

★四川省一级期刊

• 万方数据数字化期刊群入网期刊

• 《中国学术期刊(光盘版)》入编期刊

• 《中国期刊全文数据库》收录期刊

• 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊

• 北极星中华期刊网入网期刊

• 中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊

• 中国农村电气化信息网

• 重庆维普中文科技期刊数据库

• 《超星数字图书馆》入网期刊

• 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录

四川電力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



国网四川省电力公司经济技术研究院

ISSN 1003-6954



9 771003 695142

四川省电机工程学会 四川电力科学研究院

Vol.37
2014
No.3

《四川电力技术》 编辑委员会名单

主任委员 王平

副主任委员 张伟

刘俊勇

委员

(按姓氏笔画为序)

方文弟 王卓 白家棣

刘勇 朱白桦 朱国俊

朱康 邓亚军 鄒小端

李兴源 李建明 严平

胡灿 徐波 唐茂林

韩晓言 谢舫 甄威

秘书 李世平

吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN1003-6954

CN51-1315/TM

2014年第37卷第3期(总231期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主编:胡灿

副主编:吴小冬

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发行:四川电力科学研究院情报室

地址:成都市青华路24号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传真:(028)87082036

E-mail:cdsclj@163.com

印刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册6.00元

[期刊基本参数]CN51-1315/TM*1978*

b*A4*94*zh*P*¥6.00*4300*21*

2014-06

目次

·基金项目·

基于新疆继电保护故障信息系统的思考与深化应用

..... 段天元 樊艳芳 常喜强 印欣(1)

风电场送出线路距离保护的探究 王银萍 王维庆 张新燕 王海云(7)

基于生物电阻抗频率散射特性的触电特征识别仿真研究

..... 李浩 刘继勋 赵恒 范康林 肖先勇(10)

·电网技术·

含STATCOM的不同阻尼控制器对次同步振荡抑制的影响

..... 王敏华 苏永丽 裴超志(14)

链式供电结构下受端电网的稳控切负荷策略的优化研究

..... 王衡 姚秀萍 常喜强 周专 张锋(19)

基于D5000系统的风电优先调度工作方案设计与应用

..... 肖桂莲 宋明曙 郭小龙 张彦军(24)

不平衡牵引负荷对电网容量占有的探讨

..... 仇龙刚 张永岚 安娜 刘浩 崔中一 刘洋(29)

TSC+STATCOM的混合无功补偿装置协调控制策略研究

..... 张翔 王奔 冯阳 马明智(34)

直流输电系统利用大地回线自动转为金属回线抑制直流偏磁策略研究

..... 孙文 禹佳 滕予非(39)

基于可中断负荷的阻塞管理研究 魏林 魏东 彭格(44)

一种改进的SVC在风电系统霍普夫分岔控制中的应用

..... 袁义桃 康积涛 何龙(48)

异步风力机风速突变对并网系统影响分析与防护措施

..... 罗洪 陈静 冉鸿(53)

基于分布式参数的双端测距优化算法 印吉景 刘宏君 潘军军 余传坤(57)

考虑脆弱性的复杂环网最小断点集计算新方法

..... 张向亮 徐文 张向军 吕飞鹏(61)

含风电的配电网中线损计算方法改进

..... 陶奕衫 闫广新 石岩 蒋燕 王玉蓉(67)

并联电容器对变压器差动保护的影响 陈实 郭晓 张尧 史华勃(70)

一种光伏系统控制策略仿真分析 余涛 梁植淇 李武强(73)

三次产业用电特性及负荷结构研究

..... 任志超 张全明 杜新伟 王海燕 曹开江(77)

·发电厂技术·

汽轮机性能试验热耗率不确定度的分析计算 张志恒 孙戈 钟农兵(82)

电力系统中长期稳定分析用联合供水水电机组非线性仿真模型

..... 汤凡 丁理杰 张华 滕予非 魏巍(86)

不同通风条件下某水电厂电缆室火灾数值模拟分析 孙大根(91)

CONTENTS

Thinking and Discussion on Relay Protection Fault Information System in Xinjiang and Its Deepening Application	Duan Tianyuan Fan Yanfang Chang Xiqiang Yin Xin(1)
Discussion and Research for Distance Protection of Outgoing Transmission Line of Wind Farm	Wang Yinping Wang Weiqing Zhang Xinyan Wang Haiyun(7)
Simulation Research on Identification of Electric Shock Characteristics Based on Frequency Scattering Characteristics of Electrical Bioimpedance	Li Hao Liu Jixun Zhao Heng Fan Kanglin Xiao Xianrong(10)
Effect of Different Damping Controllers Containing STATCOM on Subsynchronous Oscillation Suppression	Wang Minhua Su Yongli Pei Chaozhi(14)
Optimization Study of Load Shedding Strategy for Stability Control in Receiving - end Power Grid Based on Chained Structure of Power Supply	Wang Heng Yao Xiuping Chang Xiqiang Zhou Zhuan Zhang Feng(19)
Design and Application of Wind Power Priority Dispatching Plan Based on D5000 System	Xiao Guilian Song Mingshu Guo Xiaolong Zhang Yanjun(24)
Discussion on Capacity Occupation of Unbalanced Traction Load in Power Grid	Chou Longgang Zhang Yonglan An Na Liu Hao Cui Zhongyi Liu Yang(29)
Study of Coordinated Control Strategy for Hybrid Var Compensator Based on TSC and STATCOM	Zhang Xiang Wang Ben Feng Yang Ma Mingzhi(34)
Research on Suppression Strategy of DC Magnetic Bias in HVDC Transmission System by Automatically Changing Ground Loop to Metal Loop	Sun Wen Yu Jia Teng Yufei(39)
Research of Transmission Congestion Management Based on Interruptible Load	Wei Lin Wei Dong Peng Ge(44)
Application of Modified SVC to Hopf Bifurcation Control of Wind Power System	Yuan Yitao Kang Jitao He Long(48)
Influence Analysis of Abrupt Change of Wind Velocity in Induction Wind Turbine on Grid - integrated System and Protective Measures	Luo Hong Chen Jing Ran Hong(53)
Optimization Algorithm for Two - terminal Fault Location Based on Distributed Parameter	Yin Jijing Liu Hongjun Pan Junjun Yu Chuankun(57)
A New Method for Minimum Break Point Set in Complex Multi - loop Network Considering Vulnerability	Zhang Xiangliang Xu Wen Zhang Xiangjun Lv Feipeng(61)
Calculation Method for Line Loss in Distribution Network with Wind Power	Tao Yishan Yan Guangxin Shi Yan Jiang Yan Wang Yurong(67)
Influence of Parallel Capacitor on Transformer Differential Protection	Chen Shi Guo Xiao Zhang Yao Shi Huabo(70)
Simulation and Analysis of Control Strategy of Photovoltaic System	Yu Tao Liang Zhiqi Li Wuqiang(73)
Research on Characteristics and Structure of Electricity Loads for Three Industries	Ren Zhichao Zhang Quanming Du Xinwei Wang Haiyan Cao Kaijiang(77)
Analysis and Calculation of Uncertainty of Heat Rate in Performance Test of Steam Turbine	Zhang Zhiheng Sun Ge Zhong Nongbing(82)
Nonlinear Simulation Model of Hydroelectric Generating Set with Joint Water Supply for Middle and Long Term Stability Analysis of Power System	Tang Fan Ding Lijie Zhang Hua Teng Yufei Wei Wei(86)
Numerical Analysis of Cable Chamber Fire under Different Ventilation Conditions in Hydroelectric Power Station	Sun Dagen(91)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2014 Vol. 37 No. 3

(Ser. No. 231)

Bimonthly, Started in 1978

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

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Electric Power Research Institute

Editor in chief: Hu Can

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

国网四川省电力公司经济技术研究院

国网四川省电力公司经济技术研究院于2012年6月成立，是四川省电力公司分公司性质的二级单位，主要负责省公司220~500kV电网规划的研究和编制，35kV及以下电网规划评审，指导地市经济技术研究所具体编制110kV及以下电网规划并纳入全省电网发展规划和专项规划；承担全省220kV及以上电网项目可研、初设及电厂（用户）接入系统设计编制，负责110~220kV电网项目可研、电厂（用户）接入系统设计评审；负责公司所辖35~220kV（规模以下）电网建设初设评审和工程结算监督、定额管理、质量监督；负责全省220kV及以上电网项目施工设计工作。

自成立以来，经济技术研究院先后完成了《“十二五”电网发展滚动规划》、《四川电网2020~2030年中长期规划》、《四川藏区电网发展滚动规划（2013~2020年）》等重要规划工作；累计完成评审项目2000余项；有序推进四川电网建设工程质量监督工作，承办《四川电力建设工程造价管理信息》工作，《电网工程造价信息化管理体系建设》荣获省公司2013年度企业管理创新奖；科研能力持续稳步提升，“电网与电源协调发展规划研究”、“居民阶梯电价实行效果分析”两课题获省公司2013年度优秀课题研究一等奖；取得“三甲”设计资质，积极参与编制国网公司通用设计2项、规程规范1项、省公司典型设计2项，获省部级咨询、设计成果奖励15项；企业文化、精神文明建设成果显著，成功创建省级文明单位。

经济技术研究院遵循“技术先进、服务优质、人才兴院、支撑有力”的发展理念，实现技术支撑面向全公司，服务贯穿电网发展全过程，全力打造国网公司系统一流经研院，致力成为省公司企业战略智库和坚强智能电网发展支撑平台。



授牌仪式



创省级文明单位



签订对口帮扶甘孜协议



规划成果



技经成果



现场讨论交流图纸方案



金具连接附件安装检查



依法质监：质监人员爬上
新甘石线路铁塔

四川蜀能电力有限公司



省公司王抒祥总经理视察新都桥变电站



省公司葛兆军书记调研新都桥变电站



公司总经理王世彬在川藏联网铁塔首基试点仪式上讲话



川藏联网技术交底大会



飞艇助力映秀抢险

四川蜀能电力有限公司成立于1994年，原为四川电力送变电建设公司多经企业，2012年5月由四川科锐得实业集团有限公司全资收购，现注册资本金7 107万元，资产总额约6.54亿元。公司具有送变电专业承包一级资质和电力设施一级承装（修、试）类许可资格，是工程建设施工组织质量管理体系（GB/T19001-2008 idt ISO9001:2008+GB/T50430-2007）、职业健康安全管理体系（GB/T28001-2001）、环境管理体系（ISO14001:2004 GB/T24001-2004）认证企业。公司主营业务范围涵盖电力生产、机电设备安装工程、送变电工程、建筑机械及设备租赁等。拥有种类齐全、配套完整的输变电工程施工技术装备及飞艇、多旋翼飞行器展放引绳技术装备，机械化施工能力达到较高水平。

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

2013年，公司全年共承建工程项目29个（含改扩建项目），其中线路项目11个，变电项目18个。年内建成投运工程项目14个，其中线路项目5个，线路长度约420 km（500 kV线路约140 km），变电项目9个（含扩建项目3个），容量1 150 MVA，实现主营业务收入4.59亿元。目前，公司在建项目共15个，其中线路工程项目6个，变电站项目9个，在建工程中属于藏区的工程项目有7个，占总数的41%。

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

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



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

诚征全国代理商

全国统一咨询热线:
400-8818-755



国电西高

电力测试领航者

www.gdngxg.com



GDTF 系列

变频串联谐振耐压试验装置

DL/T 849.6 - 2004

适用范围

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

国电西高旗下子站:

www.HIPOT.cn

www.SF6TEST.cn

www.CTTEST.cn

www.DCTEST.cn



GDVLF 超低频高压发生器



GDHL 智能回路电阻测试仪



GDJS-6G 绝缘工具耐压试验装置



GDYZ-301 氧化锌避雷器测试仪



GDKC-6A 高压开关动特性测试仪

企业查询官方网站: www.whhd.gov.cn

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

电话: 027-65605916
传真: 027-65606183

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

三峡水利枢纽梯级调度通信中心



溪洛渡水电站



葛洲坝水电站



向家坝水电站

三峡水利枢纽梯级调度通信中心（以下简称梯调中心）是中国长江电力股份有限公司下属生产单位，是金沙江下游-三峡梯级电站的水资源利用、调度运行、综合协调、通信保障及施工水文气象服务机构，其主要职能是在保障枢纽安全和施工的前提下，最大限度地发挥流域梯级综合效益。

2013年梯调中心通过精心调度，在长江上游来水较多年平均偏枯18.4%的不利形势下，实现了三峡-葛洲坝梯级全年累计发电98690 GWh，溪洛渡-向家坝梯级累计发电29560 GWh，完成了溪洛渡、向家坝15台机组、总装机容量超10 GW的高强度接机发电任务，实现了对两个电站“调控一体化”的远程运行管理，与两个电站共同

实现了全年“零非停”的目标，实现了金沙江下游梯级工程施工水文气象优质服务目标，完成了三峡水库第4次175 m试验性蓄水和金沙江下游梯级水库4次阶段性蓄水目标。

2014年三峡工程将全面竣工验收，金沙江梯级电站将全面投产发电，乌东德、白鹤滩工程将进行截流，施工水文气象服务重心向上游转移，梯调中心将继续贯彻“用好每一方水，调好每一度电”的工作理念，全力完成2014年各项任务，全力培育水资源利用与流域梯级统一联合调度核心能力，努力打造国际一流的梯级调度中心。



成都调控中心中控室



四川省电机工程学会

2014年秘书长工作会议纪要



四川省电机工程学会理事长王平对会议作总结



四川省电机工程学会 2014年秘书长工作会议

四川省电机工程学会2014年秘书长工作会议于2014年5月13日在四川眉山召开，理事长王平到会并做重要讲话，常务理事张建明致欢迎辞，常务理事夏军及各专（工）委会秘书长共20人参加了会议。

袁邦亮副理事长兼秘书长主持会议并发表讲话，张治安副秘书长传达2014年中国电机工程学会、四川省科协有关工作会议精神，传达四川省电机工程学会第七届四次常务理事会精神。各专（工）委会、分会秘书长汇报2014年工作安排情况，交流工作经验。大家一致认为要认清学会发展的内外部环境，把握机遇，迎接挑战，加强学会的能力建设。

王平理事长对会议进行了总结，并对学会工作提出了新的要求。

1.各专（工）委会是省学会的重要支撑力量。定期召开秘书长工作会对开

展好学会工作非常重要，有利于全面落实学会年度工作计划。

2.继续做好中国电机工程学会交办的“科普下乡凉山行”及其他工作。

3.围绕政府转移职能向社会组织购买服务的重大决策，推进提升能力建设：①省学会将组织电机界专家结合四川清洁能源资源开发、建设运行立项开展专题调查研究，形成报告向有关部门建言献策。②省学会结合四川青年科技人才的培养，为四川电机工程界青年工程师脱颖而出，在电机工程设计、制造、运行、高教开展“杰出青年工程师”评选工作，力争2015年取得相关评选资格。

4.各分会、各专委（工委会）弘扬传统，做好学会工作，创新工作思路，科学统筹，圆满完成各项各类任务。

FBS-9100SD 蓄电池 在线监控及远程自动维护系统



FBS-9100SD采用先进的远程自动维护技术，集电压监控、内阻测试、容量预估、后备时间、告警等功能为一体，将繁重的蓄电池组手工维护模式改变为远程化、集中化、智能化全面自动维护模式提升了蓄电池组维护水平，保障直流电源系统的安全可靠运行。

- **远程化：** 无需人员到电池组所在处即可对电池进行远程测试维护工作
- **集中化：** 可实现对辖区内所有监控中心的电池组进行集中管理
- **智能化：** 采用蓄电池维护领域最新维护技术，轻松实现全面、到位的自动维护



国家高压计量站检测报告

FBS系统蓄电池维护产品，凭借坚实的技术实力与可靠的产品品质，通过国家高压计量站的产品检测。

- ★ 服务于国家云计算中心蓄电池检测项目
- ★ 已经在国网电力、水电厂、IDC中心、运营商等行业成熟应用
- ★ 获得中国IDC联盟推荐“IDC中心运维管理优秀产品”
- ★ 获国家高压检测中心、国家电网电力研究院检测认证并获得证书
- ★ 已获多项国家发明专利



福光电子授权经销商

成都英孚德科贸有限公司
咨询电话：028-8525 0223/8525
邮箱：xdr_xiejun@163.com
www.cdinfrared.com



福州福光电子有限公司
Fuzhou Fuguang Electronics Co., Ltd.

联系人：赵经理 13950301973

电话：0591-83305858

Http: //www.fuguang.com



关注福光微信
赢取精美礼品
机会人人有！
好礼送不停！

风电场送出线路距离保护的探究

王银萍^{1 2}, 王维庆^{1 2}, 张新燕^{1 2}, 王海云^{1 2}

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

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

摘要: 风电场的电气特性必须符合新的大型风电场并网标准和要求。按照这些要求, 风电场受到的约束仅仅是当时的风力条件, 应该能在传统发电厂的水平上完成控制任务。例如, 在电网降低输电容量时(如主干电网器件替换或检修), 风电场的所有风力机可以运行, 但功率水平降低。风电场也必须能参与局部平衡控制(二次调频)。主要基于具有低电压穿越能力的双馈风机, 在联络线的风电场侧和网侧都采用距离保护, 增加保护的可靠性, 并建立保护模型, 并将其与风机模型相结合进行研究。

关键词: 低电压穿越; 双馈风机; 风电场; 距离保护

Abstract: The electrical characteristics of wind farms must comply with the new integration standards and requirements of large-scale wind farm. According to these requirements, the wind farm is constrained by the wind conditions just at that moment, and it should be able to complete the control tasks on the level of the conventional power plants. For example, when the grid reduces the transmission capacity (such as the device replacement or repair of main power grid), all the wind turbines of wind farms can still be in the operation, but the power level is low. And wind farms also must be able to participate in local balance control (secondary FM). Based on doubly-fed induction generator with low voltage ride through (LVRT) capability, the distance protection is adopted in the wind farm side and the grid side of the link line in order to increase the reliability of protection. Then the protection model is established and studied combining with the induction generator model.

Key words: low voltage ride through (LVRT); doubly-fed induction generator; wind farm; distance protection

中图分类号: TM773 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0007-03

0 绪 论

在风电场如何联网的争论中, 它的特点就是综合了保护的复杂性和系统的安全性。简单的投切式连接或用熔丝 T 接对配电等级是可以接受的, 但对输电等级就不能接受。距离保护(Weedy 和 Cory, 1998) 是人们经常使用的系统之一, 但这种保护很可能发生误动作, 因为它把 I 区范围的末端“看成”必须保护的主干电路, 这种保护方案会越限进入甚至超过向风电场供电的变压器。因此风电场内的主干系统可能会因扰动而跳闸。

1 采用双馈风机的变速恒频风电机组概述

为了使机组转速能够快速跟踪风速的变化, 必

须对发电机的转矩实施控制, 为此, 只需在发电机与电网之间接入变流器, 使发电机与电网之间解耦, 就允许发电机变速运行了。由于变流器通过发电机的全部输出功率, 因此, 变流器的容量较大、成本较高。当变速恒频风电机组不需要大范围的变速运行, 而只需在较窄的范围内实现变速控制时, 可选择双馈(绕线转子)感应发电机, 发电机的定子绕组直接与电网相连, 用于变速恒频控制的变流器接到发电机转子绕组与电网之间^[1]。这时, 需要对双馈感应发电机实行转速和转矩的 IV 象限控制。实际上, 采用双馈感应发电机的方案在原理上与感应电动机串级调速相类似, 当电机运行于第 II 象限时, 电机运行于发电机状态, 其电磁转矩为制动特性; 当调节转子附加电动势(即变流器的电机侧电压)的大小或相位时, 就改变了发电机的转子电流和电磁转矩, 同时, 也就改变了发电机的转速。只要令变流器的电机侧电压跟踪风速变化, 发电机的转速就可以快速跟踪

风速的变化了。

采用双馈发电机时,需要控制的只是转差功率,而转差功率一般不超过发电机额定功率的 1/3,使变速恒频双馈感应发电机组的控制成本大为降低,这也是双馈感应发电机在大型发电机组中的应用日益广泛的主要原因。双馈(绕线转子)感应发电机的运行原理与笼型感应发电机基本相同,只是由于转子使用了绕线型绕组,才使之可以实现双馈运行。所谓双馈就是电机的定子和转子都可以馈电的一种运行方式,而馈电一般是指电能的有方向传送。对于双馈感应发电机来说,定、转子的馈电方向都是可逆的^[2]。在定子侧,当电能的传送方向为电机至电网方向时,电机为发电机运行,电能传送方向为电网至电机方向时,电机为电动机运行;在转子侧,在变流器的电机侧电压的控制下,电能传送的方向也是可逆的^[3]。双馈感应发电机的运行状态和功率传递关系见图 1。

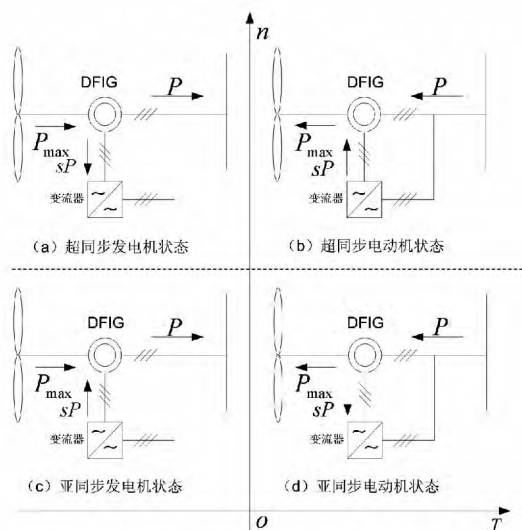


图 1 双馈感应发电机的运行状态和功率传递关系

2 风电场送出线路距离保护的模型分析

2.1 与输电系统相连的风电场距离保护

继电器可以通过相关的电压和电流有效测量阻抗。对于小阻抗距离(比如到变电站 2 距离的 80%——目的是防止超越到变电站 2 中的变压器)内的故障,故障会被无延时的 1 区保护迅速清除。2 区保护检测这一范围之外的故障,并引入一个延时。到变电站 2 距离最后 20% 区段的故障经常被检测成节点 2 的反向潮流,并会有一个加速信号送到节点 1,产生一个 1 区跳闸时间^[4]。

• 8 •

结果是,规划人员很可能用开关设备把回路分成两段,把风电场放在两个普通馈线之间。这需要 2 至 3 台断路器。图 2 是三断路器配置,而图 3 是两断路器配置。

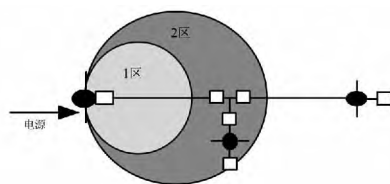


图 2 距离保护——三断路器配置

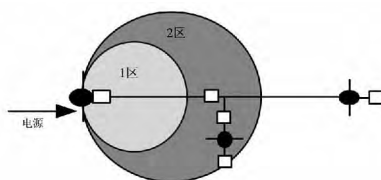


图 3 距离保护——两断路器配置

2.2 模型的建立

风力发电机组会对无线电磁波的传输产生干扰,因此应避免在导航设施或通讯中继站附近安装风力发电机组。风力发电机组对电视和无线电信号的干扰,很大程度上受机型和地理环境的制约。可以采用下面的经验公式来估算信号受干扰的区域。

$$r = \frac{c\eta A}{lm_0}$$

式中 r 为受干扰区域半径; A 为叶轮的投影面积; η 为叶轮的干扰率,金属叶片取 0.7,玻璃钢叶片取 0.3; l 为电视信号的波长; c 为电视发射塔、接收机和风力发电机组之间的几何位置常数:如果电视发射塔、接收机和风力发电机组三者在一 条线上取 $c = 2$,如果风力发电机组在电视发射塔所发射的电波水平线后面,取 $c = 2 \sim 5$; m_0 为干扰强度指数,一般取 0.15。

对于电视信号受到干扰的区域,可以通过调整接收天线、安装一个小型的辅助差转台或用有线电视传输电视信号等方法消除干扰对居民生活的不利影响。

3 风电场送出线上故障时距离保护的動作

如果要把远方操作、接地、SCADA、蓄电池充电器和安全配置都纳入,很可能会导致保护方案过于昂贵。输电企业可能会尽可能确保 T 接设备的所有问题都配备自我保护,力图保留主干电路的安全

配置,使主干系统保持原样。尽管三段距离保护方案是可以实现的,但 T 接电路的长度和位置在决定方案的可靠性方面却非常重要。它的替代方案是通信要求很高的全三端单元保护(full 3-ended unit protection)。

风电机组的感应发电机通过 0.69/35 kV 箱式变压器接入风电场内部电网。内部电网配置为 8 排(8 段),每段含 10 台风力发电机组。各排内部的风电机组都连接到 30 kV 海底电缆。同段内相邻风电机组间距为 1 500 m,而相邻段的距离为 850 m。这样的距离选择符合 5 倍风轮直径的经验值,可以保证能显著降低塔影效应。所有 30 kV 海底电缆段都连接到装有 30/30/132 kV 三绕组变压器的海上平台。再通过一条 132 kV 海底和地下电缆,将海上风电场接入陆地输电系统的连接点。这种情况下,选择交流接入输电网,进行短路故障研究之前,首先要确保线路分断本身(短路容量降低到 1 000 MVA)不会导致电网电压失稳。如果发生电压失稳,则必定是由施加于输电系统选择点的短路故障引发的。系统仿真图如图 4 所示及线路参数。

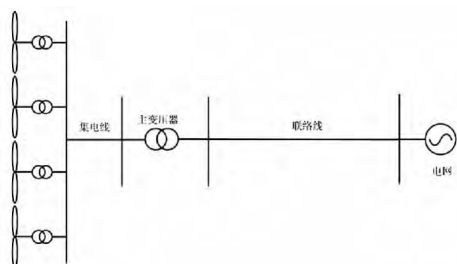


图 4 系统仿真图

表 1 线路参数

名称	长度	型号	电阻	电抗
集电线	5	LGJ-120	0.266 6	0.390 1
联络线	30	LGJ-240	0.132	0.401 1

在单相接地故障下,对保护进行仿真设置故障在 0.5 s 发生,持续时间为 0.1 s,各变量仿真图如图 5 所示。

从图 5 可看出,当风电场接入系统后,发生单相接地故障时,导致相间接地距离阻抗圆中的 AC 相落在阻抗圆内,导致保护误动,扩大了故障范围。

经常可以使用故障后自动重合闸,因为大量故障是暂时现象,如与树枝触碰、导线和鸟接触等。这种措施被视为一种减少用户用电中断时间的主要工具。但随着嵌入式发电的增长,它也会造成一些困难。即使出于安全考虑把自动重合闸排除在常规事件之外,它也经常在雷电和风暴条件下使用,以减少对检修队伍的需求。通常的规定是不允许对电缆和

变压器故障使用自动重合闸,因为它是暂时性现象,可某些风电场直接接入大电源或电网的低压侧。可以拥有这类发电设备的断路器是电业部门的决策问题,但开关设备配备的母线区保护可能需要扩展(或更换),以纳入增加的电路。它的关键节点被分为几个子段。这种保护会检测故障发生区域,并将这一区域隔离。在关键位置,还要配置断路器失效保护。在发生断路器拒跳事件时,这一保护会检测故障,跳开该节点的其他所有电路,以防止继续向故障点供电。对这一保护还需要修改,把新回路考虑在内。另一个问题是变压器是否配置逆功率保护。低负荷时,大型风电场大量发电会导致通过变压器的潮流反向。但如果变压器有能力承受这一水平的逆向潮流,那么这就只是一个保护定值问题。可以安装逆功率保护来防止故障点逆向供电^[5]。

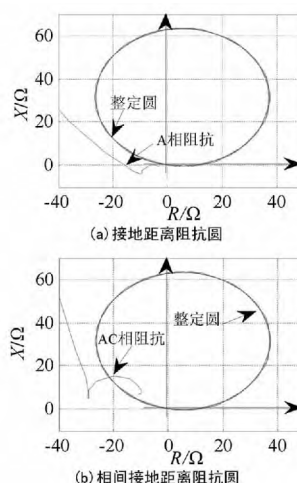


图 5 接入风电场后线路阻抗仿真图

风电机组的故障穿越能力可用定速风电机组的结构与控制来改善。这种改善基于定速风电机组的动态稳定极限,它可降低动态无功补偿的容量要求。因此,降低动态无功补偿容量要求可作为结构改进和改善定速风电机组故障穿越能力控制的度量。

4 结 论

因此,研究短时电压稳定性时,可以把定速主动失速控制的风电机组表示为失速控制。当动态无功补偿和其他控制都没有时,短路故障会导致大型海上风电场电压失稳。只要风电机组保持联网,大型海上风电场内不同风电机组上标注的发电机转速、机端电压和其他参数的波动就都会是同相的,不会相互反相。这样的同相波动称为相干响应,波动的固有频率等于机轴的扭曲模。

(下转第 33 页)

平衡点的重点在于牵引变压器的安装容量^[4]。如果按照最大需量收取基本电费,铁路部门会把最大需量报低以节约基本电费。所以电网公司要将实际负荷中超出最大需量部分予以高倍罚款来遏止这一现象。

(4) 无功计量可采用反送正计,谐波功率也纳入计费范围。因此其基本电价应该在按照牵引变压器容量或者最大负荷需量的基础上再加上一定的罚款,以此来督促铁路部门对电铁的谐波、无功进行治理。

(5) 电力部门必须在电铁投运前作出充分的实地调研,包括电能质量、继电保护及自动装置、电能计量准确性、系统无功补偿等,将电铁产生的危害降到最小,并对已投运电铁进行实测,对不满足要求的,尽快提出整改意见。

(6) 供电部门可以根据铁路部门月用电量或年用电量寻求电价计费方式^[2]新方案,制订合理的方案供铁路部门选择,这样在督促用电客户提高用电设备或最大负荷的利用率的基础上,对牵引变压器电网容量占有进行合理的收费。

5 结 论

综上所述,综合评价技术经济性,单相接线最好,其次是 V/v 和平衡接线,YNdll 接线最差。由第 3 节实测数据分析可知,在两条供电臂负荷的随机分布下,不同接线牵引变压器的负序电流恒有以下结果:平衡接线最小,三相接线次之,单相接线最大。铁路部门只有根据实际情况合理选择变电所接入的系统电压等级和选用合适的牵引变压器才能够起到改善变电所系统三相电压不平衡的作用,采取措施提高容量利用率及系统功率因数,减小负序电流及

高次谐波的干扰,在保证正常供电和达到电能质量标准的基础上,尽量减少变压器容量才是降低容量电费问题的根本方法,供电公司要根据实际牵引变电所接线方式和负荷状况制定合理的技术标准,并采取惩罚措施来规范和督促铁路部门对不平衡牵引负荷的治理。

参考文献

- [1] 谭秀炳. 交流电气化铁道牵引供电系统(第三版) [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2009.
- [2] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.
- [3] 贺建闽, 李群湛. 面向电力市场的电气化铁道 [J]. 电气化铁道, 1997(4): 1-3.
- [4] 贺建闽, 黄治清. 牵引变压器容量的合理选择 [J]. 电气化铁道, 2005(6): 1-5.
- [5] 曹建设, 臧秀芳. 牵引变压器的过负荷能力及容量的合理选择 [J]. 电气化铁道, 2008(1): 10-13.
- [6] 王金浩, 薛磊, 李蒙赞, 等. 不同牵引变压器接线方式的应用研究 [J]. 现代电力, 2009, 26(1): 33-39.
- [7] 兰青, 李群湛, 米天翔, 等. 电气化铁道电价收费方式的探讨 [J]. 铁道运输与经济, 2007(2): 35-37.
- [8] 吕文利. 高速客运专线基本电费缴纳方式的探讨 [J]. 铁道建筑技术, 2011(5): 50-52.
- [9] 贺建闽, 李群湛. 牵引变电所功率因数及其补偿措施研究 [J]. 铁道学报, 1997(6): 116-120.
- [10] 陈清瑞. 两部制电价制度与改进策略 [J]. 粤港澳市场价格与管理, 2008(9): 7-8.

作者简介:

仇龙刚(1988), 硕士研究生, 研究方向为牵引电力系统、电能质量、直流牵引供电系统等。

(收稿日期: 2014-03-20)

(上接第 9 页)

参考文献

- [1] 徐岩, 林旭涛, 赵亮, 等. 大型风电场对工频故障分量距离保护影响的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013(10): 118-125.
- [2] 张保会, 张金华, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电场送出线路距离保护影响分析 [J]. 电力自动化设备, 2013(6): 1-6.
- [3] 余昆, 曹一家, 陈星莺, 等. 含分布式电源的地区电网动态概率潮流计算 [J]. 中国电机工程学报, 2011(10): 118-125.
- [4] 陈培育, 郭小燕. 风电场风速平稳性及其平稳化处理

研究 [J]. 河南科技, 2013(16): 153-154.

- [5] Urmila M. Diwekar. A Novel Sampling Approach to Combinatorial Optimization Under Uncertainty [J]. Computational Optimization and Applications, 2012(20): 102-103.

作者简介:

王银萍(1987), 硕士研究生, 研究方向为风机控制与电力系统继电保护;

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

张新燕(1964), 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统控制;

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

(收稿日期: 2014-03-10)

风电场送出线路距离保护的探究

王银萍^{1 2}, 王维庆^{1 2}, 张新燕^{1 2}, 王海云^{1 2}

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

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

摘要: 风电场的电气特性必须符合新的大型风电场并网标准和要求。按照这些要求, 风电场受到的约束仅仅是当时的风力条件, 应该能在传统发电厂的水平上完成控制任务。例如, 在电网降低输电容量时(如主干电网器件替换或检修), 风电场的所有风力机可以运行, 但功率水平降低。风电场也必须能参与局部平衡控制(二次调频)。主要基于具有低电压穿越能力的双馈风机, 在联络线的风电场侧和网侧都采用距离保护, 增加保护的可靠性, 并建立保护模型, 并将其与风机模型相结合进行研究。

关键词: 低电压穿越; 双馈风机; 风电场; 距离保护

Abstract: The electrical characteristics of wind farms must comply with the new integration standards and requirements of large-scale wind farm. According to these requirements, the wind farm is constrained by the wind conditions just at that moment, and it should be able to complete the control tasks on the level of the conventional power plants. For example, when the grid reduces the transmission capacity (such as the device replacement or repair of main power grid), all the wind turbines of wind farms can still be in the operation, but the power level is low. And wind farms also must be able to participate in local balance control (secondary FM). Based on doubly-fed induction generator with low voltage ride through (LVRT) capability, the distance protection is adopted in the wind farm side and the grid side of the link line in order to increase the reliability of protection. Then the protection model is established and studied combining with the induction generator model.

