号主变、苍梧2号主变、苍梧10 kV I母、苍梧10 kV II母、苍梧10 kV母联7个回路。每个回路由数量不等的一、二次设备组成,独立完成一个输、变电或者配电功能。具体系统组成如图9所示。

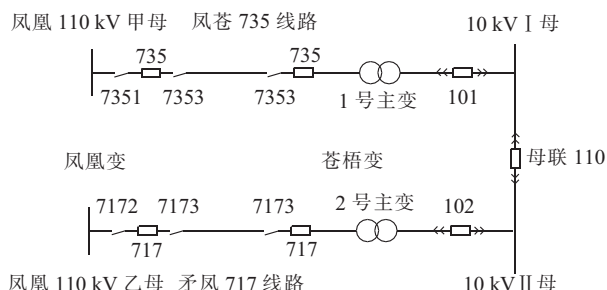


图9 苍梧系统

单一设备状态评价结果为:风苍735线路为异常状态,原因是绝缘子老化;735线路保护为注意状态,原因是校验周期到期;苍梧变1号主变保护为注意状

态,原因是校验周期到期。

综合设备评价结果。回路的状态评价结果为:风苍735线路回路为异常状态;苍梧1号主变回路为注意状态。

环节通流能力评价结果为:变电环节为严重状态,原因是苍梧主变N-1时2号主变过载超过40%;受电环节为异常状态,原因是苍梧10 kV II母出线间隔数量不满足导致部分线路过载。

综合环节通流能力评价结果和回路状态评价结果,该系统的总体评价为严重状态,检修策略见表2。

表2 苍梧系统检修策略

回路名称	回路状态 / 检修级别	检修方案	停电	工时 /d	优化检修时间
风苍 735 线路	异常 /B	1号-16号导线更换绝缘子,开关、刀闸、线路清扫、保护校验	是	1	4月23日
茅凤 717 线路	正常 /D	检修巡视,带电测试维护	否	1	3月21日
苍梧 1号主变	注意 /C	保护校验	是	1	10月15日
苍梧 2号主变	正常 /A	主变更换	是	5	5月11日-5月14日
苍梧 10千伏 I母	正常 /D	检修巡视,带电测试维护	否	1	3月22日
苍梧 10千伏 II母	正常 /B	母线新增出线间隔	是	1	5月14日
苍梧 10千伏母联	正常 /D	检修巡视,带电测试维护	否	1	3月22日

4 结束语

确保经济性和可靠性的适度检修是状态检修。状态检修应从系统和用户角度审视,依据整个系统的状态来安排检修的频度和深度。系统状态评价是核心,不仅要掌握设备的状态,还要掌握回路以及整个系统的状况。公司成本控制和用户电量供应是检修策略目标。状态限值、环境保护和检修业务外包等检修策略约束条件需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 陆颂元. 美国几个电厂状态检修技术的发展过程及特点[C]//全国火电机组状态检修研讨会论文集. 昆明:中国电力企业联合会,2004:24-28.
- [2] XU B,HAN X S,LI M,et al. System Maintenance Scheduling: Review and Prospect[C]//Proceeding of 2nd ISGT(Asia). 天津: ISGT(Asia),2012:37-55.
- [3] 国家电网公司生产技术部. Q/GDW 174—2008 架空输电线路状态检修导则[S]. 北京:国家电网公司,2008.
- [4] BALZER G,SCHMITT O,HALHANN M,et al. Maintenance and Refurbishment Strategies for M V Substations [C] //Proceeding of 16th CIRED. Amsterdam:CIRED,2001:77-81.

变压器综合试验系统的设计与实现

孙秋芹,周志成,赵 科,刘 洋,陶风波

(江苏省电力公司电力科学研究院,江苏 南京 211103)

摘 要: 变压器的电气试验项目繁多,现有的试验仪器大多功能单一,试验过程中需频繁变更试验设备和试验接线,工作量大,且给试验人员带来较大的安全隐患。提出了变压器绝缘电阻、短路阻抗、变比、绕组直流电阻、介质损耗、有载分接开关特性测试的一次性接线试验方法,基于 C# 语言开发了相应的系统软件,通过程序顺序控制,可一键操作完成变压器的电气试验,显著提高了变压器试验效率。

关键词: 变压器;电气试验;系统集成;软件开发

中图分类号: TM835

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)03-0056-03

变压器是电力系统中最重要电气设备之一,运行中一旦出现故障,将对电力系统造成严重危害^[1]。变压器的电气试验项目繁多,包括绝缘电阻、电压比、绕组直流电阻、感应耐压试验、空载电流和空载损耗、短路阻抗和负载损耗、短路承受能力试验等项目^[2-4]。现有的变压器电气试验仪器功能单一、单台测量设备通常只能开展特定的试验项目,试验过程中需频繁进行试验仪器和试验接线变更,工作量大,给试验人员也带来了较大的安全隐患。文中开发了一套变压器综合试验系统,对试验项目进行了高度集成,可通过一次性试验接线,程序顺序控制,一键式操作完成变压器绝缘电阻、短路阻抗、绕组直流电阻、有载分接开关过渡电阻与过渡时间、变压器变比、介质损耗的等参数的测量。

1 变压器综合试验系统的硬件设计

1.1 综合试验系统接线方式

变压器综合试验系统接线方法如图 1 所示。通过试验引线将被试变压器的高、中、低压侧三相及相应中性点、变压器套管末屏等与集线转换器进行连接,集线转换器与测量系统相连。为测量变压器的短路阻抗参数,引入了一种短路阻抗短接器,它与被试变压器的中压、低压侧三相及相应中性点出线相连,试验过程中可根据需要进行短接。

1.2 综合试验系统结构

变压器综合试验系统的组织架构如图 2 所示。变压器综合试验系统主要包括集成控制器、工控机、打印机、液晶显示器、集线转换器、短路阻抗短接器等。其中,集成控制器是变压器综合试验系统的核心,对各模块进行集中控制。

综合可靠性、抗干扰、扩展性、通信距离、组件资源等因素,变压器综合试验系统采用基于 TCP/IP 协

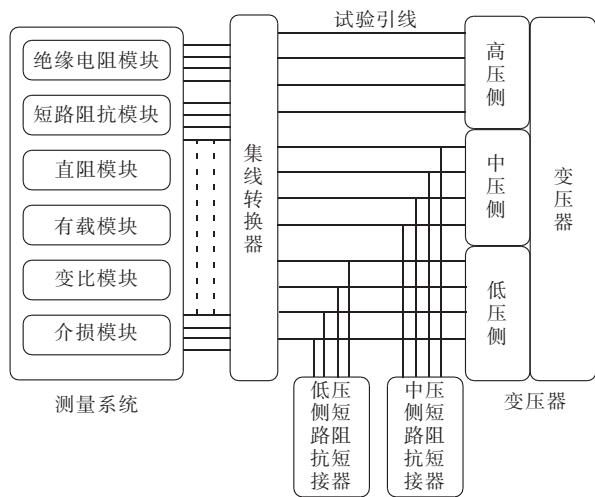


图 1 变压器综合试验系统接线

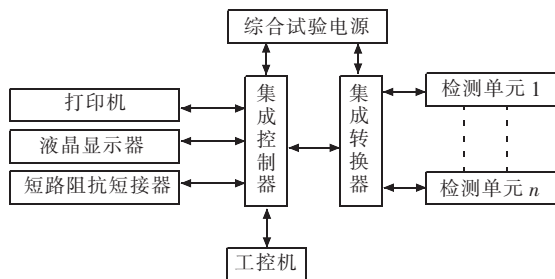


图 2 变压器综合试验系统架构

议的 Ethernet 局域网模式,实现全程网口通信,具有很高的可靠性^[5,6]。

1.3 综合试验电源

文中采用正弦脉宽调制技术 (SPWM) 和系统级的软件控制,为测量仪器提供试验电源。其中,介质损耗测试采用 10 kV 交流电压源、直流电阻测试采用 1 A 直流电流源、有载分接开关特性测试采用 1 A 直流电流源等,综合试验电源模块原理如图 3 所示。

1.4 试验引线

试验引线采用高压拖地电缆线,为两芯屏蔽结构,每根线里面包括有电流输出线、电压信号线、内高压屏

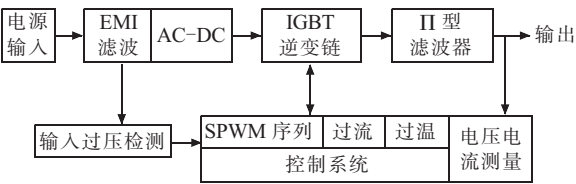


图 3 综合试验电源模块原理

蔽层和外拖接大地屏蔽层,其结构如图 4 所示。其中,内高压屏蔽和外接地屏蔽层之间采用复合式硅胶绝缘,试验引线兼顾变压器绝缘电阻、介质损耗、绕组直流电阻、有载开关特性试验等特点。内高压屏蔽层通过增加铝箔层和半导体层,保证试验引线在试验过程中不会由于内屏蔽丝网的变稀引起屏蔽不良。

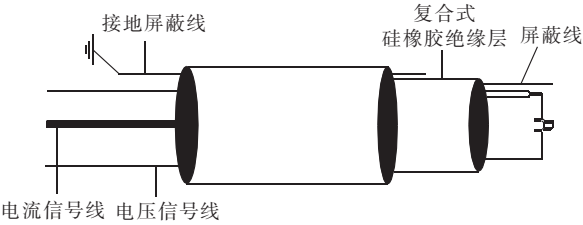


图 4 一线多用试验引线

2 软件设计

试验系统采用 C# 语言进行软件开发,系统软件包括通信管理、数据管理、设备管理、流程配置、智能测试等 6 部分,软件程序流程图如图 5 所示。

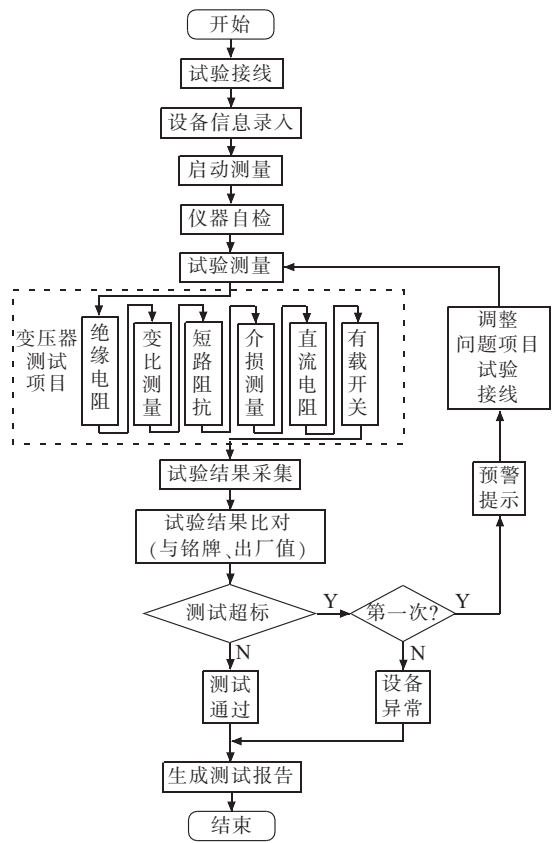


图 5 软件流程

程序开始运行后,首先录入相关设备信息;通过在仪器内部设置标准电阻、标准电容等装置,对各测量模块进行自检;依次测量变压器绝缘电阻、变比、短路阻抗、介质损耗、直流电阻、有载开关特性;对试验结果进行采集,并将试验结果与铭牌、出厂值等进行比较;当测试结果超标时,进行预警提示;试验完成时,自动生成测试报告。

3 误差测试

为了保证变压器综合试验系统的准确性,采用标准源对各模块的功能进行了测试,以校验测量系统的误差,试验结果如表 1 所示。其中,变压器绝缘电阻测量模块误差最大,为 1.90%;变压器变比测量模块误差最小,为 0.25%。测量误差满足工程应用需求。

表 1 试验系统各功能模块测量误差 %

功能模块	误差
有载分接开关过渡电阻	0.83
有载分接开关过渡时间	1.00
变比	0.09
绕组直流电阻	0.10
短路阻抗	0.23
绝缘电阻	1.9
介质损耗	0.25
电容量	0.39

4 工程应用

应用变压器综合试验系统对江苏某 220 kV 变压器进行了测试。试验项目包括有载分接开关过渡电阻、变压器有载分接开关过渡时间、变比、绕组直流电阻、短路阻抗、绝缘电阻、介质损耗、电容量等、并与传统测试仪器进行了比较。部分试验结果如表 2 至表 4 所示。

表 2 变压器高压侧套管介质损耗

相别	变压器综合试验系统		传统测试仪器	
	电容量 /pF	介质损耗 /%	电容量 /pF	介质损耗 /%
A	287.1	0.375	287.0	0.374
B	285.1	0.332	285.3	0.333
C	286.3	0.348	286.5	0.347

表 3 变压器高压侧绕组直流电阻 mΩ

分接位	变压器综合试验系统			传统测试仪器		
	A-O	B-O	C-O	A-O	B-O	C-O
01	459.6	459.5	461.2	459.2	459.8	460.6
02	453.3	453.9	454.9	453.1	453.7	454.6

由表 2 至表 4 可知,变压器综合试验系统可有效测量变压器高压侧套管介质损耗、绕组直流电阻、有载分接开关过渡电阻、过渡时间等参量,测量结果与传统方法偏差很小,均小于 1%,可满足工程需求。在试验

表 4 变压器 A 相有载分接开关过渡电阻与过渡时间

方法	过渡电阻 /Ω	过渡时间 /ms
变压器综合试验系统	2.0	44.7
传统测试仪器	2.0	44.8

效率方面,传统测试方法需要 5 h、3 人完成的试验工作量仅需 2 h、2 人即可完成相应工作。

5 结束语

建立了变压器综合试验系统,提出了变压器一次性试验接线方法,通过程序顺序控制,可一键式操作完成变压器绝缘电阻、短路阻抗、变压器变比、绕组直流电阻、有载分接开关测试、介质损耗等电气试验项目,该方法大大减小了试验工作量,可显著提高变压器电气试验效率。

参考文献:

[1] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京:机械工业出版社,2003: 2-3.
[2] 陈天翔,王寅仲. 电气试验[M]. 北京:中国电力出版社,2005:

19-33.

[3] 保定天威保变电气股份有限公司. 变压器试验技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000:4-5.
[4] 甘强,吉亚民,陈轩. 一起 220 kV 变压器局部放电试验异常情况分析[J]. 江苏电机工程,2013,32(3):10-12.
[5] 翁国庆,贾俊波. 电气试验车软件系统的设计与开发[J]. 高电压技术,2003,29(11):52-54.
[6] 刘志刚,贾俊波. VFP 在开发电气试验车试验界面中的应用[J]. 高电压技术,2002,28(11):44-45.

作者简介:

孙秋芹(1984),男,湖南岳阳人,博士,从事电力系统过电压及高压电气试验方面的研究工作;
周志成(1978),男,湖南株洲人,高级工程师,从事高电压与绝缘技术方面的研究工作;
赵科(1984),男,江苏无锡人,工程师,从事高压电气试验方面的研究工作;
刘洋(1982),男,江西景德镇人,博士,从事输变电设备外绝缘方面的研究工作;
陶风波(1982),男,江苏常州人,博士,从事高电压与绝缘技术方面的研究工作。

Design and Realization of Comprehensive Electrical Test System for Transformers

SUN Qiuqin, ZHOU Zhicheng, ZHAO Ke, LIU Yang, TAO Fengbo

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: There are various testing items for the transformer in order to evaluate its performance. However, nowadays most of the test instrument could only measure one or two items. A comprehensive electrical test system is designed and realized in this paper, which integrated the conventional test items for the transformer including the insulation resistance, the short circuit impedance, transformer ratio, DC resistance of winding, dielectric loss, the transition resistance and transition time of on load tap changer of transformers and so on. The corresponding software is developed based on C# programming language. With the comprehensive electrical test system, a 'one-key operation' test for transformers is achieved, which improves testing efficiency largely.

Key words: transformer; electrical test; system integration; software development

(上接第 55 页)

作者简介:

汤宗亮(1973),男,安徽肥东人,工程师,从事电力设备运维检修工作;

衡思坤(1963),男,江苏邳州人,高级工程师,从事电力设备运维检修工作;
韦海荣(1977),男,江苏南京人,高级工程师,从事电力设备研究开发工作。

A Strategy for Power Grid Equipment Maintenance

TANG Zongliang¹, HENG Sikun¹, WEI Hairong²

(1. Lianyungang Power Supply Company, Lianyungang 222000, China;

2. Nanjing Daonaneng Technology Co. Ltd., Nanjing 210028, China)

Abstract: With the improvement of manufacturing of transmission and transformer equipment and the progress of on-line monitoring technology for power grid equipment, the model of equipment maintenance is changing from periodical maintenance to status decided maintenance. An evaluating approach and maintenance strategy for the power grid including equipment and circuit is proposed. The practice of the proposed strategy is validated by engineering projects. For the views of power system and customers, it benefits the cost management of power supply enterprise and the reliability of power supply.