Key words: low voltage ride through (LVRT); doubly-fed induction generator; wind farm; distance protection

中图分类号: TM773 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0007-03

0 绪 论

在风电场如何联网的争论中, 它的特点就是综合了保护的复杂性和系统的安全性。简单的投切式连接或用熔丝 T 接对配电等级是可以接受的, 但对输电等级就不能接受。距离保护(Weedy 和 Cory, 1998) 是人们经常使用的系统之一, 但这种保护很可能发生误动作, 因为它把 I 区范围的末端“看成”必须保护的主干电路, 这种保护方案会越限进入甚至超过向风电场供电的变压器。因此风电场内的主干系统可能会因扰动而跳闸。

1 采用双馈风机的变速恒频风电机组概述

为了使机组转速能够快速跟踪风速的变化, 必

须对发电机的转矩实施控制, 为此, 只需在发电机与电网之间接入变流器, 使发电机与电网之间解耦, 就允许发电机变速运行了。由于变流器通过发电机的全部输出功率, 因此, 变流器的容量较大、成本较高。当变速恒频风电机组不需要大范围的变速运行, 而只需在较窄的范围内实现变速控制时, 可选择双馈(绕线转子)感应发电机, 发电机的定子绕组直接与电网相连, 用于变速恒频控制的变流器接到发电机转子绕组与电网之间^[1]。这时, 需要对双馈感应发电机实行转速和转矩的 IV 象限控制。实际上, 采用双馈感应发电机的方案在原理上与感应电动机串级调速相类似, 当电机运行于第 II 象限时, 电机运行于发电机状态, 其电磁转矩为制动特性; 当调节转子附加电动势(即变流器的电机侧电压)的大小或相位时, 就改变了发电机的转子电流和电磁转矩, 同时, 也就改变了发电机的转速。只要令变流器的电机侧电压跟踪风速变化, 发电机的转速就可以快速跟踪

• 7 •

基金项目: 教育部创新团队项目(IRT1285); 国家自然科学基金(51267017); 新疆研究生科研创新项目资助(XJGR12013034)

风速的变化了。

采用双馈发电机时,需要控制的只是转差功率,而转差功率一般不超过发电机额定功率的 1/3,使变速恒频双馈感应发电机组的控制成本大为降低,这也是双馈感应发电机在大型发电机组中的应用日益广泛的主要原因。双馈(绕线转子)感应发电机的运行原理与笼型感应发电机基本相同,只是由于转子使用了绕线型绕组,才使之可以实现双馈运行。所谓双馈就是电机的定子和转子都可以馈电的一种运行方式,而馈电一般是指电能的有方向传送。对于双馈感应发电机来说,定、转子的馈电方向都是可逆的^[2]。在定子侧,当电能的传送方向为电机至电网方向时,电机为发电机运行,电能传送方向为电网至电机方向时,电机为电动机运行;在转子侧,在变流器的电机侧电压的控制下,电能传送的方向也是可逆的^[3]。双馈感应发电机的运行状态和功率传递关系见图 1。

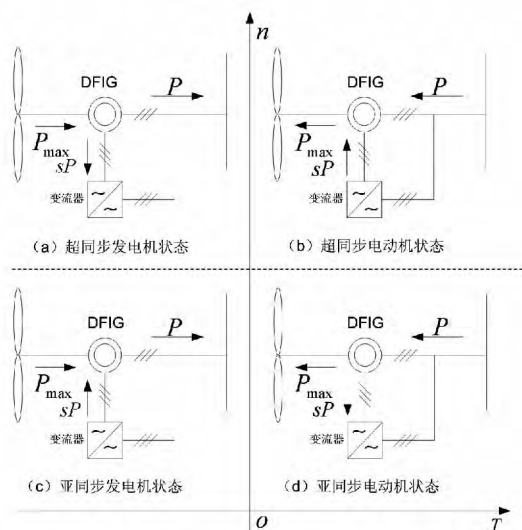


图 1 双馈感应发电机的运行状态和功率传递关系

2 风电场送出线路距离保护的模型分析

2.1 与输电系统相连的风电场距离保护

继电器可以通过相关的电压和电流有效测量阻抗。对于小阻抗距离(比如到变电站 2 距离的 80%——目的是防止超越到变电站 2 中的变压器)内的故障,故障会被无延时的 1 区保护迅速清除。2 区保护检测这一范围之外的故障,并引入一个延时。到变电站 2 距离最后 20% 区段的故障经常被检测成节点 2 的反向潮流,并会有一个加速信号送到节点 1,产生一个 1 区跳闸时间^[4]。

• 8 •

结果是,规划人员很可能用开关设备把回路分成两段,把风电场放在两个普通馈线之间。这需要 2 至 3 台断路器。图 2 是三断路器配置,而图 3 是两断路器配置。

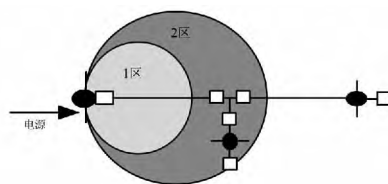


图 2 距离保护——三断路器配置

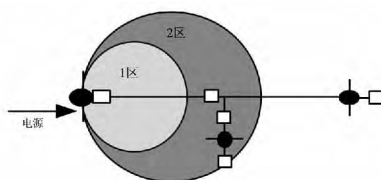


图 3 距离保护——两断路器配置

2.2 模型的建立

风力发电机组会对无线电磁波的传输产生干扰,因此应避免在导航设施或通讯中继站附近安装风力发电机组。风力发电机组对电视和无线电信号的干扰,很大程度上受机型和地理环境的制约。可以采用下面的经验公式来估算信号受干扰的区域。

$$r = \frac{c\eta A}{lm_0}$$

式中 r 为受干扰区域半径; A 为叶轮的投影面积; η 为叶轮的干扰率,金属叶片取 0.7,玻璃钢叶片取 0.3; l 为电视信号的波长; c 为电视发射塔、接收机和风力发电机组之间的几何位置常数:如果电视发射塔、接收机和风力发电机组三者在一-条线上取 $c = 2$,如果风力发电机组在电视发射塔所发射的电波水平线后面,取 $c = 2 \sim 5$; m_0 为干扰强度指数,一般取 0.15。

对于电视信号受到干扰的区域,可以通过调整接收天线、安装一个小型的辅助差转台或用有线电视传输电视信号等方法消除干扰对居民生活的不利影响。

3 风电场送出线上故障时距离保护的動作

如果要把远方操作、接地、SCADA、蓄电池充电器和安全配置都纳入,很可能会导致保护方案过于昂贵。输电企业可能会尽可能确保 T 接设备的所有问题都配备自我保护,力图保留主干电路的安全

配置,使主干系统保持原样。尽管三段距离保护方案是可以实现的,但 T 接电路的长度和位置在决定方案的可靠性方面却非常重要。它的替代方案是通信要求很高的全三端单元保护(full 3-ended unit protection)。

风电机组的感应发电机通过 0.69/35 kV 箱式变压器接入风电场内部电网。内部电网配置为 8 排(8 段),每段含 10 台风力发电机组。各排内部的风电机组都连接到 30 kV 海底电缆。同段内相邻风电机组间距为 1 500 m,而相邻段的距离为 850 m。这样的距离选择符合 5 倍风轮直径的经验值,可以保证能显著降低塔影效应。所有 30 kV 海底电缆段都连接到装有 30/30/132 kV 三绕组变压器的海上平台。再通过一条 132 kV 海底和地下电缆,将海上风电场接入陆地输电系统的连接点。这种情况下,选择交流接入输电网,进行短路故障研究之前,首先要确保线路分断本身(短路容量降低到 1 000 MVA)不会导致电网电压失稳。如果发生电压失稳,则必定是由施加于输电系统选择点的短路故障引发的。系统仿真图如图 4 所示及线路参数。

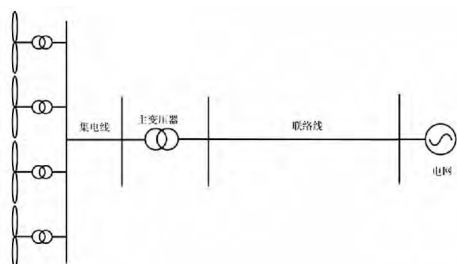


图 4 系统仿真图

表 1 线路参数

名称	长度	型号	电阻	电抗
集电线	5	LGJ-120	0.266 6	0.390 1
联络线	30	LGJ-240	0.132	0.401 1

在单相接地故障下,对保护进行仿真设置故障在 0.5 s 发生,持续时间为 0.1 s,各变量仿真图如图 5 所示。

从图 5 可看出,当风电场接入系统后,发生单相接地故障时,导致相间接地距离阻抗圆中的 AC 相落在阻抗圆内,导致保护误动,扩大了故障范围。

经常可以使用故障后自动重合闸,因为大量故障是暂时现象,如与树枝触碰、导线和鸟接触等。这种措施被视为一种减少用户用电中断时间的主要工具。但随着嵌入式发电的增长,它也会造成一些困难。即使出于安全考虑把自动重合闸排除在常规事件之外,它也经常在雷电和风暴条件下使用,以减少对检修队伍的需求。通常的规定是不允许对电缆和

变压器故障使用自动重合闸,因为它是暂时性现象,可某些风电场直接接入大电源或电网的低压侧。可以拥有这类发电设备的断路器是电业部门的决策问题,但开关设备配备的母线区保护可能需要扩展(或更换),以纳入增加的电路。它的关键节点被分为几个子段。这种保护会检测故障发生区域,并将这一区域隔离。在关键位置,还要配置断路器失效保护。在发生断路器拒跳事件时,这一保护会检测故障,跳开该节点的其他所有电路,以防止继续向故障点供电。对这一保护还需要修改,把新回路考虑在内。另一个问题是变压器是否配置逆功率保护。低负荷时,大型风电场大量发电会导致通过变压器的潮流反向。但如果变压器有能力承受这一水平的逆向潮流,那么这就只是一个保护定值问题。可以安装逆功率保护来防止故障点逆向供电^[5]。

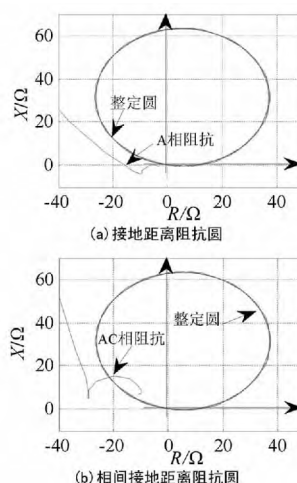


图 5 接入风电场后线路阻抗仿真图

风电机组的故障穿越能力可用定速风电机组的结构与控制来改善。这种改善基于定速风电机组的动态稳定极限,它可降低动态无功补偿的容量要求。因此,降低动态无功补偿容量要求可作为结构改进和改善定速风电机组故障穿越能力控制的度量。

4 结 论

因此,研究短时电压稳定性时,可以把定速主动失速控制的风电机组表示为失速控制。当动态无功补偿和其他控制都没有时,短路故障会导致大型海上风电场电压失稳。只要风电机组保持联网,大型海上风电场内不同风电机组上标注的发电机转速、机端电压和其他参数的波动就都会是同相的,不会相互反相。这样的同相波动称为相干响应,波动的固有频率等于机轴的扭曲模。

(下转第 33 页)

平衡点的重点在于牵引变压器的安装容量^[4]。如果按照最大需量收取基本电费,铁路部门会把最大需量报低以节约基本电费。所以电网公司要将实际负荷中超出最大需量部分予以高倍罚款来遏止这一现象。

(4) 无功计量可采用反送正计,谐波功率也纳入计费范围。因此其基本电价应该在按照牵引变压器容量或者最大负荷需量的基础上再加上一定的罚款,以此来督促铁路部门对电铁的谐波、无功进行治理。

(5) 电力部门必须在电铁投运前作出充分的实地调研,包括电能质量、继电保护及自动装置、电能计量准确性、系统无功补偿等,将电铁产生的危害降到最小,并对已投运电铁进行实测,对不满足要求的,尽快提出整改意见。

(6) 供电部门可以根据铁路部门月用电量或年用电量寻求电价计费方式^[2]新方案,制订合理的方案供铁路部门选择,这样在督促用电客户提高用电设备或最大负荷的利用率的基础上,对牵引变压器电网容量占有进行合理的收费。

5 结 论

综上所述,综合评价技术经济性,单相接线最好,其次是 V/v 和平衡接线,YNdll 接线最差。由第 3 节实测数据分析可知,在两条供电臂负荷的随机分布下,不同接线牵引变压器的负序电流恒有以下结果:平衡接线最小,三相接线次之,单相接线最大。铁路部门只有根据实际情况合理选择变电所接入的系统电压等级和选用合适的牵引变压器才能够起到改善变电所系统三相电压不平衡的作用,采取措施提高容量利用率及系统功率因数,减小负序电流及

高次谐波的干扰,在保证正常供电和达到电能质量标准的基础上,尽量减少变压器容量才是降低容量电费问题的根本方法,供电公司要根据实际牵引变电所接线方式和负荷状况制定合理的技术标准,并采取惩罚措施来规范和督促铁路部门对不平衡牵引负荷的治理。

参考文献

- [1] 谭秀炳. 交流电气化铁道牵引供电系统(第三版) [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2009.
- [2] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.
- [3] 贺建闽, 李群湛. 面向电力市场的电气化铁道 [J]. 电气化铁道, 1997(4): 1-3.
- [4] 贺建闽, 黄治清. 牵引变压器容量的合理选择 [J]. 电气化铁道, 2005(6): 1-5.
- [5] 曹建设, 杲秀芳. 牵引变压器的过负荷能力及容量的合理选择 [J]. 电气化铁道, 2008(1): 10-13.
- [6] 王金浩, 薛磊, 李蒙赞, 等. 不同牵引变压器接线方式的应用研究 [J]. 现代电力, 2009, 26(1): 33-39.
- [7] 兰青, 李群湛, 米天翔, 等. 电气化铁道电价收费方式的探讨 [J]. 铁道运输与经济, 2007(2): 35-37.
- [8] 吕文利. 高速客运专线基本电费缴纳方式的探讨 [J]. 铁道建筑技术, 2011(5): 50-52.
- [9] 贺建闽, 李群湛. 牵引变电所功率因数及其补偿措施研究 [J]. 铁道学报, 1997(6): 116-120.
- [10] 陈清瑞. 两部制电价制度与改进策略 [J]. 粤港澳市场价格与管理, 2008(9): 7-8.

作者简介:

仇龙刚(1988), 硕士研究生, 研究方向为牵引电力系统、电能质量、直流牵引供电系统等。

(收稿日期: 2014-03-20)

(上接第 9 页)

参考文献

- [1] 徐岩, 林旭涛, 赵亮, 等. 大型风电场对工频故障分量距离保护影响的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013(10): 118-125.
- [2] 张保会, 张金华, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电场送出线路距离保护影响分析 [J]. 电力自动化设备, 2013(6): 1-6.
- [3] 余昆, 曹一家, 陈星莺, 等. 含分布式电源的地区电网动态概率潮流计算 [J]. 中国电机工程学报, 2011(10): 118-125.
- [4] 陈培育, 郭小燕. 风电场风速平稳性及其平稳化处理

研究 [J]. 河南科技, 2013(16): 153-154.

- [5] Urmila M. Diwekar. A Novel Sampling Approach to Combinatorial Optimization Under Uncertainty [J]. Computational Optimization and Applications, 2012(20): 102-103.

作者简介:

王银萍(1987), 硕士研究生, 研究方向为风机控制与电力系统继电保护;

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

张新燕(1964), 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统控制;

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

(收稿日期: 2014-03-10)

基于生物电阻抗频率散射特性的触电特征识别仿真研究

李 浩¹, 刘继勋², 赵 恒², 范康林³, 肖先勇¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 国网资阳供电公司, 四川 资阳 413000; 3. 国网自贡供电公司, 四川 自贡 643000)

摘 要: 识别人体触电特征是电网安全防御、用电安全保护、开发新型漏电保护装置等的重要前提。基于生物电阻抗理论, 研究人体阻抗 α 频散特性和人体触电阻抗参数求取方法。利用低压配电网谐波电压, 提出一种考虑人体阻抗及其频率散射特性的人体触电特征识别方法。基于 PSCAD/EMTDC、MATLAB 的仿真实验表明, 该方法简单、可行, 对于解决当前剩余电流保护普遍存在的死区问题和开发基于人体触电特征的新型漏电保护装置有一定参考价值。

关键词: 生物电阻抗; 人体触电; 漏电保护; 剩余电流; 特征

Abstract: Identification for the characteristics of human body electric shock is an indispensable prerequisite for the security and defense of power grid, the security protection of power utilization, and the development of novel leakage protection devices. Based on the theory of electrical bioimpedance (EBI), the method for the frequency scattering characteristics of human body and the impedance parameters of human body electric shock are studied. Using the harmonic voltage commonly existing in low-voltage distribution network, the identification method for the characteristics of human body electric shock is proposed considering human body impedance and its frequency scattering characteristics. The proposed method is verified to be simple, feasible and fast by the simulation results with PSCAD/EMTDC and MATLAB, which is of reference significance for eliminating the dead-zone of the residual current protective devices and the design of novel leakage protection devices based on the characteristics of human body electric shock.

Key words: electrical bioimpedance; human body electric shock; leakage protection; residual current; characteristic

中图分类号: TM866 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0010-04

0 引 言

农网改造以后, 国网公司所属配电网覆盖区域更广, 尤其在广大农村地区自然和气象环境复杂, 电网装备水平相对较低, 用电安全意识不强, 触电/漏电事故发生较城市更为频繁。对中国西部某区县调查, 该地区 2013 年发生人体触电事故 9 起, 给人民生命财产和责任单位造成巨大损失。因此, 研究人体触电特征及其识别方法, 是当前迫切需要解决的重要课题, 具有重要理论价值和重大社会意义。

中国低压电网中为防止人身触电伤亡事故和因漏电事故引起的电气火灾, 广泛使用电流动作型剩余电流保护装置 (residual current devices, RCDs), 俗称漏电保护器^[1]。但现有的漏电保护装置通常

是根据线路总剩余电流的幅值或幅值变化量的大小来判断保护器是否应该动作, 并不区分该电流是由漏电故障还是人体触电所致。由于线路通常存在正常剩余电流, 致使实用中的漏电保护装置大多无法真正辨识触/漏电故障电流信号, 难以准确动作于故障, 均存在一定的保护死区^[2-3]。

实际中通常通过设置总保护、分支保护和末端保护三级保护。根据各级的剩余电流或其变化量对触漏电事故进行保护^[1-4]。保护定值一般设置为: 三相总保护 (100 ~ 500 mA, 0.2 ~ 0.5 s), 单相分支保护 (50 ~ 100 mA, 0.1 ~ 0.2 s), 单相末端保护 (15 ~ 30 mA, 0 s)。这既考虑了躲过自然漏电流又考虑了尽量提高供电可靠性。在发生一般漏电事故时, 能起到保护作用。为提高保护可靠性, 可适当减小保护定值, 但易造成保护频繁动作, 降低供电可靠性; 因此, 通常采用较大的定值, 保证供电可靠性, 但

资助信息: 国家电网科技项目资助 (SGSCZG00YJKJ1313422)

牺牲了保护的有效性。供电可靠性与保护有效性是一对矛盾。

通常要引起漏电火灾,漏电流需达到约 100 mA 以上,要引起电气设备烧毁甚至需要达到数 A 以上^[4]。因此,漏电故障短时间内使泄漏电流上升到数十 mA 的水平通常危害不大,只须报警提示用户及时检修排除故障即可。而人体敏感的电流值则要小得多,如人体的摆脱阈值通常以 6 mA 为限,致颤阈值通常以 30 mA 为限^[5]。当触电电流处于两者之间时,可能并不能触发漏电保护动作,但触电人员仍存在较大的安全风险。因此,十分有必要对人体触电加以识别,以区别于一般的漏电故障和线路正常漏电,以期切实保护人身安全和提高供电连续性。

1940 年, Cole K. S. 提出生物组织的阻抗可用复阻抗平面上的一段圆弧来表示,后经 Cole R. H. 进一步发展形成 Cole - Cole 理论,建立了生物组织的 R、C 三元件电路等效模型和 Cole - Cole 阻抗方程^[6,7]。1957 年, Schwan H. P. 提出了频散理论,指出生物组织电特性随频率在不同频段呈显著变化的规律^[8,9]。这里在现在学者研究的基础之上,提出了一种利用生物组织固有的频率散射特性进行人体触电识别的方法并进行了仿真研究。

1 生物阻抗与频率散射

生物组织由细胞组成,细胞浸浴于细胞外液。细胞外液和细胞内液可视为电解质因而可近似等效为电阻,而细胞膜则可近似等效为电容。因此,当直流或低频电流施加于生物组织时,主要流经细胞外液;随着电流频率的增加,细胞膜容抗减小,更多的电流将穿过细胞膜流经细胞内液^[10]。对于整个生物组织而言,等效电路为若干电阻、电容组织的串并网络^[11]。应用最为广泛的是所谓的三元件生物阻抗模型,在触电保护方面常用的有 IEC 人体阻抗模型^[12]。

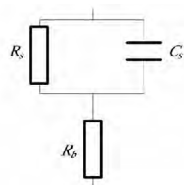


图 1 IEC 人体阻抗模型

根据 Cole - Cole 理论,生物组织的阻抗在复平

面上是第四象限的一段圆心位于实轴以下的圆弧,如图 2(a)。这段圆弧可用 Cole - Cole 阻抗方程来描述。

$$Z(\omega) = R_{\infty} + \frac{R_0 - R_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{\alpha}} \quad (1)$$

式(1)由 4 个参数确定: R_{∞} 、 R_0 分别为高频、低频时的电阻; τ 是时间常数, $f_c = 1/2\pi\tau$ 为特征频率,对应复阻抗虚部模值最大的频率,即阻抗圆的顶点; $\alpha = 2\theta/\pi$ 是一个无量纲的常数(0 ~ 1),它反映细胞膜电容由于频散而非理想电容的性质,在阻抗圆图上它决定图心的位置:当 $\alpha = 1$ 时,阻抗圆弧恰好是一个圆心位于实轴上的半圆(IEC 模型就是 $\alpha = 1$ 时的特例),当 $\alpha < 1$ 时,阻抗圆弧的圆心则位于实轴以下。对应的 Cole - Cole 模型用一恒相元件 CPE 代替理想电容元件,如图 2(b)。

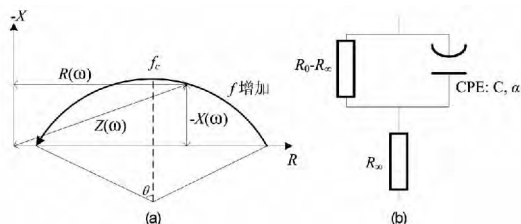


图 2 (a) 生物组织阻抗圆图和 (b) Cole - Cole 阻抗模型

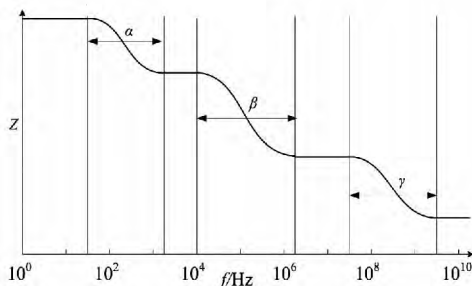


图 3 假想生物组织阻抗 - 频率图

1957 年, Schwan H. P. 提出生物组织在 3 个不同的频率范围内存在着频率散射(Dispersion)现象^[8,9],分别定义为 α 、 β 和 γ 散射,如图 3。 γ 散射发生在微波频段(100 MHz 以上),主要是由于小分子的永久性偶极子弛豫,比如生物组织中大量存在的水分子。 β 频散主要发生在射频频段(数 kHz 到数十 MHz),主要是由于 Maxwell - Wagner 效应所引起。 α 频散主要发生在音频频段(数 Hz 到数千 Hz),主要是由于离子流过细胞或大分子表面时形成的非永久性偶极子的弛豫现象,表现为细胞膜电容发生变化。在各频散范围内,生物组织介电常数 ϵ 和电导率 σ 随频率发生明显变化,使生物组织阻

抗呈现如图 3 所示的随频率变化规律。对于每一频散范围,生物阻抗均可用一个 Cole - Cole 阻抗方程来描述^[13]。由于电网工频为 50 Hz,电力谐波频率在数 kHz 范围内等,处于 α 频散区域,因此,可以认为人体触电具有 α 频散特性。

2 触电识别

由 Cole - Cole 理论可知,生物组织的阻抗由 R_0 、 R_∞ 、 τ 、 α 4 个参数决定。对于一般的非生物漏电阻抗,通常其 α 值为 1 或近似为 1^[7]。而一般生物阻抗的 α (明显小于 1)和 f_c 通常都有其一定的取值范围,如文献[10]和[14]中均测得人体皮肤的 α 值约为 0.8, f_c 为数十到数百 Hz。人体总阻抗主要由皮肤阻抗决定,并且由于人体内部阻抗可近似用电阻来代替^[5],所以其对人体总阻抗的 α 值影响较小。只要能测出 3 个以上不同频率下的复阻抗值,便能估算出阻抗圆的参数,继而估算出 Cole - Cole 公式中的 4 个参数。由于实际低压配电网电压通常含有一定的谐波成分^[15],因此,可利用谐波成分进行 4 个参数的估算^[16]。

对相电压和剩余电流进行 FFT 变换求得各次谐波电压和电流的幅值和相位,对应相除求得各频率下的复阻抗值。假设已测得 n 个复阻抗点: (R_1, X_1) , (R_2, X_2) , $\dots$, (R_n, X_n) , 这些点应满足如图 2 (a) 的阻抗圆。假设该圆圆心为 (a, b) , 半径为 R , 按最小二乘法使

$$F(a, b, R) = \sum_{i=1}^n [(R_i - a)^2 + (X_i - b)^2 - R^2]^2 \quad (2)$$

取最小值进行拟合,计算出 a 、 b 、 R 。再按式(3)~式(6)估算 R_0 、 R_∞ 、 τ 、 α 。

$$R_\infty = a - \sqrt{R^2 - b^2} \quad (3)$$

$$R_0 = a + \sqrt{R^2 - b^2} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{2}{\pi} \arccos \frac{b}{R} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{\left[\frac{R_0 - R_\infty}{Z(\omega) - R_\infty} - 1 \right]^{\frac{1}{\alpha}}}{j\omega} \quad (6)$$

检测逻辑(单相末端保护):同时对相电压和剩余电流信号进行 FFT 变换,当检测到剩余电流信号变化量幅值大于人体致颤阈值 30 mA 时,发保护器

动作信号;当变化量幅值小于 30 mA 且大于摆脱阈值 6 mA 时,利用电压电流各次谐波分量求得各频率下漏电阻抗值,通过最小二乘拟合法求得漏电阻抗 Cole - Cole 阻抗 4 个参数,若参数满足人体阻抗特征,认为发生了人体触电,发动作信号;否则,不动作。当然,如果电网电压的谐波含量太小,不足以计算多频率下的复阻抗,则保护可退化为一般地按剩余电流基频变化量进行判断,并不失去现有的保护方法。

3 仿真与讨论

利用 PSCAD/EMTDC 搭建一个 220 V 低压线路单相人体触电的试验平台。电压源接地阻抗 4 Ω , 线路正常漏电阻抗 $R_l = 50$ k Ω , $C_l = 0.07$ μ F。人体阻抗模型选用如图 1 的 IEC 模型^[14],但适当改变 R 、 C 参数值大小,以验证方法在不同参数情况下的准确性。电压源各次谐波含有量参考某地实测数据^[17],如表 1。利用仿真得到触电波形,按第 2 节所述方法进行计算,得相关结果如表 2,其中 R_t 为过渡电阻,包括接触电阻、对地电阻、线路电阻等; I_s 为人体触电电流。

表 1 某地谐波实测数据

谐波次数	U/V	谐波次数	U/V
DC	0.09	6	0.05
1	236.41	7	3.25
2	0.02	8	0.08
3	0.90	9	0.14
4	0.03	10	0.03
5	3.80	11	0.59

通过对表 2 的分析可知,所提方法所得 α 的相对误差小于 2.5%, f_c 的相对误差小于 5%,说明该方法可较准确地确定 Cole - Cole 阻抗参数,以此为依据识别人体触电特征具有可信性。但目前对于生物阻抗的研究大多集中在 β 频散范围,因此对于人体阻抗在 α 频散范围内(尤其是 0 ~ 1 000 Hz)的参数值还有待进一步实测研究确定。

该方法的另一优点是受过渡电阻 R_t 影响很小,见表 3(人体阻抗模型采用的 IEC 模型 $R_s = 1$ 500 Ω , $C_s = 0.22$ μ F, $R_b = 500$ Ω , $\alpha = 1$),只是随着触电电流的减小误差有所增大。 R_t 的存在相当于在 R_b 上叠加了一个 R_t ,只影响阻抗圆在坐标系中水平方向的位置,不改变阻抗圆形状和大小,故 α 不变; f_c

表 2 参数估计结果

模式	R_b / Ω	R_s / Ω	C_s / μF	参数理论值				参数估计值				误差	
				R_0 / Ω	R_∞ / Ω	α	f_c /Hz	R_0 / Ω	R_∞ / Ω	α	f_c /Hz	α /%	f_c /%
1	500	1 500	0.22	2 000	500	1	482.3	1 998.6	510.8	0.998	476.22	0.2	1.26
2	500	1 000	0.22	1 500	500	1	723.4	480.2	1 500.0	1.005	731.8	0.5	1.16
3	1 000	1 000	0.33	2 000	1 000	1	482.3	979.0	2 002.6	1.015	497.9	1.5	3.23
4	500	1 500	0.44	2 000	500	1	241.1	1 989.8	504.6	0.995 1	251.4	0.49	4.27
5	1 000	1 500	0.11	2 500	1 000	1	964.6	2 500.7	805.7	1.022 7	1 008.2	2.27	4.52

表 3 过渡电阻对参数估计结果的影响

模式	R_t / Ω	I_s /mA	R_0 / Ω	R_∞ / Ω	α	f_c /Hz	α /%	f_c /%
6	4	118.61	1 998.6	510.8	0.998 0	476.22	0.2	1.26
7	1 000	79.30	2 988.5	1 508.5	0.995 8	462.12	0.48	4.18
8	2 000	59.52	3 981.9	2 479.7	1.003 7	501.77	0.37	4.04
9	5 000	34.10	6 942.4	5 448.4	1.003 1	493.36	0.31	2.29
10	10 000	20.01	11 824.5	10 460.7	0.966 1	434.86	3.39	9.84

只与 R_s 和 C_s 有关,与 R_b 无关,因此理论上也不受 R_t 影响。推理可知,即使过渡阻抗中含有一定的电容电抗分量,只要其分量不大, α 值仍会明显小于 1。因为对于 Cole - Cole 阻抗公式而言,其本身就是一个整体等效公式,是对所有细胞等效阻抗的一个综合。同一生物体中,不同组织不同细胞存在差异,其单一细胞或单一组织的 Cole - Cole 参数也是不尽相同的,生物组织整体的 Cole - Cole 参数是对所有细胞、所有组织的一个综合^[11]。基于上述优点,可使所提方法不受过渡阻抗和触电电流大小的影响,使之在较小电流下仍可有效识别人体触电,增大保护范围。

4 结 论

提出一种基于生物组织固有电阻抗频率散射特性进行触电识别的全新视角,推理并仿真验证了可行性。可区分一般漏电故障与人体触电,可更切实地保护人身安全,减少因非严重漏电故障引起跳闸次数,提高供电连续性。虽然对于生物组织 Cole 参数的求取需以配电网电压含有一定的谐波成分为前提,但是考虑到如今电力电子装置普遍使用并有逐渐增多趋势,实际中这个前提是容易满足的。由于实际生物阻抗物理建模不易,仿真采用的仍是 IEC 推荐的理想模型($\alpha = 1$),仅能证明方法的可行

性,进一步还需要进行实测研究和物理实验。前面的研究对于解决当前剩余电流保护普遍存在的死区问题和开发基于人体触电特征的新型漏电保护装置有一定参考价值。

参考文献

[1] 全国低压电器标准化技术委员会. GB 16916.1 - 2003 / XG1 - 2010 家用和类似用途的不带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCCB) 第 1 部分: 一般规则 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[2] 夏越, 杜松怀, 李春兰, 等. 中国剩余电流保护技术与装置的发展趋势 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 151 - 155.

[3] 武一, 李奎, 岳大为, 等. 消除剩余电流保护动作死区的理论与方法 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 44 - 49.

[4] 滕松林, 杨校生. 触电漏电保护器及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.

[5] International Electrotechnical Commission. Effect of Current on Human Beings and Livestock—Part I: General Aspects [S]. IEC/TS 60479 - 1, 2007, 4th ed.

[6] Cole K. S. . Permeability and Impermeability of Cell Membranes for Ions [J]. Qunat. Biol. , 1940(8): 110 - 122.

[7] Cole K. S. , Cole R. H. . Dispersion and Absorption in Dielectrics. I. Alternating Current Characteristics [J]. The Journal of Chemical Physics, 1941(9): 341 - 351.

(下转第 81 页)

日负荷率夏季较大、秋季较小。化学纤维业冬季负荷曲线较为平滑,典型日负荷率冬季较大、夏季较小。住宿餐饮业夏季无用电早高峰,典型日负荷率夏季较大,春季较小。

(2) 四川地区居民生活用电夏季、冬季无早高峰,典型日负荷率及最小负荷率夏季较大、秋季较小,基本呈下降趋势;典型日峰谷差率冬季较大,夏季较小,基本呈上升趋势。

(3) 四川地区第一产业用电负荷比重极小,第二产业用电负荷比重较大。随着第三产业的迅速发展以及居民生活质量的不断改善,在一定程度上,降低了全网的负荷率水平。

参考文献

[1] 四川省人民政府. 四川省国民经济和社会发展第十二

个五年规划纲要[N]. 四川日报 2011-1-28(1).

[2] 康重庆,李顺福,夏清,等. 用电市场的结构分析及其对市场营销的启示[J]. 电力系统自动化,2003,27(14):27-31.

[3] 江峰青,郑淮,李荣民. 上海电网负荷结构分析及特性预测[J]. 华东电力,2008,36(9):51-52.

[4] 陆燕,谈健. 江苏电网负荷结构分析[J]. 华东电力,2007,35(7):26-29.

[5] 霍成军. 电力系统负荷特性分析研究[D]. 天津:天津大学,2007.

作者简介:

任志超(1980),博士研究生,研究方向为电力市场、电网规划等。

(收稿日期:2014-02-13)

(上接第 13 页)

[8] Schwan H. P.. Electrical Properties of Tissue and Cell Suspensions [J]. Advances in Biological and Medical Physics, Weinheim and New York: VCH Publishers, 1957(5): 147-209.

[9] Schwan H. P., Takashima, S.. Electrical Conduction and Dielectric Behavior in Biological Systems [J]. Encyclopedia of Applied Physics, Weinheim and New York: VCH Publishers, 1993(5): 177-200.

[10] A. De Lorenzo, A. Andreoli, J. Matthie, et al. Predicting Body Cell Mass with Bioimpedance by Using Theoretical Methods: A Technological Review [J]. Appl. Physiol, 1997, 82: 1542-1997.

[11] 唐敏. 生物阻抗测量原理与测量技术[J]. 生物医学工程学杂志, 1997, 14(2): 152-155.

[12] International Electrotechnical Commission. Methods of Measurements of Touch Currents and Protective Conductor Current [S]. IEC 60990, 1999.

[13] Jean-Louis Damez, Sylvie Clerjon, Said Abouelkaram, et al. Dielectric Behavior of Beef Meat in the 1~1500

kHz Range: Simulation with the Fricke/Cole-Cole Model [J]. Meat Science, 2007, 77: 512-519.

[14] White Erick A, Orazem Mark E, Bunge Annette L. Characterization of Damaged Skin by Impedance Spectroscopy: Mechanical Damage [J]. Pharmaceutical Research, 2013, 30(8): 2036-2049.

[15] 肖湘宁,等. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[16] 孟润泉,梁翼龙,宋建成,等. 基于谐波检测的井下高压电网选择性漏电保护系统[J]. 继电器, 2001, 29(5): 37-40.

[17] 杨黎鹏. 油田电网谐波分析及软件开发研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

作者简介:

李浩(1986),硕士研究生,主要从事剩余电流保护技术和防止人体触电方面的研究工作;

肖先勇(1968),博士,教授,博士生导师,从事不确定性理论在电力系统中的应用、电能质量和绿色智能电网方面的教学和研究工作。

(收稿日期:2014-03-04)

含 STATCOM 的不同阻尼控制器 对次同步振荡抑制的影响

王敏华 苏永丽 裴超志

(西南交通大学电气工程学院 四川 成都 610031)

摘要: 电力系统输电过程中有一定概率产生次同步振荡 (subsynchronous oscillation, SSO), 这种振荡极易造成汽轮发电机组的大轴损毁, 准确分析系统的次同步振荡特性对其防止和抑制有重要意义。研究了静止同步补偿器 (STATCOM) 的基本结构以及抑制 SSO 的基本方法, 根据不同滤波器设计对次同步阻尼控制器的抑制效果不同, 设计了 3 种次同步阻尼控制器。其中, 提出一种新的控制器设计方法, 利用该方法设计了窄带通次同步阻尼控制器; 最后基于 IEEE 第一谐振模型, 采用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件以及数值计算软件 MATLAB, 仿真验证 3 种不同控制器的有效性。

关键词: 次同步振荡; 静止同步补偿器; 次同步阻尼控制器

Abstract: There is a certain risk of subsynchronous oscillation (SSO) in process of power system transmission, and this oscillation is easy to damage the shaft of turbogenerator set, so it is of significance for the prevention and suppression of subsynchronous oscillation through the accurate analysis of subsynchronous oscillation characteristics of the system. The basic structure of static synchronous compensator (STATCOM) and inhibition method of SSO are studied, and the designed suppression effects of subsynchronous damping controller are different based on different filters. Three synchronous damping controllers are designed, among which a new design method of the controller is proposed and the narrow band-pass subsynchronous damping controller is designed according to this proposed method. Finally, based on the IEEE first benchmark model, the validity of these three different controllers are verified using PSCAD/EMTDC and MATLAB.

Key words: synchronous oscillation; static synchronous compensator; synchronous damping controller

中图分类号: TM702 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0014-05

0 引言

中国的能源资源非常丰富, 但其分配极不均衡, 煤炭资源 80% 集中在西部和北部, 水资源 80% 集中在西南地区。但另一方面, 随着中国经济的快速发展, 用电负荷急剧增加, 尤其是中国的东部经济发达地区, 这一现状决定了必须采用大容量、超高压、远距离输电^[1]。

串联补偿技术可以明显地提高输电线路的利用率, 促进实现上述输电要求, 促进经济效益。但是串联补偿会引起发电机轴系与电气系统以一个或多个低于同步频率交换能量而损坏的现象。次同步振荡是一类严重的系统稳定性问题, 不但会使系统产生振荡现象, 而且极易造成汽轮发电机组的大轴损毁^[2]。如何采取有效的措施抑制次同步振荡是电

力系统中一项重要的研究内容。

文献[3]采用人工神经网络法对扭振系统的特征值进行实时分析, 可用于在线分析 SSO; 文献[4]采用多变量频域法对次同步振荡进行分析, 可反映出发电机 dq 轴的不对称性; 文献[5]采用开环系统频率特性法对汽轮机调节系统的 SSO 特性进行分析; 文献[6]基于模态控制理论, 利用特征值法设计 SSDC; 文献[7]提出了一种基于传递函数的波特图设计 SSDC 参数的方法; 文献[8]提出了与遗传算法相结合的 SSDC 设计; 文献[9]提出了基于 H_∞ 控制理论的 SSDC, 提高了 SSDC 的在线计算速度, 并使其具有一定的鲁棒性。

国内 STATCOM 作为一项成熟的技术, 主要用于电压调节、无功补偿、提高线路输送能力等方面, 但在利用 STATCOM 抑制次同步振荡方面的研究较少。基于测试信号法, 介绍 STATCOM 装置的基本原理、

控制部件和抑制次同步振荡的原理 根据不同滤波器设计对次同步阻尼控制器的抑制效果不同,设计了 3 种次同步阻尼控制器,其中,提出一种新的控制器设计方法,利用该方法设计了窄带通次同步阻尼控制器。最后利用 PSCAD/EMTDC 软件在 IEEE 第一标准模型基础上,对其抑制效果进行了仿真验证。

1 次同步振荡机理

发电机组的轴系在转动时会会有一个自身的模态扭振频率 ω_m ,当发电机组受到扰动时将会使系统产生振动,振动将在定子电压上产生频率为 $\omega_0 - \omega_m$ 的次同步电压分量和 $\omega_0 + \omega_m$ 的超同步电压分量,相应的转速偏移量为 $\Delta\omega = A\omega_m \cos\omega_m t$ 。这两个分量依据电网在相应频率下的阻抗,产生对应频率的电流,从而造成发电机电磁转矩的变化。如果发电机转速偏移量 $\Delta\omega$ 与电磁转矩变化量 ΔT_e 之间的相角差超过 90° ,则 ΔT_e 会助增初始扰动,即出现负阻尼。一旦该负阻尼超过发电机轴系所提供的机械阻尼,则轴系扭振得以维持甚至发散,从而形成了机械与电气之间的相互激励,此过程即为机电扭振互作用^[10]。它是 SSO 的一种主要表现形式,其原理如图 1 所示。

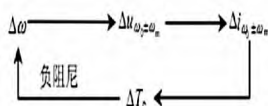


图 1 机电扭振互作用的原理示意图

具有串联补偿的单机无穷大系统如图 2 所示。

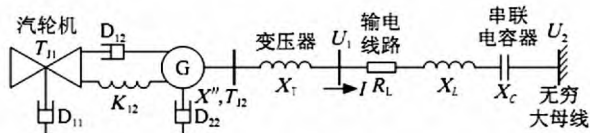


图 2 具有串联补偿的单机无穷大系统

当输电系统采用串联电容补偿时(如图 3),其电气系统的自然谐振频率 ω_{er} 为

$$\omega_{er} = \omega_0 \sqrt{\frac{X_c}{X_L + X'' + X_T}} \quad (1)$$

则相应电气系统自然振荡频率 f_{er} 为

$$f_{er} = f_0 \sqrt{\frac{X_c}{X_L + X'' + X_T}} \quad (2)$$

式(2)中 f_0 为系统同步频率; $\omega_0 = 2\pi f_0$, X_c 、 X_L 、 X'' 、 X_T 分别为同步频率下串联电容器容抗、线路电抗、发电机次暂态电抗、变压器正序电抗。

2 STATCOM 的基本结构

静止同步补偿器 STATCOM 是一种新型的并联 FACTS 装置。其原理如图 3 所示。STATCOM 是由全控型的电力电子元件组成的桥式变流器来实现动态发出或吸收无功电流的。STATCOM 的主电路由变流器构成,变流器由直流部分和交流部分组成,交流部分通过电抗器并联接入电力系统,直流部分通过储能元件为电流循环提供一条路径。

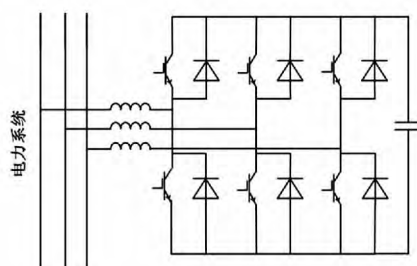


图 3 STATCOM 的原理示意图

STATCOM 主要由变流器、断路器等组成的一次系统和检测环节、控制环节、驱动装置、保护电路、检测装置组成的二次电气系统,如图 4 所示。STATCOM 需要采用连接电抗器或变压器并入系统,这是因为 STATCOM 装置采用了桥式电路。

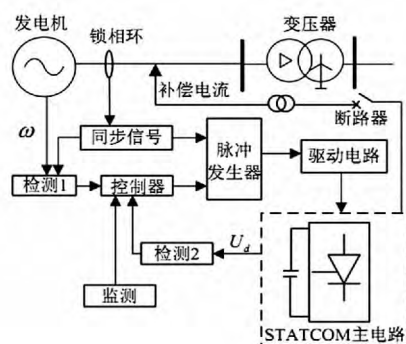


图 4 STATCOM 结构示意图

整个抑制 SSO 的过程:检测 1 环节检测到发电机的旋转角速度信号,通过检测运算电路得到发电机的转速偏差信号 $\Delta\omega$,检测 1 环节把锁相环得到的电压同步信号和计算得到的转速偏差信号 $\Delta\omega$ 发送至控制器,同时检测 2 环节也把测量得到 STATCOM 直流侧的电压信号经过与参考直流侧电压做差后发送至控制器。控制环节根据设定的控制算法对检测环节发送的信号进行处理,在同步信号的共同作用下通过直接电流控制算法得到触发脉冲信号,脉冲信号通过驱动电路控制变流器的门极,从而

控制其导通和关断,从而使 STATCOM 输出合适的电流达到抑制 SSO 的目的。

3 STATCOM 抑制次同步方案设计

3.1 STATCOM 的抑制次同步振荡的策略概述

FACTS 装置抑制 SSO 通常是通过附加阻尼控制器来实现的。在抑制 SSO 的工作中最重要的是次同步阻尼控制器(SSDC)的设计。图 5 即 STATCOM 并联到 IEEE 次同步谐振第一标准测试模型的原理图。研究表明:SSDC 设计的不当,FACTS 装置不仅不能抑制 SSO,而且有可能恶化 SSO 状态,重则导致系统次同步失稳。控制器的设计包括选取反馈信号选取、滤波器设计、控制方法选取。

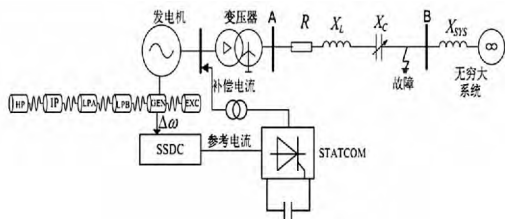


图 5 STATCOM 抑制次同步振荡原理图

这里采用发电机角速度偏差作为阻尼控制器的反馈信号。滤波器选择选用相频特性比较好的 Butterworth 滤波器。控制方法如图 6 所示,利用向系统注入补偿电流抑制 SSO。

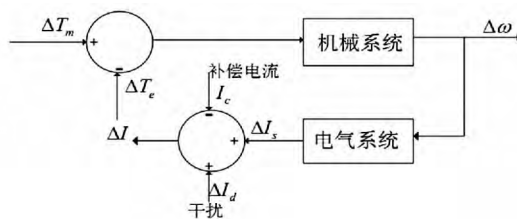


图 6 FACTS 抑制次同步谐振的机理分析

图中 ΔI_d 为当系统受到各种大小扰动后,机组定子侧产生的电流波动; ΔI_s 为由于机电互激,电气系统侧引起的电流增量; I_c 为 FACTS 装置补偿的电流; ΔT_e 为总的电流波动 ΔI 引起的电磁转矩变化量; ΔT_m 为系统受到扰动后,原动机的机械转矩增量; $\Delta \omega$ 为发电机转子的角速度偏差。

3.2 控制器 SSDC 设计

以 IEEE 次同步谐振第一标准测试模型为研究对象,其中,转子轴系 6 个轴段构成,6 个轴段对应转子轴系 6 个扭振模式,除去一个刚体模式,进行 SSO 分析的有 5 个扭振模式,轴系的机械扭振模式

频率分别为 15.71 Hz、20.21 Hz、25.55 Hz、32.28 Hz、47.45 Hz。其中,模式 5 对应的串补度低,模态阻尼非常大,一般不会发生 SSO。所以在设计阻尼控制器时只考虑前 4 个扭振模式。

3.2.1 分模态次同步阻尼控制器

分模态次同步阻尼控制器(SSDC)的框架见图 7,它以发电机角速度偏差 $\Delta \omega$ 作为反馈信号,对发电机轴系的 4 个扭振模式分别设置模态控制通道。

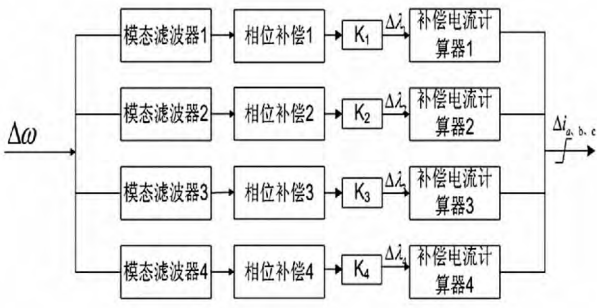


图 7 分模态 SSDC 结构框图

图 7 中的模态滤波器,下面考虑两种不同滤波器组合对抑制 SSO 的影响。

第 1 种:每个模态通道中采用 1 个模态带通的四阶 Butterworth 滤波器,记此类型的次同步阻尼控制器为 SSDC1。其参数设置如表 1 至 3 所示。

表 1 SSDC1 中滤波器设置

控制通道	通带/Hz	关注频率/Hz
模态通道 1	14 ~ 18	15.71
模态通道 2	19 ~ 23	20.21
模态通道 3	24 ~ 28	25.55
模态通道 4	29 ~ 34	32.28

表 2 SSDC1 参数设置 /C°

控制通道	α_i	φ_-	φ_+	β_i	γ_i
模态通道 1	36	-8	-116	18	152
模态通道 2	28	-52	-72	-18	152
模态通道 3	34	-22	-104	7	153
模态通道 4	34	-15	-37	-23	116

表 2 中 φ_- 为次频电流相频响应; φ_+ 为超频电流相频响应; β_i 为相位补偿角度; γ_i 为可调相位偏差角度。

表 3 SSDC1 各模态通道的增益设置

增益	通道 1	通道 2	通道 3	通道 4
K	3 000	9 000	6 000	5 000

在 IEEE 第一测试模型中投入 SSDC1 时系统的电气阻尼特性如图 8 所示。

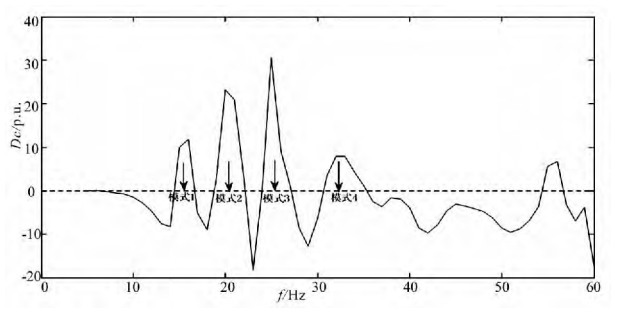


图 8 投入 SSDC1 系统的电气阻尼转矩系数

从图 8 可以看出,投入 SSDC1 时,系统的电气阻尼转矩系数在各个扭振模态频率处为正,但是在两个扭振模态频率之间的部分频率段上电气阻尼转矩系数已经变成负值。为将更多频段上的电气阻尼调节为正,因此设计了 SSDC2。

第 2 种: 每个通道采 1 个模态带通和其余模态带阻二阶 Butterworth 滤波器,每个滤波器的带宽设置为 3 Hz,记此类型的次同步阻尼控制器为 SSDC2。SSDC2 中参数设置如表 4 至 6 所示。

表 4 SSDC2 中滤波器设置/Hz

带宽	频率	通道 1	通道 2	通道 3	通道 4
14 ~ 17	15.71	带通	带阻	带阻	带阻
19 ~ 22	20.21	带阻	带通	带阻	带阻
24 ~ 27	25.55	带阻	带阻	带通	带阻
31 ~ 34	32.28	带阻	带阻	带阻	带通

表 5 SSDC2 参数设置/°

控制通道	α_i	φ_-	φ_+	β_i	γ_i
模态通道 1	-10.4	-8	-116	64.4	152
模态通道 2	16.2	-52	-72	-6.2	152
模态通道 3	35	-22	-104	6	153
模态通道 4	43.7	-15	-37	-32.7	116

表 6 SSDC2 各模态通道的增益设置

增益	通道 1	通道 2	通道 3	通道 4
K	2 000	9 000	7 000	6 000

在 IEEE 第一测试模型中投入 SSDC2 时系统电气阻尼特性如图 9 所示。

由图 9 对比图 8 可知,加入 SSDC2 后系统的电气阻尼特性有很大提高,只在 24 Hz 处电气阻尼系数为负值。

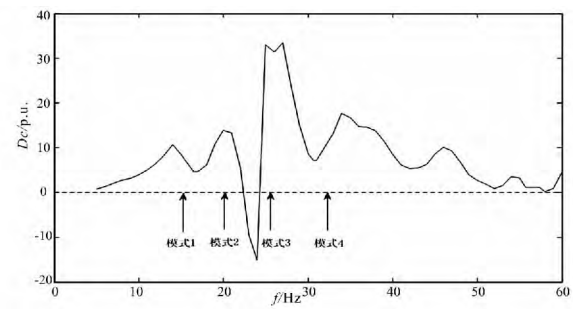


图 9 投入 SSDC2 系统的电气阻尼转矩系数

3.2.2 改进分模态次同步阻尼控制器(SSDC)

为进一步减小次同步阻尼控制器对发电机参数的依赖性,增强控制器的适应性,提出一种新的控制器设计方法:补偿电气谐振频率电流,增加系统在电气谐振频率的互补频率处的电气阻尼。

由图 9 可知,投入 SSDC2 后,系统只在电气谐振频率的互补频率处电阻尼为负,而窄带通次同步阻尼控制器只可以增加某一个频率处的电气阻尼,将两者结合,就可以在不影响 SSDC2 为系统提供的电气阻尼情况下,增加电气谐振频率的互补频率处的电气阻尼,实现将整个频段的电气阻尼调整为正。称这种改进型的分模态次同步阻尼控制器为 SSDC3。其基本框架结构如图 10 所示。

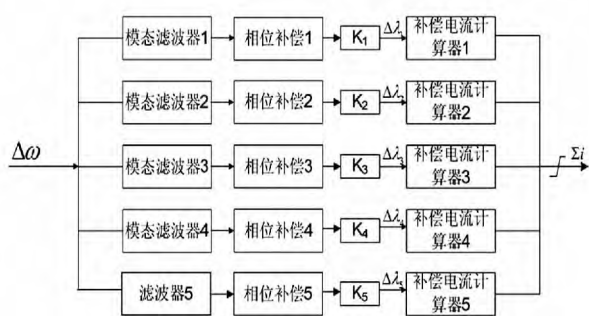


图 10 改进分模态次同步阻尼控制器

其第 5 通道的相位补偿角度和可调相位偏差角度如表 7 所示。

表 7 SSDC3 通道 5 参数设置

控制通道	α_i	φ_-	φ_+	β_i	γ_i
通道 5	0	-123	-60	-31.5	81.5

表 8 SSDC3 通道 5 增益设置

增益	通道 5
K5	40 000

在 IEEE 第一测试模型中投入 SSDC3 时系统的电气阻尼特性如图 11 所示。

从图 11 可以看出,投入将窄带通次同步阻尼控制

器与分模态次同步阻尼控制器组合设计新的次同步阻尼控制器 SSDC3, 所有频段上的电气阻尼均为正值。

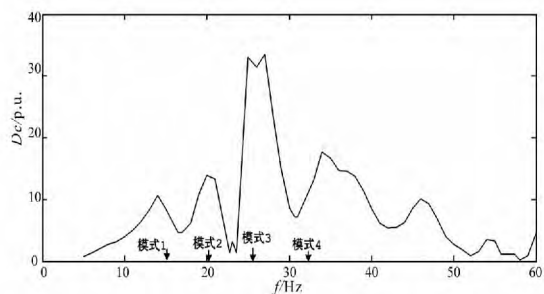


图 11 投入 SSDC3 系统的电气阻尼转矩系数

4 STATCOM 抑制次同步振荡仿真

为了进一步验证设计的 SSDC 抑制 SSO 的有效性, 利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件对图 5 所示的系统进行时域仿真分析。仿真时忽略转子轴系机械阻尼, 设置 $t = 3$ s 时处发生三相接地短路, 短路持续时间 0.05 s。

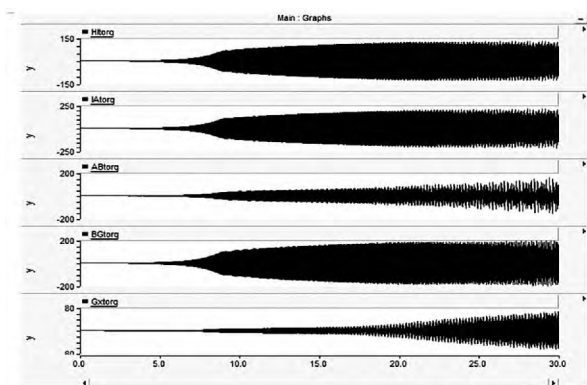


图 12 不投入抑制装置时各轴段间的扭矩

从图 12 可以发现系统在没加 STATCOM 时各个轴段间的扭矩曲线呈现发散趋势, 即系统发生次同步振荡。从图 13、图 14、图 15 可以发现在投入抑制装置 SSDC1、SSDC2、SSDC3 后各轴段间的扭矩在故障发生后有小值发散, 随着故障的消除, 补偿电流注入产生的阻尼作用, 扭矩逐渐收敛, 最后各轴段稳定在正常扭矩值。由图 13 和图 14、图 15 相比较可得出, 投入 SSDC1 时, 各轴段间的扭矩在 7.5 s 时收敛为稳态扭矩值, 投入 SSDC2、SSDC3 时, 各轴段间的扭矩在 6 s 左右收敛为稳态值。这是因为投入 SSDC1 时只有在扭振模态频率处电气阻尼为正值, 投入 SSDC2 后除 24 Hz 外整个频段的电气阻尼均为正值。投入 SSDC3 后整个频段的电气阻尼均为正值, 仿真发现系统发生故障后, 扭振模态频率处的

振荡会引起其他频率的振荡。如果设计的次同步阻尼控制器在整个频率范围内电气阻尼均为正值, 其可以在发生次同步振荡时更好更快地加以抑制。

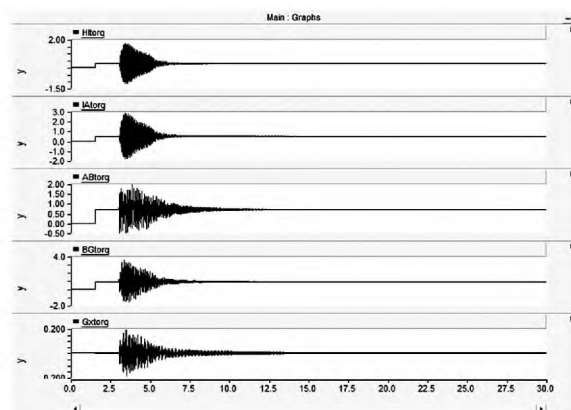


图 13 投入抑制装置 SSDC1 时各轴段间的扭矩

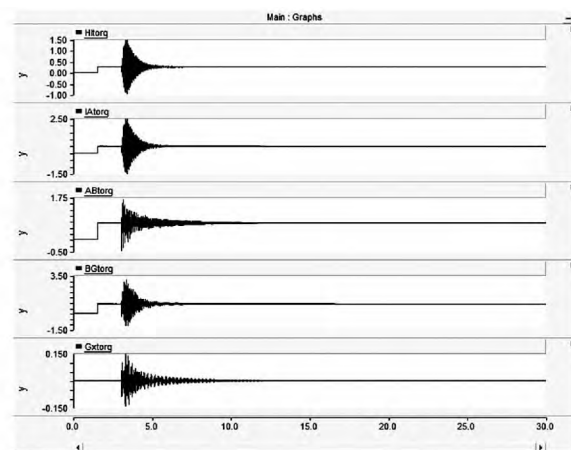


图 14 投入抑制装置 SSDC2 时各轴段间的扭矩

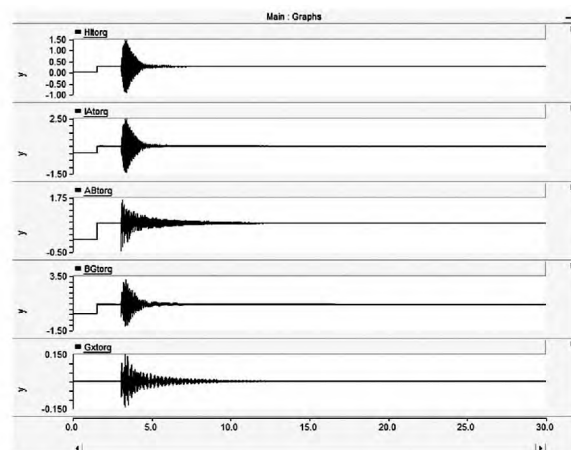


图 15 投入抑制装置 SSDC3 时各轴段间的扭矩

5 结 论

时域仿真验证与对比, 得出下列结论。

(下转第 52 页)

- [5] Saad , M. S. Hassounah , M. A. Abed , E. H. Edris , A. Delaying Instability and Voltage Collapse in Power Systems using SVCs with Washout Filter – aided Feedback [C]. Proceedings of the 2005 Digital Object Identifier American Control Conference , 2005(6) : 4357 – 4362.
- [6] 安伟春. 非线性电力系统分岔控制的研究 [D]. 沈阳: 东北大学 2008.
- [7] 彭志炜 胡国根 韩祯祥. 基于分叉理论的电力系统电压稳定性分析 [M]. 北京: 中国电力出版社 2005.
- [8] 赵晋泉 张伯明. 连续潮流及其在电力系统静态稳定分析中的应用 [J]. 电力系统自动化 2005 29(11) : 91 – 96.
- [9] Calandrinini G , Paolini E , Moiola J L. Controlling Limit Cycles and Bifurcation in Controlling Chaos and Bifurcations in Engineering Systems [C]. 1999: 200 – 227.
- [10] K. N. Srivastava , S. C. Srivastava , P. K. Kalar. . Chaotic

- Oscillation in Power System Under Disburbance [C]. In IEE 2nd International Conference on Advances in Power Control , Operation and Management , Hong Kong , 1993: 705 – 711.
- [11] 李康. 基于分岔理论的电力系统动态电压稳定性分析 [D]. 成都: 西南交通大学 2012.
- [12] 顾伟. 电力系统最优分岔控制研究 [D]. 南京: 东南大学 2006.
- [13] K. Elkington , V. Knazkins and M. Ghandhari. On the Stability of Power Systems Containing Doubly fed Generator based Generation [J]. Electr. Power System 2008 , 78(9) : 1477 – 1484.

作者简介:

袁义桃(1987), 硕士研究生, 主要研究方向为风电系统的电压稳定性分析。

(收稿日期: 2013 – 12 – 27)

(上接第 18 页)

(1) 设计的 3 个次同步阻尼控制器都可以达到抑制 SSO 的目的, 也就是说在轴系扭振模态频率处电气阻尼转矩系数为正就可以抑制次同步振荡。

(2) 如果可以使整个频段的电气阻尼转矩系数为正, 发生次同步振荡后施加抑制装置时发电机各机械量和系统中电气量起始振荡幅值更小, 恢复到平衡位置的时间更短, 对发电机轴系的疲劳损伤最小, 对系统中电气设备的危害也越小。

参考文献

- [1] 张运洲 张卫东. 国家电网公司电网“十一五”发展规划综述 [N]. 国家电网报, 2006 – 36 – 38(1) .
- [2] 周孝信 郭剑波 林集明, 等. 电力系统可控串联电容补偿 [M]. 北京: 科学出版社 2009.
- [3] Hsu YY , Jeng I H. Analysis of Torsional Oscillations Using Anartificial NeuRal network [J]. IEEE Trans. on EC 1992 7(4) : 684 – 690.
- [4] 陈陈. 多变量频域法分析电力系统次同步振荡 [J]. 电力系统自动化 1989 (5) : 22 – 27.
- [5] 于达仁 徐基豫. 大型汽轮机调节系统的设计对轴系扭振

的影响 [J]. 中国电机工程学报. 1992 12(4) : 35 – 39.

- [6] YY. Hsu and L. Wang. Modal Control of an HVDC System for the Damping of Subsynchronous Oscillations [J]. IEE Proceedings , 1989 136(2) : 78 – 86.
- [7] R. J. Piwko , E. VLarsen. HVDC system control for damping of subsynchronous Oscillations [J]. IEEE Transctionson Power Apparatus and Systems. 1982 101(7) : 2203 – 2211.
- [8] 江全元 程时杰 曹一家. 基于遗传算法的 HVDC 附加次同步阻尼控制器的设计 [J]. 中国电机工程学报 , 2005(1) : 87 – 91.
- [9] 杨秀 王西田 陈陈. 基于 H_{∞} 鲁棒控制理论的高压直流输电系统附加次同步振荡阻尼控制设计 [J]. 电网技术 2006 30(9) : 57 – 61.
- [10] Padiyar K R. Analysis of Subsynchronous Resonance in Power Systems [M]. Boston , USA: Kluwer Academic Publishers , 1999: 87 – 96.

作者简介:

王敏华(1988), 硕士, 研究方向为电力系统的稳定与控制。

(收稿日期: 2014 – 02 – 04)

链式供电结构下受端电网的稳控 切负荷策略的优化研究

王 衡¹, 姚秀萍^{1,2}, 常喜强¹, 周 专², 张 锋¹

(1. 国网新疆电力调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830002;

2. 国网新疆电力公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830013)

摘 要: 随着国家经济水平的不断提高, 电网的用电负荷不断增加, 同时由于某些电网网架结构薄弱, 采用链式结构供电, 导致电网中各重要断面功率接近极限运行。当电网发生故障情况下, 将导致断面超极限以及地区电网电压稳定性和频率稳定性等问题, 严重影响电网安全稳定运行。尤其是链式供电方式下受端电网发生机组跳闸, 将导致电网中多个断面超极限运行, 系统稳定性遭到破坏, 稳控装置动作。稳控装置动作可以保证电网安全稳定运行, 但是随着受端电网网架结构的不断建设, 受端电网装机容量以及单台机组容量不断增加, 造成稳控切负荷策略复杂甚至可能导致过切。通过对链式供电方式下, 受端电网机组发生跳闸进行分析, 找出了机组跳闸后的共性, 结合这一共性提出了一种新的稳控切负荷方案。运用 PSASP 程序对某电网进行仿真分析, 验证了该切负荷方案策略简单且不会导致过切, 具有重要的实用价值。

关键词: 稳控系统; 链式供电; 机组跳闸; 断面; 低电压; 切负荷

Abstract: With the constant improvement of the national economic level, the customers' load in power grid is increasing, and the chained structure of power supply is adopted due to the weak structure of power grid, which leads to the power at each important cross-section in the grid closes to the limit. When there are faults occurring in power grid, it will lead to the cross-section go beyond the limit and result in the problems such as the voltage stability and frequency stability in regional power grid, which seriously affects the safe and stable operation of power grid. Especially under the chained power supply, the tripping of the units in receiving-end power grid will lead to multiple cross-sections in power grid go beyond the limit, thus the system stability is destroyed and the stability control devices are in action. Stability control devices can ensure the safe and stable operation of power grid, but with the constant construction of framework structure of receiving-end power grid, the installed capacity of receiving-end power grid as well as the single unit capacity is increasing, resulting in a complex load shedding strategy for stability control, even possible over-shedding. Through the analysis of unit tripping in receiving-end power grid under the chained power supply, the general character after the unit tripping is found out. And in combination with the general character, a new load shedding strategy for stability control is proposed. The simulation analysis with PSASP in one power grid verifies the proposed load shedding strategy is simple and does not lead to a over-shedding, which has an important practical value.

Key words: stability control system; chained power supply; unit tripping; cross-section; low voltage; load shedding

中图分类号: TM734 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0019-05

0 引 言

随着国家经济水平的不断提高, 电网的用电负荷不断增加, 同时由于某些电网网架结构薄弱, 采用链式结构供电, 导致电网中各重要断面功率接近极限运行。当电网发生故障情况下, 将导致断面超极限以及地区电网电压稳定性和频率稳定性等问题,

严重影响电网安全稳定运行^[1-3]。尤其是链式供电方式下受端电网发生机组跳闸, 将导致电网中多个断面超极限运行, 系统稳定性遭到破坏, 稳控装置动作。稳控装置动作可以保证电网安全稳定运行, 但是随着受端电网网架结构的不断建设, 受端电网装机容量以及单台机组容量不断增加, 同时由于受端电网机组故障跳闸的稳控切负荷策略需要结合受端电网各个断面故障前的传输功率情况, 因此将造成

因此需要重新对具有长链式结构特点的受端电网故障跳机的稳控切负荷方案进行研究,调整、优化切负荷方案。下面通过对链式供电方式下,受端电网机组发生跳闸进行机理分析,找出了机组跳闸后的共性,结合这一共性提出了一种新的稳控切负荷方案。运用 PSASP 程序对某电网进行仿真分析,验证了该切负荷方案策略相对于之前的稳控切负荷方案明显得到简化,并且不会导致过切或欠切,稳控动作的可靠性得到提高,具有重要的实用价值。

根据《电力系统安全稳定控制技术导则》规定,电力系统稳定控制体系分为三道防线。第一道防线:快速切除故障元件,防止故障扩大;第二道防线:采取稳定控制措施,防止系统失去稳定;第三道防线:系统失去稳定后,防止大面积停电。第一道防线靠继电保护装置快速、准确的切除故障元件。第二、三道防线是由电力系统安全稳定控制装置来承担,主要包括低频低压减载、失步解列、功率振荡解列和

随着受端电网中电源不断的接入 ,可以降低断面的传输功率 ,提高系统的稳定裕度 ,但是随着单台机组容量的不断增加 ,机组跳闸对电网安全稳定运行的影响越来越大。受端电网中机组跳闸可能导致断面超极限运行 ,进一步破坏系统电压稳定、功角稳定等。图 1 为新疆南部地区电网结构图。

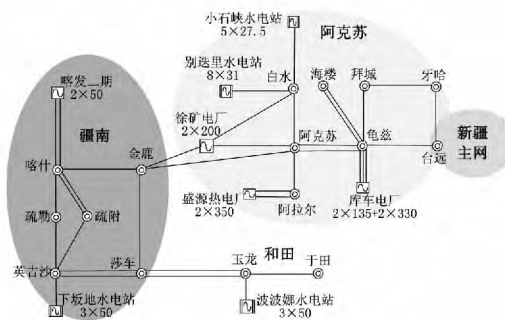


图 1 新疆南部地区电网结构图

如图 1 所示,新疆南部地区与主网仅通 - 回 750 kV 和两回 220 kV 交流线路形成电磁环互联,联系较为薄弱,联络线供电压力较大。同时南部各区域间及各区域内部也只通过两回 220 kV 交流线联络,供电距离长达约 2 000 km,供电距离较长,联系薄弱,同时沿线电源分布较少,形成典型的长链式供电结构。但是新疆南部三地区负荷比较重,表 1 为三地区负荷情况。

表 1 新疆南部地区负荷情况(2013 年) /MW

地区名称	9 月	10 月	11 月	12 月
疆南	920	860	1 100	990
阿克苏	1 000	1 050	1 250	1 250
和田	230	218	229	221

由表 1 可以看出,新疆南部三地区负荷比较重,但是三地区装机容量比较低且装机主要分布在阿克苏地区。新疆南部地区整体为受端网络,需要从主网大量吸收功率,潮流方向为:主网→阿克苏→疆南→和田,几个重要断面(台牙+台兹断面、兹拜+台兹断面、兹苏双线断面、徐鹿+苏鹿断面、鹿喀+鹿莎断面等)均接近功率极限运行。

若该受端系统中出现大容量机组跳闸,如库车 330 MW 机组、徐矿 200 MW 机组、盛源 350 MW 机组或喀发三期 350 MW 机组发生机组跳闸,均将导致各断面传输功率增加,同时导致受端电网特别是电压支撑较弱的地区如台远、牙哈、金鹿等地区的电压出现大幅度跌落,最终出现功角失稳,严重影响电网的安全稳定运行。

表 2 为机组跳闸后断面功率变化量,图 2 为机组跳闸后受端电网中电压曲线。

表 2 机组跳闸后断面功率变化量 /MW

机组	台牙线 + 台兹线	兹苏双线	徐鹿线 + 苏鹿线
库车 1 号(135)	144.20	0	0
库车 3 号(330)	343.80	0	0
徐矿 1 号(200)	258.45	262.13	0
喀什 1 号(50)	68.00	70.10	63.50
波波娜 1 号(50)	69.90	71.50	65.43

从表 2 可以看出,机组跳闸后相应的断面功率急剧增加。尤其是受端电网中大机组跳闸后断面功率突增量特别大,断面严重超极限运行,严重影响电网安全稳定运行。

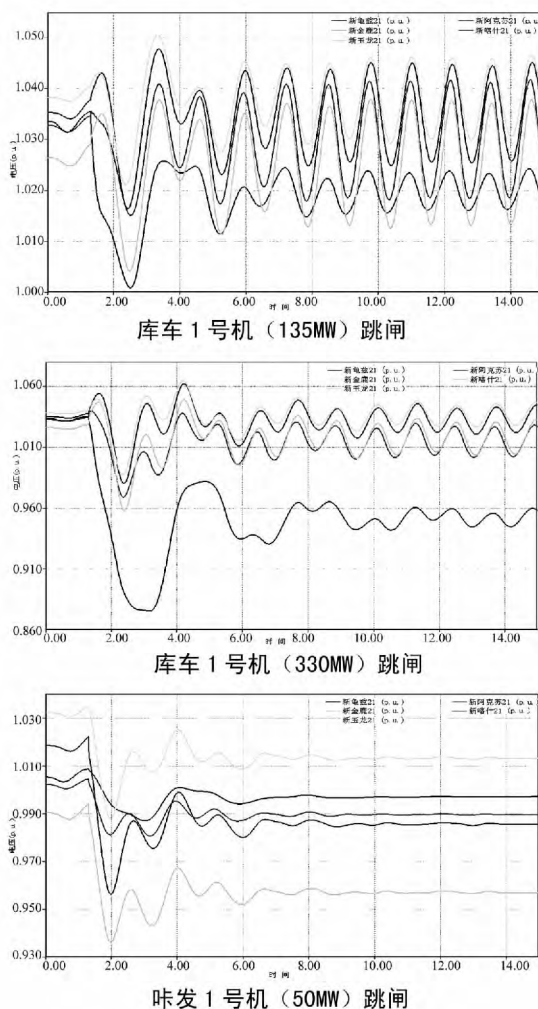


图 2 受端电网中机组跳闸后各变电站电压曲线

由图 2 可以看出,受端电网机组跳闸情况下,导致各断面传输功率增加,致使受端电网中电压降低,机组跳闸后电网稳定性遭到破坏,需要稳控装置动作,切除受端电网部分负荷,降低断面传输功率,使系统电压恢复到合理范围内,保证电网安全稳定运行。但是由于电网存在很多断面,机组出现跳闸故障后,稳控系统无法有针对性的简单判断出究竟是哪一个断面超极限运行,或哪一个地区的电压跌落最大超过允许值。因此存在当机组故障跳闸后,稳控系统可能只会“盲目”的切除与跳闸机组容量相匹配的负荷,但对于最佳切负荷点或最小切负荷量这两个方面来说,稳控系统无法满足这两点要求,因此可能造成的结果为稳控存在过切或欠切,稳控切负荷动作后,系统电压恢复偏高或偏低,严重时将出现功角失稳局面。

为了解决上述问题,在发生机组跳闸故障时,稳控系统可通过采集故障前所有断面的功率传输情况及故障后的各点电压跌落情况,将其发送至跳闸机

组的稳控装置,再由跳闸机组的稳控装置发令切除部分负荷。该方案可准确找出机组跳闸故障下最终导致系统出现功角失稳的关键断面及关键电压薄弱点,第一时间准确锁定需要切除负荷的区域以及所需切除负荷的大小,从而准确动作以最小的切负荷量来有效降低断面传输功率,同时快速恢复电压至合理范围内。该方案虽然解决了“盲目”切负荷的问题,但稳控措施及策略较为复杂,只一条策略就需要采集大量的数据和信息,通信通道占用容量较大,且通信交互、配置复杂,稳控系统的正确动作性对通信系统及所采集数据的准确性依赖较高。通信系统的可靠性较低,调试工作量大,且出现稳控动作出错的概率较高,不利于稳控系统的现场实际应用。因此,需要针对该问题进行稳控方案的优化,重新梳理稳控策略的相关思路,一方面有效、有针对性地解决问题,另一方面最大限度地简化稳控策略及方案。

3 切负荷策略研究

通过深入分析发现,当受端电网发生大容量机组跳闸的主要表现为:断面功率超极限运行以及部分地区电压跌落至允许值以下,而这也正是导致系统最终出现功角失稳的决定性和根本性的因素。因此解决问题的关键就在于如何以最简单、有效的方式降低断面功率至极限以下,以及恢复系统电压至允许值以上。

根据电网故障后电网运行表现出来的这一系列特点,如果可以准确捕获在机组跳闸前、后各断面的功率变化情况以及各点的电压跌落变化情况,即可准确找到影响电网安全稳定运行的关键断面和关键点,从而准确锁定切负荷区域及所需切负荷的大小。

但各个断面及各点信息在稳控系统采集后,在哪汇总、判断、分析和处理又成为一大问题,如果将其汇总至跳闸机组的稳控装置,势必又将造成稳控系统的复杂和可靠性低。如果将各断面、各点信息就地判断、分析,则有利于大大简化稳控系统的复杂性,但稳控系统如何将如何就地判断和动作,同时当机组跳闸后,可能出现多个断面同时出现超极限运行和电压低的情况,各断面的稳控策略将如何配合等将成为主要需要解决的问题。

最终,为了满足上述多个要求,对新疆电网南部地区的稳控策略进行如下优化:对南部电网多个关键断面制定功率突增策略,当南部机组出现跳闸后,如果功率突增量满足一定值,且功率突增后断面功率大于该断面功率极限值,或本站电压低于某一值

时,延时切除本地负荷。

这样就保证了稳控切负荷的有针对性和准确性。当电网发生故障跳机时,该策略可准确找到电气量变化最大、功率及电压裕度最低的断面,有效针对对电网影响最大的关键断面及关键电压薄弱点切除负荷,快速恢复电网稳定性。

同时为了简化稳控策略及通信的复杂性,将各断面信息量实现就地采集和就地判断、分析,不进行不同稳控装置间的交互通信,只要就地满足稳控动作要求即自动下发稳控切负荷命令,这样就实现了稳控切负荷策略与机组跳闸故障之间的解耦,简化稳控策略和通信,大大提高稳控动作的可靠性。

对于当机组跳闸后,可能出现多个断面同时出现超极限运行和电压低的情况,如果此时各断面稳控同时切除同一匹配量的负荷,则很有可能导致最终过切负荷。对此,在稳控策略中主要通过针对不同断面设定不同的延时时间来进行配合,避免同时重复切除负荷。当某一断面稳控先切除一定量负荷后,将造成其余断面功率也随之降低,若该断面功率降低至功率极限以下,同时电压恢复至允许范围以内时,则该稳控策略将会返回,不再多切负荷。这就将不同断面间的稳控切负荷的策略进行了有机的配合,简单、有效的建立了南部整体地区链式网架对于大容量机组故障跳闸后的二道防御系统。

对比原来的切负荷策略,提出的切负荷策略,减少了安全稳定控制装置的信息交互,降低了稳控策略的复杂程度,解决了因网架结构问题导致的参数整定困难以及切负荷的配合问题,将单一机组跳闸的稳控切负荷策略分解为各个断面的功率突增切负荷策略,实现稳控策略的解耦和简化,同时防止安全稳定控制装置误切,减少了切负荷量,保证了系统安全稳定运行。

4 仿真分析

为了验证所提出的安全稳定控制装置的切负荷方案的正确性,取新疆南部实际电网,运用 PSASP 来进行计算分析。电网网架结构图如图 1 所示:

电网正常运行情况下,潮流方向为主网→阿克苏→疆南→和田。电网中电源情况:库车电厂($2 \times 135 \text{ MW} + 2 \times 330 \text{ MW}$)、徐矿电厂($2 \times 200 \text{ MW}$)、喀什电厂($2 \times 50 \text{ MW}$)、下坂地水电($3 \times 50 \text{ MW}$)和波波娜水电($3 \times 50 \text{ MW}$)等。正常运行情况下,台牙线+台兹线、兹拜线+台兹线、兹苏双线、徐鹿线+苏鹿线和鹿喀线+鹿莎线断面的传输功率较重,在

负荷高峰时段接近稳定极限运行。若受端电网中机组(库车电厂、徐矿电厂、喀什电厂等)发生跳闸,将导致各断面功率突增,造成断面超极限运行,受端电网低电压,系统稳定性将遭到破坏。

为了防止受端电网中机组(库车电厂、徐矿电厂、喀什电厂等)发生跳闸,导致地区电压过低,出现电压稳定问题及断面超极限运行,根据所提出的切负荷策略,制定切负荷策略如下。

当徐鹿线+苏鹿线断面功率($P_{x1} + P_{s1}$)突增量 ΔP_{dm} (方向指向金鹿)大于 P_{set} ,且本站电压小于 V_{set} ,时间 T 大于 T_{set} ,切除本地区负荷: $K_{set} \Delta P_{dm}$ 。通过仿真计算分析各参数整定值为

$$P_{set} = 50 \text{ MW}; V_{set} = 99\%$$

$$T_{set} = 2 \text{ s}; K_{set} = 0.2$$

结合上述切负荷策略,运用 PSASP 进行仿真分析,当喀什电厂机组跳闸之后,稳控切负荷量为 13.6 MW。切除金鹿地区负荷后,受端电网电压恢复到合理范围,徐鹿线+苏鹿线断面功率控制在极限以内。安全稳定控制装置切负荷动作后各变电站电压曲线如图 3 所示。

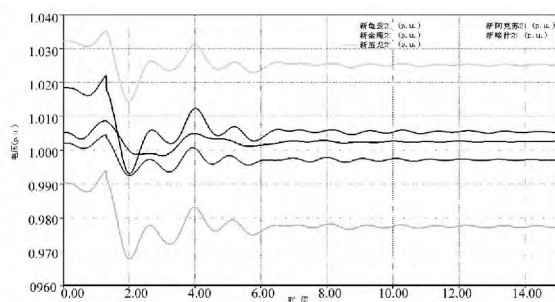


图 3 切负荷动作后受端系统各变电站电压

从图 3 可以得出,当喀什电厂机组跳闸后,受端系统中各变电站电压降低,徐鹿线+苏鹿线断面功率突增,安全稳定控制装置动作,切除金鹿地区部分负荷可以使受端系统电压恢复到合理范围内,保证电网安全稳定运行。同时通过图 3 可以证明,前面所提出的切负荷策略的有效性,可以保证安全稳定控制装置正确动作,保证电网安全稳定运行,也反应出该切负荷策略简单且各参数容易整定。

5 结 论

通过对链式供电方式下受端电网机组发生跳闸进行分析,得出当受端电网机组发生跳闸将导致电网中某些断面功率突增且超过功率极限运行,同时伴随有系统电压跌落较大等特点,针对这一特性,提

出了一种新的切负荷策略。通过对新疆南部实际电网仿真分析,证明了所提出的切负荷策略具有重要的实用价值,能准确找到大容量机组故障跳闸后对电网稳定产生重要影响的关键断面及关键点,确保安全稳定控制装置的正确、可靠动作,同时可有效防止由于稳控策略复杂或通信机制复杂等造成的稳控误切或过切负荷的现象出现,对于稳控策略各参数定值也较容易整定,只需要注意不同断面间稳控参数定值的整定配合即可。

参考文献

- [1] DL 755-2001,电力系统安全稳定导则[S].北京:中国电力出版社,2001.
- [2] 李琳,罗剑波,周霞,等.基于风险管理的过载切负荷策略制定[J].电网技术,2013,37(3):821-826.
- [3] 刘昇,徐政,侯俊贤,等.一种基于 WAMS 的低压切负荷控制策略[J].电力系统保护与控制,2013,41(15):82-87.
- [4] 中华人民共和国国务院.电力安全事故应急处置和调查处理条例[EB/OL].http://www.gov.cn/jzwgk/2011-07/15/content_1906887.htm,[2011-07-15].
- [5] 颜伟,文一宇,余娟,等.基于戴维南等值的静态电压稳定广域切负荷控制策略[J].电网技术,2011,35(8):88-92.
- [6] 余文杰,方勇杰.一种基于 SMARTDevice 的低压切负荷算法[J].电力系统自动化,2006,30(21):57-60.
- [7] 傅旭,王锡凡.一种新的节点静态电压稳定指标及切负荷算法[J].电网技术,2006,30(10):8-12.
- [8] 丁涛,董柏峰,顾伟,等.基于 PMU 的电压稳定动态线性化指标优化切负荷算法[J].电力系统保护与控制,2013,41(9):27-33.
- [9] 邓继宇,刘俊勇,魏震波,等.基于 WAMS 预测的电力系统优化切负荷研究[J].华东电力,2011,40(1):66-71.
- [10] 王菲,余贻鑫,刘艳丽.基于安全域的电网最小切负荷计算方法[J].中国电机工程学报,2010,30(13):28-33.