Key words: system; circuit; maintenance strategy; status evaluation

基于罗氏线圈的室内电源负载电流检测电路设计

王鹏宇, 王 勤

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:通过分析罗氏线圈的测量原理,设计了一款作为电流互感器的罗氏线圈及其信号调理电路,用以实时测量室内电源的负载电流。该罗氏线圈采用塑料圆环作骨架和漆包铜线为绕线,信号调理电路采用由新型低噪声的 OPA 211 构成的二级精密运算放大电路,其中,第一级运算放大电路将罗氏线圈感应出来的毫伏级电压信号加以放大,第二级运算放大电路采用钽电容作为积分元件,用以还原被测电流和对产生的干扰噪声信号进行滤波。实验结果表明:该罗氏线圈及其信号调理电路具有线性度好、测量精度高、制造成本低等优点,满足 0.5 级电流互感器工频电流测量要求,具有工程应用意义。

关键词:罗氏线圈;信号调理电路;干扰噪声;电流互感器;电源负荷

中图分类号:TM835.4

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0059-03

罗氏线圈(Rogowski Coil)作为一种新型电子式电流互感器测量传感头,主要特点是被测电流与线圈无直接接触,具有测量范围宽、无磁饱和、体积小等优点,在电力系统等领域具有广阔的应用前景,已成为新世纪互感器发展的重要方向之一^[1-2]。文献[3]设计了一款测量精度达到 0.2 级的罗氏线圈,具有线性度好、无磁饱和、测量频率范围宽、结构简单等性能特点,适应于电力系统在线测量、数字化继保、控制、故障诊断及电力系统光纤网的应用需求;文献[4]选用自积分式罗氏线圈测量系统,构建了反映 RSD 开关的放电电流试验平台,能有效提高测量高速大功率 RSD 开关状态电流的快速性、准确性和可靠性;文献[5]设计了一款既能准确测量稳态电流,又能很好反映故障电流暂态性能的罗氏线圈传感头;文献[6]设计了一种基于罗氏线圈的电子式电流互感器,能有效减小罗氏线圈的测量误差,并基于该线圈设计出由模拟积分器构成的电流互感器和采用 DSP 芯片的数字输出电子式电流互感器,测量精度达到 0.5 级。文中针对高校学生宿舍和实验室电器火灾隐患源安全用电监控装置的研发要求,设计了一款基于罗氏线圈的室内电源负载电流检测电路^[7]。罗氏线圈的设计采用塑料圆环作骨架和漆包铜线为绕线,信号调理电路采用由新型低噪声的 OPA 211 构成的二级精密运算放大电路,不仅可以将罗氏线圈感应出的毫伏级电压信号加以放大,而且还可以对罗氏线圈产生的干扰噪声信号进行滤波,能快速准确地在线检测室内电器设备的用电状态,测量电流范围为 0~20 A。

1 室内电源负载电流检测电路设计

文中设计的室内电源负载电流检测电路如图 1 所示,由罗氏线圈及其调理电路两部分组成,线圈套

在被测线路上(无电气接触),线圈两端连接至调理电路,调理电路用于将罗氏线圈感应出的被测电源负载电流 I_x 转换成便于采集的输出电压信号 V_o 。

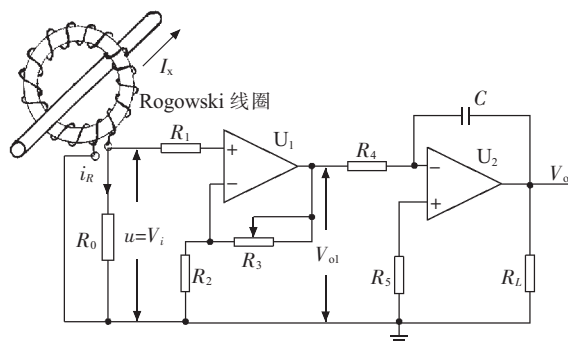


图 1 室内电源负载电流检测电路

1.1 罗氏线圈测量原理

罗氏线圈的工作原理是将导线绕制在非磁性环形骨架上,测量时将载流导线从线圈中心穿过,被测电流与线圈不直接接触。根据安培环路定律和电磁感应定律,磁场将在线圈两端产生一个感应电动势,其大小正比于被测电流 I_x 对时间的微分,测量精度可设计到高于 0.1%,一般为 1%~3%^[1,2]。由于罗氏线圈是一种特殊结构的空心线圈,不含铁心,不存在磁饱和问题,也不存在动力和热力的稳定问题,因此,几乎不受被测电流大小的限制,且因被测电流所产生的磁场变化而感应出相应电势,本身并不与被测电流回路存在直接联系,其测量电流的范围可以由几安培到几千安培,频率范围可设计到 0.1 Hz 至 1 MHz,特殊的可设计到 200 MHz,并且可以测量其他技术受限制领域的小电流^[3]。

文中设计的罗氏线圈采用塑料圆环作骨架、漆包铜线为绕线,在一根截面细且均匀的绝缘管上,均匀密绕线圈,并将此线圈的两头紧密相吻合而成为螺线管线圈。在测量电流时,将此线圈围绕载有被测电流 I_x 的导体,运用电磁场分析方法和全电流定律,磁场强度 $\vec{H}$ 沿

任意封闭轮廓的线积分等于穿过该封闭轮廓所限定面的电流, $I_x = \oint \vec{H} d\vec{l}$, 可得螺线管所交链的磁链 ψ 为:

$$\psi = n_0 \mu_0 s \oint \vec{H} d\vec{l} = n_0 \mu_0 s I_x \quad (1)$$

式中: n_0 为螺线管单位长度上的线圈匝数; μ_0 为真空磁导率; s 为管内均匀磁场中一平面的面积; $\vec{l}$ 为线圈圆管上任一线元。由式(1)可见, 当螺旋管线圈中心线直径比线圈直径大得多时, 线圈所交链的磁链 ψ 与被测电流 I_x 存在线性关系。

1.2 调理电路设计

从图 1 中不难看出, 当穿过测量线圈(即螺线管)限定面的电流 I_x 发生变化时, 测量线圈所交链的磁链也随之变化, 所产生的感应电流 i_R 通过取样电阻 R_0 转化为感应电压为 $u=V_i$, 这部分实际上为一微分环节。因此, 要反映实际被测电流 I_x 的大小, 就必须加一积分环节, 首先将感应电压 u 作为集成运放 U_1 的输入电压 V_i , 经集成运放 U_1 放大为 V_{oi} , 再送入由集成运放 U_2 组成的积分电路。利用运放“虚地”概念, 可推导出输出电压 V_o 为:

$$\begin{aligned} V_o &= \frac{1}{R_4 C} \int V_{oi} dt \\ &= \frac{1}{R_4 C} \int A_{v1} \frac{d\psi}{dt} dt \\ &= \frac{1}{R_4 C} n_0 \mu_0 s A_{v1} I_x \end{aligned} \quad (2)$$

式中: A_{v1} 为第一级同相运算放大器 U_1 的放大倍数, $A_{v1}=1+R_3/R_2$, 可以通过调节可变电阻 R_3 来选取合适的数值。

U_2 为反相积分器, 通过对上述罗氏线圈输出电压 V_{oi} 积分, 可方便地还原出被测电流 I_x 。使用电压表测量积分器的输出电压 V_o , 可得到被测电流 I_x 的大小, 以及所设计罗氏线圈及其调理电路在整个测量范围内的误差。

由于罗氏线圈感应出来的是毫伏级电压信号, 在放大微弱信号的场合, 放大器自身的噪声对信号的干扰会比较严重, 为减小这种噪声, 采用了低噪声运放作输入级, 以提高第一级放大器的输出信噪比。文中采用德州仪器(TI)新推的 OPA211 作输入级, 它是一款将超低噪声和更低功耗、更小封装尺寸和更高带宽结合起来的精密运算放大器, 噪声电压为 1.1 nV/Hz(在 1 kHz 时), 偏移电压为 100 μ V, 增益带宽为 80 MHz。

积分电路是一个非常重要的环节, 文中采用钽电容作为积分元件, 电路的准确性能保证测量的精度, 并能减少后续电路的误差, 电容的存在还可以对产生的干扰噪声信号进行有效滤波。

2 实验结果及分析

为验证如图所 1 示的以塑料圆环作骨架和漆包铜线为绕线罗氏线圈及其调理电路的有效性, 开展了一系列实验测试研究工作。

图 2 示出了该罗氏线圈电流与调理电路积分输出电压间的 $U-I$ 特性, 可调被测电流 I_x 在 0~5 A 范围, 所测出的相应调理电路的积分输出电压 V_o 。与被测电流 I_x 具有理想的线性关系。从理论上讲, 设计的罗氏线圈及其调理电路的测量电流范围可达到 0~20 A。

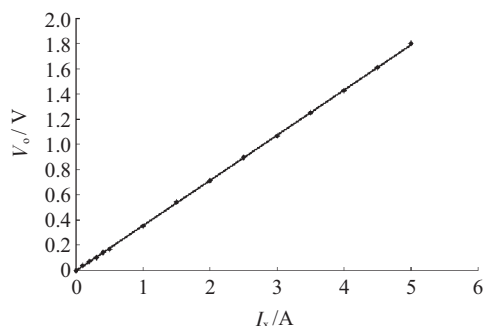


图 2 罗氏线圈及其调理电路 $U-I$ 特性

图 3 示出了该罗氏线圈及其调理电路的动态响应性能, 通过突然施加一工频被测交流电流信号 I_x , 可以看出调理电路的积分输出电压 V_o 。在很短的时间内就能达到稳态特性。

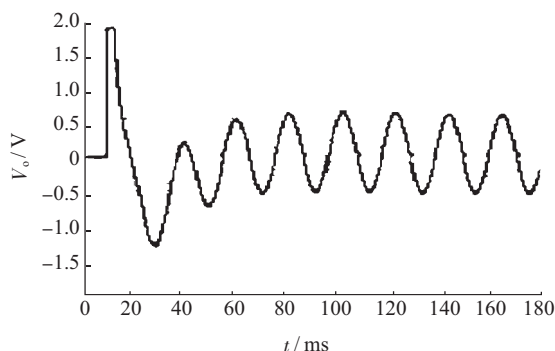


图 3 罗氏线圈检测到的瞬变电流波形

图 4 示出了所设计罗氏线圈检测到的工频感应电流信号 i_R 经取样电阻输出的电压信号 V_i , 可以明显看出输出信号中混杂了罗氏线圈产生的干扰噪声信号。进一步地, 图 5 和图 6 示出了积分电容为 $C=0.1 \mu$ F 和 $C=1 \mu$ F 的调理电路对罗氏线圈检测电流信号 i_R 经放大和滤波后产生的积分输出电压信号 V_o , 可见电容的容量大小对波形平滑是有一定的影响。选择图 6 所示较大的积分电容, 能够有效地消除输出信号中的谐波成分, 从而提高调理电路的输出电压信号品质。

3 现场测试

应用所研发的罗氏线圈电流传感器, 对实验室电

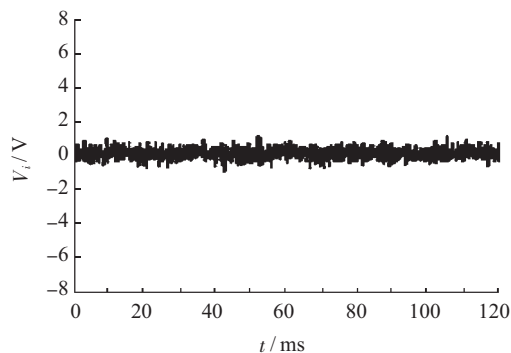
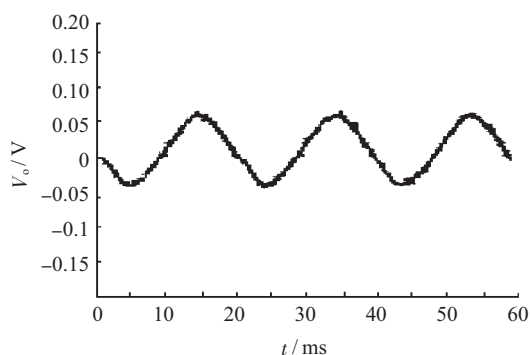
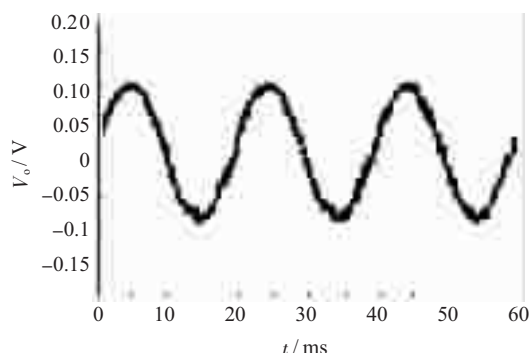


图4 罗氏线圈产生的干扰噪声信号

图5 积分电容 $C=0.1\mu\text{f}$ 的调理电路输出电压波形图6 积分电容 $C=1\mu\text{f}$ 的调理电路输出电压波形

源负载电流进行了实测研究工作,将罗氏线圈直接套在室内电源系统的出线上,与被测电源线路相间隔开,

不存在直接电的联系。实验室中运行的电器设备是台数不等的计算机,积分电路输出电压 V_o 的数值能准确反映不同台数运行计算机的电源负载电流。

4 结束语

文中设计的基于罗氏线圈的室内电源负荷检测电路能够准确、可靠地完成对电载荷的测量,具有线性度好、测量精度高、测量范围宽、制造成本低等优点,满足0.5级电流互感器工频电流测量要求,易于模块化和工业化生产,还可进一步进行数字化和智能化扩展。该罗氏线圈传感器已成功应用于一种室内电器安全用电监控装置的研发,为智能建筑领域的室内电器用电安全监控提供了新的思路。

参考文献:

- [1] 李维波,毛承雄,陆继明.新型磁位计在线检测技术研究[J].传感技术,2001,20(11):14-17.
- [2] AMBOZ R, MACHINABAL-JOHN D. Rogowski Coil Design and Calibration [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 45(2): 511-515.
- [3] 赵玉富,叶妙元,贺志容,等.用 Rogowski 线圈测量微小电流[J].高电压技术,2004,30(7):9-10.
- [4] 李维波,毛承雄,余岳辉,等.罗氏线圈在高速大功率电流检测系统中的特性研究[J].电工技术学报,2006,21(6):49-53.
- [5] 郑慧,陈明军,黄飞腾.电子式电流互感器中 Rogowski 线圈的设计及动静态性能分析[J].仪表技术,2008(12):56-58.
- [6] 司小平,乐丽琴,赵国生.罗氏线圈电子式电流互感器的设计[J].电子设计工程,2013,21(21):144-147.
- [7] 王鹏宇,王勤,戴文婧,李荃.室内电器安全用电监控装置及其监控方法[P].中国发明专利,申请号:201410111244.7,2014.4.

作者简介:

王鹏宇(1994),男,江苏南京人,本科在读,从事电气工程及其自动化专业相关研究。

王勤(1967),男,江苏南京人,教授,博导,从事功率电子变换技术、新能源发电技术等研究工作。

Rogowski Coil based Current Measuring Circuit Design for Indoor Power Supply Loads

WANG Pengyu, WANG Qin

(College of Automatization Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: By analyzing the measuring principle of Rogowski coil, a new current transducer with the Rogowski coil is proposed for on-line measuring indoor power supply load currents. The Rogowski coil is designed with plastic ring and enamel-insulated copper wire, which are used as its framework and winding wire, respectively, and the signal processing circuit is designed with two precise operating amplifiers by employing OPA 211 with low noise. Amongst, the first amplifier serves to amplify the inducted millivolt signal from the Rogowski coil, while the second amplifier serves to restore the measured current signal and filter the yielded interrupt noise signal. The experiment results show that the proposed Rogowski coil and its signal processing circuit has merits of good linearity, high measuring precision and low manufacturing cost, which meets the measuring requirement of industry frequency current transducer with 0.5 grade and has important engineering application value.

Key words: rogowski coil; signal processing circuit; interrupt noise; current transducer; power supply load

电力管廊顶管施工杆塔保护方法探讨

卞茂斌

(无锡供电公司, 江苏 无锡 214061)

摘 要:地下电力管廊的埋深在 10 m 以下。长江中下游软土地基地区, 常处在粉土夹淤泥质粉土土层中施工, 而施工路径经常密布电力杆塔, 顶管路径无法规避。结合工程施工实例, 对比分析土体加固的不同保护方法, 探讨安全可靠、经济有效的实施方案, 对其他类似的大直径顶管施工中可能遇到的杆塔保护具有借鉴意义。

关键词:顶管; 保护杆塔; 土体加固; 压密注浆; 高压旋喷

中图分类号: TM 85

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)03-0062-04

地下电力管廊是提高土地利用、改善电力供应可靠性的一项有效输电方式。由于较多为架空输电线路改建成地下管廊, 因此, 对施工区域内无法规避的运行电力杆塔的切实可靠保护, 成为地下管廊施工的严重困难。结合管廊顶管的多处电力杆塔保护的施工经验, 为类似工程施工提供实践借鉴。

1 项目概况

某电力管廊项目位于区域供电的变电所周边, 为配合该区域商业地块建设开发, 将现有和今后规划建设 220 kV 电力架空线路入地敷设。工程布置在道路两侧绿化带内, 从 220 kV 输电终端铁塔, 用地下顶管连接至变电所附近, 再用涵道接通变电所。设计规模为 220 kV 电力电缆九回。其路径示意如图 1 示。

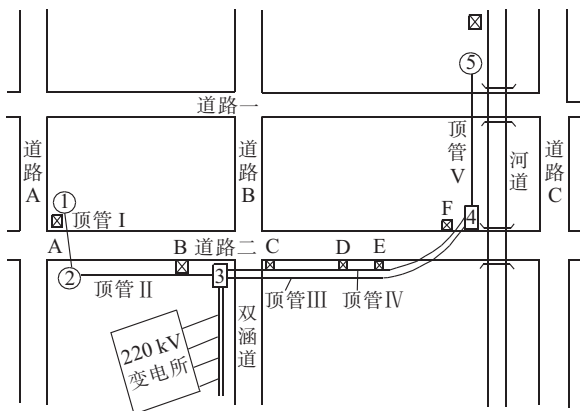


图 1 路径示意

1.1 工程地质水文

工程沿线地基地层土体分为 11 层:

1-1 层素填土 (Q_4^m): 为耕植土, 以粉质黏土、黏土为主。平均厚度 1.35 m。

1-3 层淤泥 (Q_4^m): 流塑状态, 工程性质极差。厚度: 0.50~2.00 m。

2-1 层淤泥质粉质黏土 ($Q_4^{3(al+1)}$): 流塑, 含少量腐

植物。平均厚度 2.17 m。承载力 $f_{ao} = 65$ kPa, 压缩模量 $E_{s1-2} = 4.0$ MPa。

3-1 层黏土 ($Q_4^{3(al+1)}$): 硬塑, 含氧化铁、铁锰质结核。平均厚度 3.82 m。地基土承载力 $f_{ao} = 200$ kPa, 压缩模量 $E_{s1-2} = 8.0$ MPa。

3-2 层粉质黏土 ($Q_4^{3(al+1)}$): 可塑, 含铁锰斑纹。平均厚度 1.37 m。地基土承载力 $f_{ao} = 140$ kPa, 压缩模量 $E_{s1-2} = 6.0$ MPa。

4-1 层粉土 ($Q_4^{2(al+1)}$): 湿, 中密, 部分为细砂, 含石英、云母碎屑。平均厚度 6.10 m。承载力 $f_{ao} = 140$ kPa, 压缩模量 $E_{s1-2} = 5.5$ MPa。

4-1A 层淤泥质粉质黏土 ($Q_4^{2(al+1)}$): 湿, 流塑, 部分为细砂, 含石英、云母碎屑。平均厚度 1.48 m。承载力 $f_{ao} = 80$ Pa, 压缩模量 $E_{s1-2} = 3.5$ MPa。

5 层淤泥质粉质黏土 (Q_4^{2al}): 流~软塑, 夹少量薄层粉土。平均厚度 1.15 m。土承载力 $f_{ao} = 100$ kPa, 压缩模量 $E_{s1-2} = 4.0$ MPa。