作者简介:

王 衡(1984),工程师,研究方向为电力系统分析与控制;

姚秀萍(1961),硕士生导师、高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制、调度自动化;

周 专(1987),硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;

常喜强(1976),高级工程师,研究方向为电力系统分析与控制。

(收稿日期:2014-02-28)

基于 D5000 系统的风电优先调度工作方案设计与应用

肖桂莲 宋明曙 郭小龙 张彦军

(国网新疆电力调度控制中心 新疆 乌鲁木齐 830006)

摘 要: 近年来由于风电迅猛发展,大幅度超前电网建设和社会用电负荷增长,受网架约束和电网调峰问题影响,风电出力受阻的情况时有发生,风电消纳已成为困扰电网和风电场的共同问题。依据《风电优先调度工作规范》,基于智能调度技术支持系统建设,设计新疆电网风电优先调度工作方案,有利于在保证电网安全稳定运行的前提下,实现新能源消纳最大化的目标。

关键词: 智能调度; 风电优先调度; 发电计划; 风电理论功率

Abstract: In recent years , the rapid development of wind power generation in Xinjiang is much faster than the development of grid construction and the increasing of customers' loads. And restricted by the grid structure and influenced by dispatching capability , the blocking of wind power output happens quite often , so wind power accommodation becomes the common problem obsessing the grid and wind farms. On the basis of " Wind Power Priority Dispatching Specification " and the construction of smart grid operation supporting system , the wind power priority dispatching plan is designed for Xinjiang , which can realize the accommodation maximization of new energy in the premise of ensuring the safe and stable operation of power grid.

Key words: intelligent dispatching; wind power priority dispatching; generation scheduling; theoretical wind power

中图分类号: TM734 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2014) 03 - 0024 - 05

自 2006 年中国《可再生能源法》颁布以来,新能源发电步入快速发展时期。新疆陆上风能资源十分丰富,仅次于内蒙古,随着疆电外送特高压交直流输电工程建设和投产,新疆丰富的风电成为大力开发的清洁能源之一,2013 年新疆电网风电装机年增长 136%,新疆俨然已成为风电产业发力的主战场。由于风电迅猛发展,大幅度超前电网建设和社会用电负荷增长。较强天气过程期间风电出力较大且同时率较高时,受局部地区网架结构、系统小负荷期间系统快速调节能力较弱、调峰困难等因素,以及 750 kV 哈敦双线送出极限的影响,新疆全网总体将面临部分地区部分时段控制出力的局面,风电消纳已成为困扰电网和风电场的共同问题。目前,各电网新能源调度手段和优化程度不一。依据《风电优先调度工作规范》^[1],设计提出基于智能调度技术支持系统的风电优先调度工作方案,有利于在保证电网安全稳定运行的前提下,实现新能源消纳最大化的目标。

1 方案提出的背景

新疆电力公司十分重视风电的发展,积极通过

技术创新、管理创新努力提高风电接纳水平,先后完成了风电功率预测、风电优化调度等技术支持系统建设。随着坚强智能电网建设工作的深入开展,新疆电网的网架结构和运行特性都发生着重大的变化,这对电网调度驾驭大电网的能力以及电网调度一体化运行管理水平和信息化、自动化、互动化水平提出了新的更高的要求^[2]。为此新疆电网适时开展了智能电网调度技术支持系统建设即基于 D5000 的一体化平台及支撑横向互联和纵向接入的实时监控与预警、调度计划、安全校核、调度管理四大类应用。在此基础上,设计实施风电优先调度工作方案,将风电优先调度贯穿各工作环节,满足《风电优先调度工作规范要求》。

2 风电优先调度工作方案主要内容

《风电优先调度工作规范》主要是从“提供优质服务、预留充足空间、调整及时到位、持续评价改进”等方面实现规范调度行为,优先调度风电。这里基于智能电网调度支持系统,重点从“预留充足

空间、调整及时到位、持续评价改进”这三方面着手设计风电优先调度方案,一是风电优先调度计划的编制,根据电网风电接纳能力评估,结合风功率预测合理安排电网备用容量、调整常规电源机组组合,形成风电优先消纳的日前发电计划。二是风电实时调度与调整,跟踪分析风电超短期功率预测和电网风电接纳能力情况,当风电实际发电能力超出计划导致断面受限或负荷需求降低时,应首先调减常规电源发电出力;当负荷需求增加时,应优先增加风电出力^[2-4]。三是实现风电优先调度评价、分析、评估和整改的动态闭环管理,循环推进风电优先调度工作。

2.1 风电接纳能力评估

计算电网的风电接纳能力,是做好风电优先调度计划的前提和基础。目前,关于电网的风电接纳能力,尚无明确的定义及权威部门认可的标准计算方法。这里结合新疆电网风电接入呈大分散、小集中的分布特点,基于网架结构和潮流分布,开展风电接纳能力评估,明确了新疆电网综合考虑调峰约束、网架约束的风电接纳空间计算原则^[5-6]。

电网风电接纳能力 = MIN(考虑调峰约束的全网风电接纳能力,考虑网架约束的全网风电接纳能力)。

考虑调峰约束的全网风电接纳空间 = 短期系统

负荷预测 + 联络线传输计划 - 直调火电厂最低出力 - 直调水电厂可调出力 - 自备电厂可调出力 - 地区小电源可调出力。考虑网架约束的全网风电接纳能力 = SUM(西北部地区风电接纳能力,乌鲁木齐地区风电接纳能力,吐鲁番地区接纳能力,哈密地区接纳能力)。地区风电接纳能力 = MIN(地区联络线接纳能力,地区主变压器接纳能力)。地区联络线接纳能力 = MIN(联络线接纳能力(注:适用于同一上网通道多级串供线路)。地区联络线接纳能力 = SUM(联络线接纳能力)(注:适用于不同上网通道多回路)。联络线接纳能力 = 联络线极限 + SUM(地区下网负荷) - SUM(常规火电最低技术出力) - SUM(自备、水电最低可调出力)。地区主变压器接纳能力 = SUM(集中并网风电接纳能力 + 分散接入风电并网容量)。地区集中接入风电接纳能力 = SUM(变电站接纳能力)。

变电站接纳能力 = MIN(主变压器容量 + 下网负荷,变电站风电并网容量。(注:下网负荷不含风电。地区小电源如果在母线负荷预测中已经抵消,在计算中不予考虑;否则“下网负荷 = 母线负荷预测 - 小电源可调出力)。

新疆西北部电网结构图如图 1 所示。

示例:西北部地区风电接纳能力计算

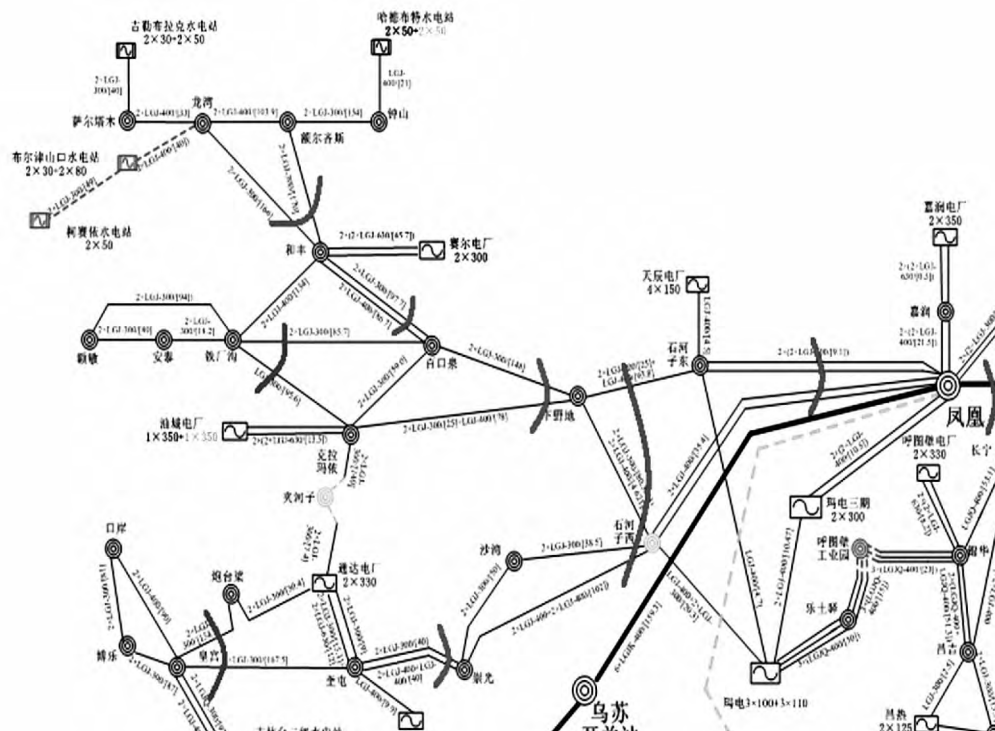


图 1 新疆西北部地区电网结构图

西北部地区风电接纳能力 = MIN 西北部地区外送通道接纳能力, SUM(莲博州地区风电接纳能力, 塔城地区风电接纳能力, 阿勒泰地区接纳能力)。西北部地区外送通道接纳能力 = MIN(野石东线 + 野石西线 + 沙石西线 + 崇石西线) 接纳能力, (凤石西双线 + 凤石东双线) 接纳能力, 凤凰主变压器接纳能力, 凤乌线接纳能力。

博州地区接纳能力 = MIN 博州地区主变压器接纳能力, 博州地区联络线接纳能力。博州地区主变压器接纳能力 = SUM 博州地区集中并网风电接纳能力 + 博州地区分散接入风电并网容量。博州地区集中接入风电接纳能力 = 口岸变电站接纳能力。口岸变电站接纳能力 = MIN(口岸变电站主变压器容量 + 口岸变电站下网负荷), 口岸变电站风电并网容量。

博州地区分散式风电并网容量 = 0

博州地区联络线接纳能力 = MIN(岸博线 + 岸皇线) 接纳能力, (岸博线 + 岸皇线) 接纳能力, (岸炮线 + 奎皇线) 接纳能力。(岸博线 + 岸皇线) 接纳能力 = (岸博线 + 岸皇线) 极限 + 口岸变电站下网。(岸炮线 + 奎皇线) 接纳能力 = (岸炮线 + 奎皇线) 极限 + 博乐变电站下网 + 口岸变电站下网。(岸炮线 + 奎皇线) 接纳能力 = (岸炮线 + 奎皇线) 极限 + 博乐变电站下网 + 口岸变电站下网 + 口岸变电站下网 - (吉林台 + 吉林台二级) 可调出力。

其余计算同理。

基于新疆电网网架结构和潮流分布进行的风电接纳能力评估, 优点是能够量化评估全网及各地区可接纳风电出力的最大能力。缺点是在应用中存在对系统运行方式变化的自适应能力较差的问题, 即在系统运行方式发生变化时, 需要及时调整计算公式, 否则计算结果与实际偏差较大。

为弥补当前算法存在的不足, 提出应用基于直流潮流的区域电网风电接纳能力算法, 与基于调峰约束、网架约束的全网风电接纳能力算法协同考虑, 对全网风电在线接纳能力进行准确评估。自 D5000 基础平台同步提取网络拓扑和常规机组最小技术出力、爬坡能力、启停状态及当前时刻实际出力等数据、综合考虑变电站母线负荷预测、相关联络线(断面) 极限、正负旋转备用约束以及风电场开机容量、风功率预测、接纳系数, 通过直流潮流计算, 分析系统负荷分布、风电场及常规电源的分布及其对全网风电上网功率的影响, 评估全网及地区实际风电接

纳能力; 在风电受限情况下, 能通过优化潮流实现该地区风电总体上网功率最大的目标。

目标函数: 考虑多时段地区接纳风电最大, 如式(1)所示。

$$\text{Max} \sum_{i \in N_w} \sum_{t \in T} \rho_i \times W_i^t \quad (1)$$

式中 ρ_i 为风电场 i 的接纳系数; W_i^t 为风电场 i 在第 t 时刻允许接纳的风电。

约束条件:

1) 电力平衡约束

$$\sum_{i \in N_g} P_i^t = \sum_{i \in N_l} L_i^t + \sum_{i \in N_w} W_i^t \quad t \in T \quad (2)$$

式中 P_i^t 为常规机组 i 在第 t 时刻的出力计划; L_i^t 为负荷 i 在第 t 时刻的预测值。

2) 机组出力约束

$$\begin{cases} P_i^{\min} \leq P_i^t \leq P_i^{\max} & i \in N_g, t \in T \\ 0 \leq W_i^t \leq W_i^{\text{Pre}} & i \in N_w, t \in T \end{cases} \quad (3)$$

其中 $P_i^{\min}$ 和 $P_i^{\max}$ 分别为常规机组 i 的最小出力与最大出力; W_i^{Pre} 为风电场 i 在 t 时刻的预测值。

3) 机组爬坡率约束

$$-r_i^d \leq P_i^t - P_i^{t-1} \leq r_i^u \quad i \in N_g, t \in T \quad (4)$$

其中 r_i^d 和 r_i^u 分别为常规机组 i 的正负爬坡约束。

4) 上旋转备用约束

$$10\% \times \sum_{i \in N_g} L_i^t > \sum_{i \in N_g} (P_i^{\max} - P_i^{\min}) > 5\% \times \sum_{i \in N_g} L_i^t \quad t \in T \quad (5)$$

5) 下旋转备用约束

$$\sum_{i \in N_g} (P_i^t - P_i^{\min}) > 3\% \times \sum_{i \in N_l} L_i^t \quad t \in T \quad (6)$$

6) 线路直流潮流约束

$$|M \times P_x^t| < \text{Line}_{\lim} \quad t \in T \quad (7)$$

其中 M 为线路直流潮流矩阵, 由线路的连接拓扑和线路参数计算获得; P_x^t 为节点功率输出矩阵, 由每个节点上的常规机组出力、风电和负荷值计算获得; $\text{Line}_{\lim}$ 为线路极限矩阵, 代表的是每条线路的最大允许潮流值。

2.2 风电发电计划编制和实时调整

将风电发电计划纳入全网日前电力电量平衡和日内计划滚动调整, 如图 2 所示。

根据全网负荷预测、开机计划以及风电发电预测结果, 考虑调峰约束、判断全网风电发电预测结果是否能够全部纳入全网平衡, 并按照新能源电站并网运行特性评价排序进行电站接纳能力的分配, 形成考虑全网调峰约束的风电发电计划。

基于 D5000 平台同步获取网络拓扑、日前计划

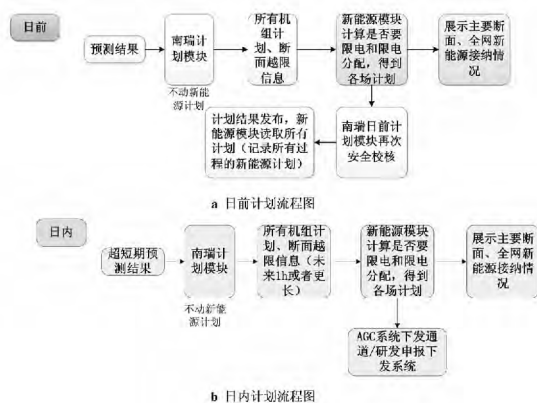


图 2 风电调度计划流程图

安全校核结果等相关信息,根据地区负荷预测、区域内开机计划、区域内各风电场功率预测结果、区域内重要断面及外送断面热稳极限等,考虑网架、机组出力等约束,以区域内风电发电整体接纳能力最大为目标,运用直流潮流算法计算风电接纳空间,如无法实现全额消纳,根据新能源电站并网性能评价排序结果完成限电功率的优化分配,消除越限线路、断面,生成综合考虑全网调峰约束和网架约束的风电发电计划。

在日内实时调度时,风电接纳能力评估系统每 15 min 滚动分析电网 4 h 之内风电接纳能力及断面越限情况,对风电场发电计划进行必要的调整,以消除由风电出力过大引起的风险。日内风电计划直接发送至平台 AGC 模块下发风电场执行。同时为调度员提供人工设置控制风电功能。

2.3 风电理论功率计算

风电理论功率的计算是风电根据国家电网公司《风电受阻电量计算办法》、原国家电监办《风电弃风电量统计办法》要求,采用样板机法、测风数据外推法计算风电受阻时段的理论功率,从而为风电规划、调度运行提供准确的基础数据^[7-8]。要准确计算统计周期内风电理论电量,必须要实现弃风时段的准确统计。一般采用调度员手动记录或风电场定时上报的方法,对于如何自动准确计算风电受阻时段,此前并无切实可行的解决方案。

结合新疆电网已实现全网风电有功自动发电控制功能(AGC)的现状,提出采用风电场 AGC 目标曲线与实际功率曲线对比分析法,通过自动计算各采样点风电场实际功率曲线与省调下发 AGC 目标曲线的偏差来判定该时刻是否处于限电时段,即两者数值吻合度高偏差接近 0 的点为限电时段,两者数值吻合度低偏差绝对值较大的点为非限电时段。此法程序设计较易实现,能够自动准确统计各风电场发电出力受阻时段,使风电理论功率的计算误差最

小化。如图 3 所示为某风电场功率曲线。

2.4 风电优先调度评价

依据国家电网公司《风电优先调度工作规范》的要求,综合评价风电优先调度工作。基于智能电网调度技术支持系统,分别对风电功率预测、新能源调度计划、常规电源调度计划、风电理论功率、弃风情况及实时调度数据进行分析,综合各方面评价结果形成对各环节风电优先调度工作评价。通过分析评价结果,查找各环节风电优先调度工作存在的问题,以便于有针对性整改,不断促进风电最大化消纳。

通过面积堆积图,检查火电机组调峰力度和开机备用容量。根据火电机组开机容量及技术参数,计算当前全网火电机组最小技术出力,并与火电实际出力进行对比,检查限电时段火电机组是否达到最小技术出力。根据限电时段火电机组开机容量与负荷情况,检查系统备用容量是否满足相关要求。图 4 为某天全网电源出力曲线。

3 所提方案具备的优点

所提方案实现了全网及地区风电在线接纳能力评估量化计算。

在此前提下,所提方案实现了新疆电网对风电接纳从风电功率预测、风电接纳能力评估、风电日前发电计划、风电日内实时调整到在线风电场有功出力控制的闭环。即以短期风电功率预测为基础,以优先接纳风电为目标,将风电纳入电网调度计划编制流程,对日前常规机组组合方式和机组发电计划进行优化,实现风电、火电联合优化调度,减少了常规机组备用容量;通过超短期风功率预测、超短期负荷预测等,实现日前计划的再调整,通过滚动调整常规机组发电计划,实时控制部分常规机组出力,调整风电场发电曲线或在线控制风电场发电出力,使风电控制由日前计划推到日内,最大限度地接纳风电。

所提方案通过采用风电场 AGC 目标曲线与实际功率曲线对比分析法,有效解决了风电受阻时段自动统计难点问题,对风电理论功率计算、风功率预测准确率计算及风电优先调度评价等工作起到了至关重要的作用。

4 结 论

所提方案以风电优先调度为目标,结合风功率预测及系统、母线负荷预测、机组计划,考虑网架断

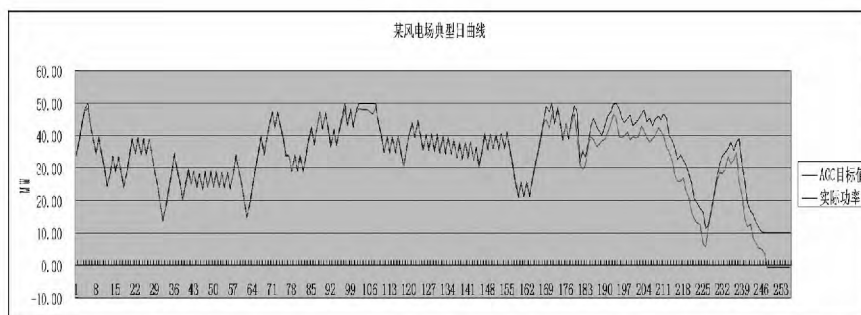


图 3 某风电场功率曲线

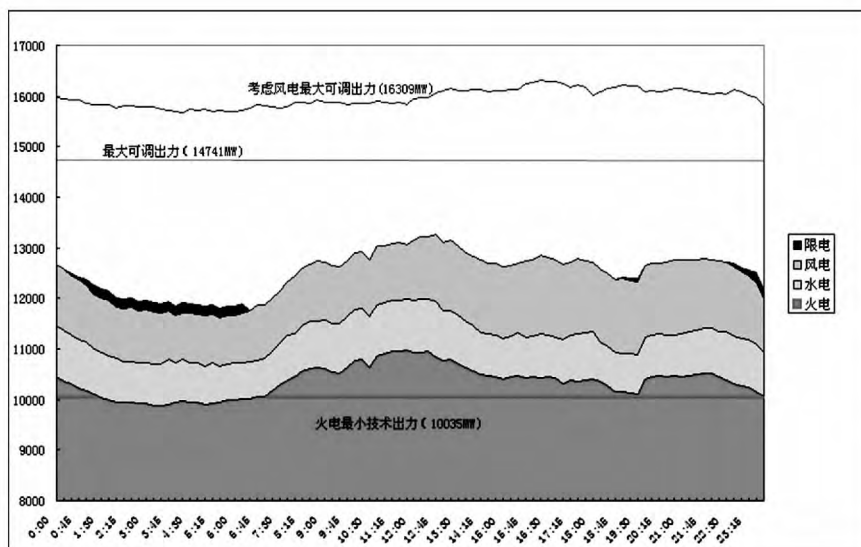


图 4 新疆全网电源出力情况

面约束,计算全网及分地区风电接纳空间;从日前调度计划编制着手,应用风电接纳空间的计算结果,合理安排常规机组计划。根据安全校核结果,调整常规电源出力计划,并通过新能源系统实现对风电发电计划的实时调整,实现了从调度日内滚动计划到风电场有功功率的闭环控制。通过对弃风时段的自动统计,实现了基于样板风机法、测风数据外推法风电理论功率计算,有利于对风电优先调度情况进行后评估,持续提升风电优先消纳工作。所提方案是新疆电力调度控制中心在进行智能电网调度技术支持系统建设过程中,结合新疆电网的实际情况,针对风电优先调度工作的难点问题所采取的解决方案,为风电优先调度工作模式作出了有益探索。

参考文献

- [1] 风电优先调度工作规范,国家电网调(2012)1938号。
- [2] 智能电网调度技术支持系统系列标准,国家电网科(2011)2005号。
- [3] 王乾坤.国内外风电弃风现状及经验分析[J].华东电力,2012(3):378-381。
- [4] 白建华,辛颂旭,贾德香,等.中国风电开发消纳及输

送相关重大问题研究[J].电网与清洁能源,2010,26(1):14-17。

- [5] 刘新东,方科,陈焕远.利用合理弃风提高大规模风电消纳能力的理论研究[J].电力系统保护与控制,2012(6):35-39。
- [6] 张谦,李琥,高松.风电对调峰的影响及其合理利用模式研究[J].南方电网技术,2010(6):18-22。
- [7] 李丰,张粒子,舒隽,等.含风电与储能系统的调峰与经济弃风问题研究[J].华东电力,2012(10):1695-1700。
- [8] 吕朝阳,张丹庆,李怀玉.我国风电大规模外送协同运行方式研究[J].水电能源科学,2012(9):202-205。

作者简介:

肖桂莲(1974),大学本科,高级工程师,从事新能源调度及运行管理工作;

宋明曙(1984),硕士研究生,工程师,从事电力系统调度运行及分析工作;

郭小龙(1983),硕士研究生,工程师,从事电力系统调度运行及分析工作;

张彦军(1980),硕士研究生,工程师,从事自动化系统建设工作。

(收稿日期:2014-03-20)

不平衡牵引负荷对电网容量占有的探讨

仇龙刚 张永岚 安娜 刘浩 崔中一 刘洋
(西南交通大学电气工程学院 四川 成都 610031)

摘要: 电气化铁道牵引负荷是典型的不平衡负荷,其负荷状况成为电网公司和铁路部门多年关注的热点问题,理论计算了在线几种典型的牵引变压器的输出容量,探讨了其各自对电网的占有容量,理论分析了三相不平衡负荷的功率因数定义及提高功率因数的方法,结合变电所实测数据,经对比分析,提出了抑制电压不平衡度的方法,最后从供电部门角度,探讨了牵引变电所容量电费计费方式。

关键词: 牵引变压器; 输出容量; 占有容量; 容量利用率; 功率因数; 容量电费

Abstract: Electrified railway traction load is a typical unbalanced load, and its load status has become a hot issue concerned by the grid companies and the railway sector for many years. The output capacity of several typical traction transformers is calculated theoretically, and their capacity occupation in power grid is discussed. The definition of power factor of three-phase unbalanced load is analyzed theoretically and the method to improve the power factor is given. Then combined with the measured data in traction substation, the method of reducing voltage unbalanced degree is proposed by the comparison and analysis. Finally, the calculation methods of capacity tariff in traction substation are discussed as viewed from the power supply departments.

Key words: traction transformer; output capacity; capacity occupation; capacity utilization; power factor; basic capacity charge

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0029-05

作为大宗电力用户的电气化铁道牵引负荷,由于其波动性、随机性、近远期负荷相差大、负载率低、供电可靠性要求高以及负序、谐波等一系列不良特征^[3],被公认为是一种典型的不平衡负荷。牵引变压器联结方式的多样性使其对电网的影响具备特殊性,文献[4]和[5]用实测数据充分考虑变压器的过载能力对牵引变压器的合理选择进行了分析;文献[6]通过建模仿真分析了牵引变压器在电铁牵引供电系统中对公用系统所造成的影响;文献[7]介绍了几种电价收费方式;文献[8]针对客运专线仅提出了基本电费交纳方案。下面则针对其对电网容量占有问题进行探讨,并理论分析了不平衡负荷功率因数的定义,最后对供电部门关注的电铁电价收费方式问题给予几方面的建议。

1 不同接线牵引变压器容量分析

变压器的额定容量是指其一次侧从电网所吸取的视在功率,是指输入容量;输出容量是指变压器二

次侧输出的视在功率。对一般的变压器来说,其输入容量和输出容量基本相等,结构容量与额定容量相等,但对于牵引变压器则要特殊对待。牵引变压器的容量利用率是指牵引变压器的最大输出容量与其额定容量之比。

1.1 单相接线牵引变压器

纯单相接线牵引变压器高压绕组接三相电源的某两相,电压为 110 kV 或 220 kV,低压绕组的首端接至牵引母线上,末端与钢轨、地连接,输出电压 27.5 kV,接牵引母线的一端,同时给左右两侧的供电臂供电,其电路原理图如图 1 所示。

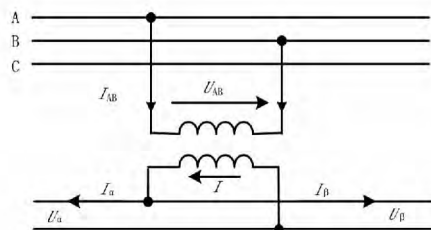


图 1 单相接线变压器

当工作绕组达到额定负荷 U_N 、 I_N 时,单相接线

变压器的输出容量为

$$S_1 = U_N I_N \quad (1)$$

依据视在功率法,其对电网的占有容量为

$$S_S = S_a + S_b + S_c = U_N I_N = S_1 \quad (2)$$

则其容量利用率为

$$K = \frac{\text{额定输出容量}}{\text{额定容量}} \times 100\% = 100\% \quad (3)$$

在三相电力系统中产生的负序电流最大,不对称度为 100%,但由于主接线简单、设备少、占地面积小、投资省等优点,在电力网比较发达的地区仍然得到利用^[1]。

1.2 单相 V/v 接线牵引变压器

V/v 接线牵引变压器原边接入电力系统的两个线电压(如 AB、BC),次边各有一端分别接到牵引侧的两相母线上,公共端子与轨道及接地网连接。由于对地电压相位不同,中间必须用分相绝缘器断开。其电路原理图如图 2 所示。

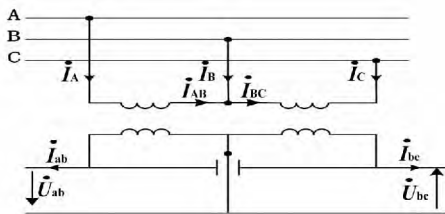


图 2 单相 V/v 接线变压器

当 I_{ab} 、 I_{bc} 达到额定值 I_e 时,即 $I_{ab} = I_{bc} = I_e$,则额定输出容量: $S_1 = I_{ab} U_e + I_{bc} U_e = 2 U_e I_e$ (4)

对电网的占有容量为: $S_S = 2 U_e I_e$,所以 $K = 100\%$ 。因次边绕组电流等于供电臂电流,因而变压器的容量能得到充分利用。在两臂负荷相同情况下,不对称度为 50%。和纯单相接线比,对系统的负序影响减少,设备相对较少但需跨相供电。

1.3 Scott 接线牵引变压器

Scott 接线牵引变压器由两台单相变压器构成。变压器的原边绕组联成倒 T 形接入三相电力系统,副边绕组联成相位差为 90° 的 V 形,公共端接地和钢轨,两个开口端分别接入接触网相邻的两区段,相邻两接触网对地电压相位不同,故必须用分相绝缘器断开。其电路原理图如图 3 所示。

原边电流: $I_A + I_B + I_C = 0$ 。若副边两相牵引负荷电流相等时,且 M、T 两供电臂功率因数相等时,以 I_β 为参考相量列磁势平衡方程为

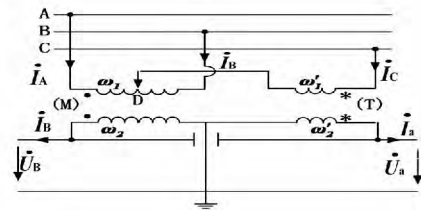


图 3 Scott 连接变压器

$$\begin{cases} \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \\ \omega'_1 \dot{I}_C = \omega'_2 \dot{I}_a \\ \frac{\omega_1}{2} \dot{I}_A - \frac{\omega_1}{2} \dot{I}_\beta = \omega_2 \dot{I}_\beta \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{解方程得: } \begin{pmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3} K_T} \begin{pmatrix} -1 & \sqrt{3} \\ -1 & \sqrt{3} \\ 2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_\beta \end{pmatrix} \quad (6)$$

达到额定输出时 $I_\alpha = I_\beta = I_e$ 此时,

$$I_A = I_B = I_C = \frac{2}{\sqrt{3} K_M} I_e \quad (7)$$

其中 $K_M = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ $K_T = \frac{\omega'_1}{\omega'_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} K_M$ 。

则变压器额定输出容量为

$$S_1 = U I_\alpha + U I_\beta = 2 U I_e \quad (8)$$

对电网的占有容量计算如下。

$$\begin{aligned} S_S &= U_{CD} I_C + U_{AD} I_A + U_{BD} I_B \\ &= U_{CD} I_C + \frac{1}{2} U_{AB} I_A + \frac{1}{2} U_{AB} I_B \\ &= (U_{CD} + U_{AB}) \frac{2 I_e}{\sqrt{3} K_M} = \frac{2 I_e}{\sqrt{3} K_M} U_{AB} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + 1 \right) \\ &= \frac{2 I_e}{\sqrt{3} K_M} U_{\alpha K_M} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + 1 \right) = \left(1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \right) U I_e \end{aligned} \quad (9)$$

则其容量利用率为

$$K = \frac{S_1}{S_S} \times 100\% = 92.8\% \quad (10)$$

所以,当 M 座和 T 座两供电臂负荷电流大小相等,功率因素也相等时,变压器容量可全部利用,对接触网也可实现两边供电,但其造价高,主接线复杂,对绝缘水平要求高。

1.4 YNd11 接线牵引变压器

高压侧绕组为 YN,三个端子(A)、(B)、(C)接电力系统的 A、B、C 三相(或 ACB、BCA...),中性点通过隔离开关 QS 接地。中性点何时接地由电力调度决定,通常是断开的。次边绕组接成 Δ , (c) 端子接钢轨和地。(a)、(b) 端子分别接牵引母线^[2]。其

电路原理图如图 4 所示。

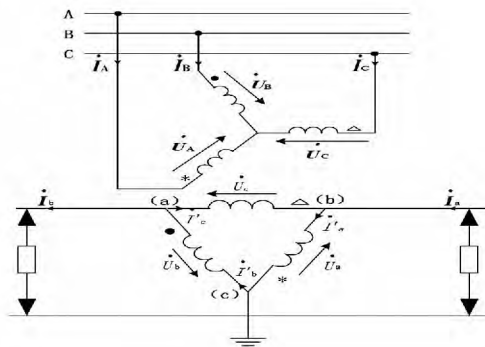


图 4 YNd11 接线变压器

设额定输出电压为 U_e ，两供电臂额定电流为

$$I_a = I_b = I_c, \begin{pmatrix} \dot{I}'_a \\ \dot{I}'_b \\ \dot{I}'_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3/2 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 \\ -1/3 & -1/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{pmatrix} \quad (11)$$