6-1 层黏土 ($Q_3^{3(al+1)}$): 硬塑, 部分为粉质黏土, 含氧化铁、铁锰质结核和高岭土。平均厚度 4.45 m。承载力 $f_{ao} = 260$ kPa, 压缩模量 $E_{s1-2} = 8.0$ MPa。

6-2 层黏土 ($Q_3^{3(al+1)}$): 硬塑, 含铁锰结核。平均厚度 4.45 m。承载力 $f_{ao} = 300$ kPa, 压缩模量 $E_{s1-2} = 8.5$ MPa。

7-1 层粉质黏土 ($Q_3^{3(al+1)}$): 可塑。该层钻孔未揭穿。地基土承载力 $f_{ao} = 110$ kPa, 压缩模量 $E_s = 7.0$ MPa。

该项目的顶管工程埋深 9~14.3 m, 均在 3-2 层至 5 层土层中。地下水主要为松散土类孔隙水, 稳定水位埋深为 0.40~1.80 m, 主要接受大气降水和地表水渗入补给, 与地表水联系密切, 以蒸发及向河道排泄为主要排泄方式。地下水位设计埋深取 0.5 m。

1.2 工程分析

按照电力线路运行规程, 输电线路路径边线两侧 15 m 为保护区域, 是工程建设禁区。该项目施工区域与输电线路保护区多处重叠。顶管 I~IV 段工程, 路径经过 A-F (见图 1) 6 基电力杆塔必需保护。根据以往经验

和地质报告,预计顶管后杆塔沉降平均值大于 150 mm,难于达到保护目的,需采取预加固措施。其中,A 钢管塔为 220 kV 大转角塔,结构荷载大,顶管路径穿过塔基水平受压区,竖直距离小,沉降控制要求较高;B-F 钢管塔为 110 kV 直线塔,结构荷载较小,顶管外边线与塔基最近点距离为 -0.87~3.5 m,结构的竖直距离 3.5~7.8 m,沉降控制措施困难相对较小。为此,分别对上述两类杆塔分别采取不同加固方案。

2 加固方案

2.1 A 钢管塔

该钢管位于顶管 I 段区,钢管外径 2.4 m,其基础为 4 层台阶重力式扩大基础,每层台阶高 1.3 m,埋深 4.75 m,底层台阶平面尺寸 11.8 m×11.8 m,顶层台阶 6.4 m×6.4 m。区间内采用直线顶管施工, $D_{内}=2.4$ m,壁厚 0.24 m, $D_{外}=2.88$ m。

2.1.1 加固计算

依据 JGJ79—2002^[1]。计算条件:选择高压旋喷桩的直径为 $D=0.6$ m,则桩的截面面积 $A_p=0.2826$ m²,桩的周长 $\mu_p=1.884$ m,桩间距 0.8 m,等边三角形排列。基础土层特征值如表 1。

表 1 钢管塔基础土层计算特征值

序号	土层名称	厚度/m	侧壁摩阻力/kPa	承载力/kPa
1-1	素填土	0.72	30	
3-1	黏土	5.5(1.47)	78	200
3-2	粉质黏土	0.5	39	140
4-1	粉土	3.5	92	140
4-1A	淤泥质粉土	0.6	21	80
4-1	粉土	2.6	92	140
5	淤泥质粉土	0.7	23	100
6	黏土	0.88	101	260

桩体单独承载的单桩竖向承载力 R_{kd1} 为:

$$R_{kd1} = \eta \times f_{cu} \times A_p \quad (1)$$

式中: η 为桩身强度折减系数,取 0.33; f_{cu} 为桩身抗压强度平均值,取 10 000 kPa。桩体和土体联合承载的单桩承载力 R_{kd2} 为:

$$R_{kd2} = \mu_p \times \sum (q_{si} \times l_i) + A_p \times q_p \quad (2)$$

式中: q_{si} 为桩周第 i 层土的侧阻力特征值; l_i 为桩周第 i 层土的厚度; q_p 为桩端地基土承载力特征值,取 260。经计算, R_{kd1} 、 R_{kd2} 分别为 933 kN、1605 kN,取其较小值,即单桩承载力 $R_{kd}=933$ kN。

单桩承担的处理面积 A_e 为 0.554 m²,单桩分担的处理地基面积的等效圆直径 D_e 为:

$$D_e = a \times s \quad (3)$$

式中: a 为布桩特征系数,等边三角形布桩 $a=1.05$; s 为

桩间距。面积置换率 m 为:

$$m = D^2 / D_e^2 \quad (4)$$

则,复合地基承载力 f_{spk} 为:

$$f_{spk} = m \times R_{kd} / A_p + \beta \times (1 - m) \times f_{sk} \quad (5)$$

式中: β 为桩间土承载力折减系数,取 0.2; f_{sk} 为处理后桩间土承载力特征值,取 140 kPa。计算得 $f_{spk} = 1697$ kPa,加固后的土体复核地基承载力将近 1700 kPa,可确保顶管施工对基础承载土体的沉降影响很小。

2.1.2 加固方法

采用 $D=0.6$ m 高压旋喷桩^[2],等边三角形布桩,桩间距 0.8 m×0.8 m,桩长 15 m,共 140 根。加固范围长 15.8 m,严禁接触碰撞基础;基础下部无法施工高压旋喷桩的区域,采用高压注浆加固,但是不影响基础运行^[3],加固面积 15.4 m²,深度为基础底面以下 6 m。加固平面如图 2 所示,立面布置和土层分布如图 3 所示。

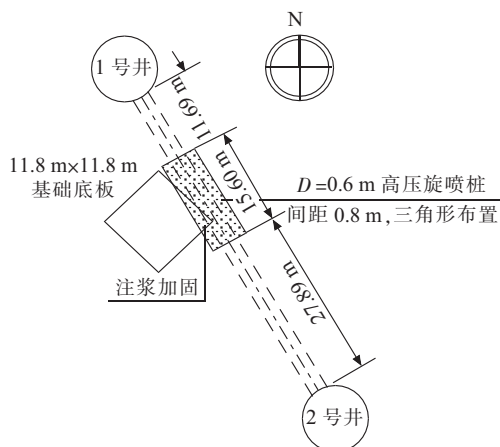


图 2 A 钢管塔加固平面图

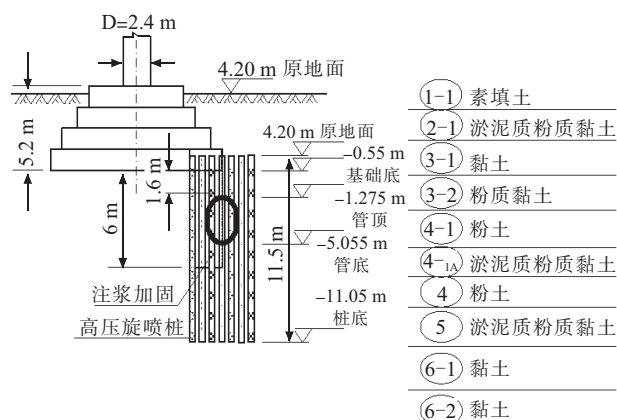


图 3 A 钢管塔加固立面和土层分布

2.1.3 主要施工参数

高压旋喷桩水泥为不低于 42.5 级普通硅酸盐水泥,水泥浆液水灰比取 1,水泥掺量取土天然重度的 30%,喷浆压力为 2.0 MPa,喷浆量 100~150 L/min,气压 0.7 MPa,风量 10 m/min,水压 30 MPa,水流量 80~120 L/min,提升速度 6~10 cm/min。桩身垂直度不大

于 1/100, 孔位偏差不大于 50 mm。施工及质量符合 JGJ 79-2002^[1]和 JGJ 120-2012^[4]。

2.1.4 施工检测

高压旋喷桩施工 28 d 后, 钻孔取芯检查成桩的质量^[5], 桩身无侧限抗压强度值应大于 10 MPa, 若不足, 应及时调整施工工艺后加密复喷。保养龄期到后, 钻检桩体完整性, 并检测注浆凝固体强度和变形性能。

2.2 B-F 钢管塔

以 C 和 F 钢管塔为例, 其他杆塔的加固方法类似。C 和 F 钢管塔位于顶管 IV 段。C 钢管塔为三级台阶扩大基础, 基础底层平面尺寸 3.4 m×3.4 m, 埋深 2.5 m。F 钢管塔为三级台阶扩大基础, 底层平面尺寸 7.2 m×7.2 m, 埋深 3.0 m。

2.2.1 加固计算

采用液压注浆加固, 加固后的土体复核地基承载力, 经核算为 130 kPa, 达到天然黏土至粉质黏土的地基承载力水平, 结合钢管塔下 3~4 m 厚的原状黏土持力层, 可保证顶管施工对钢管塔的沉降影响较小。

2.2.2 加固方法

对顶管外边线两侧 1.5 m 范围内的土体进行液压注浆加固, 注浆孔间距 1 m, 以提高土体的承载力, 增大土体力学参数, 减小顶管施工引起的土体沉降。C 钢管塔土体加固如图 4 和图 5 所示, F 钢管塔土体加固与此类似。

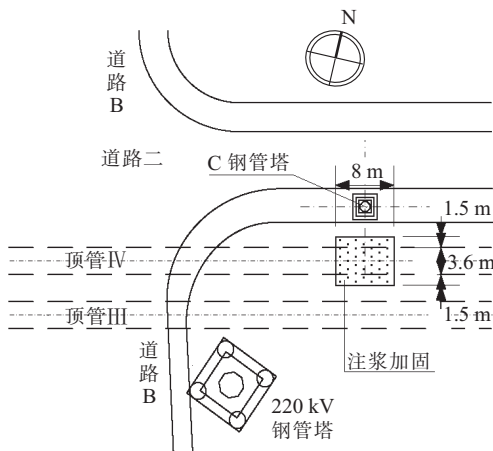


图 4 C 钢管塔加固平面图

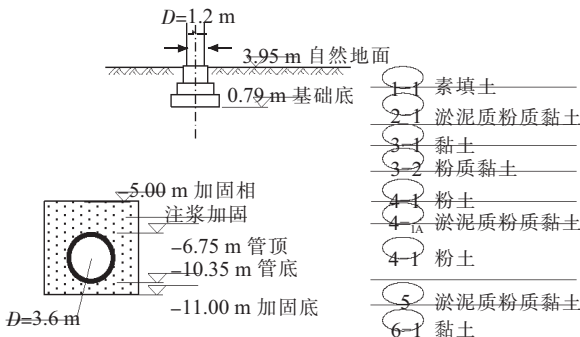


图 5 C 钢管塔加固立面和土层分布

2.2.3 主要施工参数

水泥浆采用 42.5 级硅酸盐水泥, 水灰比取 1, 水泥浆塌落 25~75 mm, 黏度 80~90 s, 7 d 抗压强度应为 0.3~0.5 MPa, 注浆流量 7~10 L/min, 注浆压力 1~7 MPa。施工及质量符合相关规定。

2.2.4 施工检测

注浆凝固体强度和变形性能检测采用标准贯入试验、现场十字板剪切试验、静力轴探试验。

2.2.5 施工监测

注浆施工和顶管施工过程中, 同步检测土体的隆起量和铁塔的沉降和倾斜度等。当观测值超过预警时应及时报告监理、施工单位及设计单位, 采取相应保护措施。沉降监测的控制值与报警值如表 2 所示。

表 2 沉降控制值与报警值

监测项目	日变化速率报警值	累计报警值	累计控制值
周边地表沉降 /mm	-5~+2	-16~+8	-20~+10
钢塔基础沉降 /mm	-5~+2	-16~+8	-20~+10
钢塔倾斜率 /%		0.15	0.2

3 加固效果

按上述施工方案实施加固施工及保养, 结合工程进度要求, 分别对加固区进行 4 d, 10 d 和 28 d 保养龄期后的土体加固效果检测^[6], 检测结果如下。

3.1 A 钢管塔

28 d 龄期后, 高压旋喷桩区采用地探钻机随机钻芯取样, 抽检桩体 6 根。实验室试验芯样, 检测桩体搅拌效果和深度范围内的水泥含量。同时, 对桩体芯样进行无侧限抗压强度试验, 综合评定桩身质量。检测结果表明, 芯样质地坚硬, 水泥与土体搅拌均匀性良好, 完整性较好, 水泥含量高, 桩端持力层为灰褐色可塑粉质黏土。检测无侧限抗压强度 1.39~9.95 MPa, 达到 1700 kPa 的设计要求。

3.2 C 钢管塔

4d 龄期后, 在加固区注浆孔位之间静力触探机施钻静力触探孔, 孔深 11~11.5 m。检测结果表明, 注浆加固对黏土和粉质粘土层的影响较小, 但对粉土层强度的提高作用明显, 推算 28 d 强度可达到 160~170 kPa, 可以达到设计的加固效果, 达到控制顶管后地表浅层基础沉降。

3.3 F 钢管塔

10 d 龄期后, 在加固区注浆孔位之间采用钻机施钻探孔, 孔深均为 10 m, 重力动力触探试验和钻芯取土样目测鉴定相结合。检测结果表明, 注浆加固对粉质黏土层(3-2)的影响较小, 对粉土(4)强度的提高作用明显, 推算 28 d 强度可达到 160~170 kPa, 可以达

到设计的加固效果,控制了基础的沉降。

4 顶管施工和沉降监测结果

4.1 A 钢管塔

顶管 I 施工穿越 A 钢管塔加固区时,顶进速度受加固土体阻力影响,在顶力 400 t 不变的条件下,由原土区 1.5 cm/min 减缓为 1.0 cm/min,穿越后恢复到 1.5 cm/min,刀具磨损十分严重。

同时,A 钢管塔基础 4 个角点的沉降监测记录显示,顶管穿越该区时,基础有明显沉降,最大累计沉降量为-19.65~-15.15 mm,满足基础的保护要求。

4.2 C 和 F 钢管塔

顶管 IV 施工穿越 F 钢管塔基础加固区时,顶力 450 t 不变,顶进速度由 5 cm/min 减缓为 4 cm/min,穿越后恢复到 5 cm/min,顶管完成后刀具磨损轻微;穿越 C 钢管塔时,顶力 725 t 不变,顶进速度由 5 cm/min 减缓为 3.5 cm/min,穿越后恢复到 5 cm/min,刀具磨损也轻微。

F 钢管塔基础在顶管穿越时有明显沉降,并在顶管穿越后持续沉降 0.32~5.35 mm,累计沉降量稳定在-5.59~+2.12 mm 的状态。C 钢管塔基础在顶管穿越时沉降明显,最大累计沉降量-19.73~-9.13mm,并且在穿越后继续沉降 0.47~0.84 mm,至累计沉降量稳定在-20.57~-9.74 mm。基本满足基础的保护要求。

5 差别性效果分析

5.1 地质条件

地质报告和相同顶进长度下的顶管顶力及顶进速度表明,顶管 I 段的地质工程特征比顶管 IV 段高 50%左右,因此 A 钢管塔基础的地质条件比 C 和 F 钢管塔好很多。

5.2 基础受力状态

A 钢管塔为双回路 220 kV 大转角塔,顶管穿越区处于其基础的集中受压区;而 C 和 F 钢管塔为单回路 110 kV 直线塔,顶管穿越区处于其基础侧边的均匀受压区。因此,A 钢管塔基础的加固要求比 C 和 F 钢管

塔高得多。

5.3 土体加固方法

A 钢管塔基础加固采用高压旋喷桩工艺,可采用恰当措施,控制加固施工对基础下承载土层的扰动,效果良好。F 钢管塔采用压密注浆工艺,为控制造价,施工方案限定了浆液渗透范围,加固施工扰动保护基础较明显抬升,减小了顶管穿越后的累计沉降量。同样采用压密注浆工艺的 C 钢管塔,由于加固区为地质软弱层,限定浆液渗透范围的措施的效果较差,加固施工对保护基础的抬升扰动不明显,累计沉降量较大。

6 结束语

保护基础沉降趋于稳定后,总沉降量基本到达设计限值,均达到了保护基础的目的。决定加固方法选择的主要因素为地质条件和基础受力。加固措施成功的五个主要因素为:选择有代表性的地质参数进行加固计算,精确分析和计算基础受力,规范化实施施工技术措施,检测确认加固施工效果,预先控制顶管穿越加固区施工参数,并在过程中及时调整。以上分析及保护方法的取用,对其他类似的大直径顶管施工中可能遇到的杆塔保护具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部. JGJ79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [2] 苏新法.高压旋喷桩在深基坑加固的应用[J].西部探矿工程,2010,4:29-30.
- [3] 李方楠,沈水龙,罗春泳,等.考虑注浆压力的顶管施工引起土体变形计算方法[J].岩土力学,2012,33(1):205-208.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ120—2012 建筑基坑支护技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [5] 中国工程建设标准化协会. CECS03—2007 钻芯法检测混凝土强度技术规程[S].
- [6] 王国英.注浆加固在顶管施工的应用[J].中国高新技术企业,2010(3):155-156.

作者简介:

卞茂斌(1974),男,江苏盐城人,助理工程师,从事电力生产的现场施工管理及协调工作。

Discussions on Protection Methods for Transmission Towers on the Tunnels of Power

BIAN Maobin

(Wuxi power supply company, Wuxi 214061, China)

Abstract: The tunnels of power underground are in the depth of more than 10 meters. In the area of soft soil foundation at the Yangtze River, they are often built in the soil layer. However, power transmission towers also constructed near the path of tunnels, which cannot be evaded. With practical engineering projects, analysis on the soil reinforcement are implemented in terms of reliability, economic and effectiveness. The research provide a reference for future similar construction projects.