在两臂负荷相等的情况下，以 $\dot{I}_a$ 为基准相量， $\dot{I}_a = I \angle 0^\circ$ ， $\dot{I}_b = I \angle -120^\circ$ 。两接地相绕组（臂绕组）的电流大小相等为

$$I'_a = I'_b = \frac{2.65}{3} I \quad (12)$$

非接地相绕组（自由相绕组）的电流较小为

$$I'_c = \frac{1}{3} I = \frac{1}{2.65} I'_a \quad (13)$$

因 $I_{ep} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{el}$ 则

$$\begin{aligned} I_a = I_b = I_c &= \frac{3}{2.65} I_{ep} \\ &= \frac{3}{2.65} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} I_{el} = 0.655 I_{el} \end{aligned} \quad (14)$$

三相变压器的额定容量，即占有的电网容量为

$S_s = \sqrt{3} U_e I_{el}$ ，额定输出容量为

$$\begin{aligned} S_1 &= U_e I_a + U_e I_b = 2 U_e I_e \\ &= 2 U_e \times 0.655 I_{el} = 1.134 U_e I_{el} \end{aligned} \quad (15)$$

$$K = \frac{S_1}{S_s} \times 100\% = \frac{1.134 U_e I_{el}}{\sqrt{3} U_e I_{el}} \times 100\% = 75.6\%$$

(16)

因该变压器原边采用 YN 接线，中性点引出接地方式与高压电网相适应，且其制造相对简单，价格相对便宜，运用技术成熟，但其容量不能充分利用，输出容量只能达到其额定容量的 75.6%，引入温度系数后，也只能达到 84%。和单相接线牵引变电所相比，主接线比较复杂，设备多，占地面积大，工程投

资大。

以上分析的各牵引变压器的容量利用率是理想状态下的理论计算值，实际的牵引变压器利用率非常低，据统计全线牵引变压器的容量利用率低至 15%~20%^[3]，因为选择变压器容量既要满足正常运输，又要满足两小时紧密运行的需要，同时还要考虑远期运量的增长，再加上牵引负荷的一系列不良特征，很难保证使其工作在额定负载。另一方面，中国整流型电力机车的功率因数一般为 0.8~0.85，由于牵引网阻抗及牵引变压器阻抗的影响，功率因数平均值在 0.75 左右，再生工况下会低至 0.2~0.4。

2 不平衡三相负荷的功率因数

2.1 不平衡三相负荷功率因数的定义

其实无论负荷是几相的，也无论其是否对称，定义公式即：功率因数 = (三相有功功率之和) / (三相视在功率之和) 是不变的，而视在功率的计算方法有两种，一种是算术视在功率，另一种是向量视在功率，对于三相不平衡负荷有

$$P_{\text{总}} = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c \quad (17)$$

$$S_{\text{总}} = \sqrt{(P_a + P_b + P_c)^2 + (Q_a + Q_b + Q_c)^2} \quad (18)$$

采用算术视在功率计算方法，其功率因数可定义为

$$\cos \varphi = \frac{P_a + P_b + P_c}{S_a + S_b + S_c} \quad (19)$$

采用向量视在功率计算方法，其功率因数可定义为

$$\cos \varphi = \frac{P_a + P_b + P_c}{\sqrt{(P_a + P_b + P_c)^2 + (Q_a + Q_b + Q_c)^2}} \quad (20)$$

2.2 提高功率因数的方法

功率因数低不仅会导致牵引变压器的容量不能充分利用，而且在视在功率不变的情况下致使输送的有功功率降低，或者系统容量得不到充分利用，接触网上的能量损耗和电压损耗也会增大。从根本上有以下两种提高功率因数的方法。

(1) 提高用电自然功率因数。可提高电力机车的功率因数，改善牵引网的阻抗特性（包括减小牵引网单位阻抗值和阻抗角、限制供电臂的长度等），合理选择牵引变压器容量，提高其容量利用率。

(2) 在牵引变电所牵引侧装设并联电容补偿装置。它同时还可以减小电压损失，改善电压质量，提高牵引侧母线电压，降低系统供电电流及电能损失；

并补装置还可吸收谐波电流,具有滤波作用。电气工程学院的分组分级可调并联电容补偿技术^[9]对于提高功率因数就直接有效。

3 牵引变压器三相电压不平衡度实例分析

牵引负荷产生的负序电流流过电网阻抗将产生负序电压,引起三相电压不平衡,国标给出了电压不平衡度的近似计算值,并规定电力系统公共连接点处的电压不平衡度 ε_U 的 95% 概率不得超过 2%,短时值不得超过 4%。

$$\varepsilon_U = \frac{\sqrt{3}U_N I^{(-)}}{10S_d} \% \quad (21)$$

式中 U_N 为线电压; S_d 为短路容量。

当牵引变压器负荷与变压器接线方式一定时,变电所高压三相侧电压不平衡度与进线短路容量成反比,与负序功率成正比。

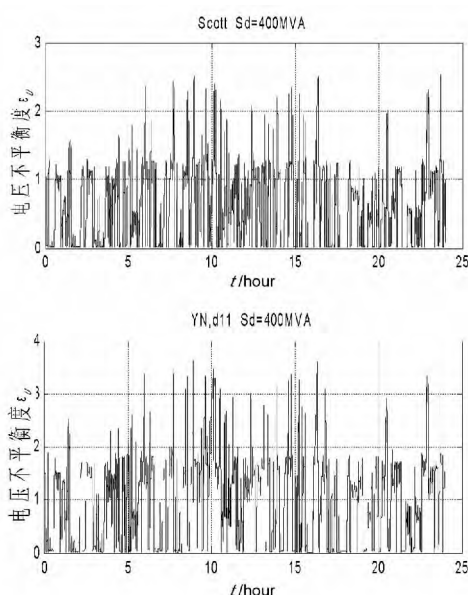


图 5 两类牵引变压器三相电压不平衡度趋势图

以某牵引变电所为例,变压器为 YNd11 接线,测得该变电所两臂负荷的基波电流全天 24 h 的数据(3 s 为一个采样间隔,共 28 800 个点),使用 Matlab 软件的计算功能,可得使用 YNd11 和 Scott 接线变压器相应的三相电压不平衡度曲线如图 5 所示。此时系统进线为 110 kV,短路容量约为 400 MVA,显然使用平衡变压器和常规变压器相比有较好的抑制负序能力,三相电压不平衡度基本达到国标要求。

选用更高电压等级的电力系统时,根据实测数据

计算,图 6 给出 YNd11 常规变压器在 220 kV 进线时(短路容量假定为 750 MVA)三相电压不平衡度的曲线图,不难看出,电压不平衡度得到明显改善。

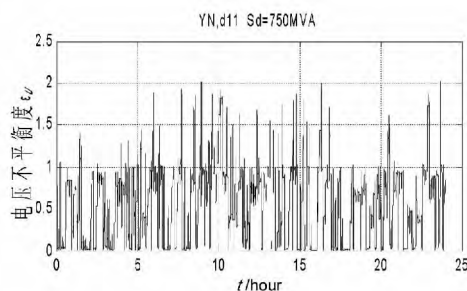


图 6 YNd11 接线变压器三相电压不平衡度趋势图(220 kV)

4 牵引变电所容量电费计费方式

众所周知,中国供电部门对大工业企业(用电变压器容量 315 kVA 及以上)用电实行两部制电价制度,自 1994 年开始中国电气化铁路就开始执行两部制电价。基本电价是按照工业企业的变压器容量或最大需用量(即一月中每 15 min 或 30 min 平均负荷的最大值)作为计算电价的依据,由供电部门与用电部门签订合同,确定限额,每月固定收取,不以实际耗电数量为转移;电度电价,是按用电部门实际耗电度数计算的电价^[10]。由于电气化铁路自身特殊的供电结构造成电力系统侧三相电压严重不平衡,同时,也给系统注入了谐波负序等问题,严重影响了电网正常运行,对电网中其他用户的供电电能质量产生了不良的影响。因此单纯地按照变压器的额定容量计算是不合理的。

(1) 采用容量缴纳基本电费对供电部门来说,比较容易操作。若按固定容量收取基本电费,经前面的容量分析可知,铁路部门一般会考虑使用容量利用率最高的单相或 V/v 变压器,但负序电流大,不平衡度高。所以电网公司应制定允许电铁投运的技术标准,要求变压器一次侧三相电压、电流不平衡度必须达到标准,否则予以经济处罚。

(2) 牵引变压器容量利用率可以作为衡量收费等级的一个标准,即可以根据变电所的日负荷曲线划分,申请不同的用电负荷下采取不同的电价,当天变电所变压器利用率达到标准的,可以免收惩罚性费用,否则额外收取一部分惩罚性费用。

(3) 铁路部门选择合适的基本电费交纳方式重点在于找到安装容量和最大需量法的平衡点,而确定该

平衡点的重点在于牵引变压器的安装容量^[4]。如果按照最大需量收取基本电费,铁路部门会把最大需量报低以节约基本电费。所以电网公司要将实际负荷中超出最大需量部分予以高倍罚款来遏止这一现象。

(4) 无功计量可采用反送正计,谐波功率也纳入计费范围。因此其基本电价应该在按照牵引变压器容量或者最大负荷需量的基础上再加上一定的罚款,以此来督促铁路部门对电铁的谐波、无功进行治理。

(5) 电力部门必须在电铁投运前作出充分的实地调研,包括电能质量、继电保护及自动装置、电能计量准确性、系统无功补偿等,将电铁产生的危害降到最小,并对已投运电铁进行实测,对不满足要求的,尽快提出整改意见。

(6) 供电部门可以根据铁路部门月用电量或年用电量寻求电价计费方式^[2]新方案,制订合理的方案供铁路部门选择,这样在督促用电客户提高用电设备或最大负荷的利用率的基础上,对牵引变压器电网容量占有进行合理的收费。

5 结 论

综上所述,综合评价技术经济性,单相接线最好,其次是 V/v 和平衡接线,YNdll 接线最差。由第 3 节实测数据分析可知,在两条供电臂负荷的随机分布下,不同接线牵引变压器的负序电流恒有以下结果:平衡接线最小,三相接线次之,单相接线最大。铁路部门只有根据实际情况合理选择变电所接入的系统电压等级和选用合适的牵引变压器才能够起到改善变电所系统三相电压不平衡的作用,采取措施提高容量利用率及系统功率因数,减小负序电流及

高次谐波的干扰,在保证正常供电和达到电能质量标准的基础上,尽量减少变压器容量才是降低容量电费问题的根本方法,供电公司要根据实际牵引变电所接线方式和负荷状况制定合理的技术标准,并采取惩罚措施来规范和督促铁路部门对不平衡牵引负荷的治理。

参考文献

- [1] 谭秀炳. 交流电气化铁道牵引供电系统(第三版) [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2009.
- [2] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.
- [3] 贺建闽, 李群湛. 面向电力市场的电气化铁道 [J]. 电气化铁道, 1997(4): 1-3.
- [4] 贺建闽, 黄治清. 牵引变压器容量的合理选择 [J]. 电气化铁道, 2005(6): 1-5.
- [5] 曹建设, 杲秀芳. 牵引变压器的过负荷能力及容量的合理选择 [J]. 电气化铁道, 2008(1): 10-13.
- [6] 王金浩, 薛磊, 李蒙赞, 等. 不同牵引变压器接线方式的应用研究 [J]. 现代电力, 2009, 26(1): 33-39.
- [7] 兰青, 李群湛, 米天翔, 等. 电气化铁道电价收费方式的探讨 [J]. 铁道运输与经济, 2007(2): 35-37.
- [8] 吕文利. 高速客运专线基本电费缴纳方式的探讨 [J]. 铁道建筑技术, 2011(5): 50-52.
- [9] 贺建闽, 李群湛. 牵引变电所功率因数及其补偿措施研究 [J]. 铁道学报, 1997(6): 116-120.
- [10] 陈清瑞. 两部制电价制度与改进策略 [J]. 粤港澳市场价格与管理, 2008(9): 7-8.

作者简介:

仇龙刚(1988), 硕士研究生, 研究方向为牵引电力系统、电能质量、直流牵引供电系统等。

(收稿日期: 2014-03-20)

(上接第 9 页)

参考文献

- [1] 徐岩, 林旭涛, 赵亮, 等. 大型风电场对工频故障分量距离保护影响的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013(10): 118-125.
- [2] 张保会, 张金华, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电场送出线路距离保护影响分析 [J]. 电力自动化设备, 2013(6): 1-6.
- [3] 余昆, 曹一家, 陈星莺, 等. 含分布式电源的地区电网动态概率潮流计算 [J]. 中国电机工程学报, 2011(10): 118-125.
- [4] 陈培育, 郭小燕. 风电场风速平稳性及其平稳化处理

研究 [J]. 河南科技, 2013(16): 153-154.

- [5] Urmila M. Diwekar. A Novel Sampling Approach to Combinatorial Optimization Under Uncertainty [J]. Computational Optimization and Applications, 2012(20): 102-103.

作者简介:

王银萍(1987), 硕士研究生, 研究方向为风机控制与电力系统继电保护;

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

张新燕(1964), 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统控制;

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

(收稿日期: 2014-03-10)

TSC + STATCOM 的混合无功补偿装置 协调控制策略研究

张翔,王奔,冯阳,马明智

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:提出一种由 TSC 和 STATCOM 构成的混合无功补偿装置,兼具 TSC 大容量、低成本和 STATCOM 准确无功补偿的优点。采用分层控制结构,利用专家系统来推理协调二者运行。对 TSC 频繁投切的情况,为避免电容器组投入时的涌流,TSC 采用预充电技术,并于电网电压峰值时刻投入。考虑到 STATCOM 的数学模型为一强耦合、非线性系统,采用逆系统方法对其进行线性化解耦,再用变结构理论进行设计。仿真结果表明,在采用所提控制策略下,该混合无功补偿装置具有良好的补偿效果。

关键词:无功补偿;混合无功补偿装置;专家系统;逆系统;变结构控制

Abstract: A hybrid var compensator which consists of thyristor switched capacitor (TSC) and static synchronous compensator (STATCOM) is proposed. It has the advantages of TSC and STATCOM and can realize low cost, large capacity and accurate reactive compensation. The hierarchical control structure is adopted and the coordinated control of TSC and STATCOM is realized by expert system. In order to avoid inrush current, the pre-charge technology is applied to TSC and the capacitor is put into operation in the system voltage peak. Considering the fact that the mathematical model of STATCOM is a nonlinear coupling system, the inverse system approach is adopted to carry out the decoupling linearization of the original system. Then the variable-structure control is used for its design. The simulation results indicate that the hybrid var compensator has a perfect compensation performance based on the proposed control strategy.

Key words: reactive compensation; hybrid var compensator; expert system; inverse system; variable-structure control

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0034-05

电力系统中,大量无功的远距离传输造成电网损耗增加、各节点电压降低,严重影响电能质量^[1-2]。近年来,随着负荷容量的不断增加,电网对无功的需求越来越大,无功功率的补偿就显得尤为重要。目前,无功补偿装置种类繁多,主要有固定电容器(fixed compensator,FC)、并联饱和电抗器(saturating reactor,SR)、晶闸管控制电抗器(thyristor controlled reactor,TCR)和晶闸管投切电容器(thyristor switched capacitor,TSC)等。而得益于电力电子技术的发展,静止同步无功补偿器(static synchronous compensator,STATCOM)也受到了广泛的关注^[3-4]。

目前,TSC作为一种成本较低、控制简单的无功补偿装置已得到广泛应用,但其只能实现无功的分级补偿,难以满足现代电网对无功补偿技术较准确的要求。而 STATCOM 采用 GTO、IGBT 等全控型电力电子器件,能准确、快速地实现无功的补偿,但由于电力电子制造工艺的限制,大容量的 STATCOM

造价昂贵,这限制了其进一步的发展。故研究一种低成本、快速、大容量的无级无功补偿装置显得非常有必要^[5-7]。

针对 TSC 和 STATCOM 各自的优缺点,提出一种由 TSC 与 STATCOM 构成的混合无功补偿装置,兼具 TSC 低成本、大容量和 STATCOM 准确补偿的优点。TSC 为离散子系统,STATCOM 为连续子系统,所以混合无功补偿装置是由离散子系统和连续子系统构成的混杂系统,其控制是该无功补偿装置的重点。为实现离散子系统 TSC 和连续子系统 STATCOM 的协调控制,在分析其工作原理的基础上,采用分层控制结构。其中,TSC 与传统机械开关投切电容器(mechanical switching capacitor,MSC)不同,采用晶闸管阀代替机械开关,在频繁投切电容器(来不及对电容器残压放电)的情况下,能任意准确控制电网电压值在等于电容器残压时刻投入电容器组,避免了因机械开关动作时间不准确导致电网电压与电容器残压偏差而引起的电容器冲击电流现

IF 语句可确定 P 值, THEN 语句确定 m 与 Q_{ref}^* 。其中 P 为正值时, 表示投入电容器组, 其值大小表示投入组数, 此时 $0 \leq P \leq n - m$; P 为负值时, 表示切除电容器组, 其值大小表示切除组数, 此时 $|P| \leq m$; Q_{ref}^* 为正值时, 表示发出感性无功功率, 其值大小表示补偿容量, 此时 $0 \leq Q_{ref}^* \leq Q_c/2$; Q_{ref}^* 为负值时, 表示吸收感性无功功率, 其值大小表示补偿容量, 此时 $|Q_{ref}^*| \leq Q_c/2$ 。

2.3 TSC 控制器的设计

TSC 控制简单, 但需注意到电容器组投入系统, 且电网电压不等于电容器残压时, 极易引起涌流, 而对于 TSC 频繁投切的场合, 更是严重影响电容器组的使用寿命。由于上次电容器组被切除时, 晶闸管在电容器电路电流过零时关断, 则电容器电压必然为电网电压的峰值。所以, 若电容器组电压初值为电网电压峰值, 并于电网电压峰值时刻投入, 则理论上不存在涌流。故在初次投入时, 采用预充电技术, 将电容器组电压充至电网电压峰值, 控制器接收到决策层的投入信号后不立即投入, 待电网电压到达峰值时再发送投入信号至执行层, 可有效避免涌流。之后, 由于频繁投切加之未设置电容器组的放电电路, 切除后的电容器组残压略小于电网电压峰值, 此时若有投入信号, 则待检测到电网电压值等于电容器组残压值时(在电网电压峰值附近时刻), 投入电容器组。这样, 避免了在频繁投切情况下电容器组投入的涌流问题, 延长了电容器组的使用寿命。

2.4 STATCOM 控制器的设计

2.4.1 STATCOM 的数学模型

由图 1 中 STATCOM 的电路结构, 可得出其在 abc 坐标系下的数学模型^[10], 如式(1)所示。

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = U_a - Ri_a - S_a U_{dc} - U_{NO} \\ L \frac{di_b}{dt} = U_b - Ri_b - S_b U_{dc} - U_{NO} \\ L \frac{di_c}{dt} = U_c - Ri_c - S_c U_{dc} - U_{NO} \end{cases} \quad (1)$$

其中 S_i ($i = a, b, c$) 为开关信号函数; U_{NO} 为直流侧电容器低电位点与系统中性点的电位差, 二者数学表达式如下。

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 相上桥臂导通, 下桥臂关断} \\ 0 & \text{第 } i \text{ 相上桥臂关断, 下桥臂导通} \end{cases} \quad i = a, b, c \quad (2)$$

$$U_{NO} = -\frac{U_{dc}}{3} \sum_{i=a,b,c} S_i \quad (3)$$

为了便于控制器的设计, 将 STATCOM 在 abc 坐标系下的数学模型转换到 dq 坐标系下, 即得

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L} (U_d - RI_d - S_d U_{dc} + L\omega I_q) \\ \frac{dI_q}{dt} = \frac{1}{L} (U_q - RI_q - S_q U_{dc} - L\omega I_d) \\ \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2C} (S_d I_d + S_q I_q) \end{cases} \quad (4)$$

式中, 下标 d, q 表示各物理量在 dq 坐标系下的 d 轴和 q 轴分量。

2.4.2 无功电流的计算

STATCOM 控制器从决策层接收到的是无功功率的期望值, 需通过计算得出 STATCOM 无功电流的期望值。由瞬时无功检测理论知^[11], 当 Park 变换矩阵的初相角与母线电压相角相同时, STATCOM 补偿的无功功率与电流存在如下关系。

$$Q_s = \frac{3}{2} U_d I_q \quad (5)$$

2.4.3 逆系统方法线性化解耦

逆系统方法^[12]是近 20 年发展起来的一种新型反馈线性化理论, 其基本思想是: 通过反馈方法求得被控对象的逆系统, 将逆系统串接于原系统之前, 组成新型复合系统。该新型复合系统是具有线性传递关系的伪线性系统。

选取式(4)的状态变量为 $[x_1 \ x_2 \ x_3] = [I_d \ I_q \ U_{dc}]$, 控制输入量为 $[u_1 \ u_2] = [S_d \ S_q]$, 输出变量为 $[y_1 \ y_2] = [I_d \ I_q]$, 并利用逆系统方法求得逆系统为

$$\begin{cases} u_1 = \frac{1}{x_3} (U_d - Rx_1 - L\dot{x}_1 + L\omega x_2) \\ u_2 = \frac{1}{x_3} (U_q - Rx_2 - L\dot{x}_2 - L\omega x_1) \end{cases} \quad (6)$$

选取 $v_1 = \dot{y}_1$, $v_2 = \dot{y}_2$ 为逆系统的输入变量, 并将式(6)串接于原系统之前, 构成具有线性关系的伪线性系统, 如图 3 所示。

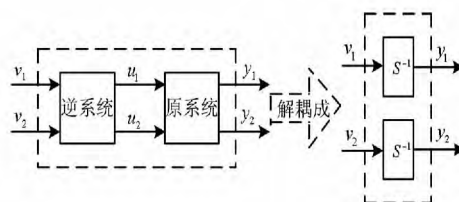


图 3 逆系统方法线性化原理图

这样构造出来的伪线性系统可解耦成两个独立的线性子系统, 表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_1 \\ y_1 = x_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = v_2 \\ y_2 = x_2 \end{cases} \quad (8)$$

根据逆系统的相对阶定义,可求得该系统的相对阶 $1 + 1 = 2 < 3$,所以伪线性系统存在一个隐动态,即式(4)中的第 3 式。该隐动态的稳定即是直流侧电容电压的稳定,采用 PI 控制使其稳定,如图 4 所示。

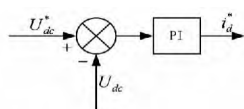


图 4 直流侧 PI 控制图

2.4.4 变结构控制方法设计

现对已进行线性化解耦的伪线性系统进行变结构控制方法设计^[13]。对于线性子系统式(7),要实现 $x_1 \rightarrow x_1^*$,且考虑到子系统中输入与输出为一重积分关系,故选取切换面为

$$S_1 = x_1 - x_1^* \quad (9)$$

综合考虑状态变量收敛速度及抖动现象,取变结构控制的指数趋近率如下。

$$\dot{S}_1 = -\xi_1 \text{sat}(S_1) - kS_1 \quad (10)$$

式中 k 值取较大, ξ 值取较小,可有效提高收敛速度,降低抖动现象。为进一步减小抖动,用饱和函数 $\text{sat}(\cdot)$ 以代替传统变结构控制中的符号函数。

联立式(7)、(9)、(10),得到子系统式(7)的变结构控制率为

$$v_1 = -\xi_1 \text{sat}(x_1 - x_1^*) - k_1(x_1 - x_1^*) \quad (11)$$

同理,得到线性子系统式(8)的变结构控制率为

$$v_2 = -\xi_2 \text{sat}(x_2 - x_2^*) - k_2(x_2 - x_2^*) \quad (12)$$

将式(11)、(12)代入式(6),可得原系统的输入控制量 u_1 、 u_2 为

$$\begin{cases} u_1 = \frac{1}{x_3} (u_d - Rx_1 + L\xi_1 \text{sat}(x_1 - x_1^*) \\ \quad + Lk_1(x_1 - x_1^*) + L\omega x_2) \\ u_2 = \frac{1}{x_3} (u_q - Rx_2 + L\xi_2 \text{sat}(x_2 - x_2^*) \\ \quad + Lk_2(x_2 - x_2^*) - L\omega x_1) \end{cases} \quad (13)$$

求得 u_1 、 u_2 后,经 Park 逆变换和正弦脉宽调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM),得到逆变器的控制信号^[14],从而实现了 STATCOM 无功功率的精确补偿,其控制原理如图 5 所示。

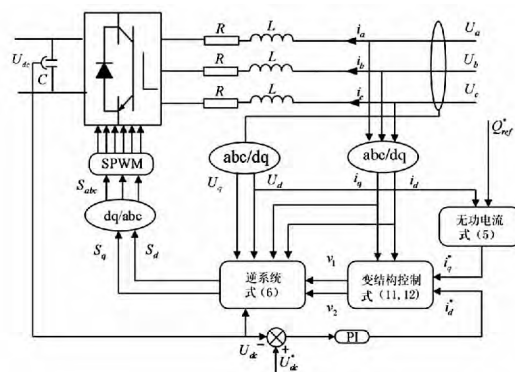


图 5 STATCOM 控制原理图

3 仿真分析

为验证所提装置及其控制策略的有效性,在 Matlab/Simulink 软件中搭建仿真模型。各仿真参数为:系统电压 10 kV,频率 50 Hz,TSC 共有三组,每组容量为 4 Mvar,STATCOM 容量为 2 Mvar,变压器变比为 4,其折算到 STATCOM 侧的电阻为 0.01 Ω 、电感为 2 mH,直流侧电容 7 mF。变结构控制参数 $\xi_1 = \xi_2 = 3$, $k_1 = k_2 = 3000$,直流侧 PI 控制参数 $K_p = 10$, $K_i = 1$ 。

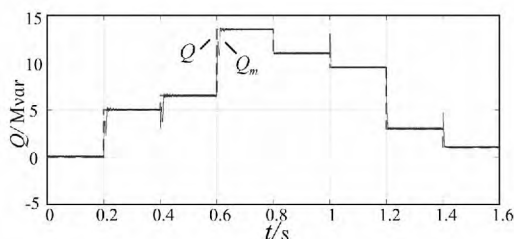


图 6 混合无功补偿装置补偿无功值 Q_m

系统需补偿无功功率如图 6 中的 Q 所示,初始为 0 Mvar,0.2 s 时突变为 5 Mvar,0.4 s 时突变为 6.5 Mvar,0.6 s 时突变为 13.5 Mvar,0.8 s 时突变为 11 Mvar,1 s 时突变为 9.5 Mvar,1.2 s 时突变为 3 Mvar,1.4 s 时突变为 1 Mvar。 Q 值为正表示发出感性无功功率。

根据系统需补偿无功功率值 Q ,经专家系统推理,确定 TSC 投切组数 P 及 STATCOM 无功功率补偿指令值 Q_{ref}^* ,并实时更新已投电容器组数 m ,从图 7(a)、(b)中能看出 m 值始终处于 0 与 3 之间, Q_{ref}^* 的大小始终在 STATCOM 补偿容量之内,均满足设计要求,且如图 6 所示,二者补偿总和 Q_m 恰等于系统所需补偿无功功率 Q ,这说明专家系统设计的正确性。图 7(b)同时表明,基于逆系统的变结构控制方法可使 STATCOM 快速、准确地追踪指令值,说明 STATCOM 控制器的正确性。图 7(c)中,采用预充电技术,并在电压峰值处投入电容器组几乎不会产生

生涌流,说明 TSC 控制器的正确性。

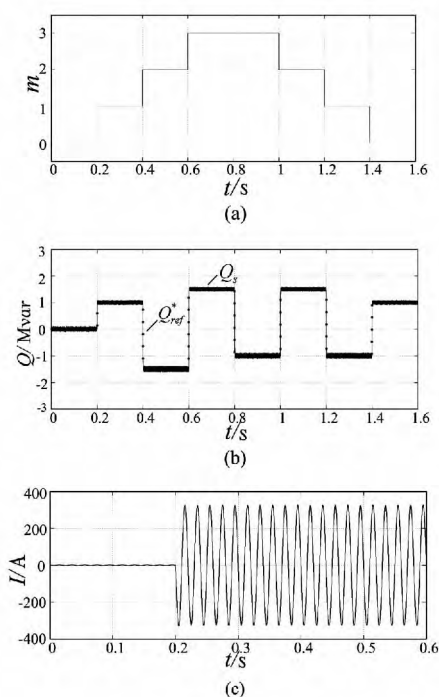


图 7 电容器组投入组数 m 、STATCOM 无功补偿值 Q_s 、电容器组 A 相电流 I

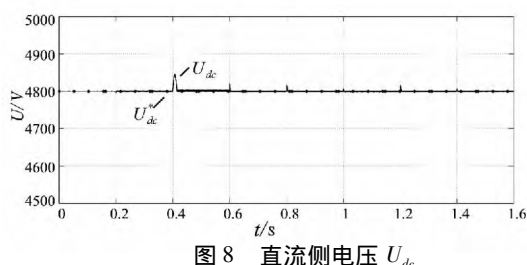


图 8 直流侧电压 U_{dc}

图 8 为逆变器直流侧电容电压期望值 U_{dc}^* 与实际值 U_{dc} 波形。由图 8 可知,装置在进行无功补偿时,逆变器直流侧电容电压 U_{dc} 几乎保持不变,即使发生小波动也快速稳定在期望值,满足设计要求。且图 6 已表明系统需补偿无功功率值 Q 发生变化,混合无功补偿装置能及时作出响应,准确补偿无功功率。这说明所采用的控制策略能使该混合装置具有良好的补偿效果。

5 结 论

所提出的 TSC + STATCOM 混合无功补偿装置能实现低成本、大容量、连续的无功补偿,弥补了 TSC 有级补偿及大容量 STATCOM 成本较高的缺点。采用分层控制结构,利用专家系统推理协调离散子系统 TSC 与连续子系统 STATCOM 二者的运行。同时,TSC 控制器保证了电容器组投入时几乎

不引起涌流,而基于逆系统的变结构控制策略使得 STATCOM 能准确跟踪指令值。仿真结果已表明该混合无功补偿装置具有良好的无功补偿效果。

参考文献

- [1] 蒋建民,冯志勇,刘美仪. 电力网电压无功功率自动控制系统[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2010: 1-11.
- [2] 张勇军,刘瀚林,朱心铭. 地区电网感性无功补偿优化配置方法[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 141-145.
- [3] 单翀,王奔,陈丹,等. 基于滑模控制理论的 STATCOM 无功补偿控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 150-154.
- [4] Nicolas Lechvin, Pierre Sicard, Ziwen Yao. Nonlinear Control of Static Synchronous Compensator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(3): 37-43.
- [5] 彭劲杰,樊晓平,李刚. 新型连续无功补偿装置的设计与仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1): 86-90, 101.
- [6] 周诗嘉,方厚辉,方璐,等. 混合动态无功补偿系统的无功协调控制[J]. 电力电子技术, 2011, 45(10): 92-95.
- [7] 赵伟,罗安,唐杰,等. 静止无功发生器与晶闸管投切电容器协同运行混合无功补偿系统[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 92-98.
- [8] 毕天姝,倪以信,杨奇逊. 人工智能技术在输电网故障诊断中的应用分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 11-16.
- [9] 程武山. 智能控制理论、方法与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 56-96.
- [10] 张崇巍,张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 62-82.
- [11] 李庚银,陈志业,丁巧林,等. $dq0$ 坐标系下广义瞬时无功功率定义及其补偿[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 176-179.
- [12] 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆控制方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 29-52.
- [13] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 328-330.
- [14] 刘向向,李新宇,王奔,等. 变结构控制策略在直驱永磁同步风力发电机中的应用[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 520-525.

作者简介:

张翔(1989),硕士研究生,研究方向为柔性交流输电和电能质量控制;

王奔(1960),教授,研究方向为电力系统非线性变结构控制;

冯阳(1987),硕士研究生,研究方向为电力电子技术应用;

马明智(1987),硕士研究生,研究方向为电能质量控制。

(收稿日期: 2014-01-15)

直流输电系统利用大地回线自动转为金属回线 抑制直流偏磁策略研究

孙 文¹, 禹 佳¹, 滕予非²

(1. 国家电网公司运行分公司宜宾管理处, 四川 宜宾 644000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘 要: 直流系统接地极流过较大电流是导致中性点接地变压器中流过直流电流、引发直流偏磁的主要原因。而直流偏磁的引入不仅对交流变压器产生影响, 同时还会向系统注入谐波, 影响电能质量。分析了直流偏磁产生原因, 以及对电力系统的危害, 同时提出了一种基于换流站操作的直流偏磁抑制策略。利用该策略, 当直流输电系统因保护动作导致单极闭锁时, 自动地由大地回线模式装换为金属回线方式。由此可以极大地减小接地极流过较大电流的实现, 有效抑制直流偏磁。

关键词: 直流输电系统; 直流偏磁; 大地回线运行; 金属回线运行

Abstract: The large current through the grounding electrode of DC system is the main reason for DC magnetic bias which causes DC current running through the neutral grounding transformer. Whereas the introduction of DC magnetic bias can not only affect AC transformers, but also can inject the harmonic wave into the system, which would influence the power quality. The reasons for the generation of DC magnetic bias are analyzed as well as its harms to the power system, and meanwhile a suppression strategy for DC magnetic bias based on the operation of the convertor station is proposed. Using this strategy, when the DC transmission system experiences the unipolar locking due to the protection action, the ground loop mode automatically changes to the metal mode, which greatly reduces the heavy current running through the grounding electrode and suppresses DC magnetic bias effectively.

Key words: HVDC transmission system; DC magnetic bias; ground loop operation; metal loop operation

中图分类号: TM726 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0039-05

0 引 言

随着中国西部大开发和电力能源战略的推进, 集中于四川金沙江、雅砻江流域的多条特高压直流输电工程已逐渐投运^[1-3]。锦苏、复奉、宾金三条特高压直流从四川向华东输送电能达到 2 160 MW, 成为“西电东送”重要的电力通道。

在直流输电工程中, 双极运行方式是最常见的运行方式, 在该运行方式下, 双极电流保持一致, 从而将接地极电流控制在一个较小的范围之内。然而, 如果此时一极因某种原因退出运行, 大量的注入电流则会通过接地极注入大地。在该方式下, 接地极附近的主变压器极有可能因直流电流的注入而产生直流偏磁。该问题已经得到了学者的深入关注。

文献[4]在分析变压器直流偏磁原理的基础

上, 应用 PSCAD 电磁暂态仿真软件分析了直流偏磁对变压器励磁电流的影响。也有学者利用试验的方法对 500 kV 单相变压器空载及模拟带部分负载下的直流偏磁进行研究^[5]。

在直流偏磁抑制策略方面, 有学者对中性点串联电阻/电容法、电流注入法的工作原理、实施方式、性能效果进行了分析^[6]。结果表明, 利用上述 3 种方法均可导致电网直流电流总量下降, 但是交流电网局部的直流偏磁危害却有可能加剧。

首先对直流偏磁的原理进行了分析, 并对现有常见的抑制策略进行了综述。其次, 基于从源头上抑制风险的思路, 提出了一种利用换流站操作抑制直流偏磁的策略。利用该策略, 当直流输电系统因保护动作导致双极闭锁时, 自动地由大地回线模式装换为金属回线方式, 从而起到减小直流接地点的入地电流, 缓解直流偏磁的目的。

1 直流偏磁产生的原因

国内外研究和实际测量发现,地磁暴或直流系统接地极流过较大电流是导致中性点接地变压器中流过直流电流的主要原因。

太阳耀斑和地磁场相互作用产生极光电喷,使地磁场产生暂态波动,当足够严重时,就称为地磁暴。

大地是一个导电的球体,在发生地磁暴时,地磁场的暂态波动使大地的一部分处于这个随时间变化的磁场中,引起感应地表电位(ESP),在土壤电阻率高的地带,地磁暴较严重时,其数值可达 $1.2 \sim 6 \text{ V/km}$ 。从有关资料上看到因地磁暴产生的变压器中性点直流电流最大可达 300 A 。

直流输电系统换流站的接地极附近有直流电位,该电位由注入电流的大小和该处的土壤电阻率决定。当直流系统采用大地返回方式运行时,注入电流就是直流输送电流,而土壤电阻率越高,电位也越高,影响范围也就越广。直流接地极的高电位也作用在交流变电站的接地点上,在中性点接地的变压器中流过直流电流,相当于分流了部分直流输送电流,这是交流变压器中性点直流电流的另一个来源。直流电流在交直流系统中的流向如图1所示。

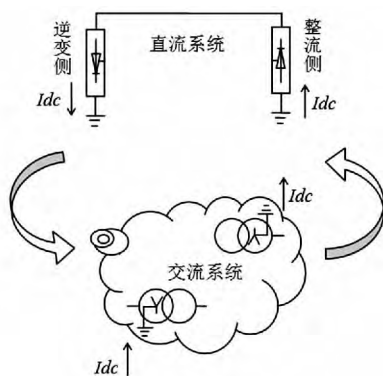


图1 直流电流在交直流系统中流向示意图

单极大地回线运行方式是直流输电系统不同运行方式中的一种。它是利用单根金属导线和大地构成直流侧的单极回路,大地相当于直流输电线路的一根导线,流经它的电流为直流输电工程的运行电流。从理论分析和系统运行情况可知,这种运行方式将在中性点接地变压器上产生直流分量,从而引起变压器发生直流偏磁。

2 直流偏磁对系统的影响

发生直流偏磁时,变压器励磁电流产生的大量谐波,引起变压器的一系列问题。

(1) 无功损耗增大

由于直流偏磁引起变压器饱和,励磁电流大大增加,使变压器消耗无功增加,它或使系统无功补偿装置过载,或使系统电压下降。

(2) 振动、噪声加大

畸变的励磁电流导致变压器铁心的磁致伸缩力增加,加剧铁心的振动,辐射更强的空载噪声;严重的变压器直流偏磁将使变压器工作在半周高度饱和状态下,饱和铁心成为更高磁阻路径,铁心要求更多安培匝数产生相同数量的磁通,为了维持系统正常的正弦电压水平,会产生大量的漏磁通,漏磁与变压器绕组电流作用产生的电动力使绕组振动产生噪声,并使绕组易变形老化。

国外的文献中未见到变压器因直流偏磁引起振动而损坏的实例,据中国的一些变压器制造厂商称,变压器中性点流过直流造成的偏磁的确会引起噪声,但中性点十几安直流尚不至于造成变压器损坏。江苏省对其所属电网的几种变压器的分析结果证实了上述说法。

(3) 变压器损耗增大

谐波中的高频成分在铁心中产生更多的涡流损耗;由于直流的入侵和谐波的集肤效应增加了铜损耗,直流电流越大、谐波频率越高,铜耗越大;增加的漏磁进入箱体各个部件中,增大有功损耗,并使变压器局部过热。发热使设备产生温升,从而恶化设备绝缘条件,缩短设备的寿命。

(4) 影响二次保护

变压器发生直流偏磁时,励磁电流谐波增加,随之变压器各侧的电流和电压谐波均有增加,间接地会影响继电器、自动控制装置的正常工作,影响继电保护装置的正常工作,造成拒动或误动。

3 直流偏磁抑制措施简介

目前国内外抑制流入变压器中性点直流电流的方法有多种,主要是有以下几种。

1) 在变压器中性点装设电阻,可限制直流电流

的大小,但无法全部消除;

2) 在输电线上装设串联电容补偿,阻断直流的通路,但造价较高;

3) 在变压器中性点注入与流入中性点的直流电流大小相等方向相反的电流,可在一定程度上减小直流电流;

4) 在变压器中性点装设电容,彻底阻断直流电流;

5) 采用第 3 根导线替代大地回线;

6) 在直流系统发生单极闭锁后迅速双极闭锁,以防止大量直流电流入地。

2004 年 6 月,中国电力科学研究院开始对抑制直流偏磁问题进行了深入的研究及装置研发。随后清华大学、华东电力试验研究院等单位也相继开展了相关研究。目前在广东、上海、辽宁、江苏、浙江等地区已经采取了相应的治理措施。

广东地区已经装设了 11 台电容型隔直装置,其中 500 kV 变压器装设了 7 台,220 kV 变压器装设了 4 台,还有 1 台正在实施。电容型隔直装置能够彻底消除直流偏磁电流。

上海地区已经装设了 5 台电阻型隔直装置,以 220 kV 变电站居多,能够将直流电流限制在 3 A 以下。

4 大地回线自动转为金属回线治理直流偏磁措施研究

4.1 措施原理

直流输电工程在单极大回线或双极不平衡运行方式下,直流电流依靠大地形成通路回路,如果在接地极周围的土壤电阻率较大则会使周围交流变电站接地网产生不同的直流电位差,进而在中性点接地的变压器中形成直流电流,此直流电流有可能引起变压器的磁路饱和,引起发热、振动以及谐波超标、声响异常等一系列不良后果。通过直流系统采用双极平衡运行方式或单极金属回线运行方式,可以消除由于直流输电工程入地电流引起的直流偏磁现象。

在直流输电工程的运行中,双极运行方式是最常采用的运行方式,但如果此时一极由于某种原因退出运行,则可将健全极及时转为金属回线运行方式,消除直流系统产生的入地电流,从而彻底解决接地极附近变压器的直流偏磁问题。

4.2 措施步骤

直流系统由大地回线转为金属回线需考虑站间通讯正常及异常两种状态。在极 I 因故障而闭锁时,直流系统自动将极 II 由大地回线转为金属回线的步骤如下。

(1) 控制系统自动核实直流系统两端设备具备由大地回线运行转为金属回线运行条件,例如 MRTB 开关在运行状态。

(2) 控制系统核实停运极是否满足转为金属回线运行的条件,如该极是否处于极隔离状态。若不满足条件,则下发转金属回线运行指令后由控制系统自动转为极隔离,或下发转金属回线运行指令前人为将该极隔离。

(2) 执行大地回线转金属回线运行指令,分、合两站相关接地刀闸及隔离刀闸,最后合上大地回线转换开关(GRTS),形成大地回线和金属回线并联运行状态。

(3) 最后执行大地回线转金属回线运行指令分开金属回线转换开关(MRTB),大地回线电流转移至金属回线,直流系统形成金属回线运行方式。

图 2 为直流系统双极平衡运行示意图,停运极 I 并利用自动装置将极 II 转为金属回线运行后直流系统运行状态图见图 3。

4.3 措施风险评估

直流输电工程采用手动方式由大地回线运行方式转为金属回线运行方式需要比较久的时间,包括运行人员检查直流设备的时间及上级调度给运行人员下令的时间。若采用自动转换方式,则上述时间均可省略,但这种条件下要求控制系统对直流系统是否具备转换条件进行必要及充分的判断。

比较直流系统由大地回线转为金属回线运行的手动和自动两种方式,在转换过程中存在的相同风险如下。

(1) 在转换过程中控制系统接收到刀闸位置信号与设备的实际状态不一致,导致转换中断,保持大地回线运行。

(2) 转换过程中由于设备缺陷,例如 MRTB 开关的并联支路、GRTS 开关的并联支路,导致转换过程失败,甚至正常运行极闭锁。

而如果采用自动方式将直流系统由大地回线运行转为金属回线运行,还需考虑下列风险。

(1) 双极正常运行的直流系统,当一极由于保

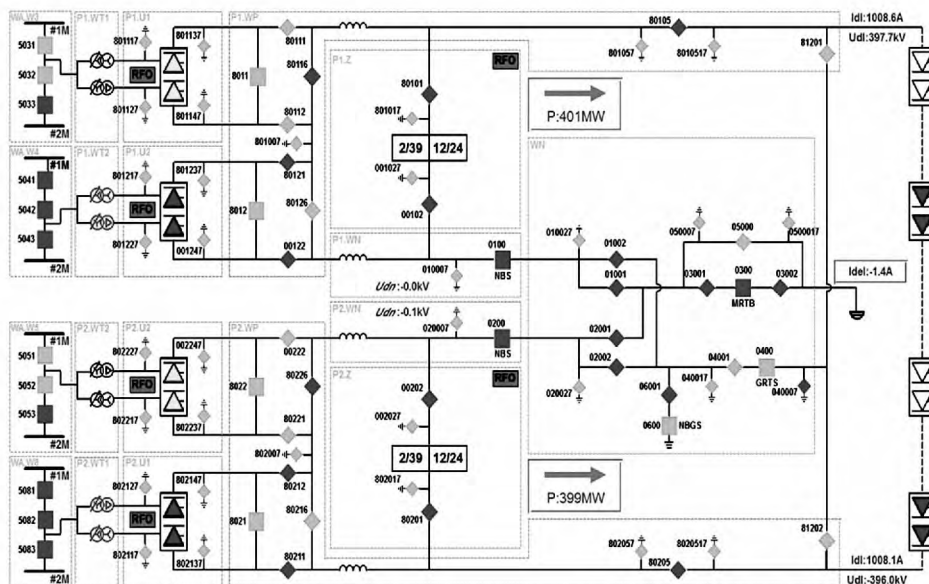


图 2 直流系统双极平衡运行

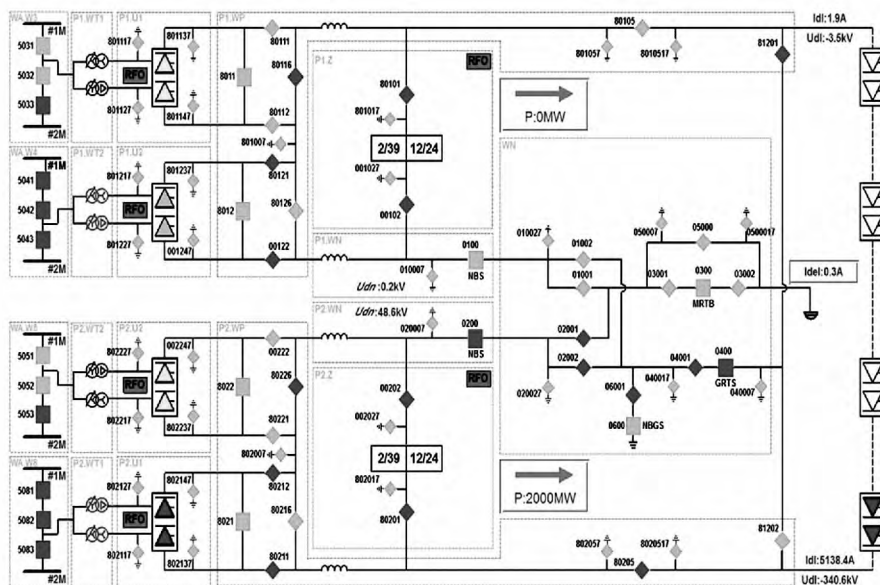


图 3 直流系统单极金属回线运行

护闭锁后其功率将自动转至正常运行极, 正常运行极可能出现过负荷运行现象, 实际直流电流超过额定电流; 此时进行转换的话, 运行电流超过设备的转换能力, 不增加约束条件即进行转换, 可能导致设备损坏。

(2) 双极正常运行的直流系统, 一极由于直流线路故障导致该极闭锁, 闭锁后无法判断直流线路故障是否清除, 此时进行大地/金属转换, 可能由于直流线路故障仍然存在而导致正常运行极闭锁。

(3) 换流站均装设有紧急停运按钮, 运行人员可以在紧急情况下将直流系统快速停运。若直流系

统一极由于运行人员按紧急停运按钮闭锁, 说明站内出现比较严重故障, 运行人员需要进行故障处理, 此时再进行设备操作风险很大。

(4) 金属回线转换开关(MRTB) 在检修状态, 采用与其并联的刀闸作为大地回线运行的通路, 由于该刀闸不具备开断直流电流能力, 不能进行大地金属回线转换。

(5) 现有超高压及特高压直流工程中, 一个极的换流器保护或极保护动作时要求闭锁该极的同时进行极隔离, 以下列举了相关的一些保护。

极母线差动保护

极差动保护
中性母线差动保护
极过流保护
换流器连线差动保护
直流谐波保护
阀短路保护
换相失败保护
直流滤波器差动保护
极控制保护设备监视跳闸 如 VBE 跳闸
辅助设备保护跳闸 水冷系统
非电量保护,如换流变压器非电量保护等

在进行极隔离时均有可能发生 NBS 重合的问题,且导致 NBS 重合的保护具有动作不确定性,而 NBS 重合产生的后果是去合站内接地开关 NBGS,在规定的时间内 NBGS 不拉开就转入金属回线运行也会引起正常运行极闭锁的风险。

(6) 直流系统两站站间通讯异常时,需要两站配合才能完成大地/金属回线转换,因此在站间通讯异常时,此时进行大地/金属转换存在导致正常运行极闭锁功能。

综合上述自动方式下直流系统由大地回线转为金属回线的风险评估,与手动方式大地/金属回线转换功能相比,采用自动方式需要在控制系统设计时进行更加周密的考虑。

5 结束语

对直流偏磁产生原因、直流偏磁影响及其抑制措施进行了综述,并提出了一种基于换流站自动操作的直流偏磁抑制策略。根据该策略,当直流输电系统因保护动作导致单极闭锁时,自动地由大地回线模式转换为金属回线方式,避免大量直流电流入地。得到了以下结论。

(1) 当直流系统采用大地返回方式运行时,注入电流就是直流输送电流,而土壤电阻率越高,直流接地极则会出现高电位。直流接地极的高电位也作用在交流变电站的接地点上,在中性点接地的变压器中流过直流电流,相当于分流了部分直流输送电流,这是交流变压器中性点直流电流的一个主要来源。

(2) 发生直流偏磁时,变压器励磁电流产生的大量谐波,引起变压器的一系列问题。如无功损耗

增大;振动、噪声加大变压器损耗增大;影响二次保护等。

(3) 目前国内外抑制流入变压器中性点直流电流的方法有多种,主要包括在变压器中性点装设电阻,限制直流电流的大小;在输电线上装设串联电容补偿,阻断直流的通路;在变压器中性点注入与流入中性点的直流电流大小相等方向相反的电流;在变压器中性点装设电容,彻底阻断直流电流;采用第 3 根导线替代大地回线等。

(4) 所提出的基于换流站操作的直流偏磁抑制策略,可当直流输电系统因保护动作导致单极闭锁时,自动地由大地回线模式转换为金属回线方式。由此可以极大地减小接地极流过电流的实现,有效抑制直流偏磁。分析表明,与大地/金属回线手动转换方式相比,自动转换方式存在更多的潜在风险,需要在功能设计时考虑周全。在充分考虑大地/金属回线自动转换方式的潜在风险并采取相应的对策后,大地/金属回线自动转换功能的实现在技术上是可行的。

参考文献

- [1] 郑晓冬,邵能灵,杨光亮,等.特高压直流输电系统的建模与仿真[J].电力自动化设备,2012,32(7):10-14.
- [2] 谢绍宇,王秀丽,王锡凡.交直流混联系统可靠性评估[J].电力自动化设备,2011,31(7):10-16.
- [3] Aik D L H, Andersson G. Power Stability Analysis of Multi-infeed HVDC Systems [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(3): 923-931.
- [4] 袁海燕,刘民,庄燕飞,等.交直流混联电网中变压器直流偏磁特性分析[J].电气技术,2013(6):15-21.
- [5] 李英,王健,孙树波,等.500 kV 单相变压器空载和负载下的直流偏磁试验研究[J].变压器,2013,50(4):55-60.
- [6] 张露,阮羚,潘卓洪,等.变压器直流偏磁抑制设备的应用分析[J].电力自动化设备,2013,33(9):151-156.

作者简介:

孙文(1980),工程师,研究方向为特高压直流输电技术;

禹佳(1983),工程师,研究方向为特高压直流输电技术。

(收稿日期:2014-04-23)

基于可中断负荷的阻塞管理研究

魏 林¹ 魏 东² 彭 格³

(1. 重庆电力公司南岸供电局, 重庆 400060; 2. 重庆电力公司电力科学研究院, 重庆 401123;

3. 重庆科技检测中心, 重庆 401147)

摘 要: 随着电力市场的逐步完善, 将可中断负荷引入输电阻塞管理成为缓解阻塞和消除市场力的有效手段。提出通过潮流优化并将可中断负荷引入输电阻塞管理, 提出潮流优化与可中断负荷联合调度模型解决输电阻塞问题。对该模型以及 IEEE 6 节点仿真表明, 在电力市场下, 采用潮流优化与可中断负荷联合调度模型, 可以有效缓解输电阻塞。

关键词: 电力市场; 可中断负荷; 阻塞管理; 潮流优化

Abstract: With the development of electricity market, it is an effective way to alleviate the congestion and eliminate the market power by introducing interruptible load into transmission congestion management. It is proposed that the interruptible load is introduced into transmission congestion management through power flow optimization and the combined dispatching model of power flow optimization and interruptible load can solve the transmission congestion. The simulation results of the economical efficiency analysis of the proposed model and the calculation example by IEEE 6-bus system show that in the environment of electricity market the proposed combined dispatching model can alleviate the transmission congestion effectively.

Key words: electricity market; interruptible load; transmission congestion management; power flow optimization

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0044-04

0 引 言

未来中国电力市场的改革进入深水区, 输配分离逐步形成, 电力市场将更加趋于完善, 输电阻塞成为亟待解决的问题。在电力市场下, 发电侧完全开放, 自由竞争, 报价低的机组优先发电, 使得电力公司在制定发电计划时以购电费用最低为目标。这将导致与报价低的机组相连的某些节点或线路加大输电阻塞的概率。在开放的电力市场环境下, 如何公平公正地进行输电网络的阻塞调度管理, 保证电网的安全稳定运行成为了国内外学者广泛关注的问题^[1-2]。

可中断负荷应用于输电阻塞管理已经有许多研究, 文献[3]提出了一个基于双边拍卖可中断负荷用于阻塞管理的模式; 文献[4]分析建立激励可中断负荷积极签约的机制; 文献[5]从用户侧出发, 提出了一种考虑负荷需求弹性的阻塞管理定价方法; 文献[6]提出了以总发电成本为目标得到阻塞成本, 并分给发电侧和用户侧共同承担的阻塞管理定

价新方法; 文献[7]提出了允许用户参与, 利用当时电价解决阻塞问题。Thomas. W. Gedra 提出了传输阻塞时阻塞成本和节点电价的计算方法, 并探讨了采用传输阻塞合同(TCC)消除阻塞交易双方收益的影响^[8]; R. S. Fang 和 A. K. David 针对电力联营体制和双边/多边交易同时存在的市场环境提出了阻塞调度模型^[9]; 任震等讨论了发生阻塞时节点的定价问题, 并提出了在不同交易模式下解决传输阻塞的措施^[10]。下面在现有理论的基础上, 提出了利用可中断负荷(interruptible load)配合电网的潮流优化来降低阻塞线路上的负荷需求, 从而有效地降低发生阻塞概率。

1 可中断负荷

随着 20 世纪 60 年代能源危机的出现, 需求侧响应的概念逐渐进入人们视野。所谓需求侧响应是指把用户侧资源和发电侧资源等同看待, 增加电力系统负荷弹性。可中断负荷是需求响应中的一种, 已经在欧美、日本、台湾等地区成功实施多年, 电力

公司通过与用户签订中断合同,采取有效激励,缓解电力高峰期用电紧张的局面。文献[11]从最优潮流的角度出发分析了在电力市场条件下电力公司如何正确选择 ILM 的合同类型以及如何最好地实施 ILM,为电力公司科学地进行可中断负荷管理提供了参考依据。

1.1 可中断负荷管理模型有如下几种。

(1) 目标函数

$$\min \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_c} C_i [1 - Z_i(j)] w_i \quad (1)$$

式中 $w_i = \frac{0.7 \arctan(\frac{EI - I_r}{EI})}{2}$; C_i 为第 i 个电力公司的中断量; n_i 、 n_c 表示参与可中断负荷管理的参与数目、控制时段数; $Z_i(j)$ 为第 i 个控制用户在第 j 时段的被控状态; EI 为用户平均激励比率; I_r 为第 i 个用户的激励比率。

(2) 负荷约束

为了保持电网的安全稳定运行,当系统出现容量短缺时,应将负荷降至系统能够承受的范围之内。即系统中被中断的负荷总量应该大于或等于容量短缺量,其数学表达式为

$$\sum_{i=1}^{n_i} C_i [1 - Z_i(j)] \geq SC \quad (2)$$

式中 SC 为系统 j 时刻缺额容量。

(3) 最大中断时间约束

用户与电力公司签订的可中断负荷合同中通常规定了电力公司在某个时段中断用户的电力供应所能持续的最大时间,当第 i 个用户的负荷中断时间的累计值达到合同所规定的中断时间上限时,电力公司必须恢复用户 i 的电力供应,即

$$Z_i(j) = 1, \text{ 当 } T(j-1) = T_i^{\max} \quad (3)$$

式中 $T(j-1)$ 为第 i 个用户至 $j-1$ 时刻的累积中断时间; $T_i^{\max}$ 为用户与电力公司签订的最大中断时间。

(4) 最小供电时间约束

电力公司对第 i 个可中断用户的供电时间必须足够长以满足该用户的电力需求,即当电力公司对用户 i 的电力持续供应没有达到合同所限定的下限值时,电力公司不能中断对用户 i 的供电,即

$$Z_i(j) = 1, \text{ 当 } T(j-1) < T_i^{\min} \quad (4)$$

式中 $T(j-1)$ 为第 i 个用户至 $j-1$ 时刻的累积中断时间; $T_i^{\min}$ 为用户与电力公司签订的最小中断时间。

2 阻塞管理的数学模型

2.1 最优调度原则

在竞争的电力市场中,既要使输电线路的安全得到保障,又要使发电侧自由竞争,避免发生输电阻塞,因此调度必须满足以下 3 个原则。

(1) 最低竞价优先并网原则。电力公司购买电量时要保证支出最小化,从而让报价最低的机组优先并网发电,保证发电侧的公平竞争。

(2) 输电网络安全原则。保证电能能在传输过程中不能超过线路的最大输送容量,保证电力系统稳定运行。

(3) 社会效益最大化原则。在线路安全运行的前提下保证用户创造的价值最大化。

2.2 阻塞管理的目标函数

在发生输电阻塞的情况下,将导致有些节点边际成本上升,造成全网购电费用上涨,因此依据购电费用最小的原则,将全网购电费用最小为目标函数。

$$\min \sum_{i=1}^n c_i P_i \quad (5)$$

式中 n 表示发电侧机组数目; c_i 表示第 i 台发电机组发电容量; P_i 表示第 i 台发电机组边际成本价格。

2.3 约束条件

(1) 系统节点的有功、无功功率平衡约束

$$\begin{aligned} P_{gi} - P_{di} &= u_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n u_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{gi} - Q_{di} &= u_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n u_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 P_{gi} 、 P_{di} 、 Q_{gi} 、 Q_{di} 分别为节点 i 的发电机和负荷的有功功率、节点 i 的发电机和负荷的无功功率; u_i 、 u_j 为节点 i 、 j 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的相角。

(2) 支路传输容量约束

$$P_{ij}^{\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{\max} \quad (7)$$

式中 $P_{ij}^{\min}$ 、 $P_{ij}^{\max}$ 表示支路 $i-j$ 的传输容量上下限。

(3) 控制变量与状态量约束

$$\begin{aligned} v_i^{\min} &\leq v_i \leq v_i^{\max} \\ \theta_i^{\min} &\leq \theta_i \leq \theta_i^{\max} \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $v_i^{\min}$ 、 $v_i^{\max}$ 表示节点 i 的电压幅值最小、最大值; $\theta_i^{\min}$ 、 $\theta_i^{\max}$ 表示节点 i 的电压相角最小、最大值。

3 基于可中断负荷的电网输电阻塞管理

一般情况下,电力调度员根据发电公司报价和潮流计算程序计算相关线路的潮流,分析哪些线路可能会出现输电阻塞,重新分配线路潮流,再依据阻塞费用的分摊原则将阻塞所导致的机会成本公平合理地分摊到各线路及其用户。这种消除阻塞的方式所带来的直接后果便是全电网的总体交易电价比原来明显高出许多,因为它从边际价格高的发电厂取得了电力,通过长距离或绕道进行传输导致了电网的整体购电费用攀升,进而增加了用户的电费负担。与用户签订可中断负荷合同是一种有效缓解输电阻塞的方法。当线路出现阻塞时,电力公司根据与用户签订的可中断合同切断相应负荷,并利用最优潮流程序分析确定切负荷后的线路潮流分布是否满足电网稳定性及安全可靠输电的要求,通过此种方式可以较好地缓解线路的阻塞状况,全网的整体购电费用也不会攀升得很高。这里提出潮流优化与可中断负荷相结合的综合调度方法:①调度员利用潮流仿真程序确定线路潮流;②结合可中断合同条件确定阻塞线路所能够中断的负荷容量,进行初步经济分析,确定哪些线路可以利用可中断负荷来消除阻塞;③利用潮流程序确定通过联合调度后的线路潮流是否符合线路安全。

4 算 例

以图 1 所示的 IEEE 6 节点系统为例对所提出的方法进行了模拟计算,此系统包括 3 台发电机、2 台变压器及 4 个负载,系统总有功负荷为 320 MW,总无功负荷为 92 Mvar。计算所用的线路参数见表 1 表 1 和以下各表中的中各量均为标么值,系统容量基准值为 100 MVA。

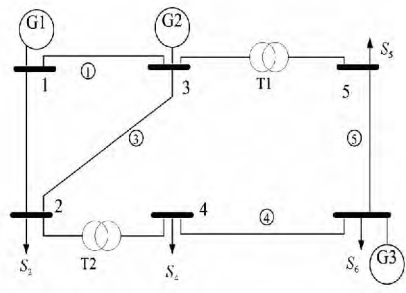


图 1 IEEE6 节点系统

表 1 线路参数

支路	首末端线号	支路电阻	支路电抗	1/2 充电电纳
①	1-3	0.082 05	0.192 07	0.000 00
②	1-2	0.054 03	0.223 04	0.024 60
③	3-2	0.056 95	0.173 88	0.017 00
④	4-6	0.037 00	0.084 50	0.000 00
⑤	5-6	0.019 38	0.059 17	0.024 60

发电机 G1、G2、G3 竞价上网的电价分别为 30 元/MWh、35 元/MWh 和 38 元/MWh。母线 2、4、5、6 的负荷 S2、S4、S5、S6 的标么值分别为 0.6 + 0.1j、0.6 + 0.1j、1.0 + 0.4j、1.0 + 0.32j,所有交流支路的传输极限容量均为 100 MW。

假定在节点 2 的用户已和电力公司签订了可中断负荷合同,规定电力公司如提前 1 小时通知用户切负荷则赔偿金额为 32 元/MWh,最大可中断负量小于或等于 10 MW。在节点 5 的用户也和电力公司签订了可中断负荷合同,规定电力公司如提前 1 小时通知该用户切负荷必须付出的赔偿金额为 33 元/MWh,最大可中断负荷容量小于或等于 20 MW。

仅按照潮流优化程序对计及支路容量约束的传统的调用高价电能的经济调度方法求解,得到以此种模式消除阻塞适宜的发电策略为发电机 G1 发电 1.8 + 0.15j,发电机 G2 发电 1.3 + 1.1j,发电机 G3 发电 0.208 61 - 0.117 79j,所导致的目标函数即电网整体购电费用为 S1 = 107 42.68 元/h,产生的阻塞成本为 T1 = 10 742.68 - 10 650 = 92.68 元/h,每条支路流过的潮流如表 2 所示。

按照所提出的消除阻塞的方法,利用潮流程序分析得出此系统最优的经济调度方式为:切除节点 S2 的可中断负荷 5 MW,切除节点 S5 的可中断负荷 10 MW,发电厂 G1 发电 1.9 + 0.12j,发电厂 G2 发电 1.27 + 1.038j,发电厂 G3 不发电,再次利用潮流优化程序分析,得出的结论为利用此种方法消除网络阻塞电网的潮流分布符合稳定性的要求,确定以此进行经济调度。结果显示此种模式下的电网整体购电费用为 S2 = 10 635 元/h,在这种模式下每条支路流过的潮流见表 3。

由表 3 可见,采用潮流优化与可中断负荷联合调度能够有效解决输电阻塞问题,并使全网购电费用最优化。

表 2 未考虑可中断负荷的线路潮流

编号	I 侧母线	J 侧母线	I 侧有功	I 侧无功	J 侧有功	J 侧无功
支路 1	1	3	0.888 71	0.038 64	0.083 126	-0.095 84
支路 2	1	2	0.911 30	0.111 37	0.087 068	-0.003 72
支路 3	3	2	0.128 86	-0.083 59	0.127 66	-0.053 09
支路 4	4	6	-0.201 68	-0.258 63	-0.205 61	-0.267 61
支路 5	5	6	-0.088 98	-0.546 98	-0.094 39	-0.512 39
变压器 T1	3	5	0.911 02	-0.130 05	0.911 02	-0.146 98
变压器 T2	2	4	0.398 32	-0.156 81	0.398 32	-0.158 63

表 3 考虑可中断负荷的线路潮流

编号	I 侧母线	J 侧母线	I 侧有功	I 侧无功	J 侧有功	J 侧无功
支路 1	1	3	0.954 72	0.011 72	0.890 62	-0.144 66
支路 2	1	2	0.942 58	0.108 30	0.899 07	-0.018 88
支路 3	3	2	0.091 79	-0.063 27	0.091 19	-0.031 01
支路 4	4	6	-0.159 74	-0.252 04	-0.163 00	-0.259 50
支路 5	5	6	-0.102 51	-0.495 67	-0.107 00	-0.458 50
变压器 T1	3	5	0.797 49	-0.082 81	0.797 49	-0.095 67
变压器 T2	2	4	0.440 26	-0.149 89	0.440 26	-0.152 04

(3):46-49.

5 结 论

提出了一种新的解决输电阻塞思路,即将潮流优化和可中断负荷管理相结合的模型,将灵活性高的可中断负荷引入输电管理中,解决单纯潮流优化的不足。潮流优化与可中断负荷管理相结合,既能使全网的整体购电费用低于仅仅采用潮流优化,又使电力用户创造的价值增加,达到了发电商、电力公司、用户三者的共赢。

参考文献

[1] 张永平,焦连伟,陈寿孙,等. 电力市场阻塞管理综述[J]. 电网技术 2003 27(8):2-9 32.

[2] Shrestha G B ,Fonseka P A J . Congestion - driven Transmission Expansion in Competitive Power Markets [J]. IEEE Transactions on Power System 2004 ,19(3) :1-8.

[3] Marannino P ,Vaiati R ,Zanellini et al. OPF tools for optimal pricing and congestion management in a Two Sided Auction Market Structure [C]. 2001 IEEE Porto Power Tech Conference: 1-7.

[4] 鲁丽娟,侯云鹤,吴耀武,等. 计及用户需求弹性影响的输电阻塞解决方案研究[J]. 电网技术 ,2004 ,28

[5] 许林,余贻鑫,刘怀东,等. 双侧输电阻塞管理与 Aumann-Shapley 拟定价[J]. 中国电机工程学报 ,2002 ,22(10) :56-60.

[6] 凌永伟,辛洁晴,言茂松. 基于输电当量电价的直接阻塞管理[J]. 电网技术 2003 27(7) :19-24.

[7] Thomas W G. On transmission congestion and pricing[J]. IEEE Transcations on Power Systems ,1999 ,14(1) :241-248.

[8] Fang R S ,David A K. Transmission congestion management in an electricity market [J]. IEEE Transcations on Power Systems ,1999 ,14(3) :877-883.

[9] 任震,吴杰康,吴重民,等. 在竞争的电力市场下的传输阻塞管理与定价[J]. 电力系统自动化 ,2001 ,25(2) :19-22.

[10] Uturbey W ,Costa A S. Interruptible load management assessment via dynamic optimal power flow [C] . IEEE Bologna PowerTech Conference 2003(7) :23-26.

作者简介:

魏 林(1971),本科,主要从事电气工程设计研究;

魏 东(1968),本科,主要从事电能计量及互感器检定研究;

彭 格(1975),硕士,主要从事高电压绝缘研究。

(收稿日期:2014-04-02)

一种改进的 SVC 在风电系统霍普夫 分岔控制中的应用

袁义桃¹ 康积涛¹ 何 龙²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 运用延拓法追踪以双馈感应风电机组(washout filter DFIG)为代表的风电系统的平衡解流形,并基于分岔理论,分析平衡解流形的分岔点。提出了一种基于高通滤波器(washout filter)技术的 SVC 模型,对风电系统发生的霍普夫(Hopf)分岔进行分岔控制,改变与系统分岔相关的雅可比矩阵特征值,不但消除了 Hopf 分岔点,还提高了电压幅值,扩大了电压稳定裕度。仿真结果和时域仿真验证了所提出的方法是正确可行的。

关键词: 风电系统; 电压稳定; 高通滤波器; SVC; Hopf 分岔

Abstract: Continuation method is used to track the balance flow of power system connected by DFIG, and based on bifurcation theory the bifurcation point of balance flow is also analyzed. A novel SVC model based on washout filter technology is proposed, which is used to control hopf bifurcation, alter the eigenvalue of Jacobian matrix that is related to bifurcation. It not only enhances the voltage amplitude, but also eliminates the hopf bifurcation point and expands the margin of voltage stability. The simulation results and time-domain simulation demonstrate the new approach is correct and feasible.

Key words: wind power system; voltage stability; washout filter; SVC; Hopf bifurcation

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0048-05

0 引 言

系统失稳是一个从稳定状态到分岔状态的过程,而分岔理论是分析非线性动态系统稳定的有力工具^[1]。在电力系统中,随着控制参数的变化,易发生分岔现象,而以 Hopf 为代表的动分岔较以鞍结分岔(saddle node bifurcation, SNB)为代表的静分岔提前发生,故 Hopf 分岔决定了系统的电压稳定裕度。

风电并入电网后,由于其自身的特性,对电压稳定影响大,需要无功补偿,电力系统中无功补偿装置虽然提高了系统的电压,但也会使系统发生新的分岔现象,降低系统的稳定裕度。

高通滤波器技术已广泛用于 Hopf 分岔控制^[2-3],它能自动跟踪系统的平衡点,而不改变运行点。目前对于 SVC 的研究,用 washout filter 对其控制来提高电压稳定的文献相对较少。文献[4]对一个单机无穷大系统运用 washout filter 对其进行分岔控制,但是没有 SVC 提供无功补偿。文献[5-6]对一个典型的单机无穷大系统,运用带 washout filter

控制的 SVC 对系统进行无功补偿,但是该模型仅对消除 Hopf 分岔点有效果,而系统电压幅值又变化为系统无 SVC 提供无功补偿时的幅值。基于以上原因,提出了一种带 washout filter 控制的 SVC,不但能够消除系统的 Hopf 分岔点,扩大系统的参数变化裕度,还能够提高系统电压的幅值。

1 研究理论和方法

1.1 分岔理论简介^[7]

非线性电力系统的动态特性一般用一组微分-代数方程(DAE)来描述为

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

式中 x 代表微分变量; y 代表代数变量; μ 代表控制参数。微分方程组描述同步发电机、DFIG、负荷元件的动态特性;代数方程描述电力系统的网络约束方程。

式(1)表示的系统在平衡点 (x_0, y_0, μ_0) 处满足下列方程组。

$$\begin{cases} 0 = f(x_0, y_0, \mu_0) \\ 0 = g(x_0, y_0, \mu_0) \end{cases} \quad (2)$$

在平衡点 (x_0, y_0, μ_0) 处, 将式 (1) 两边进行微分变换得

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = D_x f(x_0, y_0) dx + D_y f(x_0, y_0) dy \\ 0 = D_x g(x_0, y_0) dx + D_y g(x_0, y_0) dy \end{cases} \quad (3)$$

令 $A = D_x f(x_0, y_0)$; $B = D_y f(x_0, y_0)$

$C = D_x g(x_0, y_0)$; $D = D_y g(x_0, y_0)$

经过变换, 可将式 (3) 变换为

$$\dot{x} = (A - BD^{-1}C)^* x \quad (4)$$

令 $J = (A - BD^{-1}C)$ 。

根据动力学知识, 系统的动态稳定性可由雅可比矩阵 J 的特征值来确定。根据李亚普诺夫稳定性理论, 当系统的特征值实部全部为负时, 系统稳定。当特征值出现一零特征值时, 系统发生 SN。系统出现一对共轭特征值时, 发生 Hopf 分岔。

1.2 延拓法^[8]

延拓法(连续潮流法)用于追踪系统的平衡解流形, 是对系统电压稳定性分析的有力工具。它的基本思想是: 从初始点开始, 随着参数的变化沿相应的平衡解流形曲线对下一点进行预估和校正, 直至勾画出完整的平衡解流形曲线。

每向前追踪一步结束后, 使用分岔理论判断系统是否发生分岔, 再进行对下一点的追踪。

2 带 washout filter 控制的 SVC 设计

washout filter 控制法是一种状态反馈法, 通过引入新的变量, 把控制器施加到被控系统, 控制器多为原系统某一状态变量和 washout filter 的状态变量构成的多项式。这种控制器不改变原系统的平衡点, 控制简单, 具有一定的鲁棒性^[9], 易于实现, 可利用较小的控制代价实现非线性系统的分岔控制, 可应用于高维系统^[3], 因此可将该方法用于电力系统的分岔控制中。washout filter 是一种稳定的高通滤波器, 对于一维的情况, 它有如下的传递函数。

$$G(s) = \frac{\gamma(s)}{x(s)} = \frac{s}{s+d} \quad (5)$$

其中 d 为 washout filter 时间常数的倒数。当 $d > 0$ 时, 控制器稳定; $d < 0$ 时, 控制器不稳定。根据现代控制原理, 由传递函数写出它的状态方程为

$$\dot{w} = x - dw = y \quad (6)$$

其输出方程为

$$\mu = g(y, k) \quad (7)$$

其中 w 为 washout filter 的状态变量; x 为输入的系统变量; y 为输出变量; k 为控制器的增益; μ 为控制器输入到 SVC 的表达式, 是一个关于 y 和 k 的函数。当系统稳定时, 有 $w = x/d$, $y = 0$, 相当于输入变量 x 被冲洗掉了, 因此被称为滤波器法。

这里采用 SVC 的一阶动态模型, 其数学模型如下^[11]。

$$T_{svc} \dot{B} = -B + K_{svc}(U_{ref} - U_7) \quad (8)$$

式中 B 为 SVC 的等值电纳; T_{svc} 为 SVC 的时间常数; K_{svc} 为 SVC 的放大倍数; U_{ref} 为电压参考值; U_7 为输入的被控节点电压。

所提出的带 washout filter 控制的 SVC 模型为

$$T_{svc} \dot{B} = -B + K_{svc}(U_{ref} - U_7) + \mu \quad (9)$$

式中 $\mu = k \cdot (U_7 - d \cdot w)$, 该部分起着消除 Hopf 分岔点的作用, SVC 模型的其他部分起着提高电压幅值的作用。

参数值 d 和 k 值的确定参考文献 [5] 中的方法, 在 Hopf 分岔点处求得系统在带 washout filter 控制的 SVC 模型时闭环系统的雅可比矩阵, 根据特征值实部为负时, 系统稳定, 来选取参数值。

3 风电系统模型

3.1 发电机系统模型

同步发电机采用四阶数学模型, 模型和参数见文献 [11], 励磁部分采用一阶数学模型, 模型和参数见文献 [12]。DFIG 的动态模型采用非线性三阶微分方程描述, 模型参数见文献 [13]。

3.2 动态负荷模型

采用第一类动态负荷 (Walve) 模型, 参数详细含义见文献 [1]。

$$\begin{cases} P_L = P_0 + P_1 + K_{p\omega} \dot{\theta}_7 + K_{pu}(U_7 + T\dot{U}_7) \\ Q_L = Q_0 + Q_1 + K_{q\omega} \dot{\theta}_7 + K_{qu}U_7 + K_{qu2}U_7^2 \end{cases} \quad (11)$$

3.3 网络约束模型

对于同步发电机节点和非发电机节点的网络约束方程见文献 [12], 对于 DFIG 节点, 将其处理为一个 PQ 节点, DFIG 注入系统的功率即 DFIG 与系统的接口为

$$\begin{cases} P = \frac{E' |U|}{X'} \sin(\delta_0 - \theta) \\ Q = \frac{E' |U| \cos(\delta_0 - \theta) - |U|^2}{X'} \end{cases} \quad (15)$$

4 算例分析

4.1 风电系统描述

这里采用 3 机 9 节点系统, 简化模型如图 1, 节点 2 处为同步发电机, 节点 3 处为 DFIG, 节点 7 处接入动态负荷和 SVC, 节点 5、9 为恒功率负荷, 节点 1 为系统平衡节点。