Key words: path on the tunnels of power; transmission tower protection; soil reinforcement

Caesar II 与 Glif 对高温高压管道静力分析的比较

王 静, 徐 蕾

(江苏省电力设计院, 江苏 南京 211102)

摘 要:以某江苏华电句容发电厂 1000MW 机组工程主蒸汽管道为对象,根据计算数据分析从冷热位移、端口推力、弹簧选择三方面分析比较了 Glif 与 Caesar II 两种电站管道设计软件的差异,确定了两种软件高温高压管道的静力分析结果基本吻合。

关键词:Caesar II ; Glif ; 静力分析

中图分类号:TK223.1

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0066-03

国内火电设计中普遍使用的管道应力分析软件是东北院开发的 Glif 软件,随着火电机组参数和容量的不断提高,越来越多的设计院引进了国际上较为流行的 Caesar II 软件进行静力和动力分析。江苏华电句容 2×1000 MW 工程主蒸汽管道和高压旁路阀门前管道的设计温度为 610℃,设计压力为 29.67 MPa,工作温度为 605℃,工作压力为 28.245 MPa,管道材料为 A335P92。低温再热蒸汽管道和高压旁路阀门后管道的设计温度为 390.8℃,设计压力为 29.67 MPa,工作温度为 370℃,工作压力为 6.303 MPa,管道材料为 A6911-1/4CrCL22。为了更好了解 Caesar II 与 Glif 静力计算结果的差异,以江苏华电句容发电有限公司一期(2×1000 MW)工程的主蒸汽管道为实例,对主蒸汽管道应力计算结果进行了分析比较。

1 建模

分别使用 Glif 与 Caesar II 软件对管系进行建模。因 Glif 软件的应用较为广泛,这里不再赘述。Caesar II 软件的建模主要依据《Caesar II User's Guide》、《Caesar II Application Guide》、《Caesar II Technical Reference》。Caesar II 内含的数据库^[1]比较丰富,在建模过程中要注意初始条件的设置:如选择正确的应力验算规程、选用或编制合适的单位表、设置通用的坐标轴系等。

使用 Caesar II 软件所建主蒸汽、高压旁路和低温再热蒸汽管道的模型如图 1 所示,主蒸汽管道各支吊点布置如图 2 所示。Caesar II 软件较 Glif 软件有更直观的输入界面,并能实时三维显示,一定程度上避免了输入错误,而且管道属性可以继承,建模快捷。

2 计算结果分析比较

2.1 冷热位移比较

管道冷位移是管道安装完成后相对于设计线产

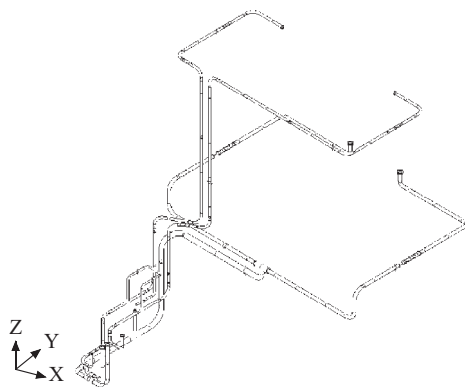


图 1 主蒸汽、高压旁路和低温再热蒸汽管道模型

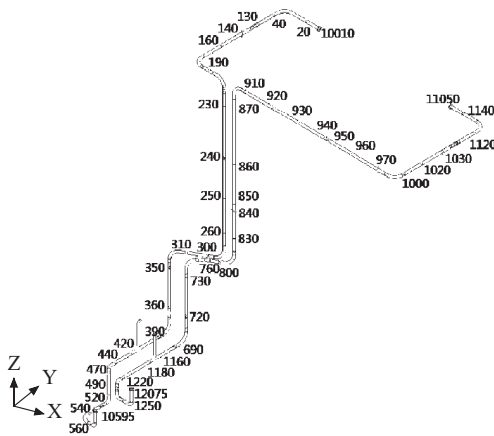


图 2 主蒸汽管道各支吊点布置

生的位移,主要由管道自重及外力的共同作用产生,受管道刚度及弹簧刚度的影响。管道热位移是在冷态的基础上考虑了温度及端口热位移的影响所产生的位移。左侧主蒸汽管道上的支吊点的冷热位移如表 1 所示,右侧管道情况基本相似。可以看出,Glif 软件得出的冷、热位移与 Caesar II 软件得出的冷、热位移值大小基本吻合。

需注意的是 Glif 中给出的热位移是从冷态到热态的相对位移,对应 Caesar II 中的结果应该是膨胀荷载工况(EXP,考虑温度和附加位移)下的位移,这里很容易把 Caesar II 中运行热态工况(OPE,考虑自重、温度、

表 1 左侧支管冷热态位移

点号	G 冷位移/mm			C II 冷位移/mm			G 热位移/mm			C II 热位移/mm		
	X 向	Y 向	Z 向	X 向	Y 向	Z 向	X 向	Y 向	Z 向	X 向	Y 向	Z 向
20	0	0	-1	0	0	-1	-156	2	-14	-156	2	-14
40	1	-1	-4	1	-1	-3	-185	-36	-17	-185	-36	-19
130	4	-1	0	3	-1	0	-116	-97	0	-115	-97	0
140	6	-1	4	6	-1	4	-53	-137	14	-53	-137	15
160	8	-1	7	8	-1	7	11	-173	22	11	-173	23
190	10	1	4	9	1	4	70	-134	75	70	-133	76
230	4	1	0	4	0	0	174	-32	86	174	-32	86
240	-3	-3	0	-3	-3	0	272	105	0	271	106	0
250	-5	-4	0	-5	-4	0	278	210	-65	278	211	-65
260	-6	-4	0	-6	-4	0	219	277	-122	219	277	-122
300	-6	-5	0	-5	-5	0	114	277	-114	115	277	-114
310	-5	-7	0	-4	-7	0	96	252	40	96	252	-40
350	-4	-7	0	-4	-7	0	1	219	0	2	219	0
360	-3	4	0	-3	-3	0	-142	190	-65	-140	190	-65
390	-1	0	-2	-1	0	-2	-201	138	-85	-199	139	-85
420	1	0	-9	1	0	-9	-167	83	-29	-165	83	-29
440	1	0	-13	1	0	-14	-147	51	-4	-146	52	-5
470	2	0	-14	2	0	-14	-123	36	-5	-122	36	-5
490	2	0	-11	2	0	-11	-74	21	-25	-73	21	-25
520	2	0	-7	2	0	-8	-56	0	-29	-56	0	-29
540	1	0	-5	1	0	-5	-50	-22	-28	-50	-22	-28
560	1	0	-1	1	0	-1	-27	-35	-36	-27	-35	-35

注:G 和 C II 分别表示采用 GLIF 软件和 Caesar 的计算结果。

附加位移、压力和集中力)下的位移与 Glif 中的热位移等同起来,OPE 工况下的热位移是从设计态到热态的绝对热位移。

2.2 端口推力比较

Glif 在计算初热端口推力时采用热态弹性模量。而 Caesar II 默认的热态 OPE 工况采用的是冷态弹性模量,这与实际情况不符,计算的结果相对保守,在小机组和小管道上采用会更偏安全;但对于 1000 MW 的四大管道来说,采用冷态弹性模量计算势必要增加管道的柔性才能保证接口推力在允许的范围内,导致了建设成本的增加,是不经济的^[2]。针对这种情况,江苏院孙国模高工提出了修改建议^[3],COADE 公司在 Caesar II 5.0 以上的版本都提供了用户选用热态弹性模量进行计算的方法。在该次计算中,添加了一个采用热态弹性模量的 OPE 热态工况,用于热态端口推力的计算。冷热态接口推力计算结果如表 2、表 3 所示。

从表 2 可以看出,除了冷态时过热器出口(10010 点)的计算结果力矩差异明显,其他接口的计算结果都基本接近。经过比较分析可以发现 10010 接口附近的 40 号支吊点,Glif 与 Caesar II 选出的弹簧型号不一致,Glif 为 118 而 Caesar II 为 218,118 的弹簧刚度为 1 541.5 N/mm,218 的弹簧刚度为 770.8 N/mm,不同的

表 2 冷态接口推力和力矩

项目		接口推力/N			接口力矩/(N·m)		
		F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
过热器出口 (10010 点)	G	878	-34	-39 675	-17 188	-192 685	21 154
	C II	824	-46	-34 148	-12 287	-140 790	20 016
过热器出口 (11050 点)	G	-800	-527	-14 735	-18 649	40 900	-7560
	C II	-806	-526	-15 833	-18 734	43 547	-7609
主汽门入口 (10595 点)	G	-368	9606	-47 238	-64 409	-119 626	-23 450
	C II	-401	9531	-47 134	-64 624	-120 771	-22 994
主汽门入口 (12075 点)	G	1520	-4076	-47 630	-41 088	-168 059	8026
	C II	1622	-4328	-48 204	-42 775	-170 178	8747

注: F_x, F_y, F_z 为接口处推力; M_x, M_y, M_z 为接口处力矩;其中 x, y, z 为坐标方向。

弹簧刚度使该吊点在冷态时的分配荷重不同,从而影响了该接口的冷态端口推力。

从表 3 可以看出,初热工况下,当 Caesar II 采用冷态弹性模量计算时,过热器出口及主汽门进口处的接口推力明显大于 GLIF 的计算结果。当 Caesar II 采用热态弹性模量计算时,过热器出口及主汽门进口处的端口推力 Glif 与 Caesar II 的数据吻合得比较好。

2.3 弹簧型式比较

弹簧的选择、安装有热态吊零和冷态吊零 2 种方式。所谓吊零,就是管道吊点在对应的热态或冷态时由

表 3 热态接口推力和力矩

项目		接口推力 /N			接口力矩 /(N·m)		
		F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
过热器出口 (10010点)	G	16 161	26 812	-3610	-100 602	-214 053	238 553
	CⅡ热	16 150	26 654	-4712	-100 412	-215 674	238 772
	CⅡ冷	20 663	34 140	-5080	-126 301	-278 179	305 560
过热器出口 (11050点)	G	-1045	2400	38 420	-95 755	-187 795	-85 498
	CⅡ热	-1121	2374	37 023	-95 137	-183 442	-86 178
	CⅡ冷	-1427	3047	48 388	-119 559	-233 098	-110 290
主汽门入口 (10595点)	G	5517	27 202	2040	16 803	183 454	65 990
	CⅡ热	5477	27 479	1873	15 925	179 174	62 941
	CⅡ冷	6738	35 293	2524	22 794	226 280	81 180
主汽门入口 (12075点)	G	-2415	-26 270	-12 373	-118 290	-26 510	123 110
	CⅡ热	-2334	-26 120	-13 185	-119 531	-29 668	121 816
	CⅡ冷	-3473	-31 976	-15 899	-148 240	-38 396	152 571

注：CⅡ热表示采用热态弹性模量时的计算结果，CⅡ冷表示采用冷态弹性模量时的计算结果。

于管道自身重力荷载而产生的垂直位移为零。热态吊零时，弹簧工作荷载等于分配荷载，管道处于冷态时，弹簧荷载即安装荷载等于分配重力荷载和弹簧附加力的矢量和。由于热态吊零时管系中支吊架承受的自重重力比较均匀，所以电厂管道的弹簧选型常常基于热态吊零原则^[4]。

Glif 的选弹方式是热态吊零。而 Caesar II 中弹簧的吊零方式可以通过更改弹簧库的方法进行选择，这里采用热态吊零的方式进行设置。

Caesar II 软件推荐的选弹方式不包含弹簧刚度进行选弹设计。2001 年，江苏省电力设计院就 Caesar II 软件忽略弹簧刚度的选弹方式提出了质疑，随后 COADE 公司对软件进行了修改，在 Caesar II 4.2 以上的版本中添加了考虑弹簧刚度的选项。考虑弹簧刚度时，弹簧冷荷载会推动管道，但该刚度会限制管道的热胀变形，所以计算出的弹簧位移相对小一些，弹簧的选弹热位移与 EXP 工况位移一致；不考虑弹簧刚度时，弹簧的选弹热位移与 OPE 工况位移一致。文中设置成考虑弹簧刚度的影响。

2 款软件计算所得的弹簧型号见表 4。可以看出，选出的弹簧基本一致，支吊点 40 和 440 的弹簧有出入是位移及荷载处于选弹临界点所致。在 Caesar II 所出的弹簧表中，可以清晰地看出选弹位移为冷态到热态的相对位移（EXP 工况位移），即弹簧的实际运行位移。在管道相对柔性的情况下，Caesar II 推荐方式选出的弹簧会明显大于 Glif 选出的弹簧，即弹簧刚度的影响较大。而管道刚度比较大的情况下，这种影响就不明显。COADE 公司认为在不考虑弹簧刚度的情况下，得到弹簧的理论安装荷载，也就是弹簧出厂的预压荷载，在安装过程中不需要调整弹簧，比较方便。而考虑弹簧

表 4 弹簧选型表

点号	GLIF	Caesar II
20	117	117
40	118	218
140	216	216
160	217	217
310	116+216	116+216
420	2216	2216
440	113	114
470	117	117
490	218	218
540	216	216
560	2×(115+215)	2×(115+215)
690	2×(115+215)	2×(115+215)
1000	217	217
1020	116	116
1120	118	118
1140	117	117
1160	2×(117+217)	2×(117+217)
1180	217	217
1220	214	214
1250	2×(115+215)	2×(115+215)

刚度的方法得到的是弹簧的实际安装荷载，需要在安装过程中调整弹簧到该荷载下，相对比较繁复。

3 结束语

通过对 Caesar II 软件进行计算条件设置后，Glif 与 Caesar II 软件在高温高压管道静力分析上结果基本接近。相比 Glif 只能用于静力分析，Caesar II 还能用于管道动力计算，与汽锤力分析软件 Pipenet 设有数据接口，能满足对四大管道须进行动力计算要求。Caesar II 软件是一款界面直观、功能强大的应力分析软件，在以后的火电设计中必定会越来越显示其优越性。

参考文献：

[1] 陈 乐. 应力分析软件 CAESAR II 功能及应用[J]. 钢铁技术, 2004(1):31-32.
[2] 王致祥,梁志钊,孙国模,等. 管道应力分析与计算[M]. 北京：水利电力出版社,1983:45.
[3] 孙国模,王少宁. CAESAR II (4.2 版)软件的使用研究报告(静力分析计算部分)[R]. 南京：江苏省电力设计院,2001.
[4] 郑 钢. 电厂管道的弹簧支吊架选型[J]. 热力发电,2010,39(7):95-97.

作者简介：

王 静(1984),女,江苏张家港人,工程师,从事电厂设计咨询等方面工作；
徐 蕾(1975),男,江苏通州人,高级工程师,从事电厂设计咨询等方面工作；

某 150 MW 机组新投运期间水汽品质异常分析及控制

刘兰平

(江苏国华太仓发电有限公司,江苏 太仓 215433)

摘要:以 150 MW 机组为对象,针对新投运发电机组在试运行过程中工质品质容易发生大幅度超标问题,分析了产生超标的原因,给出了水汽品质相应的控制方法,并利用 2 台机组的运行数据说明了控制方法的有效性。

关键词:发电机组;水汽品质;异常;控制

中图分类号:TK223.5

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0069-03

某电厂 2 台新装超高压 150 MW 机组,热力系统由 DGJ500/13.7-II 7 型超高压参数自然循环汽包炉和 C135/N150-13.24/535/535/0.6865 型超高压中间再热抽汽凝汽式汽轮机组成。首台机组在试运及投产后的水质超标问题严重影响了锅炉和汽轮机的安全运行,给锅炉腐蚀和汽轮机通流部分结垢埋下了隐患。文中分析了机组水汽品质超标的原因,提出了新的解决方法,在第二台机组试运时取得了良好的效果。由于新建或大修后机组水质超标现象在各类机组及各电厂普遍存在,这种低成本且快速使水汽品质达标的方法,对实现机组的安全、经济、节能运行具有一定参考价值。

1 典型水汽品质超标实例

第一台机组在约 30 d 的试运期间水汽品质完全不合格,商业运行初期水汽品质也不合格,定排和连排排污量较大,机组补水率达 8%,至水汽系统水汽品质完全合格历时 82 d,严重影响了机组的经济性,并影响到机组的长期安全运行。

整理启动后 35 d、每 2 h 进行一次化验,数据趋势如图(1-6)所示,分析结果见表 1。给水溶氧最小值为 31.7 $\mu\text{g/L}$,全部不合格;给水二氧化硅连续不合格天数为 25 d;炉水二氧化硅最小值 0.961 mg/L 连续不合格天数为 25 d;饱和蒸汽电导 35 d 内仅有 2 次合格;过热蒸汽二氧化硅不合格率为 37.1%;过热蒸汽电导仅有 2 次合格。

表 1 水汽品质分析数据

指标名称	国家标准	不合格天数/d	合格率/%
给水溶氧	$\leq 7 \mu\text{g/L}$	35	0
给水二氧化硅	$\leq 20 \mu\text{g/L}$	25	28.57
炉水二氧化硅	$\leq 0.45 \text{ mg/L}$	25	28.57
饱和蒸汽电导	$\leq 0.3 \mu\text{s/cm}$	35	0.48
过热蒸汽二氧化硅	$\leq 20 \mu\text{g/kg}$	13	62.9
过热蒸汽电导	$\leq 0.3 \mu\text{s/cm}$	35	0.48

2 水汽品质超标因素分析

在原始数据中,各监督点的二氧化硅、联氨、氢电导、溶氧等均有严重超标现象,其原因分析如下。

2.1 联氨超标

联氨超标是由于人工或者自动加联氨加药不当而引起的。

2.2 氢电导

氢电导是衡量热力系统水汽品质的重要指标^[1],综合反映水汽质量的优劣,尤其当系统阴离子含量异常时,氢电导率能够准确反映锅炉水汽系统阴离子杂质含量的变化。氢电导超标反映出水质可能存在多种因素的污染,应根据以下分析进行控制。

(1) 机组启动初期,系统安装及锅炉酸洗等遗留杂质在短时间内未得到控制,上水过程中搅动某些死角的杂质或酸洗存水容易造成氢电导超标。

(2) 正常运行时,凝汽器泄漏造成水质污染,漏真空引起系统内部二氧化碳增多,导致 H^+ 、 OH^- 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 CHCOO^- 相关离子增加,从而造成氢电导超标。

(3) 正常运行时,精处理控制不当、阳树脂被过量氧化或凝补水携带有机物造成有机酸含量增加,造成氢电导超标。

2.3 二氧化硅

二氧化硅超标会造成汽轮机叶片积盐,影响锅炉的安全和汽轮机效率。其超标有以下几个方面原因。

(1) 新机组中二氧化硅主要来源于管道内的泥沙,在安装前以及喷砂处理后没有完全清理干净。

(2) 机组在启动阶段凝泵采用工业水等不合格的水进行密封,工业水进入水系统。

(3) 正常运行时凝汽器钛管泄漏,循环水进入汽水系统。

(4) 除盐水制水过程工艺出现问题或者水质污染,通过凝补水进入系统。

2.4 溶氧

溶氧超标会引起管道及受热面等腐蚀,严重的会引起氧化皮脱落,对机组的安全运行造成隐患。由原始数据得知,凝结水溶氧超标严重,除氧器的除氧效果很好,但由于凝结水溶氧较高,导致给水溶氧不合格。凝汽器漏真空、凝泵滤网漏气、凝泵密封水不足和凝补水水量过多都是凝结水溶氧超标的主要原因。

3 控制措施

3.1 联氨超标

运行人员只要严格执行操作规程,就可以避免联氨超标。

3.2 氢电导超标

(1) 新系统投运时分系统、分阶段彻底清洗基建或酸洗等过程中留存杂质以及存水。

(2) 正常运行时控制凝结水补给水的水质,控制好化水制水工艺。

(3) 凝结水精处理运行时,防止阳树脂过度氧化,生成有机酸。

3.3 二氧化硅超标

电厂新机组的洗硅过程是必需经历的步骤,按照规定,一定的压力等级对应一定的二氧化硅含量,当含量超标时,禁止进入下一个压力等级。二氧化硅在蒸汽中的溶解性随着压力和温度的升高而升高,二氧化硅将随着蒸汽进入汽轮机中。当蒸汽在汽轮机做功后,随着压力的降低二氧化硅析出,沉积在通流部分形成积盐。积盐会增加汽轮机的轴向推力以及降低汽轮机效率,影响汽轮机的经济运行,严重者影响汽轮机的安全运行。另外,如果二氧化硅含量不合格,在正常运行时必须采用排污的方法进行控制。大量排污不仅浪费凝结水,而且造成大量的热量损失。采取以下方法可以有效降低以上风险。

(1) 试运初期,系统管道内部的泥沙、杂质会沉积在凝汽器、除氧器、汽包及各个联箱等处,随着机组的排污,杂质会逐渐减少。为了使机组在启动后短时间内汽水品质达到标准,在上水前仔细清理凝汽器、除氧器底部遗留或沉淀杂质。在试运及初期运行过程中,如果有停运机会,也要及时检查清理凝汽器和除氧器。

(2) 上水阶段的冲洗,即冷态冲洗。机组上水时要保证每一个阶段水质合格后才能进入下一个环节,冷态冲洗至关重要。具体步骤如下。

首先进行凝汽器冲洗。凝补水合格,凝汽器上水冲洗。凝泵密封水使用工业水时尽可能在启动凝泵时投入,启动凝泵后应及时切换密封水至凝结水供给。凝泵启动后检查凝结水水质,如果水质不合格,则必须放水或者利用低加出口放水门进行管路冲洗,最终达到合格,然后才能进入除氧器。

其次进行除氧器冲洗。除氧器上水初期,利用除氧器底部放水对除氧器进行初步冲洗,冲洗合格后启动电泵打循环直到水质合格再给锅炉上水。机侧冲洗合格标准^[2,3]为:全铁 $\leq 200 \mu\text{g/L}$;联氨 $100\sim 300 \mu\text{g/L}$; pH 值 ≥ 90 ;浊度 FTU ≤ 2 。

锅炉上水时,先开启水冷壁底部放水门对汽包及水冷壁下联箱进行冲洗,冲洗合格后关闭底部放水,锅炉上水至正常。炉侧冲洗合格标准^[2,3]为:浊度 $\leq 2 \mu\text{mol/L}$;全铁 $\leq 200 \mu\text{g/L}$;联氨 $200\sim 300 \mu\text{g/L}$; pH 值 ≥ 90 ;磷酸根 $3.0\sim 5.0 \text{ mg/L}$ 。

(3) 点火升温升压阶段的冲洗,即热态冲洗,汽包炉称之为洗硅。随着机组压力和温度的升高,炉水二氧化硅含量升高,此时加强底部排污,并将连排开到最大,进行热态冲洗过程。在汽水品质超标时,严禁进入下一个压力等级。升温升压阶段加强排污冲洗不仅对在短时间内改善水质起到重要作用,而且在机组启动过程中排放的总热量和水量都较少。

(4) 并网时,汽水品质应合格,否则应继续进行热态洗硅过程,防止溶硅进入汽轮机。汽轮机冲车及并网后,应及时投入高低加系统,便于及早冲洗高低加汽侧,在低负荷阶段对高低加进行洗硅,汽水品质合格后升负荷进入下一个压力等级。

(5) 正常运行汽水品质超标时,应当降压运行,加强排污。由于新机组是全周进汽,因此调门可以全开降压运行而不影响机组负荷。压力降低时,不仅蒸汽携带二氧化硅的能力降低,而且有利于炉水排污。锅炉排污应当主要用连排进行,不仅可以回收工质,而且可以回收热量,也可以防止底部排污影响水循环,有益于机组安全和经济运行。

3.4 凝结水溶氧超标

在机组试运初期或者有条件时进行凝汽器灌水查漏实验,确定泄露点,然后进行相应处理。在汽缸结合面涂抹黄油前后的真空严密性试验可以确定汽缸结合面是否严密不漏。

在正常情况下,应当控制系统的漏水漏汽,发现阀门内漏外漏应及时消除。汽水品质合格时,限制定排次数及连排外排阀门开度,降低补水率。

3.5 进行全过程化学监督

机组启动至正常运行是一个持续渐进和正常监督的过程,在机组的全寿命期间,化学监督起到了至关重要的作用。汽水品质长期不合格会影响机组的安全、稳定、长寿命和高效运行。因此,在机组启停的一个循环中,必须进行全过程化学监督。

4 实效对比

根据以上分析,在第二台机组试运投产阶段参考

了相关措施,第一台机组和第二台机组的综合水汽品质从最初到合格的实践对比如表 2 所示。

表 2 2 台新装机组水汽品质对比

项目	不合格天数/d	
	第一台	第二台
氢电导	82	29
溶氧	75	23
二氧化硅	67	28
硬度	25	16

5 结束语

第二台机组采用上述措施,从启动开始,仅 30 d

水汽品质已经合格,大大缩短了从初负荷至满负荷的时间。此结果表明文中的原因分析正确,采取的措施有效,节水节能效果良好。

参考文献:

- [1] 丁桓如,吴春华,龚云峰,等.工业用水处理工程[M].北京:清华大学出版社,2005:27-29.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员. GB/T 12145—2008 火力发电厂机组及蒸汽动力设备水汽质量[S].北京:中国电力出版社,2008.
- [3] 国家能源局. DL/T 805—2011 火电厂汽水化学导则[S].北京:中国电力出版社,2011.

作者简介:

刘兰平(1970),男,河北石家庄人,工程师,从事火力发电工作。

Analysis on Abnormal Water-Vapour Quality Encountered in One 150 MW Power Unit Newly Put Into Operation

LIU Lanping

(Guohua Taicang Power Generation Co. Ltd., Taicang 215433, China)

Abstract: In one 150 MW power unit newly put into operation, it was found that the water-vapour quality cannot meet the requirement. After analyzing the main reasons, we proposed several solution measures, which have been validated to be effective by the operation data acquired in two power units adopting them.

Key words: power unit; water-vapour quality; abnormal; control

(上接第 68 页)

Static Analysis Comparison of High Temperature and High Pressure Pipelines Between Caesar II and Glif

WANG Jing, XU Lei

(Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

Abstract: In this paper, based on the project of Jiangsu Huadian Jurong Power Plant, pipe modeling and static calculation of the main stream pipes are performed by respectively using Caesar II and Glif. The results of the static calculation, including the cold and hot state displacement value, the joint thrust and torque at the pipe connections of the boiler and the steam turbine as well as the selection of the spring, are analyzed and compared. The results show that basically consistent results are achieved by Caesar II and Glif, for the static analysis of high temperature and high pressure pipelines.

Key words: Caesar II; Glif; static analysis

千亿投资助推特高压审批开闸 2014 年迎来特高压大年

近日,国家电网发布消息称,淮南—南京—上海 1000 kV 特高压交流工程已经获得了国家发改委核准。该工程动态总投资为 268.1 亿元,将把安徽电送到用电高度紧张的江苏、上海等地。这条特高压线路从前期的规划到获批,历经了 5 年的时间。由电力规划设计总院制定的电网投资方案,已通过评估,预计将在随后公布。方案主要包括 12 条“西电东送”的输电通道项目,其中有淮南—南京—上海、蒙西—天津等 8 条特高压项目。获得批准的淮南—南京—上海 1000 kV 特高压的项目并不是个案,酒泉到株洲的 800 kV 特高压输变电工程已经通过了电力规划设计总院的可研评审,随后国家发改委也会有一个专门的建设批复。酒泉到株洲的 800 kV 特高压输变电工程,规划的起点是甘肃酒泉,落点湖南株洲,途经甘肃、陕西、重庆、湖北、湖南等 5 省(市),线路总长度 2413 km,输电能力 750 万 kW,项目总投资 240 亿元。

摘自《江苏电力信息网》

1000 MW 超超临界锅炉不带炉水循环泵的冲管方式

崔国华, 厉富超

(江苏新海发电有限公司, 江苏 连云港 222023)

摘 要:某电厂 1000 MW 超超临界锅炉采用不带炉水循环泵吹管方式进行吹管。对该吹管方式的系统原理, 实施过程中的关键点等相关问题进行了叙述, 针对实际应用中发现的故障进行了分析, 归纳了不带炉水循环泵吹管方式实际运用中的事项注意, 并与国内同类型锅炉传统采用的带炉水循环泵吹管方式进行对比, 分析 2 种吹管方式各自的优点, 供同类型燃煤机组冲管时参考。

关键词:超超临界锅炉; 炉水循环泵; 冲管方式

中图分类号:TK223.5

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0072-03

某公司 1000 MW 机组锅炉系德国 ALSTOM 技术制造的超超临界变压运行螺旋管圈直流炉, 型号为 SG-3049/28.25-M548; 锅炉采用单炉膛塔式布置、四角切向燃烧、摆动喷嘴调温、平衡通风、全钢架悬吊结构、露天布置、固态排渣; 锅炉尾部布置 2 台转子直径为 $D16\ 379\text{ mm}$ 的三分仓容克式空气预热器。锅炉制粉系统采用中速磨冷一次风机直吹式制粉系统, 每台锅炉配置 6 台中速磨煤机, BMCR 工况时, 5 台投运, 1 台备用, B 层燃烧器带有微油点火装置; 设计煤种为彬长大佛寺矿煤; 该工程同步建设脱硫、脱硝装置。该公司首台 1000 MW 机组工程于 2010 年 9 月正式动工, 2012 年 8 月进行化学清洗, 2012 年 9 月 2 日进入冲管阶段。按照冲管技术措施要求, 先是带炉水循环泵启动方式进行, 后在冲管阶段炉水循环泵出现故障。为加快工程进度、节省时间, 经研究决定充分利用现有系统和设备, 尝试采用不带炉水循环泵冲管方式, 取得一点经验, 供参考。

1 锅炉 2 种冲管方式简介

某公司 1000 MW 机组冲管范围: 锅炉受热面管束(蒸汽部分)及其联络管; 主蒸汽管道; 冷段再热蒸汽管道; 热段再热蒸汽管道; 炉本体吹灰系统管路; 取样及仪表管路。按照调试方案, 冲管采用串冲形式进行, 即过热器和再热器成为一个回路, 再热器进口加装集粒器, 直至靶板合格^[1]。冲管以降压、稳压冲管相结合的方式。降压冲管通过工况变化对受热面内的氧化皮等杂物产生扰动, 使之从受热面内壁上剥落, 并随着冲管汽流排出; 稳压冲管可以通过长时间的大动量比系数对受热面的颗粒进行携带^[2]。

1.1 带炉水循环泵启动方式

其汽水流程如图 1 所示。锅炉启动初期, 大部分给水通过炉水循环泵在水冷壁内实现再循环, 水质不

合格时, 给水经大气扩容器由启动疏水泵直接排放至冷却塔。

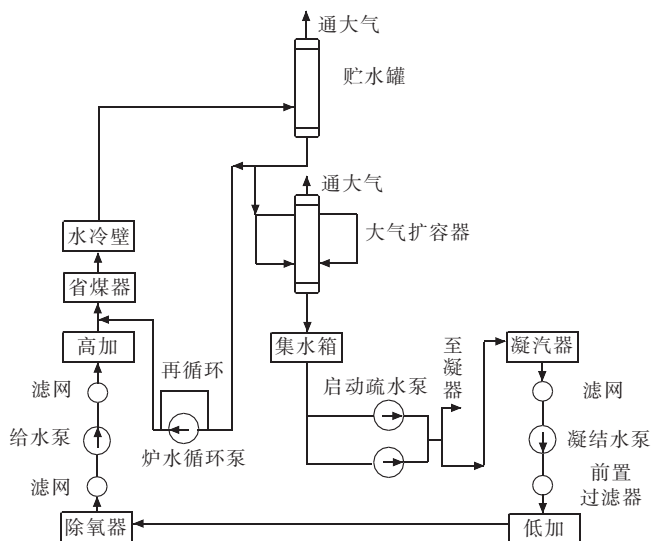


图 1 带炉水循环泵汽水流程

1.2 不带炉水循环泵冲管方式

该方式在炉水循环泵故障情况下采用, 其系统如图 2 所示。锅炉给水除产生蒸汽外, 其余全部进入大气式扩容器, 由锅炉启动疏水泵回收至凝汽器, 水质不合格时直接排放至冷却塔^[2]。

2 带炉水循环泵吹管方式优缺点分析

2.1 优点

热量直接回收, 暖炉效果好, 启动时间短, 节省大量燃料, 水冷壁流量大, 相同燃料情况下产汽量大, 有效防止水冷壁、过热器、再热器超温现象。

2.2 缺点

(1) 贮水罐水位调节难度大, 威胁机组安全。锅炉启动阶段, 贮水罐水位控制十分关键: 贮水罐水位低会导致炉水循环泵跳闸; 贮水罐水位高触发锅炉 MFT, 严重时造成过热器进水事故。此外, 启动过程中要考虑到省煤器出口流量保持 800 t/h 以上, 防止给水流量低

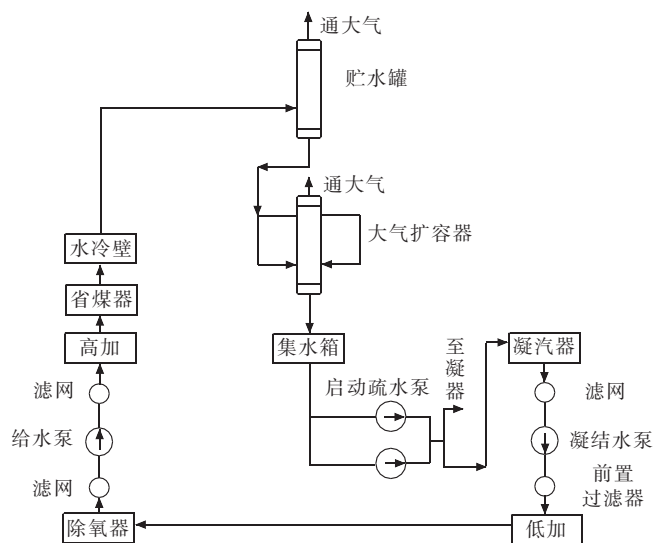


图2 不带炉水循环泵冲管系统

主燃料跳闸(MFT)动作。在频繁的降压吹管过程中,贮水箱压力波动大且快速,贮水箱水位难以调整。贮水箱及其连接管道容积仅 16 m^3 ,降压吹管过程中汽压快速下降造成严重的虚假水位,关闭临冲门后贮水箱压力又快速回升,导致贮水箱水位大幅波动。此时必须统筹协调节主给水旁路调节门、循环泵出口调节门、循环泵再循环门、锅炉贮水罐疏水调节阀等,运行调节难度大,极易发生事故。

(2) 对炉水循环泵不利,频繁地快速调节炉水循环泵出口调节门和再循环门,引起炉水循环泵电流短时间内大幅波动。当临冲门关闭,贮水箱压力回升过程中,贮水箱水位由于压力回升和过热器系统充压的双重作用,快速波动,为维持水位稳定,运行人员快速调整炉水循环泵出口流量,导致炉水循环泵电流在 20 s 内快速从 60 A 下降至 20 A ,后又经历几个快速升降过程。这对运行中的 6 kV 电机和泵都是严峻的考验,应该避免这样的情况发生。

(3) 锅炉冲管前水冷壁虽经化学清洗,冲管过程的给水中仍有可能带有大量铁离子和剥落的氧化皮等物质,采用此方式给水量、排放量均较小,杂质容易在水冷壁内富集,不易及时排放。

3 不带炉水循环泵冲管方式优缺点分析

3.1 优点

(1) 持续大流量冲洗汽机侧高压和低压管道、凝汽器、除氧器、锅炉侧水冷壁等设备,能按照化学检验的要求及时排放、补水,有效提高整个热力系统的清洁程度。排放方式灵活,可以根据化学检测结果灵活排放:如凝汽器内杂质多,可从5号低加出口直接排放,快速提高锅炉水冷壁洁净程度;如集水箱内杂质多,可从锅炉疏水泵直接排放至冷却塔。

(2) 凝泵进口滤网、前置过滤器、前置泵进、出口滤网等都能过滤杂质,提高热力系统清洁程度。

(3) 该方式下,贮水箱水位容易控制,相对带炉水循环泵方式而言,吹管过程中仅需调节锅炉贮水罐疏水调节阀和进水旁路开度,避免炉水循环泵电流大幅波动。冲管过程中,贮水箱水位快速下降,但省煤器出口流量波动仅有 50 t/h 左右,水位波动较小且缓慢,运行人员控制较容易。

3.2 缺点

(1) 锅炉启动时间长,大量热量损失,冲管燃料耗用大。

(2) 为防止蒸汽量过少,导致过热器、再热器超温,必须严格控制燃料量的投入,控制炉膛出口烟温在 470°C 左右。其出口流量为 850 t/h ,省煤器进口水温基本维持 85°C ,此时燃料量为 35 t/h 煤加 $7\sim 9 \text{ t/h}$ 燃油。此过程中,后墙水冷壁 $65\sim 75$ 管多次出现管壁温度高报警,二级再热器管壁温度接近保护值。

(3) 长时间油、煤混烧,不能投用电除尘装置,对环境有较大污染,同时可能引起SCR脱硝装置催化剂中毒、空预器低温结露、堵灰、未燃烬烟灰粘附甚至二次燃烧。

(4) 在启动初期和运行一段时间后,容易出现汽机侧热力系统各泵滤网堵塞情况。

4 不带炉水循环泵冲管方式应采取的措施及注意事项

(1) 该方式下锅炉疏水量大,必须事先对锅炉2台启动疏水泵的出力进行试验,确保泵的出力能够满足锅炉最小启动流量的要求,防止启动过程中集水箱满水。同时,运行中加强疏水泵运行监视和调整,若发生两台泵均跳闸情况,必须手动MFT停炉。

(2) 冲管阶段汽轮机还不具备进汽条件,锅炉疏水直接回收至凝汽器,大量热量同时也被带入凝汽器,须防止过热蒸汽及锅炉疏水经汽轮机疏水或抽汽管路倒至汽轮机内。在启动前,检查关闭汽轮机及各抽汽管路疏水手动门,严密监视汽轮机汽缸、转子温度,同时确保汽轮机油系统、轴封系统及盘车正常运行,严防冲管期间汽轮机停转。