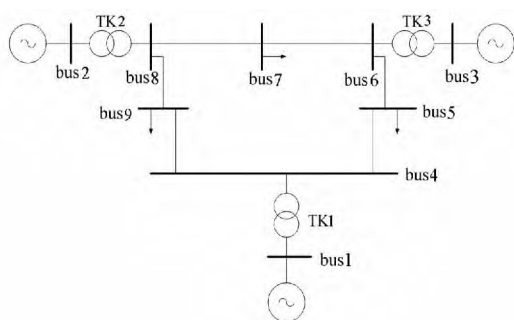


图 1 含 DFIG 的电力系统

SVC 参数: $T_{SVC} = 0.6$; $K_{SVC} = 10$; $U_{ref} = 1$; $d = 7$; $k = 72$ 。

4.2 仿真分析

下面就对 3 机 9 节点系统在没有 SVC 进行无功补偿、带 washout filter 控制的 SVC (即文献 [5-6] 中的 SVC 模型)、所提出的带 washout filter 控制的 SVC 模型分别随动态负荷控制参数 Q_1 变化, 利用延拓法进行分岔仿真分析, U_7 为节点 7 的电压幅值, HP 表示 Hopf 分岔点, SNB 表示鞍结分岔点。

4.2.1 无 SVC 补偿

图 2 为系统在无 SVC 提供无功补偿的情况下, 系统的 QV 曲线, 系统在 $Q_1 = 1.1864$ 处发生 Hopf 分岔。

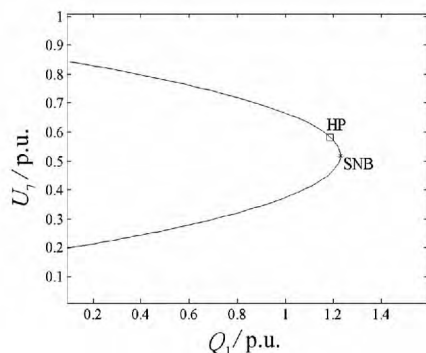


图 2 无 SVC 补偿的 QV 曲线

4.2.2 不带 washout filter 控制的 SVC 分岔分析

图 3 为系统在 SVC 无 washout filter 控制情况下的 QV 曲线, 与图 2 相比, 由 SVC 给系统提供的无功使系统电压幅值得到提高, 同时系统在 $Q_1 = 3.2062$ 处发生 Hopf 分岔, 比图 2 中的 $Q_1 = 1.1864$ 稳定裕度扩大了。从图 4 在 Hopf 分岔点的时域仿真同样可以验证由分岔理论得到的分岔点的正确性。

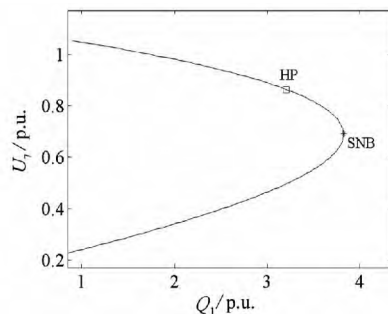
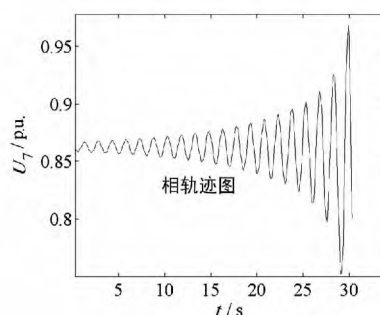
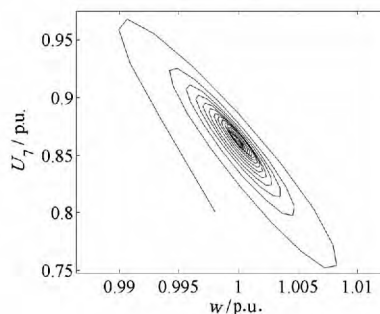


图 3 无 washout filter 控制的 SVC 的 QV 曲线



(a) $u(t)$ 曲线



(b) $u-w$ 相轨迹图

图 4 无 washout filter 的 SVC 时的时域仿真

4.2.3 带 washout filter 控制的 SVC

图 5 为系统在 SVC 用文献 [5-6] 提出的 washout filter 控制模型情况下的 QV 曲线。由图可得, 通过引入该 SVC 模型确实消除了系统的 Hopf 分岔点, 但同时和图 2 相比, 两者的 QV 曲线一样, 即在同一控制参数值 Q_1 下的节点电压 U_7 幅值相同, 也即是说, 该 SVC 模型下系统的电压幅值降低了, 控制参数的稳定裕度变小了。

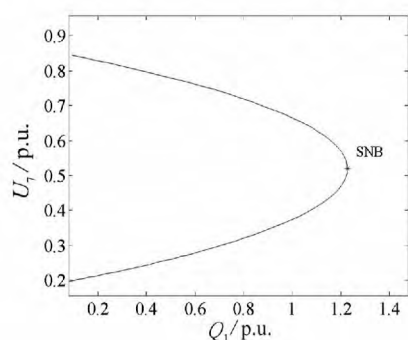


图 5 washout filter 控制的 SVC 的 QV 曲线

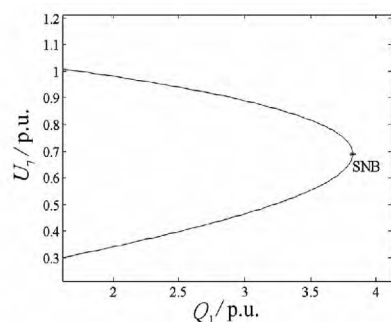
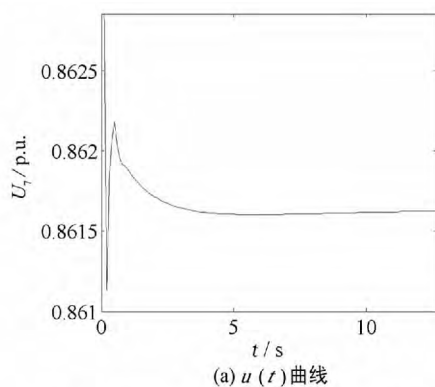
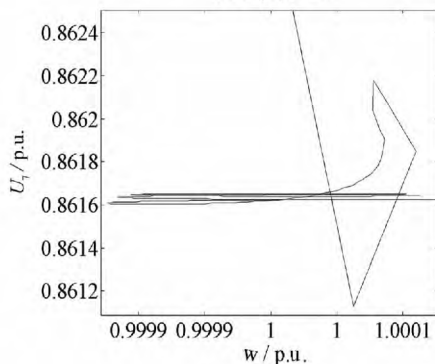


图 6 所提出的一种新的 washout filter 控制的 SVC 的 QV 曲线



(a) $u(t)$ 曲线



(b) $u-w$ 相轨迹图

图 7 新的 washout filter 控制的 SVC 时系统的时域仿真

4.2.4 带 washout filter 控制的 SVC 分岔分析

图 6 为系统在所提出的带 washout filter 控制的 SVC 模型时的分岔分析。与图 3 相比,该 SVC 模型

不但保持了原来 QV 曲线形状,电压幅值并没有降低,同时也消除了系统的 Hopf 分岔,使系统的稳定裕度得到提高。与图 5 下的模型仅消除分岔点而系统稳定裕度降低相比,所提出的模型显然更具有优势。在图 3 中,在 $Q_1 = 3.2062$, $U_1 = 0.8620$ 处出现 Hopf 分岔,在该点进行时域仿真,系统不稳定而发散。但在图 7 中同样参数下,由于消除了分岔点,出现扰动时,系统的电压随时间趋于稳定值, $u-w$ 相轨迹趋于稳定收敛,由时域仿真可验证该模型是正确可行的。

5 结 语

当电力系统无功不足时,电压降低, SVC 为系统补偿无功可以提高系统电压幅值。前面以动态负荷无功为参数,基于分岔理论和延拓法,首先分析了含双馈感应风电机的电力系统在没有 SVC 提供无功补偿下的 QV 曲线,然后分析了 SVC 在两种控制情况下时系统的 QV 曲线。在文献 [5-6] 中 washout filter 控制下的 SVC 只能消除分岔点,但这是以降低系统电压幅值和稳定裕度为代价的。所提出的 washout filter 控制下的 SVC 模型,在同样的系统参数下,不但可以消除分岔点,稳定裕度得到提高,还可以提高系统的电压幅值,通过时域仿真验证表明所提出的带 washout filter 控制的 SVC 模型是正确可行的。

参考文献

- [1] Lerm, A. A. P. Multiparameter Bifurcation Analysis of the South Brazilian Power System [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 737-746.
- [2] Le Hoa Nguyen, Keum-Shik Hong. Analysis and Control of the Bifurcation in a Morris-Lecar Neuron via a Washout Filter-Aided Dynamic Control Law [C]. 11th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 2011: 342-347.
- [3] Dong Chen, HUA O. Wang. Anti-control of Hopf Bifurcations Through Washout Filters [C]. Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control, 1998 (3): 3040-3045.
- [4] 马幼捷, 李小双, 周雪松, 等. 基于高通滤波器技术的电力系统霍普分岔控制 [J]. 电网技术, 2011, 35(7): 76-80.

- [5] Saad , M. S. Hassouneh , M. A. Abed , E. H. Edris , A. Delaying Instability and Voltage Collapse in Power Systems using SVCs with Washout Filter – aided Feedback [C]. Proceedings of the 2005 Digital Object Identifier American Control Conference , 2005(6) : 4357 – 4362.
- [6] 安伟春. 非线性电力系统分岔控制的研究 [D]. 沈阳: 东北大学 2008.
- [7] 彭志炜, 胡国根, 韩祯祥. 基于分叉理论的电力系统电压稳定性分析 [M]. 北京: 中国电力出版社 2005.
- [8] 赵晋泉, 张伯明. 连续潮流及其在电力系统静态稳定分析中的应用 [J]. 电力系统自动化 2005 29(11) : 91 – 96.
- [9] Calandrinini G , Paolini E , Moiola J L. Controlling Limit Cycles and Bifurcation in Controlling Chaos and Bifurcations in Engineering Systems [C]. 1999: 200 – 227.
- [10] K. N. Srivastava , S. C. Srivastava , P. K. Kalar. . Chaotic

- Oscillation in Power System Under Disburbance [C]. In IEE 2nd International Conference on Advances in Power Control , Operation and Management , Hong Kong , 1993: 705 – 711.
- [11] 李康. 基于分岔理论的电力系统动态电压稳定性分析 [D]. 成都: 西南交通大学 2012.
- [12] 顾伟. 电力系统最优分岔控制研究 [D]. 南京: 东南大学 2006.
- [13] K. Elkington , V. Knazkins and M. Ghandhari. On the Stability of Power Systems Containing Doubly fed Generator based Generation [J]. Electr. Power System 2008 , 78(9) : 1477 – 1484.

作者简介:

袁义桃(1987), 硕士研究生, 主要研究方向为风电系统的电压稳定性分析。

(收稿日期: 2013 – 12 – 27)

(上接第 18 页)

(1) 设计的 3 个次同步阻尼控制器都可以达到抑制 SSO 的目的, 也就是说在轴系扭振模态频率处电气阻尼转矩系数为正就可以抑制次同步振荡。

(2) 如果可以使整个频段的电气阻尼转矩系数为正, 发生次同步振荡后施加抑制装置时发电机各机械量和系统中电气量起始振荡幅值更小, 恢复到平衡位置的时间更短, 对发电机轴系的疲劳损伤最小, 对系统中电气设备的危害也越小。

参考文献

- [1] 张运洲, 张卫东. 国家电网公司电网“十一五”发展规划综述 [N]. 国家电网报, 2006 – 36 – 38(1) .
- [2] 周孝信, 郭剑波, 林集明, 等. 电力系统可控串联电容补偿 [M]. 北京: 科学出版社 2009.
- [3] Hsu YY , Jeng I H. Analysis of Torsional Oscillations Using Anartificial NeuRal network [J]. IEEE Trans. on EC 1992 7(4) : 684 – 690.
- [4] 陈陈. 多变量频域法分析电力系统次同步振荡 [J]. 电力系统自动化 1989 (5) : 22 – 27.
- [5] 于达仁, 徐基豫. 大型汽轮机调节系统的设计对轴系扭振

的影响 [J]. 中国电机工程学报. 1992 12(4) : 35 – 39.

- [6] YY. Hsu and L. Wang. Modal Control of an HVDC System for the Damping of Subsynchronous Oscillations [J]. IEE Proceedings , 1989 136(2) : 78 – 86.
- [7] R. J. Piwko , E. VLarsen. HVDC system control for damping of subsynchronous Oscillations [J]. IEEE Transctionson Power Apparatus and Systems. 1982 101(7) : 2203 – 2211.
- [8] 江全元, 程时杰, 曹一家. 基于遗传算法的 HVDC 附加次同步阻尼控制器的设计 [J]. 中国电机工程学报 , 2005(1) : 87 – 91.
- [9] 杨秀, 王西田, 陈陈. 基于 H_{∞} 鲁棒控制理论的高压直流输电系统附加次同步振荡阻尼控制设计 [J]. 电网技术 2006 30(9) : 57 – 61.
- [10] Padiyar K R. Analysis of Subsynchronous Resonance in Power Systems [M]. Boston , USA: Kluwer Academic Publishers , 1999: 87 – 96.

作者简介:

王敏华(1988), 硕士, 研究方向为电力系统的稳定与控制。

(收稿日期: 2014 – 02 – 04)

异步风力机风速突变对并网系统影响 分析与防护措施

罗 洪 陈 静 冉 鸿

(国网重庆武隆县供电有限责任公司 重庆 408500)

摘 要: 在含异步风力机风电场电网中,风电场风速的突变将会对电网系统造成影响。研究了含异步风电机组的风电场在风速突变条件下对接入电网的电压、电流、有功、无功的影响情况。通过动态模拟仿真,在风速突变时,接入点的电压水平和风力机的风能利用率都有明显下降,并仿真分析了 STATCOM 对接入点的电压水平和风力机的风能利用率的影响。最后讨论了平移突变风速、变桨距控制风速突变等防护措施的可行性,保证异步风电场在风速突变时正常运行。

关键词: 异步风力机模型; 突变风速; 动态仿真; 防护措施

Abstract: In wind farm grid with induction wind turbines, the abrupt change of wind velocity will affect the grid system. The influences of wind farm with induction wind turbines during the abrupt change of wind velocity on the grid-integrated voltage, current, active power and reactive power are studied. Through the dynamic simulation, during the abrupt change of wind velocity, the voltage level of access point and the wind energy utilization of wind turbine decrease significantly, and the impacts of STATCOM on the voltage level of access point and the wind energy utilization of wind turbine are analyzed by the simulation. Finally the feasibility of protective measures such as abrupt change of shift wind velocity and abrupt change of pitch control wind velocity is discussed in order to ensure the normal operation of induction wind farms during the abrupt change of wind velocity.

Key words: induction wind turbine model; abrupt change of wind velocity; dynamic simulation; protective measures

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0053-04

0 引 言

在目前形势下,国家已经把能源作为一个国家的重要发展战略。中国是世界风电机组装机容量最大的国家之一,异步风力机最早应用到风力发电中,各地区风电场中均含有异步风力发电机组。由于天气原因,风速具有不可预测性和间断性,将导致风力机组的有功出力出现随机变化,严重会影响到电网安全稳定。当大规模含异步风力发电机组的风电场并入电网时,风速发生突变时,风电场将不能正常运行,会对并网系统的安全稳定造成冲击和影响,甚至威胁其他挂网发电机组的正常运行,严重时会导致系统瓦解,造成重大经济损失。

目前,风速突变时对异步风力机组的影响研究较多,但对其接入电网后其电压等相关影响、风能利用率和对其的防护措施研究较少,文献[1]主要分

析了在风速突变时风电场出口电压的情况。文献[2]提出了采用小干扰稳定分析方法仿真分析了风力发电机组在风速突变下的数学模型,并对风电场和接入电网之间相互影响进行了全面分析。文献[3]研究了某实际风电场实际风电功率波动的时空分布特性及其内在趋势性特征,来系统评估风电波动对并网系统造成的影响。

现有研究中对风力机在风速突变下对并网系统影响分析的文献较多,但对异步风力机在风速突变下采取的防护措施的相关研究较少。于是针对异步风力机组接入电网在风速突变时段的电压和风能利用率进行了分析,得到了在风速突变情况下,异步风力机对系统电压影响较大和风能利用率较小。提出了当风速突变时异步风力机采用无功补偿措施,电压在安全运行范围,风力机组的风能利用率明显上升;同时给出了平移突变风速和变桨距控制风速突变的可行性措施。

1 突变风速模型与风能转变模型

1.1 突变风速模型

风速一般可分为基本风、阵风、渐变风和随机风。突变风速一般为阵风,其模型如图 1 所示。

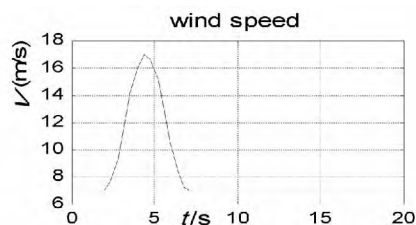


图 1 突变风速模型图

突变风速数学表达式如式(1)所示。

$$V_{WG} = \begin{cases} V_B & t < t_G \\ V_B + V_{\cos} & t_G < t < t_{G1} \\ V_B & t > t_G + t_{G1} \end{cases} \quad (1)$$

式中, V_B 为基本风; $V_{\cos}$ 为阵风风速; t_G 为阵风启动时间; t_{G1} 为阵风作用时间。

式中, $V_{\cos} = \frac{V_{\max}}{2} \left[1 - \cos 2 \left(\frac{t}{t_{G1}} - \frac{t_G}{t_{G1}} \right) \pi \right]$; $V_{\max}$ 为阵风最大值。

1.2 风能转变电能模型

风力发电中,风的能量与其风速的平方成正比。风力发电是风轮在流动的空气中获得了阻碍流动空气流速的部分机械能。风轮从空气中吸收的功率可以用公式(2)表示。

$$P = \frac{1}{2} C_p A \rho V^3 \quad (2)$$

$$A = \pi R^2 \quad (3)$$

式中, P 为风轮输出功率; C_p 为风轮的功率系数; A 为风轮扫掠面积; ρ 为空气密度; V 为风速; R 为风轮半径。风轮可获得的最大风效率,即贝兹极限下 $C_p = 59\%$ [4]。

在风速低于额定风速时,风力机获得最佳功率与转速的关系式如下。

$$P_{\text{opt}} = kn^3$$

式中 $k = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{R}{\lambda_{\text{opt}}} \right)^3 C_{p\text{max}}$; n 为转速; P_{opt} 为目标输出功率; A 为式(3)值; $C_{p\text{max}}$ 为最佳功率系数; λ_{opt} 为最佳叶尖速比 [5]。

将公式(1)代入公式(4)中,可以得到风速与风

力机获得最佳功率呈三次方变化。但在风速突变过程中,传动过程的惯性将会影响风力机获得最佳功率,不利于风力机对风能的利用率。

2 仿真系统模型与结果分析

2.1 异步风力发电机结构模型

因为风速不稳定和不确定性,很难保持转子转速始终为同步转速,所以目前大中型风力发电机多采用的是异步发电机。同时由于异步风力发电机结构简单、价格便宜、维护方便等特点,在国内风电场中大规模使用。异步风力机组接入电网结构如图 2 所示。

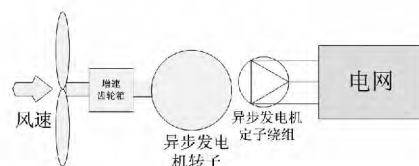


图 2 异步风力发电机组接入电网

2.2 含异步风力机组风电场仿真系统

基于异步风力机组模型搭建了该机型等值风电场接入电网的仿真系统,其系统基本结构如图 3 所示。

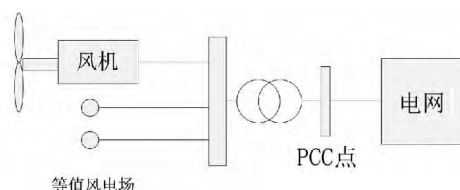


图 3 仿真动态系统模型

仿真过程中的风速采用阵风模型,其基本风为 7 m/s,风速从 2 s 开始经过 2.5 s 突增到 17 m/s,再经过 2.5 s 从 17 m/s 下降至 7 m/s。

含异步风力机组等值风电场容量为 10 MW,将以上突变风速引入,对风电场 PCC 点的电压、电流、有功和无功波动曲线进行仿真和分析。

2.3 仿真结果分析

在风速突变时段,异步风力机风电场接入电网的 PCC 点母线电压、电流、有功功率、无功功率图形如图 4、5、6、7 所示。

对图 4 分析可知,风力发电机组将风能转化为电能时由于传动惯量有时间延迟。

在风速扰动时段,异步风电场 PCC 母线电压跌

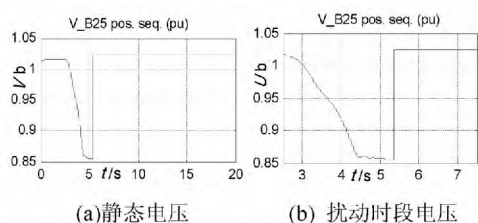


图 4 异步风电场 PCC 母线电压

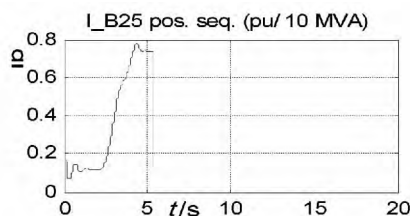


图 5 异步风力发电机组电流波动

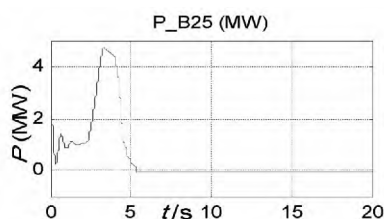


图 6 异步风力发电机组有功功率

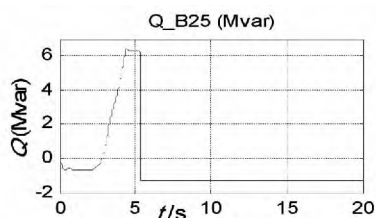


图 7 异步风力发电机组无功功率

落 $0.14U_N$ 0.5 s 后并网侧低电压继电器保护动作, 将该等值风电场切除, 其与并网系统解列。

对图 5 分析可知, 等值异步风力机风电场风能转化为电能的时间延迟为 1 s , 变化趋势基本与风速一致; 电流随着风速增大而增大, 但当风速达到额定风速值时, 电流没有达到额定出力值, 最后异步风力机因电压跌落与电网解列, 电流为数字。

对图 6 分析可知, 异步风力机有功功率随风速增大而减小的趋势, 仿真中异步风力机随风速增大而有功功率降低, 最后在 5.35 s 时刻, 并网侧低压继电器保护动作将风电场解列。

从图 7 可以得出在风速突变时断, 异步风力发电机一直对电网发出无功功率, 直至解列为止。

从以上仿真结果图形中, 可知在对异步风力机组引入突变风速时段, 异步风力机电压跌落明显; 电

流随风速增大而增大; 有功功率有下跌趋势; 无功功率随风速变化。

3 异步风力机风速突变防护措施

3.1 加无功补偿装置

在异步风力机风电场的出口接入无功补偿装置时, 引入同一突变风速, 接入同一电网, 仿真结果如图 8、9、10 所示。

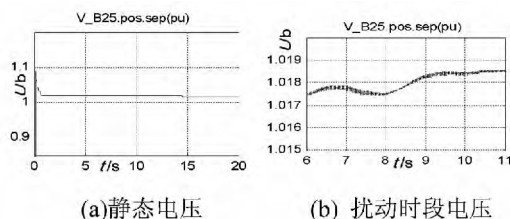


图 8 无功补偿后异步风力发电机组风速扰动时电压

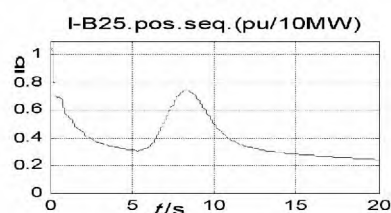


图 9 加无功补偿后异步风力发电机组电流

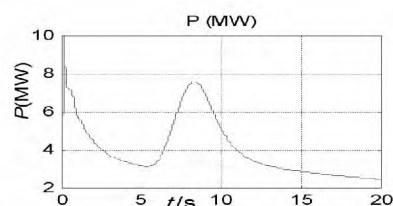


图 10 加无功补偿后异步风力发电机组有功功率

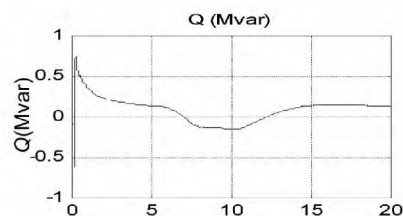


图 11 加无功补偿后异步风力发电机组无功功率

通过图 4、5、6、7 与图 8、9、10、11 对比, 明显可知, 加入无功补偿装置 STATCOM 后, 异步风力机风电场能正常运行风速突变时段, 电压稳定在正常安全电压下, 风能利用率明显提高, 有效地解决了异步风力机在风速突变时段引起电压跌落问题。

3.2 平移突变风速

风速通过叶片带动齿轮箱,然后带动风力发电机发电。在异步风力机设计时,考虑到风速突变(突增),可在风力机内部风能转化为动能后,将动能进行平移。如使齿轮箱的传递齿轮的加速度达到一定值时趋于饱和,不使转速上升,进而对突变风速进行平移,最后使风力机正常运行。

3.3 变桨距控制

在异步风力机的叶片上,安装变桨距控制系统。对风速实时监测,将测得的风速反馈给变桨距控制系统,使该系统进行变桨距控制,变桨距控制使风力机的叶片攻角在一定范围内($0^{\circ} \sim 90^{\circ}$)变化,从而调节输入风速,达到对突变风速的控制。

4 结 论

这里针对的是等值风电场,风电场的容量相对较小,实际中风电场较大,当在此类的风电场风速突变时,将形成的效果和影响会更大。对平移风速、变桨距控制上未作仿真研究,后续将进一步分析研究。由以上研究结果给出两点结论如下。

(1) 由动态仿真结果表明,基于异步风力机风电场风速突变时段,风电场会解列接入电网,对电网造成危害。同时基于电压、电流、有功、无功波动和风能利用率考虑时,应考虑该类型机组在风速突变情况下的防护措施,当加 STATCOM 装置后,仿真结果表明该类型风力机此时电压在风速突变时较缓和,且对此时的风能利用率较高,使并网系统安全稳定运行。

(2) 异步风力机组在风速突变(风速突增)时,电压下降,当风速突变到某一值时,由于电压低于风力机低电压保护整定值,继电器动作,切除该风电场,这将对电网安全造成很大的影响。例如 2011 年 4 月甘肃酒泉某风电场由于低电压穿越能力不行,风电场解列,对西北电网造成巨大影响。风电场的异步风力发电机组应注重在风速突变时,风力机组的电压跌落问题,如添加 STATCOM、风力机内部进行平移突变风速势能、变桨距控制等。

参考文献

- [1] 范高峰,于德龙,任普春,等. 变动风速作用下风电场对电网电压的影响[J]. 电网技术,2006,30(4):231

-233.

- [2] 汤宏,吴俊玲,周双喜. 包含风电场电力系统的小干扰稳定分析建模和仿真[J]. 电网技术,2004,28(1):38-41.
- [3] 崔杨,穆钢,刘玉,严干贵. 风电功率波动的时空分布特性[J]. 电网技术,2011(2):110-114.
- [4] 叶杭治. 风力发电系统的设计、运行与维护(第一版)[M]. 北京:电子工业出版社,2010:90-94,183-187.
- [5] 张志英,赵萍,李银凤,等. 风能与风力发电技术(第二版)[M]. 北京:化学工业出版社,2010:65-73,290-299.
- [6] 吴学光,张学成,印永华,等. 异步风力发电系统动态稳定分析的数学模型及其应用[J]. 电网技术,1998,22(6):68-72.
- [7] 王承熙,张源. 风力发电[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [8] 文玉玲,晁勤,吐尔逊·依布拉音. 风电场对电网继电保护的影响[J]. 电网技术,2008,32(14):14-17.
- [9] 张学广,徐殿国,李伟伟. 双馈风力发电机三相短路电流分析[J]. 电机与控制学报,2008,12(5):493-497.
- [10] 欧阳金鑫,熊小伏. 接入配电网的双馈风力发电机短路电流特性及影响[J]. 电力系统自动化,2010,34(23):106-110.
- [11] 关宏亮,赵海翔,刘燕华,等. 风力发电机组对称短路特性分析[J]. 电力系统自动化,2008,28(1):61-64.
- [12] O. Anaya-Lara, X. Wu. Performance of Doubly Fed Induction Generator(DFIG) During Network Faults[J]. Wind Engineering, 2005,29(1):49-66.
- [13] 迟永宁,王伟胜,刘燕华. 大型风电场对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化,2006,30(15):10-14.
- [14] 张保会,李光辉,王进,等. 风电接入电力系统故障电流的影响因素分析及对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备,2012,32(2):1-8.
- [15] 何世恩,董新洲. 大规模风电机组脱网原因分析及对策[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(1):131-137.

作者简介:

罗洪(1972),电气工程师,研究方向为清洁能源与并网技术;

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

(收稿日期:2013-11-07)

基于分布式参数的双端测距优化算法

印吉景¹, 刘宏君², 潘军军², 余传坤²

(1. 泰州供电公司, 江苏 泰州 225300; 2. 长园深瑞继保自动化有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 基于输电线路的分布式参数模型, 采用两端的电气量进行测距计算, 提出了双端测距优化算法。该算法详细分析了故障时线路各点电压与电流的关系, 利用接地电阻阻性特征确定故障位置, 不受线路负荷、系统阻抗和过渡电阻的影响, 且具有较高精度。

关键词: 分布参数; 双端测距; 阻性; 优化算法

Abstract: Based on the distributed parameter model of transmission line, the optimization algorithm for two-terminal fault location is presented by adopting the electrical quantities at two terminals for the calculation of fault location. This algorithm makes a detailed analysis on the relationship for each point between its voltage and current when there has a line fault. Meanwhile, this method also utilizes the resistive character of resistance to determine the fault location, which is not affected by the influence of line load, system impedance and transition resistance, and finally obtains a relatively high accuracy.

Key words: distributed parameter; two-terminal fault location; resistive character; optimization algorithm

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0057-04

0 引言

随着工业的不断发展, 电能作为一种清洁的二次能源在现在能源应用中的比例越来越高, 成为人类正常生活、生产的重要保证。而输电线路担负着传送电能的重任, 是电力系统安全运行的大动脉。当输电线路发生永久性故障时, 系统正常工作状态遭到破坏, 这时需要迅速地找到并排除故障, 排除永久性故障的时间越长, 对整个系统稳定运行的危害越大。由此提出了故障测距的研究课题, 利用自动程序进行运算, 快速地发现人工难以发现的隐秘故障, 帮助系统工作人员及时地找到并排除故障, 具有巨大的实际应用价值^[1]。

故障测距可简单地分为单端算法和双端算法。由于单端算法只采用线路一端的交流量进行测距计算, 在理论上无法避免过渡电阻、系统允许方式及分布电容等带来的测距误差, 而且单端测距算法主要采用的阻抗法和故障分析法需要一定的系统允许方式假定为前提, 各参数大多取线路参数近似值, 方程计算精度低, 导致故障测距的结果不准确。由于通信技术发展, 目前线路差动保护应用越来越广泛, 利用差动保护实现双端故障定位成为可能。基于线路

差动保护装置研究了一种高精度的双端测距算法, 并从电压电流的精确测量、差动保护同步精度的改进和线路参数的对称度等方面对算法进行了改进, 最终完成了测距算法在差动保护装置中的集成实现, 具有较强实用性和精确度。EMTP 仿真结果及 RTDS 动模实验结果表明, 算法的测距结果具有较高的精度。

1 算法基本理论

图 1 是一个长线路的均匀分布参数模型, 考虑了导纳和阻抗的分布情况, 将均匀传输导线设想为许多无穷小的长度元 dx 组成, 每一长度元 dx 都具有电阻、电感、电容和电导。

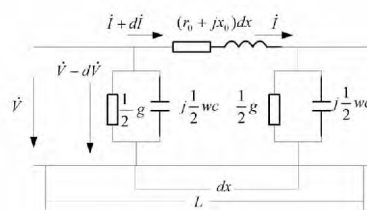


图 1 集中参数的输电线路等值电路

其中单位长度的阻抗和导纳分别为

$$z_0 = r_0 + j\omega l_0 = r_0 + jx_0 \quad y_0 = g_0 + j\omega c_0 = g_0 + jb_0$$

对于长线路来说,不能忽略线路电导、电纳,即有

$$Z = R + jX = l z_0$$

$$Y = G + jB = j b_0 l$$

若线路发生单相接地故障,系统示意图如图 2 所示。

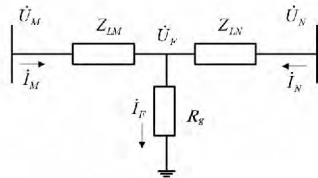


图 2 单相接地故障

发生接地时,流经过渡电阻 R_g 的电流 I_F 即为差动保护装置所测差流,对于线路保护装置而言为电容电流补偿后的差流。

分析单相接地故障中各故障分量有 M 侧母线测量点电压 结合阻抗分析有

$$\dot{U}_F = \dot{U}_M - \dot{U}_{MF} = \dot{U}_M - (\dot{I}_M + \dot{K} \cdot 3 \dot{I}_0) \cdot \alpha \dot{Z} \quad (1)$$

式中 $\dot{Z}$ 为线路全长正序阻抗; $\alpha = \frac{MF}{MN}$ 为故障点距离百分比。

对于不能忽略线路电导、电纳的长线路来说,等值电路如图 3 所示。

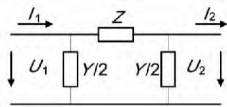


图 3 长线路等值模型

结合图 3 对式(1)进行故障分量运算可得

$$\begin{aligned} \dot{U}_F = & \left(\frac{\dot{Z}_1 \dot{Y}_1}{2} \cdot \alpha^2 + 1 \right) \dot{U}_{M1} - (\dot{I}_{M1}) \cdot \alpha \dot{Z}_1 \\ & + \left(\frac{\dot{Z}_2 \dot{Y}_2}{2} \cdot \alpha^2 + 1 \right) \dot{U}_{M2} - (\dot{I}_{M2}) \cdot \alpha \dot{Z}_2 \\ & + \left(\frac{\dot{Z}_0 \dot{Y}_0}{2} \cdot \alpha^2 + 1 \right) \dot{U}_{M0} - (\dot{I}_{M0}) \cdot \alpha \dot{Z}_0 \quad (2) \end{aligned}$$

化简有

$$\begin{aligned} \dot{U}_F = & \left[\frac{\dot{Z}_1 \dot{Y}_1}{2} (\dot{U}_M - \dot{U}_{M0}) + \frac{\dot{Z}_0 \dot{Y}_0}{2} \dot{U}_{M0} \right] \cdot \alpha^2 \\ & + [- (\dot{I}_M - \dot{I}_{M0}) \dot{Z}_1 - \dot{I}_{M0} \dot{Z}_0] \cdot \alpha \\ & + \dot{U}_M \quad (3) \end{aligned}$$

式中 $\dot{Y}_1 = \frac{j}{X_{C1}}$; $\dot{Y}_0 = \frac{j}{X_{C0}}$; X_{C1} 、 X_{C0} 为线路全长正序容

抗; $\dot{Z}_1$ 、 $\dot{Z}_0$ 为线路全长正序阻抗。

由于接地电阻成阻性,分析可知 $\dot{U}_F$ 与 $\dot{I}_F$ 同相位。

可得

$$\text{Im} [\dot{U}_F^* \dot{I}_F] = 0 \quad (4)$$

展开方程可得

$$\begin{aligned} \text{Im} \left[\frac{\dot{Z}_1 \dot{Y}_1}{2} (\dot{U}_M - \dot{U}_{M0})^* \dot{I}_F + \frac{\dot{Z}_0 \dot{Y}_0}{2} \dot{U}_{M0}^* \dot{I}_F \right] \cdot \alpha^2 \\ + \text{Im} [- (\dot{I}_M + \dot{K} \cdot 3 \dot{I}_{M0}) \dot{Z}_1^* \dot{I}_F] \cdot \alpha \\ + \text{Im} [\dot{U}_M^* \dot{I}_F] = 0 \quad (5) \end{aligned}$$

解此一元二次方程,得到一个根(根据 $0 \leq \alpha \leq 1$ 去掉一个伪解)即为测距结果。

在此方程中,各参数差动保护装置都可获得,而且由于长线路所产生的分布电容的影响可被线路保护装置并联电抗器补偿和电容电流补偿所消除,大大地减少了由于系统运行方式的不确定性增加的测距算法的复杂性。

2 测距算法的验证

2.1 EMTDC 仿真验证

针对分布参数的测距方案,采用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件搭建仿真模型。仿真系统采用长度为 200 km 的典型双端 220 kV 系统模型,如图 4 所示。

测试结果见表 1~表 4。

通过各因素条件下,双端测距优化算法的仿真结果分析可知,双端测距优化算法不受故障位置等各因素影响,具有较高的精确性,能够方便准确地应用于差动保护装置。

2.2 RTDS 仿真验证

在长园深瑞的光纤分相纵差成套保护装置 PRS-753S 上实现了双端测距优化算法,实现了分布参数的双端测距方案。搭建 RTDS 试验采用的是双回线模型,线路全长 200 km,具体模型如图 5 所示。

测试结果见表 5~表 7。

由表 5~表 7 分析可知,针对各种影响因素,基于光纤差动保护装置的双端测距优化算法都具有较高精度。

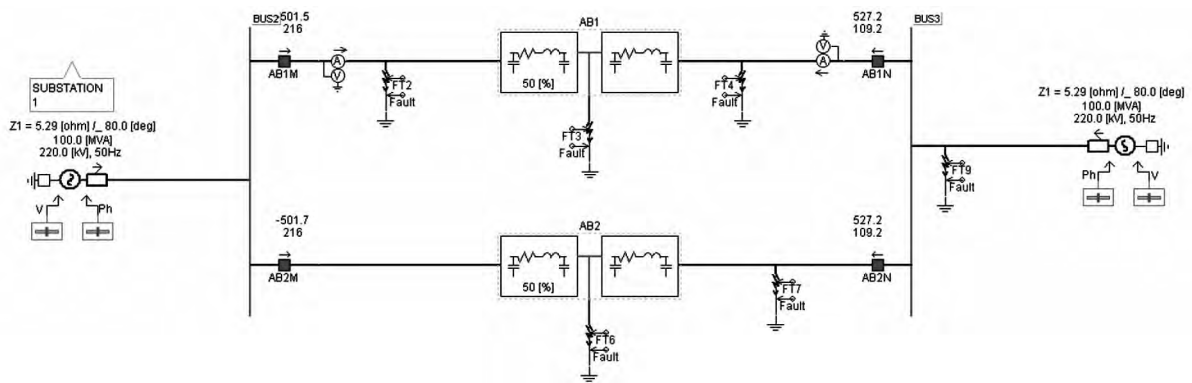


图 4 EMTDC 仿真模型

表 1 A 相金属性接地短路故障分析故障位置因素

故障位置 / %	M 侧故障电压 幅值 / V	M 侧故障电流 幅值 / A	N 侧故障电压 幅值 / V	N 侧故障电流 幅值 / A	测距结果	误差分析 / %
20	44.26	3.42	52.34	1.08	0.197 8	1.10
40	51.91	2.01	53.05	1.40	0.398 8	0.30
50	53.26	1.57	53.19	1.58	0.499 9	0.02
60	53.55	1.38	51.28	1.96	0.601 0	0.17
80	53.97	1.04	45.82	3.72	0.801 7	0.21
100	49.01	1.01	0.001	21.99	0.998 9	0.11

表 2 线路 50% 处发生接地短路故障分析故障类型因素

故障类别		M 侧故障电压 幅值 /V	M 侧故障电流 幅值 /A	N 侧故障电压 幅值 /V	N 侧故障电流 幅值 /A	测距结果	误差分析 /%
Ag		53.3	1.11	37.73	1.12	0.499 9	0.02
BCg	B 相	50.35	2.62	50.14	2.74	0.499 9	0.02
	C 相	50.57	2.59	51.06	2.45		
CA	C 相	57.87	2.44	57.80	2.64	0.499 9	0.02
	A 相	51.63	2.64	52.06	2.44		
ABCg	A 相	49.36	3.26	49.15	2.94	0.499 9	0.02
	B 相	49.29	2.87	49.29	2.92		
	C 相	49.22	2.52	49.43	2.91		

表 3 50% 线路处 A 相接地点故障接地电阻影响分析

过渡电阻 / Ω	M 侧故障电压 幅值 / V	M 侧故障电流 幅值 / A	N 侧故障电压 幅值 / V	N 侧故障电流 幅值 / A	测距结果	误差分析 / %
0	53.26	1.57	53.19	1.58	0.499 9	0.02
1	53.12	1.64	53.05	1.67	0.499 9	0.02
10	53.76	1.40	53.62	1.56	0.499 8	0.04
50	56.52	0.65	56.24	0.96	0.500 0	0.00
100	57.23	0.29	57.02	0.65	0.499 9	0.02

表 4 两侧电源相角差的影响分析

两侧相角 / °	M 侧故障电压 幅值 / V	M 侧故障电流 幅值 / A	N 侧故障电压 幅值 / V	N 侧故障电流 幅值 / A	测距结果	误差分析 / %
10	52.91	1.67	52.62	1.68	0.500 1	0.02
20	52.62	1.75	52.41	1.65	0.500 1	0.02
40	56.03	1.79	51.35	1.70	0.500 9	0.18
60	53.97	1.90	50.07	1.77	0.500 6	0.12

表 5 参数对称传输情况下的简单金属性瞬时短路故障

序号	故障类型	M 侧测距 /m	N 侧测距 /m	测距误差 /%
1	30% - AN	58.7	141.3	0.65
2	50% - ABN	99.7	100.3	0.15
3	30% - BC	61.1	138.9	0.55
4	70% - ABCN	140.2	59.8	0.10

表 6 参数不对称传输情况下的简单金属性瞬时短路故障

序号	故障类型	M 侧测距 /m	N 侧测距 /m	测距误差 /%
1	30% - AN	62.8	137.2	1.4
2	50% - ABN	99.9	100.1	0.05
3	30% - BC	61.5	138.5	0.75
4	70% - ABCN	140.3	59.7	0.15

表 7 参数对称传输情况下的高阻接地故障

序号	故障类型	M 侧测距 /m	N 侧测距 /m	测距误差 /%
1	30% - AN - RG50	62.2	137.8	1.10
2	50% - AN - RG50	101.5	98.5	0.75
3	70% - AN - RG50	141.1	58.9	0.55

参考文献

[1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.