(3) 锅炉疏水直接回收至凝汽器,虽经大气扩容器减压,但大量疏水温度基本达到 100°C ,导致凝汽器水温异常上升,严重时可能引起凝结水泵进口汽蚀,应密切监视并严格控制凝结水温上升速度,及时从凝补水箱补充冷水。大量热水进入凝汽器,还会在一定程度上影响真空。

(4) 延长暖炉时间,严格控制锅炉启动期间燃料量,严密监视水冷壁、过热器、再热器壁温,防止出现超

温情况。尽量提高锅炉给水温度,开大辅汽至除氧器加热门,保持给水在 100℃以上;控制锅炉上水速度,用热水对锅炉进行持续暖炉;延长大油枪暖炉时间,推迟投粉,适当降低锅炉风量,提高空预器出口一、二次风温。待空预器出口二次风温度达 120℃左右投入 B 磨微油模式。

(5) 启动前必须重视过热器、再热器减温水的检查和调试,防止在稳压冲管过程中,某侧减温水出现严重漏流或管道堵塞。某公司在稳压吹管过程中,第一次投用减温水系统时出现二级过热器 A 侧减温严重漏流(电动隔离门关闭的情况下,减温水流量显示 40 t/h),同时二级减温器 C 侧管道堵塞,调节门开度达 100%时减温器前后蒸汽温度一致。此时三级过热器管壁短时间温差最长达 100℃,严重威胁锅炉安全。

(6) B 磨采用蒸汽加温暖风器和微油点火技术,提高一次风温,实现冲转前投粉,改善启动初期煤粉燃烧情况,节省燃油。某公司在吹管过程中出现以下情况:出于控制炉膛出口烟气温度和 B 磨稳燃的需要,吹管过程中 B 磨煤量保持 30 t/h 稳定,由于此时煤量远低于设计出力,燃烧器内煤粉化学浓度低,加上炉膛内温度较低,锅炉整体风量过大等不良因素叠加,导致 B 磨在启动和吹管过程中燃烧情况一直不好,1 号、3 号角火检强度在 11%~20%间波动,与现场看火情况相符。因此,吹管过程中 B 磨在微油模式下,仍要保持 2~4 支大油枪助燃,根据炉膛出口烟温和实际着火情况投退。

(7) 及时投入炉膛出口烟温探针,严密监视炉膛出口烟温,防止过热器、再热器干烧严重,锅炉说明书要求控制炉膛出口烟温在 540℃以下,实际运行中,炉膛出口烟气温度控制在 450℃左右。稳压吹管过程中,燃料量大,此时采用下 3 台磨运行方式,正三角配煤,全开顶部强耦合燃尽风(CCOFA)、分离式燃尽风(SOFA)风门,控制炉膛出口烟温,同时减少炉膛出口烟气温度偏差。

(8) 在确保安全的前提下,适当降低省煤器出口

流量,也就是锅炉实际给水流量,MFT 保护要求锅炉流量不低于 800 t/h,实际运行中精确控制给水流量在 850 t/h,减少对燃料量的需求。

(9) 在启动过程中保持过热器、再热器、临冲管道上疏水打开,防止管壁干烧损坏。

(10) 加强吹管期间化学检验,特别是凝汽器、省煤器进口水质检验,在长时间大流量冲刷的情况下,给水中仍有可能存在大量铁离子和水冷壁内剥落的氧化皮等物质。这些物质富集在凝汽器中,若凝汽器水质不合格,应及时加大补充水,同时从 5 号低加出口排放、甚至停炉放水、换水。

(11) 采用该方式进行冲管,锅炉内杂质被带入凝汽器、除氧器及高、低加管道等,在吹管过程中应严密监视凝结水泵进口滤网和前置泵进、出口滤网的压差,出现滤网差压大的情况后应提前启用备用泵,停下堵塞泵进行滤网清洗(吹管一般使用 1 台凝泵+1 台汽泵运行方式,有备用余地)。

5 结束语

某公司自 2012 年 9 月 2 日 20 时第一次试吹开始,到 9 月 10 日 20 时打靶合格,该次冲管供进行 140 次降压冲管和 8 小时连续稳压冲管。在炉水循环泵故障的情况下,工程技术人员通过严谨分析、大胆尝试,在现有设备和系统的基础上在规定时间内完成了冲管工作。

参考文献:

- [1] 徐齐胜,刘庆鑫,徐程宏,等. 锅炉设备及系统[M]. 北京:中国电力出版社,2011:74-78.
- [2] 樊泉桂. 超超临界锅炉设计及运行[M]. 北京:中国电力出版社,2010:33-35.

作者简介:

崔国华(1961),男,江苏金坛人,高级工程师,从事火电厂设备管理工作;

厉富超(1982),男,江苏连云港人,工程师,从事火电厂设备运行工作。

Tube Blowing Mode Not Employing Circulating Pump in 1000 MW Ultra-supercritical Power Unit

CUI Guohua, LI Fuchao

(Xinhai Power Generation Co. Ltd., Lianyungang 222023, China)

Abstract: The tube blowing mode not employing circulating pump is adopted in one 1000 MW ultra-supercritical boiler. The fundamentals of this blowing mode as well as the key points during the implementation process are introduced in this paper. Then, the typical faults encountered during practical application processes are analyzed, and the issues needing more attention are summarized. After thoroughly comparing the conventional and current methods, their main advantages are analyzed, which may provide valuable references for similar coal-fired power plants.

Key words: ultra-supercritical; circulating pump; tube blowing mode

防止超超临界锅炉受热面超温的技术措施分析

闫仕军

(江苏大唐国际吕四港发电有限责任公司,江苏 南通 226246)

摘 要:江苏大唐国际吕四港发电有限责任公司超超临界锅炉在启动和正常运行中经常出现的锅炉受热面超温问题,超温后高温受热面材料内壁氧化皮生成速率明显加快,对锅炉安全影响很大。通过启动与运行参数分析,从多个方面查找原因,提出了防止超超临界锅炉受热面超温的控制措施。

关键词:超超临界;锅炉;受热面;超温

中图分类号:TK222

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)03-0075-03

在火电生产中,锅炉高温受热面超温爆管事故在非计划停炉中占有较大的比重,是影响机组安全稳定运行的主要因素,特别是超超临界锅炉由于采用大量新型不锈钢材料,内壁氧化皮大面积脱落的问题比较突出,解决高温受热面超温问题十分迫切。江苏大唐国际吕四港发电有限责任公司(4×660 MW)超超临界燃煤发电机组,锅炉型号为 HG-2000/26.15-YM3,Π 型布置、一次中间再热、单炉膛、平衡通风、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构,采用一级大旁路。炉膛出口及水平烟道按烟气流动方向布置分隔屏过热器,后屏过热器(简称后屏),高温过热器(简称高过)以及高温再热器(简称高再),其中后屏、高过以及高再流经的蒸汽参数较高,容易出现超温现象。

1 受热面超温的危害

机组运行过程中,锅炉事故特别是承受部件中水冷壁、过热器、再热器和省煤器的泄漏事故在事故及非计划停运中占较大比例,是影响机组安全稳定运行的主要原因之一。其中,“四管”泄漏中由于磨损造成的约占 30%,焊接质量引起的约占 30%,金属过热引起的约占 15%,腐蚀引起的约占 10%,其他原因引起的占 15%^[1]。受热金属超温是运行中造成爆管的主要原因之一。对锅炉受热面高温部件,目前设计运行时间一般为 100 000 h,其计算温度水平是选择材料的主要考虑指标。在相同工作压力下,工作温度越高,则运行时间越短。超超临界锅炉中金属超温的危害主要表现在材料劣化,如碳化物析出、铬流失以及组织变化等,导致金属材料力学性能下降;内壁受蒸汽氧化腐蚀,内壁氧化皮生长速度加快,氧化皮与母材结合状态变差,内壁氧化皮大面积脱落的几率显著增大。目前超超临界锅炉内壁氧化皮大面积脱落的危害程度较材料劣化更甚。为保证锅炉高温受热面运行安全,防止运行中超温是重中之重。

2 受热面壁温超限报警值

对于各级受热面,锅炉厂按取用材料强度值以及材料抗蒸汽氧化温度给出报警温度,表 1 为正常运行时各级受热面出口炉外壁温报警值。根据受热面选用材料,壁温报警值设置基本合理,受热面壁温控制在此范围,可以满足长期安全运行要求。

表 1 锅炉受热面炉外壁温报警值 ℃

炉膛位置	报警值
水冷壁	500
一级过热器出口	505
分隔屏过热器出口	530
后屏过热器出口	568
高温过热器出口	625
低温再热器出口	573
高温再热器出口	648

3 受热面超温原因分析

3.1 锅炉受热面壁温测点偏少且设计存在问题

厂家规定额定主及再热汽温控制在 600 ℃,两侧蒸汽温度偏差小于 10 ℃。受热面金属温度不超过报警值。4 台机组主热汽温累计值分别为 592 ℃,592 ℃,591 ℃,592 ℃。4 台机组再热汽温累计值分别为 592 ℃,590 ℃,591 ℃,590 ℃。在正常运行中,在原锅炉初设的壁温测点中未发现超温情况。

锅炉厂给定的高温受热面测点共 26 点,且 70%的壁温点加在最外圈受热面。由于最外圈管子没有加装节流圈,在整个管屏中流量最大,壁温处于最低值。由于测点加装不合理,锅炉运行存在隐性超温。

3.2 受热面存在较大热偏差

锅炉在正常运行中过热器和再热器存在比较明显的左右侧热偏差,后屏、末过、末再左右两侧的最大壁温差在 65 ℃以上,呈现左低右高的特性。通过资料对比,该锅炉的末级过热器和高温再热器的壁温差在同类型

锅炉中属于比较大的。在额定汽温工况下,较大的壁温差直接导致后屏、末过和末再受热面管屏长期处于隐性超温。为保证锅炉安全稳定运行,锅炉只能被迫降温运行。

受热面左右屏间热偏差,主要是因为逆时针四角切圆在炉膛出口的残余旋转形成。随着锅炉容量的增大。炉膛出口的切向动量比锅炉容量更快地增大(炉膛出口的切向动量近似正比与锅炉容量的 1.33 次方)。因此,对于 660 MW 机组锅炉,炉膛出口的残余旋转非常明显。为了减少炉膛出口的残余旋转,锅炉厂设计了 AA 附加风,但 AA 附加风喷口燃烧器存在摆动角度不到位、摆动不灵活、甚至卡死等现象,造成机组在运行中缺少调节受热面两侧偏差的有效手段。检查发现,主要原因为长期裸露在外,活动螺丝扣等部件锈蚀严重。

3.3 操作不当造成受热面超温和氧化皮的产生及脱落

在协调模式下,机组升负荷时,燃料量增加幅度较大,如果启磨时机把握不好,磨煤机出力过大堵塞,实际进入炉膛的煤粉量增加不大,备用磨煤机启动后,其他磨出力减少,风煤比增加,制粉系统堵塞很快吹通,导致瞬间大量煤粉进入炉膛,引起受热面大面积超温。通过对受热面超温记录的追忆,此类超温占大多数。从受热面管材取样金相分析情况看,管材光谱分析都符合原设计材质,其主要合金元素含量符合要求。硬度测试:试样布氏硬度值为:160 HB,155 HB,172 HB,175 HB,175 HB,试样的硬度值均低于正常值(180 HB 左右)。氧化皮厚度检查:经测量高再入口管内脱落氧化皮厚度在 100 μm 左右。根据相关资料对于铁素体钢管,氧化皮厚度达到 500 μm 时开始剥落;对于奥氏体钢管,Fe₃O₄ 氧化皮厚度达到 100~200 μm 开始剥落。根据锅炉温度场分布及受热面设计管材情况,容易产生氧化皮剥落的管圈为后屏、末级过热器及高温再热器,氧化皮剥落后沉积在底部 U 型弯头处或受热面入口的节流孔。

机组干湿态转换的负荷点选择不合适,启动流量和启动压力偏低是导致受热面启停时超温的主要原因。由于在锅炉干湿态转换过程中,汽水由两相变单相,水动力不稳定,控制不好,将导致汽水状态反复,水煤比失调,继而受热面大幅超温。

4 主要采取的措施

氧化皮产生的主要原因是受热面管壁长期超温,因此控制高温受热面管壁温度是防止氧化皮生成的关键。2011 年以来,4 台机组相继出现的大面积氧化皮剥落,检修被迫进行大规模割管清理氧化皮,4 台炉平均割管约 1500 根。

4.1 加装壁温测点

结合 4 台锅炉检修经验,按照以下原则加装测点。

4.1.1 壁温测点工艺要求

(1) 安装热接点的管壁部位应严格除锈及杂物,热接点要牢固地压接或熔接在已除锈的壁面上,防止松动或脱落。

(2) 测点保温层要密实、贴牢、无裂纹,且具有足够的厚度,以尽可能减少管子向环境的散热。

(3) 按照测点温度的范围选择合适的热电偶型式,安装前逐一对热电偶进行校验和选优。

4.1.2 监视高温受热面同屏热偏差

在高温受热面左、中、右各加装整屏壁温测点,监视同屏热偏差。后屏整屏(9 屏,27 屏,33 屏),每屏 19 根管。末过整屏(28 屏,44 屏,53 屏),每屏 15 根管。末再整屏(18 屏,52 屏,63 屏),每屏 11 根管。

4.1.3 监视屏间热偏差和最高管壁温度区域

后屏沿炉膛宽度方向,每屏的第 10 根管进行加装。末过沿炉膛宽度方向:双数屏(2,4……56)第 7 根管进行加装。末再沿炉膛宽度方向:双数屏(2,4……70)第 6 根管进行加装。

4.1.4 监视易堵区域温度

由于高温受热面集箱为端部进汽,主要为集箱中部区域。后屏集箱中部易积存异物管排 14~20 屏的下部管圈,如 6,7,8,9,10,11,12,13 根管,加装 49 点。末过集箱中部易积存异物管排 25~32 屏的第 4,5,6,7,8,9,10,11 根管,共 49 点。

4.2 进行热偏差调整

4.2.1 对 AA 进行反切

该锅炉设计中为了减弱炉膛内空气气流的残余旋转,减少炉膛出口两侧烟温偏差,设置了 A—A 风,各喷口还可做水平摆动。A—A 风风箱分 4 个风室,每个风室设置 2 个喷口即上喷口和下喷口。A—A 风风箱外在高度方向布置 4 只手动的水平摆动机构,A—A 风每个风室内的 2 只上下喷口组成一组,绕其内部转轴由水平摆动连杆连接到外部手动的水平摆动机构,做左右 10° 的摆动。

该厂检修时,在炉内实际检查燃烧器的喷口位置,确保各个 AA 风喷口摆动到“反切”位置即向右 10° 摆动(顺时针方向)。通过反切后,壁温偏差调整取得了一定效果。但是后屏中间区域的壁温显示较低,末过、末再左侧壁温偏低,制约进一步提高汽温。末再出口汽温两侧偏差为 7℃,末再左右两侧屏间存在约 40℃ 的热偏差,需要采取其他方法进一步优化。

4.2.2 进行 AA 风摆角组合形式摆动

在距上层煤粉喷嘴上方约 5.0 m 处有 4 层附加燃尽风 AA 喷嘴,角式布置,A—A 风的设置有利于减少

NO_x 排放量,调节火焰中心。每只 A—A 风燃烧器沿其高度设置了 4 个带内曲拐的外摆动机构,A—A 风风室可以做上下 30° 的摆动。通过进行 4 个角不同步摆动,增加炉膛出口位置气流扰动,缩小偏差。

采用燃烧试验的方法选择最优的燃烧方式。具体摆动试验为:选取负荷为 660 MW,分别对 AA 风单个角进行大开度摆动试验,每个工况试验稳定 1 h。对该工况下的水冷壁、后屏过热器、末级过热器和末级再热器的最高壁温及壁温偏差进行记录。最终通过定负荷、变负荷、制粉系统变化等扰动,选择了 1、2 号角开大(约 70%以上),3、4 号角关小(30%以下)的方式长期运行。

4.2.3 优化吹灰方式

通过新增壁温测点分析,温度高区域主要集中在锅炉右侧。两侧的壁温偏差较大,由于一侧壁温偏高,严重影响主汽温度提高。而另一侧壁温裕量较大。开展吹灰优化工作,降低锅炉右侧后屏、末再受热面的吹灰频率。通过适当积灰,降低右侧受热面的换热效率。从而平衡左右两侧偏差。实际情况看,两侧最高点偏差从原来的 40℃ 左右,降低到 20℃ 之内。

4.3 制定机组正常运行和启停受热面防止超温措施

(1) 启动制粉系统时,把握好时机,控制好锅炉加负荷的速率。避免加负荷过快,备用制粉系统启动不及时,运行制粉系统出力过大堵塞,备用制粉系统启动后,堵塞制粉系统快速吹通,大量煤粉瞬间进入炉膛,导致受热面大面积超温现象的发生。

(2) 调节一次风时,应缓慢进行,防止磨煤机风量突增使大量存粉进入炉膛内,短时间内使实际煤水比失调,造成分离器出口蒸汽温度、末再及末过温度飞升

而引起相应受热面金属超温。

(3) 调节主、再热汽温在正常范围内,防止因汽温超温导致金属壁温超温;过热器减温水装置应投入自动,防止减温水在手动时监控不到位而导致超温。

(4) 锅炉启动过程中严格按启动曲线进行升温、升压,控制各受热面管壁温度在允许范围内。锅炉燃烧器对称均匀投入,保证火焰中心适宜,不冲刷水冷壁,防止结焦,减少热偏差,同时控制好风量,避免风量过大或缺氧燃烧,防止过热器超温或锅炉尾部二次燃烧。

(5) 锅炉干湿态转换时选择在锅炉 25%~30% 负荷点,保证省煤器入口流量在 900~1000 t/h,分离器压力在 11~12 MPa。干湿态转换过程中,燃料量、给水量中选择 1 个作为变动量,以减少受热面的反复波动。

5 结束语

防止因氧化皮产生及脱落关键在于有效控制受热面管壁温度及温度变化速度。首先要根据炉型优化壁温测点的数量及位置,以便全面监控受热面壁温。运行锅炉要控制同屏及屏间热偏差现象。通过采取燃烧调整和吹灰优化,摸索出最佳燃烧工况和吹灰方案,通过对锅炉运行和启停过程中的经验摸索,制定出控制受热面超温的技术措施,从而实现受热面超温的可控和在控。

参考文献:

- [1] 崔浩,刘云燕,于森.电厂锅炉四管泄露原因分析及应对措施[J].内蒙古科技与经济,2009(20):119-120.

作者简介:

闫仕军(1968),男,河北唐山人,工程师,从事安全管理工作。

Measures for Preventing Overheating of High Temperature Heating Surfaces in Boilers of Ultra-supercritical Power Plants

YAN Shijun

(Datang Lvsigang Power Generation Co. Ltd., Nantong 226246, China)

Abstract: Tube overheating issues were frequently observed during the start-up and normal operation periods of the ultra-supercritical boiler of Datang Lvsigang Power Generation Co. Ltd. The undesired high tube temperature can lead to higher steam-side oxidation rate, which has significant effect on the safety of the boiler. Through thoroughly analyzing the acquired start-up and operation parameters, we proposed in this paper several prevention measures.

Key words: ultra-supercritical; boiler; heating surface; overheating

广告索引

江苏省电力公司常州供电公司	封一	《江苏电机工程》协办单位	前插 4
《江苏电机工程》十佳论文	封二	南京苏逸实业有限公司	(黑白) 文前
南京南瑞继保电气有限公司	前插 1	远东电缆有限公司	封三
《江苏电机工程》协办单位	前插 2、3	南瑞科技股份有限公司	封四

电厂入炉煤皮带秤的测量精度分析

郭剑锋

(江苏射阳港发电有限责任公司, 江苏 射阳 224346)

摘 要: 发供电煤耗是考核机组运行性能最主要的指标, 而皮带秤计量的准确性是其核心之一。以提高电站煤耗管理准确性为目标, 结合某电厂实际输煤系统, 重点分析了入炉煤皮带秤的准确性的影响因素, 并在介绍测量数据处理方法的基础上, 利用现场数据计算说明如何判断皮带秤的准确性。

关键词: 正平衡; 煤耗; 皮带秤; 精度

中图分类号: TH715.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)03-0078-03

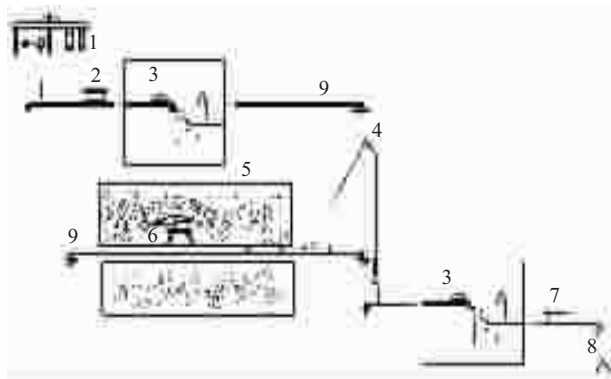
发供电煤耗是考核机组运行性能最主要的指标。按照规定, 火电厂发供电煤耗统一以入炉煤计量煤量和入炉煤机械取样分析的低位发热量为基础, 进行正平衡煤耗计算。目前火电厂普遍使用电子皮带秤作为测量设备对入炉煤煤量进行计量, 在皮带输送机输送固体散状物料过程中, 对物料进行连续自动称重计量, 已成为固体物料连续自动称重主流计量系统。而皮带秤计量的准确性是正平衡煤耗能否正常开展的核心问题之一。某公司 5 号炉投产后, 月度盘煤时进、用、存煤情况一直不平衡。在进行多次分析后判定为入炉煤皮带秤计量存在问题, 煤场出库数值存在较大偏差, 从而导致煤耗数据偏离真实水平。虽然进行了入炉煤计量装置校验, 但月度盘盈亏时常出现秤的计量数据偏差情况。文中分析了入炉煤皮带秤准确性的影响因素, 并利用现场数据计算结果说明如何判断其准确性。

1 系统及运行情况

某火电企业燃料系统如图 1 所示, 煤船上的煤由卸船机 1 取下, 经皮带 9 送到斗轮机 6 在煤场 5 进行堆放或者进煤仓 8 存放, 中途需经过多个转运站 3 和三通、落煤筒 4, 卸煤时的煤计量由入厂煤皮带秤 2 进行计量。斗轮机 6 可以将煤向煤场 5 堆放煤, 也可以从煤场 5 取煤通过皮带 9 送到煤仓 8, 当向煤仓上煤时由入炉煤皮带秤 7 进行计量。入厂煤皮带秤配有实物校验装置, 满足日常校验工作的需要。入炉煤配备了循环链码校验装置, 无实物校验设备。

2 入炉煤皮带秤误差情况与监控方法改进分析

皮带秤作为一种动态衡器, 其测量过程受工作原理、外界环境的影响, 干扰测量精度的原因较多, 误差比静态的衡器要大。皮带秤的误差以质量单位表示, 为皮带秤累计显示器示值的增量与通过皮带秤物料



1 卸船机; 2 入厂煤皮带秤; 3 转运站; 4 三通、落煤筒; 5 煤场; 6 斗轮机; 7 入炉煤皮带秤; 8 煤仓; 9 皮带机

图 1 燃料系统

的质量约定真值之差。可用绝对误差和相对误差表示:

$$E = x - \mu \quad (1)$$

$$RE = \frac{x - \mu}{\mu} \times 100\% \quad (2)$$

式中: E 为绝对误差; x 为观测值; μ 为真值; RE 为相对误差。其中相对误差能更好地反应测量结果的准确率。皮带秤测定过程中主要误差源分析如下。

(1) 系统误差: 系统误差是测量过程中的主要误差, 其数值相对稳定, 在测定过程中有一定规律性, 可以修正, 多次测量取平均值后其值趋向于某一值。如测量装置特性的变化、零位不准、输送机的振动导致的测量误差。

(2) 随机误差: 随机误差是在测定过程中不可控偶然因素导致的, 数值变化不定, 不可校正。其虽然不可避免, 但其测定数值表现为以平均值为中心对称分布, 数值波动不会超过某一值, 小误差出现次数多, 大误差出现次数少, 多次测量取平均值后值趋向于 0。主要是环境因素导致的误差, 如偶发电磁干扰、风力、潮湿、尘土、温度等因素导致的测量误差。

(3) 过失误差: 测定过程中由于人为因素、装置不合格等原因导致的误差, 无规律可循, 经常表现为值异常变化, 可以通过过程控制, 严格执行标准可避免。例

如安装工艺不好、物料输送方式不正常引起过量的附加误差;皮带的纵向张力应变化、张紧装置受温度、磨损或载荷的影响造成打滑;未定期做好检定调整工作。

值得注意的是,如果维护管理不到位,会导致部分随机误差和过失误差常态化存在,在数值特征上表现为系统误差的特点,影响计量准确性,进而误导数据统计分析。

减小皮带秤系统误差的方法有:保证测量装置使用环境符合要求;定期对皮带秤进行维护;定期检验测量装置,对测量装置的数据与更可靠的设备进行测量比对;对测量结果进行分析,修正测量参数,减小对测量的影响。其中,对测量装置的数据与更可靠的设备进行测量比对,即实物校验工作尤其重要。

按照有关设计规范要求^[1,2],皮带秤应该配套有实煤校验装置,即使使用循环链码校验合格的皮带秤,也应当定期进行实煤校验。上述系统中入炉煤皮带秤没有配备料斗秤校验装置,无法进行实煤校验工作。通过对现场设备系统进行分析,考虑使用入厂煤皮带秤作为控制衡器,对入炉煤皮带秤进行实物校核。

入厂煤皮带秤配有的实物校验装置,为1台精度更高的料斗秤^[3],可以对入厂煤皮带秤进行校验检查,确保计量可靠,其计量数据可以与燃料供应部的港口发货数据、水尺测量数据对比,对计量偏差进行动态监督。所以,入厂煤皮带秤作为全厂的煤计量监控点是可靠的,满足作为入炉煤的控制衡器条件。同时在系统连接方式上,具备使用入厂煤皮带秤对入炉煤皮带秤进行校验的条件。其主要问题是:两者之间流程长,受沿途煤散落、煤粘附在设备上或者从设备上脱落返回煤流、雨水等影响多,必须对测量结果数据进行分析,确认其准确性。一般要对异常数据进行离群值分析和试验数据的准确性分析,在确认数据正常后,采取多次测量数据取平均值得方法,获得对比试验数据的偏差平均值与标准差,作为正常的监控指标。试验重复的次数越多,估值越接近真实值。通过这些手段,减小测量中干扰因素的影响,保证测量数据的准确性。

3 皮带秤校验数据的数理分析

上述方法实际就是对误差进行测定,观测计量值与真值之间的差值。判定一组试验数据的测量误差时可以用2个指标说明,即反映数据集集中特征的平均值 $\bar{x}$ 和反映数据分散特征的标准差 S 。

在进行校验数据分析^[4]时,有些数据值偏离平均值较大,对平均值和标准差的计算皆有较大影响,难以对试验结果的准确性进行评价。对试验数据进行离群值检查,剔除异常数据,然后使用 t 检验法对数据准确性进行分析。

3.1 试验数据中异常值的去除

异常数据分析采用格鲁布斯法(Grubbs)。该方法主要用于均值一致性检验和去除离群值。其过程如下。

(1) 将样本数据按从小到大次序进行排列。

(2) 分别计算总平均值 $\bar{x}$ 和标准差 S_x :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

当 $n \gg 1$ 时,式(4)可简化为:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中: n 为试验次数; x_i 为各次测量值; $\bar{x}$ 为各测量值的平均值; S_x 标准差。

(3) 可疑值为最大均值 $\bar{x}_{\max}$ 时,则统计量 T 值为:

$$T = (\bar{x}_{\max} - \bar{x}) / S_x \quad (6)$$

(4) 对给定的数据进行计算。

(5) 根据显著性水平 α 及测定数据的组数, α 一般给定为0.05,由Grubbs临界值 T_α 表查出临界值 T_α 。

(6) 查表得到确认剔除水平 $T_{0.01}$ 。

(7) 判断方法:如果 $T > T_{0.01}$,则可判断可疑数据为离群均值,予以剔除;如果 $T_{0.05} < T < T_{0.01}$,可疑数据为偏离群值,如果 $T \leq T_{0.05}$,则可判断可疑数据为正常数值,应保留。

3.2 试验数据精密度与准确度分析

异常数据剔除后,判断检查结果的精密度和准确度是否满足要求,这里使用 F 检验法和 t 检验法。 F 检验法可以用于不同测量条件下测定的2组数据是否有相同的精密度。在精密度合格的情况下,使用 t 检验法进行准确度检验, t 检验法常用于对被测量体系平均值与真值的比较。

3.2.1 F 检验法程序

(1) 求 F 值:

$$F = s_1^2 / s_2^2 \quad (7)$$

式中: s_1^2, s_2^2 分别为2组测定的方差,且 $s_1^2 > s_2^2$ 。

(2) 检查2组数是否有显著性差异,用双侧检验,查 F 临界值表得到 $F_{\alpha/2}$ 值。

(3) 判断:当计算的 $F < F_{\alpha/2}$,说明2组数据没有显著性差异,否则说明数据明显不同。

3.2.2 t 检验法程序

(1) 计算统计量 t 值:

$$t = (|\bar{x} - \mu| \sqrt{n}) / S \quad (8)$$

式中: μ 标准值,此处为 1; n 测定次数。

(2) 由 t 值表查得 $t_{0.05}$ 值。

(3) 比较 t 值与 $t_{0.05}$ 值,如 $|t| < t_{0.05}$,说明两者之间无显著差别,测量结果正确;如 $t_{0.05} < |t| < t_{0.01}$,说明测量值有显著差异;如 $|t| > t_{0.01}$,说明有非常显著差异。

4 实例计算

采用入厂煤皮带秤作为控制衡器,对入炉煤皮带秤进行实物校验,试验数据如表 1 所示。

表 1 皮带秤计量数据与偏差情况

试验次数	入厂煤计量值/t	入炉煤计量值/t	偏差率/%
1	275	276	0.36
2	256	258	0.78
3	322	325	0.93
4	359	362	0.83
5	248	249	0.04
6	472	474	0.42
7	488	488	0.00
8	630	633	0.04
9	541	545	0.02
10	407	402	-1.24
11	694	697	0.03
12	632	633	0.16

4.1 离群值数据分析

表 1 中,样本量 $n=12$,计算可得: $\bar{x}=0.197\ 5$, $S_x=0.579\ 9$, $(S_x)^2=0.336\ 3$ 。假设可疑值为最大值 $\bar{x}_{\max}$ 时,则 $T_{\max}=1.263$;假设可疑值为最小值时,则 $T_{\min}=4.615$;根据显著性水平 α 及测定数据的组数,由 Grubbs 临界值 T_α 表查出临界值 T_α ,本例中: $m=12$, $\alpha=0.05$,查表 $T_{0.05,12}=2.285$;确认剔除水平 $T_{0.01,12}=2.550$;比较 $T_{\min}=4.615 > T_{0.01,12}$,所以判断可疑数据 -1.24 为离群均值,予以剔除;再查较大的数据 0.00, $T_{\min}=0.928 < T_{0.01,12}$ 为正常数值,应保留。比较 $T_{\max}=1.033 < T_{0.05,12}$,所以 0.93 判为正常数据,予以保留。

4.2 数据的精密度分析

上述数据剔除异常值后计算得到: $s_1=449$, $s_2=$

447 , $s_1^2=26\ 993$, $s_2^2=26\ 890$; $F=1.004$ 。此为双侧检验, $f_1=f_2=6$,查 F 临界值表得到 $F_{\alpha/2}$ 值, $F_{\alpha/2}=4.284$ 。判断:当计算 $F=1.004 < F_{\alpha/2}$,2 组数据没有显著性差异。

4.3 数据的准确度分析

计算得: $t=0.382\ 7$,为双侧检验,由 t 值表查得 $t_{0.01}=2.086$, $t_{0.01}=3.169$ 。 $|t|=0.382\ 7 < t_{0.01}$,两者之间没有显著性差别,测量结果准确。

5 实施情况

按照该方法,设备主管部门在现场进行了多次试验。通过入厂煤皮带秤与入炉煤皮带秤对比得到数据,发现数据异常,结合现场分析,及时发现了皮带秤零点漂移过大、测量装置打滑、校验方法过程不合理等问题,并及时进行处理。同时试验中逐步总结经验,使试验方法更加规范,最终形成完整的试验规定,作为定期的制度进行执行。

6 结束语

开展入厂煤皮带秤与入炉煤皮带秤对比工作后,入炉煤皮带秤的计量数据同比入厂煤的计量数准确性,有了较大的提高。入炉煤皮带秤的精确度能达到一级秤规定的误差要求,基本满足了日常煤耗管理要求。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家经济委员会. DL 5000—2000 火力发电厂设计技术规程[S]. 北京:中国电力出版社,2000.
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 5187.1—2004 火力发电厂运煤设计技术规程[S]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 195—2002 连续累计自动衡器(皮带秤)[S].
- [4] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会. GB/T 4883—2008 数据的统计处理和解释 正态样本离群值的判断和处理[S].

作者简介:

郭剑锋(1975),男,江苏盐城人,助理工程师,从事火电厂技术管理工作。

Analysis on the Measurement Accuracy of Belt Conveyor Scale

GUO Jianfeng

(Jiangsu Sheyanggang Power Generation Co. Ltd., Sheyang 224346, China)

Abstract: The most important indicator in the assessment of unit operation performance is coal consumption of electricity generation and supply, which largely depends on the accuracy of belt scales. In order to improve the accuracy of power station coal consumption management, this paper mainly analyze the factors that affect the accuracy of belt scale of the furnace-entering coal based on the coal handling system employed in one power plant. The method used to process the measurement data is presented and based on that a method for determining the accuracy of belt scale through calculation employing field data is proposed.

Key words: direct balance; coal consumption management; belt conveyor scale; accuracy

大规模海上风电场并网接入方式

陈 锋, 刘连永, 董余凡
(丹阳市供电公司, 江苏 丹阳 212300)

摘 要:海上风电场以其储量丰富、风力稳定、干扰少等特点, 受到越来越多的关注, 是未来风力发电发展利用的大趋势。对比分析了适用于海上风电场并网的高压交流 (HVAC), 常规高压直流 (LCC-HVDC) 和柔性直流输电 (HVDC-Flexible) 3 种并网方式, 并着重探讨了几种柔性直流输电并网的具体方案以及适用于海上风电场的直流换流站拓扑结构。

关键词:海上风电; 高压交流输电; 常规高压直流输电; 柔性直流输电

中图分类号: TM614

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)03-0081-04

随着世界经济的不断发展, 能源短缺和环境污染等问题日益严峻, 各国都开始着手优化能源结构, 大力开发可再生能源。近年来, 我国也加快了构建绿色能源供应体系的步伐, 其中风力发电以其巨大的潜力和相对成熟的商业化基础最为引人注目。文中介绍了适用于海上风电场并网传输解决方案的特点和适用范围, 并进行了对比分析。

1 海上风电场发展状况及优势

中国风能资源十分丰富, 目前已经探明的风能储量约为 3226 MW, 主要分布在西北、华北和东北的草原和戈壁以及东部和东南沿海及岛屿上, 已经建成并网发电的风电场主要分布在新疆、广东、辽宁、内蒙、浙江等 16 个省区^[1,2]。东部沿海地区经济发达, 能源紧缺, 开发丰富的海上风能资源将有效改善能源供应情况, 因此海上风电的开发前景广阔^[3-5]。

一般认为 2 MW 是陆上风电机组单机容量的极限值, 因为此类风机桨叶长度将达到 60~70 m, 陆上运输很困难, 安装用的吊车吊装重量将超过 1200~1400 t, 大部分地区不具备这个条件。由于风电场的噪声、占用大量土地资源以及风电机组庞大的体积, 使得陆上风电场的选址和风机的运输遭遇很大困难。而这些问题对于海上风电来说, 相对比较容易解决, 海上运输方便并且超过 1500 t 的浮吊已经比较普遍, 风电的开发正向海上转移, 即建设海上风电场。

与陆地风电相比, 海上风电有以下优点: 高风速、低风切变, 由于海平面光滑、摩擦力小, 因此风速较大, 风速、风向的变化较小, 风切变也较小, 不需要很高的塔架, 可降低风电机组成本; 海上风湍流强度小, 具有稳定的主导风向, 机组承受的疲劳负荷较低, 风机寿命更长; 海上风电场允许单机容量更大的风机, 高者可达 5~10 MW^[6], 由于对噪音要求较低, 通过更高的转动速度及输出电压, 可获取更高的能量产

出。海上风电年平均利用小时可达 3000 h 以上, 离岸 10 km 的海上风速比岸上高 25%^[7], 海上风电场的能量收益比沿海风资源丰富地区的陆地风机高出 20%~40%^[8], 所以海上风机更具吸引力。

2 海上风力发电传输方案

海上风电场的容量一般较大, 距离海岸 5~300 km, 需要通过海底电缆接入陆上的电网。并且由于自然风的随机性, 预测准确度不高, 风力发电的波动性较大, 随着海上风电场的容量越来越大, 对系统的影响也越来越明显。目前可采用的海上风电场并网方案主要是高压交流 (HVAC), 基于相控变流器的常规高压直流 (LCC-HVDC) 以及基于电压源型变流器的柔性直流输电 (HVDC-Flexible), 以下将对 3 种方案各自的特点进行比较分析^[9-11]。

2.1 HVAC 并网方式

目前海上风电场规模较小、离岸距离教近, 普遍采用 HVAC 并网方式, 如图 1 所示。高压交流并网方式最大优点是技术成熟、并网结构简单、成本低。

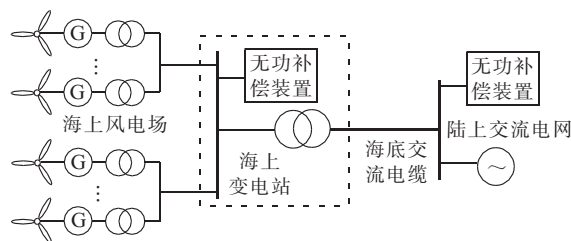


图 1 高压交流并网方式

HVAC 并网方案使用的是交流电缆, 在传输交流电能时会产生大量容性无功损耗, 传输线路的功率因素较低, 降低了交流电缆的实际输电容量, 并且随着输电距离的增加这种现象越严重。因此, 必需在电缆两端的变电站增设大容量感性无功补偿装置, 既增加输电成本, 也增加海上变电站的体积, 给变电站的建设带来困难。而从国内外海上风电场的规划方案来看, 海上风电场的容量会越来越大, 一般大中型海上风电场的装

机容量都会达到 200 MW 甚至 1000 MW 以上。同时,海上风电场的地理位置一般距负荷中心较远,其就近的接入电网主要是低压配电网,这样的输电系统 R/X 比值较大、短路容量较低,而使用 HVAC 并网方式需要接入电网的短路容量比较大,进一步制约了海上风电场的并网容量。此外,HVAC 并网方式也意味着风电场和所接入的陆上交流系统必须保持同步,无论是风电场侧,还是系统侧发生故障都会直接影响到另一侧。随着海上风电场装机容量的增大和离岸距离的增加,HVAC 并网方式的经济性和可靠性会降低,使其在远距离大容量海上风电场并网中的应用非常有限。

2.2 LCC-HVDC 并网方式

LCC-HVDC 产生于上世纪 50 年代,经过半个世纪的发展,在陆上输电系统中已经有了一定应用。因其适宜远距离输送、输电容量大、易于控制和调节,在海上风电场并网工程中应用前景乐观。

基于 LCC-HVDC 技术的海上风电场并网传输系统如图 2 所示,包括:换流变压器、无功补偿设备、交流滤波器、晶闸管换流器、直流电抗器、直流滤波器、直流电缆、辅助功率设备以及控制和保护设备。

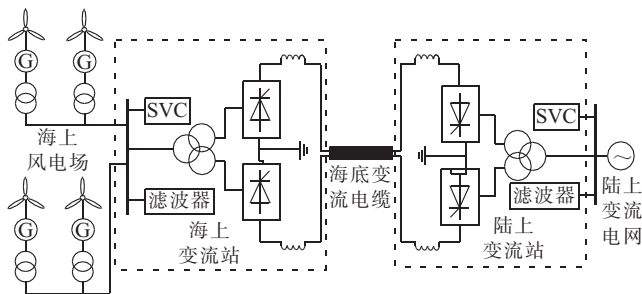


图 2 常规高压直流输电并网方式

由于 LCC-HVDC 换流站基于晶闸管器件,而晶闸管是半控型功率器件,只能控制其开通过程,无法控制其关断过程,只有当流过晶闸管的电流为零,且管两端电压在一段时间内为零或负值时,晶闸管才能可靠关断。因此 LCC-HVDC 存在如下固有缺陷^[12]:(1) 为保证晶闸管可靠触发,其整流侧的触发滞后角一般要保证 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$,而逆变侧的关断超前角一般为 15° 或更大些。因此 LCC-HVDC 在运行过程中,需要吸收大量的无功功率,其数值为输送有功功率的 $40\% \sim 60\%$,这样需要在整流站和逆变站装设大量的无功补偿设备,从而增加了换流站的体积,特别不利于离岸的换流站的施工和安装。(2) 晶闸管的开关频率一般都比较低,换流站运行过程中会产生大量谐波,需要在两端的换流站增设体积庞大的交流滤波装置。(3) LCC-HVDC 输电系统对所联交流系统的故障非常敏感,故障发生时交流母线电压会下降,容易导致换相失败,造成系统运行事故。

2.3 HVDC-Flexible 并网方式

HVDC-Flexible 是一种基于电力电子技术的新颖输电技术,以 IGBT、IGCT 等全控电力电子器件和 PWM 技术为核心,具有很好的性能:独立控制有功、无功功率;可连接弱交流系统或无源系统;不会增加交流系统的短路容量;变流站采用模块化设计,安装、调试简单等等。从瑞典 Gotland、丹麦 Tjaereborg 等并网风电场工程的运行经验来看,HVDC-Flexible 不仅能够减小风电场对电网稳定性、安全性和电能质量等方面的影响,而且可以提高并网风电场的输送容量和风电场的接入容量,灵活控制风电潮流。

但 HVDC-Flexible 变流站也存在开关损耗较大等问题,与 HVAC、LCC-HVDC 之间不存在绝对的优劣,需要综合考虑。在输送功率相同和可靠性指标相当的条件下,虽然 HVAC 中换流站的建造费用比较昂贵,但 LCC-HVDC 只需要 1 根电缆(单极型)或 2 根电缆(双极型),HVDC-Flexible 也只需要 2 根电缆,而 HVAC 需要 3 根电缆,且直流电缆成本更低。因此当海底电缆输电距离增加到一定值,交、直流输电方式的设备总成本可以相等,这个距离就称为交直流输电等价距离,如图 3 所示^[13]。

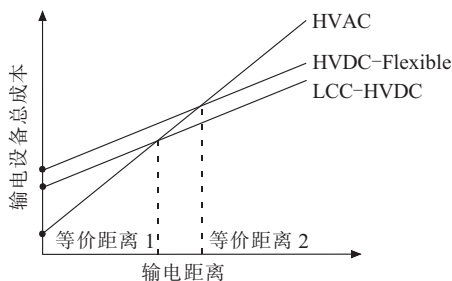


图 3 交直流输电等价距离示

从图 3 可以看出,虽然 LCC-HVDC 和 HVDC-Flexible 变流站的建设成本要高于 HVAC 变电站的,但由于敷设直流电缆的单位成本要比交流电缆的成本低。因此当输电距离达到电缆线路等价距离时,高压直流输电与高压交流输电的输电设备总成本相等,当输电距离大于等价距离时,LCC-HVDC 和 HVDC-Flexible 比 HVAC 更经济,且距离越长 LCC-HVDC 和 HVDC-Flexible 的经济性越明显。目前一般认为海底电缆线路的交直、流输电等价距离约为 90 km,并且随着变流装置价格的不断下降,等价距离必然也将不断减小。

一般海上风电场装机容量在 100 MW 内,或离岸距离在 100 km 内,HVAC 并网方式相对其他 2 种直流并网方式具有更大的优势。而在考虑了海上变流站的施工费用和安装难度的因素,海上风电场装机容量在 100~400 MW 之间时,相对于 LCC-HVDC 来说,HVDC-Flexible 在经济和技术上更优越。而当装机容量超过 400 MW 时,LCC-HVDC 占有优势。

3 海上风电场 HVDC-Flexible 并网方案

虽然 HVDC-Flexible 都是基于 VSC 换流器,但根据海上风电场电气主接线方式和 VSC 安装位置的不同,其 HVDC-Flexible 并网方案分为以下几种。

3.1 并网方案一

如图 4 所示,每台风力发电机输出的交流电经变压器升压到 10 kV 或 35 kV,由各自的 VSC 变换成直流电,再通过海底直流电缆连接到海上风电场的直流升压站,升压站内的 DC/DC 模块将公共直流母线上的直流电压提升到 ± 150 kV,然后经过海底直流电缆将海上风电场的电能输送到岸上的 VSC 换流站,经岸上 VSC 换流站变换为交流电后接入电网。

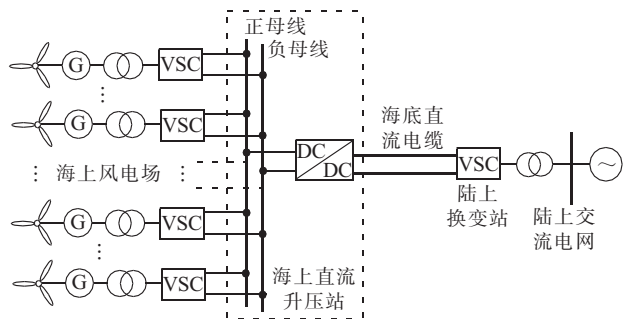


图 4 海上风电场 HVDC-Flexible 并网方案一

该方案的优点是可以通过独立的 VSC 灵活控制每台风机的有功、无功功率;每台风机可以根据本台风机的实时风速,调节机组输出交流电压的频率,使得本机组工作在理想的转速,以保证本机组功率捕获性能始终保持最优状态。其缺点是风电机组内电气结构较复杂,在机组设计时要充分考虑 VSC 的结构和安装位置,增加了风电机组设计和安装的难度;并且海上风电场的 VSC 控制系统比较复杂,如果机组侧 VSC 直流电压控制不当的话,可能会在 VSC 之间产生换流;由于要考虑单台机组 VSC 的尺寸,所以其输入输出电压等级较低,需经过 DC/DC 升压站来提升直流输电的电压等级,目前 DC/DC 升压技术主要应用在小功率低电压的开关电源领域,在大功率和高电压领域的工程实例基本没有;同时考虑每台 VSC 的功率冗余问题后,该方案需要使用的功率器件数目比较多,增加了设备成本;由于每台机组都装有 VSC,增加了维护难度。

3.2 并网方案二

如图 5 所示,将海上风电场的风机分成多组,每台风力发电机输出的交流电经变压器升压到 10 kV 或 35 kV,由各自的 VSC 变换成直流电,在每一组内的 VSC 输出电压串联起来,使得每一组的输出直流电压达到 ± 150 kV,然后将各组的输出电能并接到海上汇流站的 ± 150 kV 母线上,再经过海底直流电缆将海上风电场的电能输送到岸上的 VSC 换流站,经岸上 VSC

换流站变换为 50 Hz 交流电后接入电网^[14,15]。

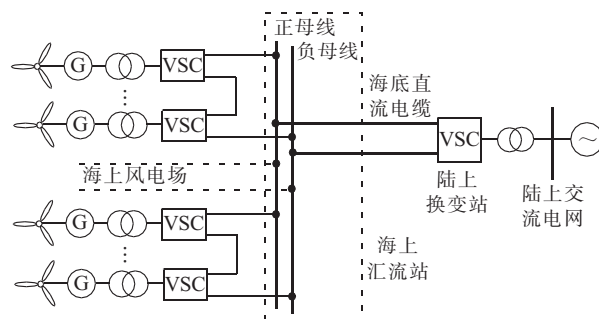


图 5 海上风电场 HVDC-Flexible 并网方案二

该方案具有方案一的优点,且相对于方案一来说,节省了 DC/DC 升压站的设计和安装,降低了并网的技术难度和成本。该方案也存在与方案一类似的缺点,由于对风电场内的 VSC 进行分组和串并联连接,使得海上风电场的内部接线比较复杂,增加了海上风电场安装和施工难度。

3.3 并网方案三

如图 6 所示,风电场内的风机划分成独立的几块区域,各区域内的所有风力发电机输出电压经变压器升压到 10 kV 或 35 kV,然后通过海底交流电缆汇接到本组的交流母线上,各组的母线是相互隔开的,海上换流站内各组 VSC 将本段母线的交流电能转化为 ± 150 kV 的直流电能,再经本组专用的海底直流电缆将直流电能传输到相应的岸上 VSC,各组岸上 VSC 再独立地将本组的直流电转化为交流电,经过变压器接入电网^[16]。

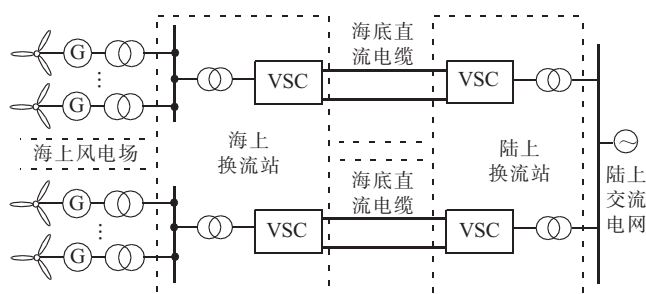


图 6 海上风电场 HVDC-Flexible 并网方案三

该方案的优点是:每片区域内的风电场只通过本组的背靠背型 HVDC-Flexible 系统就实现了并网运行,不需要装设体积庞大的 VSC 变流器,从而降低了风电机组和风电场内部主接线的设计和安装难度,同时也降低了 VSC 的控制设计和维护难度,适合于单片区域内风机容量约为 400 MW,风电场总容量超过 600 MW 的大型海上风电场。其缺点是:海上换流站内分段母线较多,要配备多套母线保护设备,增加了设备成本和维护难度;区域内所有风机都只受同一个 VSC 控制,区域内机组不能独立控制自身的有功、无功功率,所有风机只能工作在同一个转速下,无法保证区域内

每台机组功率捕获性能始终保持最优状态;使用了多套背靠背型柔性直流输电系统,增加了成本和维护难度,总的开关损耗也比较大。

3.4 并网方案四

如图7所示,风电场内所有风力发电机输出电压经变压器升压到10 kV或35 kV,然后通过海底交流电缆汇接到海上换流站的交流母线上,通过海上换流站内VSC将交流电能转化为 ± 150 kV的直流电能,再经过海底直流电缆将直流电能传输到岸上VSC,岸上VSC再将直流电转化为交流电,经过变压器接入电网^[10]。

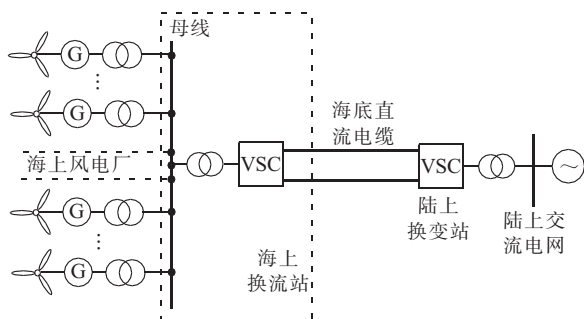


图7 海上风电场 HVDC-Flexible 并网方案四

该方案的优点是:风电场内电气主接线较简单,总的成本相对也比较低,安装和维护难度相对前面的几种方案也比较低。其缺点是:所有风机都只受同一个VSC控制,区域内机组不能独立控制自身的有功、无功功率,所有风机只能工作在同转速下,无法保证区域内每台机组功率捕获性能始终保持最优状态,这种并网方案适合于装机容量100~400 MW海上风电场。

4 结束语

海上风电以其独特的优势已开始引领风电未来的发展。世界上许多国家都十分重视海上风电的开发和利用,纷纷着手建设海上风电场,更加高效大规模地发展风电。开展对海上风电场并网方式的研究,对于解决海上风电场的关键技术问题,进一步推动风电产业的可持续发展,都有着重要的意义。

参考文献:

- [1] 崔晓丹,李威,任先成,等.大规模风电接入的输电网规划研究述评[J].江苏电机工程,2012,31(6):1-5.
- [2] 秦旭东.大规模风电接入对江苏电网调频影响与对策研究[J].

江苏电机工程,2013,32(4):6-9.

- [3] 林鹤云,郭玉敬,孙蓓蓓,等.海上风电的若干关键技术综述[J].东南大学学报:自然科学版,2011,41(4):882-888.
- [4] 葛川,何炎平,叶宇,等.海上风电场的发展、构成何基础形式[J].中国海洋平台,2008,23(6):31-35.
- [5] 黄维平,李兵兵.海上风电场基础结构设计综述[J].海洋工程,2012,30(2):150-156.
- [6] 宋础,刘汉中.海上风力发电场开发现状及趋势[J].新能源,2006(2):55-58.
- [7] 李晓燕,余志.海上风力发电进展[J].太阳能学报,2004,25(1):78-84.
- [8] 王志新,王承民,艾芊,等.近海风电场关键技术[J].华东电力,2007,35(2):37-40.
- [9] KLING W L, HENDRIKS R L, DEN BOON, J. H. Advanced Transmission Solutions for Offshore Wind Farms[C]// Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, Pittsburgh, PA, United States, 2008.
- [10] BRESESTI P, KLING W L, HENDRIKS R L, et al. HVDC Connection of Offshore Wind Farms to the Transmission System[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2007, 22(1):37-43.
- [11] BARBERIS N N, TODOROVIC J, ACKERMANN T. Loss Evaluation of Hvac and HvdC Transmission Solutions for Large Offshore Wind Farms[J]. Electric Power Systems Research, 2006, 76(11):916-927.
- [12] 宫改花.高压直流输电系统控制策略的研究[D].太原:太原理工大学,2007.
- [13] 徐科,吴超,杨晓静,等.VSC-HVDC系统风力发电结构分析与控制[J].电网技术,2009,33(4):103-108.
- [14] 王志新,李响,艾芊,等.海上风电柔性直流输电及变流器技术研究[J].电力学报,2007,22(4):413-417.
- [15] 王琦,陈小虎,纪延超.大型风电机组和电力系统联网及相关问题[J].现代电力,2005,22(5):23-28.
- [16] 姚伟,程时杰,文劲宇.直流输电技术在海上风电场并网中的应用[J].中国电力,2009,40(10):70-74.

作者简介:

陈锋(1979),男,江苏南京人,工程师,从事供用电技术及工程管理工作;
刘连永(1968),男,江苏宝应人,工程师,从事供用电技术及工程管理工作;
董余凡(1975),女,江苏丹阳人,助理工程师,从事供用电技术工作。

Review on Integration Program of Large-scale Offshore Wind Farm

CHEN Feng, LIU Lianying, DONG Yufan

(Dan Yang Power Supply Company, Dan Yang 212300, China)

Abstract: Offshore wind farm is seen as the future development of wind power utilization trend and attracts more and more attention for its superiority such as abundant, stable, less interference and so on. Three grid connected program of offshore wind farm, HVAC, LCC-HVDC, and HVDC-Flexible are analyzed and compared with each other. Specific programs of HVDC flexible and AC-DC converter station topology for offshore wind farm are discussed.

Key words: offshore wind; HVAC; LCC-HVDC; HVDC-Flexible