[2] 朱声石. 高电压电网继电保护原理与计算 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[3] 全玉生, 杨敏中, 王晓蓉, 等. 双端测距中的自适应线路参数在线估计 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (11): 26 - 30.

[4] 康小宁. 基于参数识别的高压输电线路故障测距研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2006.

[5] T Takagi, Y Yamakosi, M Yamaura, et al. Development of a New Type Fault Locator Using the One Terminal Voltage and Current Data [J]. IEEE Trans. on PAS., 1982, 101(8): 2892 - 2898.

作者简介:

印吉景 (1976), 工程师, 从事电力系统生产管理;

刘宏君 (1974), 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护和智能变电站的研究;

潘军军 (1980), 硕士, 工程师, 从事电力系统继电保护和智能变电站的研究;

余传坤 (1989), 硕士, 工程师, 从事电力系统继电保护研究。

(收稿日期: 2014 - 01 - 06)

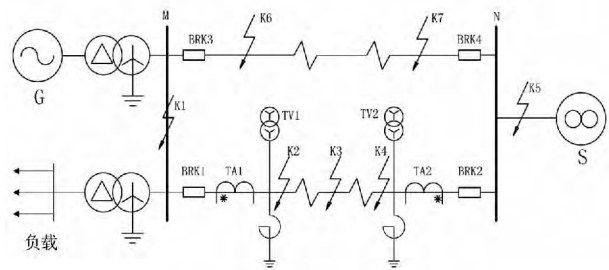


图 5 试验模型

3 结 语

针对提出的双端测距优化算法进行了 PSCAD 仿真分析, 搭建长度为 200 km 的典型双端 220 kV 系统模型, 利用差分算法后用全波傅氏提取基波相量以进行双端测距优化算法的计算。仿真结果充分地证明了双端测距优化算法的正确性和稳定性, 并详细分析了可能对线路故障测距结果产生影响的各类因素对算法的影响情况。最后的仿真实验结果表明, 故障位置、故障类型、过渡电阻、两侧系统阻抗以及两侧电源相角差等因素都不会对双端测距优化算法的结果精度产生影响。在长园深瑞的光纤分相纵差成套保护装置 PRS - 753S 上实现了双端测距优化算法, 证明了理论的正确性。

考虑脆弱性的复杂环网最小断点集计算新方法

张向亮¹ 徐文¹ 张向军² 吕飞鹏³

(1. 景德镇供电公司, 江西 景德镇 333000; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

3. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 分析了断点脆弱性的两个表现形式, 并以线路电气介数衡量断点的脆弱程度。将断点脆弱性作为断点选取的判据之一, 基于该指标和 0-1 状态的人工鱼群算法, 给出了一种多组同基最小断点集的选取方法。为了降低搜索时间的复杂度, 引入了禁忌表。最后通过算例系统验证了算法的可行性和正确性。

关键词: 最小断点集; 断点脆弱性; 线路电气介数; 人工鱼群算法; 禁忌表

Abstract: Two forms of break point vulnerability are analyzed and the electric betweenness in the lines is taken to measure the vulnerability. Break point vulnerability is used as one criterion of choosing break point. A method for selecting the optimum minimum break point set (MBPS) from multi-MBPS with the same cardinal number is presented based on this indicator and 0-1 state artificial fish swarm algorithm. In order to reduce the complexity of searching time, the tabu list is introduced. Finally, the feasibility and correctness are proved with the examples of simulation.

Key words: minimum break point set (MBPS); vulnerability of break point; electric betweenness in line; artificial fish swarm algorithm; tabu list

中图分类号: TM772 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0061-06

现代电网逐渐形成为大规模多环复杂网络, 这给电力系统的安全稳定运行提出了严峻的考验和挑战。研究表明, 很多大面积停电事故与继电保护的不正确动作密切相关^[1-2]。保护误动引发系统连锁故障继而导致大停电事故, 这会严重影响系统运行的安全与稳定。不同保护装置误动造成的影响程度与波及范围有差异, 处于关键位置的保护误动后果更严重, 影响更大。断点(break point, BP)保护通常不与其他保护配合整定, 使得系统故障时断点保护动作的选择性无法得到保证, 可能会出现越级误动, 使断点成为整个电网的一个脆弱环节。断点的脆弱性易引起保护越级误动, 导致断点保护所在的线路断开, 造成潮流转移和重新分布, 可能会引起过载跳闸事故, 给电网埋下了重大的安全隐患^[3]。处于关键位置的断点保护装置发生越级误动会给电力系统、国民经济、人民生活水平带来更为负面的影响, 造成更严重的后果。为了降低断点保护误动的影响程度及提高系统运行的可靠性、安全性、经济性, 在保护配置方式及整定计算、系统运行方式及网络结构变化较大时应优先考虑和监护最脆弱的断点保护。有鉴于此, 需要提出一种行之有效的断点保护脆弱性的评估方法。

在大型复杂环网中, 满足微机保护装置的“四性”要求较为不易。为使保护装置定值更合理、更准确, 需要对整定计算方法进行更加深入的研究。整定计算过程包含 4 个重要步骤, 即寻找网络中所有有向基本回路、寻找相关顺序矩阵、求解主/后备保护对和计算最小断点集(minimum break point set, MBPS), 其中 MBPS 求取至关重要。如果选择了不恰当的整定计算起点, 可能会延长整个电网整定配合的收敛速度, 甚至不收敛, 也可能对系统的安全性和稳定性造成严重的破坏。目前相关文献和有关整定计算程序一般能求解出多组 MBPS^[4-6], 优解和劣解均混于其中, 如何从中选取最优 MBPS 或在 MBPS 算法中直接求出最优 MBPS 用于整定计算的问题亟待解决。基于此, 提出了一种基于线路电气介数的断点脆弱性的分析方法, 并基于断点脆弱性和改进的人工鱼群算法(artificial fish swarm algorithm, AFSA)^[7]选取最优 MBPS, 以全新的视角研究多组同基 MBPS 最优选取问题。

1 断点脆弱性

由于断点保护自身的整定特点, 使其成为电网

中的一个脆弱元件,为减小断点脆弱性对系统的负面影响,需对断点脆弱性的形成原因和脆弱程度进行深入的分析研究。

1.1 断点脆弱性分析

断点保护的整定原则具有特殊性,不与相邻其他线路保护进行配合整定,可能因保护定值按灵敏性进行整定而无法满动作选择性的要求,继而发生越级误动现象,扩大了停电范围;也可能因保护定值按动作选择性进行整定而无法符合保护定值灵敏度的要求,继而发生拒动,造成设备的损坏或系统稳定的破坏。保护越级误动和拒动均会给电力系统带来巨大的影响和损失。可见,断点脆弱性的表现形式体现为无法满足动作选择性而越级误动和不符合保护定值灵敏性而拒动。下面以距离保护为例对断点脆弱性的两个表现形式予以说明。

(1) 按保护灵敏性整定

保护装置的灵敏性是指在其保护范围内出现故障或不正常状态时的反应能力^[8]。

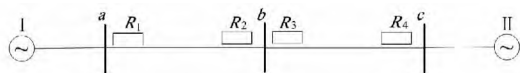


图1 简单网络

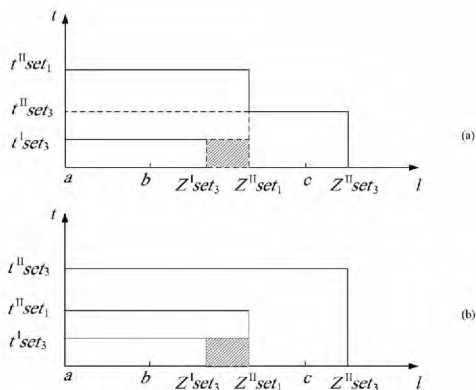


图2 第1种定值配合

在图1所示的简单网络中,分析断点保护按保护灵敏性进行整定而无法满动作选择性之后发生越级误动的过程。以 R_1 的距离II段保护定值按与 R_3 的距离II段保护定值配合为例。保护 R_1 不为断点和为断点的定值配合如图2所示。

在保护 R_1 不为断点的情况下, R_1 与 R_3 的定值配合关系如图2(a)所示。 R_1 的距离II段保护动作值与动作时限均按照与 R_3 的距离II段保护动作值与动作时限配合整定,如式(1)所示。

$$\begin{aligned} Z_{set1}^{II} &= K_{rel}^{II} Z_{set3}^{II} \\ t_{set1}^{II} &= t_{set3}^{II} + \Delta t \end{aligned} \quad (1)$$

在图2(a)中,若在线路(b,c)的阴影区域内发生故障,由于保护 R_1 与 R_3 的动作时限按配合整定,此时 $t_{set1}^{II} > t_{set3}^{II}$, R_3 的距离I段不动作,其距离II段动作经过 t_{set3}^{II} 切除故障,保护 R_1 的距离保护II段不动作,保证了其动作的选择性。此外, R_1 的距离保护II段的灵敏系数 $K_{sen} \geq 1.25$ 。

在 R_1 为断点的情况下, R_1 与 R_3 的定值配合关系如图2(b)所示。若 R_1 的距离II段定值按照保护灵敏性进行整定,其动作定值与其不为断点情况下的距离II段动作定值相等,均为 Z_{set1}^{II} ,灵敏系数 $K_{sen} \geq 1.25$ 符合灵敏性要求。另一方面, R_1 的距离II段动作时限与 R_3 的距离II段动作时限不满足选择性要求,有 $t_{set1}^{II} < t_{set3}^{II}$ 。在图1(b)中,若在线路(b,c)的阴影区域内发生故障,则 R_4 的主保护(距离I段)先瞬时动作跳闸,再经过 t_{set1}^{II} 之后, R_1 的距离II段保护发生误动,越级跳闸断开了线路(b,c)切除故障,扩大了停电范围,造成了不必要的损失。

(2) 按保护选择性整定

保护动作选择性是指其发生动作时,只把故障部分从电力系统中切除,尽可能缩小停电面积,用于确保系统中非故障元件仍可以安全稳定运行^[8]。

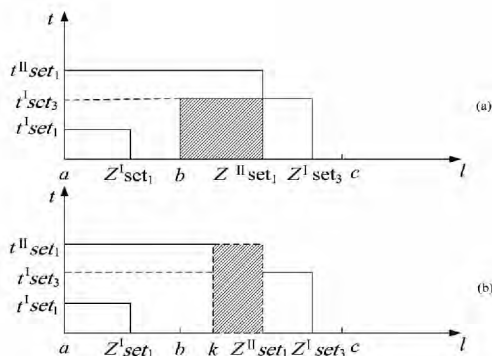


图3 第2种定值配合

在图1中分析断点按保护选择性进行整定而无法满保护的灵敏性要求之后发生拒动的过程。以 R_1 的距离II段保护定值按与 R_3 的距离I段保护定值配合为例。 R_1 不为断点和为断点的定值配合如图3所示。

在 R_1 不为断点的情况下, R_1 与 R_3 的定值配合关系如图3(a)所示。 R_1 的距离II段保护动作值与动作时限均按照与 R_3 的距离I段保护动作值与动作时限配合整定,如式(2)所示。

$$\begin{aligned} Z_{set1}^{II} &= K_{rel}^{II} Z_{set3}^I \\ t_{set1}^{II} &= t_{set3}^I + \Delta t \end{aligned} \quad (2)$$

在图 3(a) 中,若在线路(b, c)的阴影区域内发生故障,由于 R_1 与 R_3 的动作时限按配合整定,此时 $t_{set3}^I < t_{set1}^I$, R_3 的距离 I 段保护经过 t_{set3}^I 动作切除故障,而 R_1 的距离 II 段保护不动作,保证了 R_1 动作的选择性。此外, R_1 的距离保护 II 段的灵敏系数 $K_{sen} \geq 1.25$, 满足了其灵敏性要求。

在保护 R_1 为断点的情况下, R_1 与 R_3 的定值配合关系如图 3(b) 所示。若 R_1 的距离 II 段定值按照保护选择性要求进行整定,其动作时限与其不为断点情况下的距离 II 段动作时限相等,均为 t_{set1}^{II} ,从 R_1 不为断点的情况下分析可知,这样保证了保护动作的选择性。图 3(b) 中的 k 是此时 R_1 的距离 II 段保护的定值,该值无法满足灵敏性要求,有 $K_{sen} < 1.25$, $k < Z_{set1}^{II}$ 。在图 3(b) 中,若在线路(b, c)的阴影区域内发生故障且 R_3 的主保护(距离 I 段)及近后备保护拒动时, R_1 的距离 II 段保护作为 R_3 的远后备保护,因其灵敏度不够导致自身拒动,使故障越级,扩大停电范围,造成更多设备的损坏,严重破坏了系统的安全稳定运行。

在实际的整定计算中,断点保护定值通常按照保护灵敏性进行整定,如此,其动作选择性无法得到保证。当系统发生故障时,极有可能发生越级误动现象,断开断点所在线路,可能会引起线路相继过载,形成连锁过载跳闸事故,甚至造成大规模停电事故,其脆弱性给系统埋下了重大的安全隐患。断点的脆弱性与断点保护越级误动切除所在线路造成的后果密切相关,故可将断点脆弱性评估转化为断点所在线路的脆弱性评估。

1.2 断点脆弱性评估

潮流是衡量电网安全稳定运行水平的重要指标之一,其本质上是一种电气介数。在电网中,通常是按照欧姆定律和基尔霍夫定律在线路上传输功率。在复杂网络理论的有权电网模型上,没有假设潮流是沿着最短路径传播,如此,物理意义明确,更符合电力系统的实际情况。

目前,有较多文献以线路介数作为判据用于评估线路在系统中的重要程度,但是该判据仍然存在某些问题,如以其评估线路重要性时短线路容易具有更大的介数,但是在实际电网中,并非短线路具有更重要的地位,相反在多数情况下其重要性更低^[9]。

结合上述两点,采用新的线路脆弱性指标,定义线路(m, n)的电气介数计算公式为

$$B(m, n) = \sum_{i \in G, j \in L} |I^{ij}(m, n)| \quad (3)$$

式中 $I^{ij}(m, n)$ 是在发电-负荷节点对(i, j)之间加上单位注入电流源后,在线路(m, n)上引起的分布电流; G 和 L 分别为发电机节点集合和负荷节点集合。

线路电气介数 $B(m, n)$ 反映了发电-负荷节点对之间注入单位电流源后分布电流对线路的利用情况和量化了线路对分布电流传播的贡献。若 $B(m, n)$ 越大,表明线路(m, n)的作用越大,重要程度和脆弱性也越大。越重要越脆弱的线路断开将引起潮流大范围转移,可能因其他线路相继过载跳闸造成大停电事故,说明在此线路上的断点保护就越脆弱。断点脆弱性可作为多组同基 MBPS 的最优选取问题的判据之一。

2 基于人工鱼群算法的 MBPS 最优选取方法

将断点脆弱性指标引入人工鱼群算法,改进该算法,利用人工鱼群算法优良的全局寻优能力^[10]求解 MBPS 计算的数学模型^[11-15],获取最优 MBPS,在此过程中,构造了鱼群 4 种寻优行为的 0-1 状态计算公式。为了获取最优 MBPS,需在计算过程中基于一种选优指标进行选取,这里以断点脆弱性作为选优指标,以人工鱼群算法求解 MBPS 数学模型,为了将断点脆弱性合理地融入鱼群算法中,将断点脆弱性定义为鱼群对食物的喜爱程度,选优的优先级次于食物浓度。基于上述两点,以改进的人工鱼群算法求取最优 MBPS。下面对鱼群算法中各寻优行为的 0-1 状态公式、食物浓度、食物喜爱度、禁忌表分别予以说明。

2.1 食物浓度和食物喜爱度

鱼当前状态的食物浓度及自身在感知域内搜寻到其他位置的食物浓度是引领和指导其作出决策判断的依据。只有食物浓度高的地方才会吸引更多鱼前来扑食。在基础的人工鱼群算法中,定义目标函数 $Y=f(X)$ 为食物浓度,而本章的目标函数是求极小值,为了能与鱼扑食依据相一致,即寻找食物浓度最高的位置,在此定义食物浓度 Y 为本章目标函数的倒数,如式(4)所示。

$$Y = \frac{1}{\min_{j=1}^N X_j} \quad (4)$$

本章约定食物浓度为鱼寻优依据的第一指标,

即优先级最高。

鱼对不同食物的喜爱程度有差异,若鱼群在寻优过程中,在公告板上记录最高的食物浓度时对应了多组最优状态,各组状态的食物通常对鱼的吸引力是有区别的,为了在上述情况下区分这种差异,找出鱼最愿意最可能去的位置,本章定义了鱼的食物喜爱度 Y_{love} ,基于该指标进行最优解的选择,其计算如式(5)所示。

$$Y_{love} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N (X_i \cdot Vul(r_i))} \quad (5)$$

式中, $Vul(r_i)$ 表示保护 r_i 的断点脆弱性。

本章约定食物喜爱度为鱼寻找优解依据的第二指标,即优先级别次于食物浓度。

目标函数的约束条件不变,如文献[11-15]所示。

2.2 觅食行为的 0-1 状态公式

假定人工鱼 i 的当前状态向量为 $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iN}\}$, 如果在其感知域内随机选择一个状态向量 $X_j = \{X_{j1}, X_{j2}, \dots, X_{jN}\}$, 若此时食物浓度大于当前位置的食物浓度, 鱼 i 向 X_j 方向移动一步, 其新状态向量 $X_{i+1} = \{X_{(i+1)1}, X_{(i+1)2}, \dots, X_{(i+1)N}\}$ 中各元素的计算公式如式(6)所示; 相反, 人工鱼 i 再重新随机选择其他鱼的状态, 判断是否满足行进条件, 反复试探 Try_number 次后, 若仍然不满足行进条件, 则鱼 i 随机移动一步, 即是鱼的随机行为, 其新状态向量的计算公式亦如式(6)所示。

$$X_{(i+1)k} = \begin{cases} X_{ik} & X_{ik} = X_{jk} \\ \max(0, X_{ik} - 1) & X_{ik} \neq X_{jk} \end{cases} \quad (6)$$

2.3 聚群行为的 0-1 状态公式

设人工鱼当前状态向量为 $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iN}\}$, 搜寻到其感知域内的伙伴个数为 n_f 及中心位置状态 $X_c = \{X_{c1}, X_{c2}, \dots, X_{cN}\}$, 其中的元素计算公式如式(7)所示。若人工鱼所在位置的食物浓度 Y_i 与中心位置的食物浓度 Y_c 满足公式(8)所示关系, 表明中心位置的食物丰富且不太拥挤, 可向中心位置方向行进一步, 其新状态向量中各元素的计算公式如(9)所示; 若两者不满足公式(8)所示关系, 则进行觅食行为。

$$\begin{cases} A = \frac{1}{n_f} \sum_{j=1}^{n_f} X_{jk} \\ X_{ck} = \begin{cases} 1 & A \geq 0.5 \\ 0 & A < 0.5 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{Y_c}{n_f \cdot \delta} > Y_i \quad (8)$$

$$X_{(i+1)k} = \begin{cases} X_{ik} & X_{ik} = X_{ck} \\ \max(0, X_{ik} - 1) & X_{ik} \neq X_{ck} \end{cases} \quad (9)$$

2.4 追尾行为的 0-1 状态公式

设当前人工鱼 i 的状态向量为 $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iN}\}$, 搜索到其感知域内食物浓度最高为 Y_j , 对应的人工鱼为 j , 其状态向量为 $X_j = \{X_{j1}, X_{j2}, \dots, X_{jN}\}$ 。若两者所在位置食物浓度满足公式(10)所示关系, 表明人工鱼 j 所在位置的食物丰富且不太拥挤, 可向 X_j 方向行进一步, 人工鱼 i 的新状态向量中各元素的计算公式如式(11)所示; 若两者不满足公式(10)所示关系, 则进行觅食行为。

$$\frac{Y_j}{n_f \cdot \delta} > Y_i \quad (10)$$

$$X_{(i+1)k} = \begin{cases} X_{ik} & X_{ik} = X_{\max k} \\ \max(0, X_{ik} - 1) & X_{ik} \neq X_{\max k} \end{cases} \quad (11)$$

2.5 禁忌表的引入

MBPS 计算是带有约束条件的 0-1 整数规划问题, 为此, 在人工鱼搜索到较优状态时, 其新状态不一定能满足求解模型中的约束条件, 需重新搜索以至于其自身新状态符合约束条件为止。在该情况下, 为能有效地避免重复搜索不符合条件的状态, 降低搜索时间的复杂度, 可引入禁忌表 Tabu()。在人工鱼一次迭代结束后, 禁忌表 Tabu() 中的各状态被清空, 为下次迭代的禁忌搜索做准备。在 MBPS 算法程序的觅食函数 gmjprey() 中, 觅食行为和随机行为用到了禁忌表 Tabu()。人工鱼的觅食行为随机选择其他鱼的状态, 然后判断是否满足行进条件, 反复试探 Try_number 次直至满足条件为止, 在此过程中, 把不满足约束条件的新状态对应的行进方向的指引状态放入禁忌表 Tabu() 中。若觅食行为没找到合适状态, 则跳出觅食循环后执行随机行为, 在此过程中, 如同觅食行为, 将不符合约束条件的状态对应的行进方向的指引状态放入禁忌表 Tabu() 中, 直至找出合适的新状态。若随机行为也找不到合适的新状态, 只能通过函数 InitOneProperState() 随机产生一个合格的状态。

2.6 利用人工鱼群算法对模型求解

人工鱼群算法的核心是: 通过对鱼群各寻优行为的评价, 选择当前最优行为予以执行, 最终到达食物浓度最丰富的地方。将其应用于 MBPS 计算问题, 可

描述为:通过对觅食行为、聚群行为、追尾行为的评估选择执行。经过多次迭代后,找到最大 Y 值对应的状态,将该状态下元素“1”对应的保护选为断点。

设人工鱼 i 的当前状态为 $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iN}\}$, 搜寻到其感知域内的伙伴个数为 n_f 及中心位置状态 $X_c = \{X_{c1}, X_{c2}, \dots, X_{cN}\}$, 通过聚群行为寻优, 以公式 (9) 计算其新状态向量 $X_{i \text{ next}1} = X_{i1 \text{ next}1}, X_{i2 \text{ next}1}, \dots, X_{iN \text{ next}1}$, 而该状态下的食物浓度以式 (4) 计算, 记为 $Y_{i \text{ next}1}$ 。人工鱼 i 搜索到其感知域内食物浓度最高为 Y_j , 对应的人工鱼为 j , 状态向量为 $X_j = \{X_{j1}, X_{j2}, \dots, X_{jN}\}$, 通过追尾行为寻优, 以公式 (11) 计算其新状态向量 $X_{i \text{ next}2} = \{X_{i1 \text{ next}2}, X_{i2 \text{ next}2}, \dots, X_{iN \text{ next}2}\}$, 而该状态下的食物浓度以式 (4) 计算, 记为 $Y_{i \text{ next}2}$ 。此时, 若 $Y_{i \text{ next}1} > Y_{i \text{ next}2}$, 表明人工鱼 i 通过聚群行为寻优效果优于追尾行为寻优效果, 其新状态向量 $X_{i \text{ next}} = X_{i \text{ next}1}$, 所在位置的食物浓度 $Y_{i \text{ next}} = Y_{i \text{ next}1}$; 若 $Y_{i \text{ next}1} \leq Y_{i \text{ next}2}$, 表明人工鱼 i 通过聚群行为寻优效果更好, 其新状态向量 $X_{i \text{ next}} = X_{i \text{ next}2}$, 所在位置的食物浓度 $Y_{i \text{ next}} = Y_{i \text{ next}2}$ 。人工鱼 i 一次寻优完成后, 将其新状态所在位置的食物浓度 $Y_{i \text{ next}}$ 与公告板上的食物浓度 $Y_{\max}$ 相比较, 若 $Y_{i \text{ next}} > Y_{\max}$, 则将公告板上的食物浓度和状态更新为 $Y_{i \text{ next}}$ 和 $X_{i \text{ next}}$; 若 $Y_{i \text{ next}} < Y_{\max}$, 则不更新公告板; 若 $Y_{i \text{ next}} = Y_{\max}$, 则需要以公式 (5) 分别计算状态 $X_{i \text{ next}}$ 和 $X_{\max}$ 的食物喜爱度 $Y_{(i \text{ next}) \text{ love}}$ 和 $Y_{(\max) \text{ love}}$, 若 $Y_{(i \text{ next}) \text{ love}} > Y_{(\max) \text{ love}}$, 则将公告板上的食物浓度和状态更新为 $Y_{i \text{ next}}$ 和 $X_{i \text{ next}}$; 若 $Y_{(i \text{ next}) \text{ love}} < Y_{(\max) \text{ love}}$, 则在公告板上增加食物浓度和状态 $Y_{i \text{ next}}$ 和 $X_{i \text{ next}}$; 否则, 不必更新公告板。上述关系可如式 (12) 所示, 如此, 等待其他鱼的一次迭代结束后准备下次迭代。当算法结束之后, 公告板上状态向量的“1”元素对应保护组成的集合即是要找的最优 MBPS。

$$[X_{\max}, Y_{\max}] = \begin{cases} [X_{i \text{ next}}, Y_{i \text{ next}}] & Y_{i \text{ next}} = Y_{\max} \text{ 且 } Y_{(i \text{ next}) \text{ love}} > Y_{(\max) \text{ love}} \\ \text{增加 } [X_{i \text{ next}}, Y_{i \text{ next}}] & Y_{i \text{ next}} = Y_{\max} \text{ 且 } Y_{(i \text{ next}) \text{ love}} = Y_{(\max) \text{ love}} \\ \text{不更新} & Y_{i \text{ next}} = Y_{\max} \text{ 且 } Y_{(i \text{ next}) \text{ love}} < Y_{(\max) \text{ love}} \\ \text{不更新} & Y_{i \text{ next}} < Y_{\max} \\ [X_{i \text{ next}}, Y_{i \text{ next}}] & Y_{i \text{ next}} > Y_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

3 算法步骤

人工鱼群算法的主要步骤如下所示。

步骤 1: 设置人工鱼群个体数 N , 一次移动的最大试探次数 Try_number, 迭代次数为 number, 感知距离为 Visual, 拥挤度因子为 δ ;

步骤 2: 随机生成 N 个符合约束条件的人工鱼个体状态, 形成初始鱼群, 即 N 组 $\{X_{ik}\}$ (其中 $i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, n$);

步骤 3: 算出初始各人工鱼当前状态所在位置的食物浓度, 将浓度最大值和此时的状态赋予公告板;

步骤 4: 所有人工鱼分别模拟聚群行为和追尾行为, 比较两种情况下鱼新状态所在位置的浓度, 选择食物浓度值最大的寻优行为予以执行, 两者的缺省行为是觅食行为;

步骤 5: 每条人工鱼一次迭代结束后, 计算自身状态的食物浓度和食物喜爱度, 并按照公式 (12) 决定是否更新公告板;

步骤 6: 当迭代次数不大于最大迭代次数时, 算法流程转向步骤 4; 否则, 终止迭代, 算法结束, 输出计算结果。

4 算例分析

在图 4 中, 包含 5 个节点、7 条线路和 14 个保护, 给出了线路电抗标么值, 选节点 5 为参考节点, 以线路电气参数计算各保护可能被选为断点的潜在脆弱性, 结果如表 1 所示。建立起有向基本回路矩阵 L 。

设置人工鱼群算法基本参数, 人工鱼群总数 $N = 50$, Try_number = 50, number = 10, Visual = 6, $\delta = 0.618$ 。

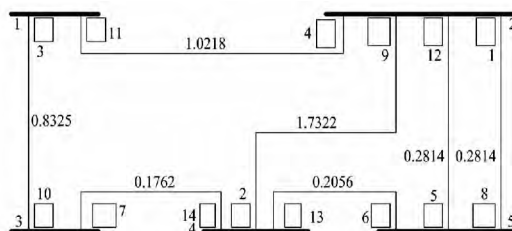


图 4 电力系统接线图

表 1 断点脆弱性

编号	断点脆弱性	编号	断点脆弱性	编号	断点脆弱性	编号	断点脆弱性
1	0.333 3	5	0.333 3	9	0.133 3	13	0.666 4
2	0.133 3	6	0.666 4	10	0.200 5	14	0.799 7
3	0.200 5	7	0.799 7	11	0.200 4		
4	0.200 4	8	0.333 3	12	0.333 3		

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

若不考虑食物喜爱度选优判据, 50 只鱼经过 5 次迭代后, 公告板上存在 5 组最优状态, 即: $\{2, 5, 8, 10\}$, $\{2, 5, 8, 11\}$, $\{2, 5, 8, 14\}$, $\{1, 4, 9, 12\}$, $\{1, 7, 9, 12\}$ 。而迭代 6 次后, 公告板上存在 6 组最优状态, 即: $\{2, 5, 8, 10\}$, $\{2, 5, 8, 11\}$, $\{2, 5, 8, 14\}$, $\{1, 4, 9, 12\}$, $\{1, 7, 9, 12\}$, $\{1, 3, 9, 12\}$ 。之后不管迭代几次, 均不会增加最优状态的个数, 即只存在 6 组最优解, 与文献[11]所求解相同。各组解的食物喜爱度大小如表 2 所示。若将食物喜爱度考虑进去, 经过 6 次迭代后, 公告板上存在 2 组最优状态, 即: $\{2, 5, 8, 11\}$, $\{1, 4, 9, 12\}$ 。整定工作者可任选一组作为整定计算的起点。通过断点脆弱性分析, 此组 MBPS 给电力系统安全稳定运行带来的潜在危害相对较小。

表 2 6 组解的食物喜爱度

最优解	食物喜爱度	最优解	食物喜爱度
$\{2, 5, 8, 10\}$	1.000 4	$\{1, 4, 9, 12\}$	1.000 3
$\{2, 5, 8, 11\}$	1.000 3	$\{1, 7, 9, 12\}$	1.599 6
$\{2, 5, 8, 14\}$	1.599 6	$\{1, 3, 9, 12\}$	1.000 4

5 结 论

针对断点脆弱性会给电力系统带来潜在的安全隐患, 提出了一种基于线路电气介数的断点脆弱性的分析方法, 并基于断点脆弱性和 0-1 状态的改进人工鱼群算法选取最优 MBPS, 可获得一组或多组最优解, 有效地降低了 MBPS 对电力系统安全稳定性的潜在危害, 避免了整定工作者在劣解和优解中盲目选取 MBPS, 对预防保护误动导致的大规模停电事故具有指导意义。

参考文献

- [1] Thorp J S, Phadke A G, Horowitz S H, et al. Anatomy of Power System Disturbances Importance Sampling [J]. Journal of Electric Power and Energy Systems, 1998, 20(2): 147-152.
- [2] S. H. Horowitz, A. G. Phadke. Third Zone Revisted [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 2006, 21(21): 23-29.
- [3] 王立永, 张保会, 王克球, 等. 考虑安全约束的输电断面经济传输容量及其计算 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(10): 1125-1128.
- [4] 刘丹, 吕飞鹏. 基于网络化简和配合关系的最小断点集计算方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 24-27.
- [5] 刘丹, 吕飞鹏. 基于蚁群算法的环网方向保护配合最小断点集计算 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(21): 27-31.
- [6] 吕飞鹏. 基于配合关系计算复杂环网保护最优配合顺序的新方法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 65-69.
- [7] 李春梅, 马良. 非线性 0-1 规划问题的人工鱼群算法 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(7): 2449-2450.
- [8] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理(增订版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [9] 张向亮, 吕飞鹏, 李运坤, 等. 基于保护重要度的多组同基最小断点集选取方法 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 90-93.
- [10] 江铭炎, 袁东风. 人工鱼群算法及其应用 [M]. 科学出版社, 2012.
- [11] 陈绩, 吕飞鹏, 黄妹雅. 确定复杂环网方向保护最小断点集的改进离散粒子群优化算法 [J]. 电网技术, 2008, 32(12): 90-94.
- [12] 吕飞鹏, 米麟书, 姜可薰. 环网方向保护配合最小断点集的神经计算方法 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 184-189.
- [13] 乐全明, 顾永朋, 吕飞鹏. 基于 GA 的环网方向保护配合最小断点集的计算 [J]. 继电器, 2002, 30(30): 23-26.
- [14] 周文越, 吕飞鹏, 廖小君. 基于人工蜂群算法的环网方向保护配合最小断点集计算 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 77-81.
- [15] 卢志刚, 谢晓伟, 李学平, 等. 一种求解复杂环网保护配合最优断点集的新方法 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 86-91.

作者简介:

张向亮(1987), 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护;
张向军(1980), 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护;
吕飞鹏(1968), 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护和故障信息处理智能系统。

(收稿日期: 2014-01-01)

含风电的配电网中线损计算方法改进

陶奕衫¹, 闫广新¹, 石 岩², 蒋 燕², 王玉蓉²

(1. 新疆电力设计院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆昌吉电力公司, 新疆 昌吉 831100)

摘 要: 针对风电接入配电网的特点, 对配电网线损计算方法进行了研究, 通过合理划分计算时段和灵活选择馈线首端对等效容量法进行了改进。根据风电出力的波动性, 提出以风电出力来动态划分计算时段, 采用改进等效容量法来计算含风电的配电网线损, 并在具体算例中验证了改进等效容量法的有效性。

关键词: 风电; 等效容量法; 线损

Abstract: Aiming at the characteristics of wind power integration with the distribution network, the method of line loss is studied. The equivalent capacity method is improved by the reasonable division of calculation time and the flexible choice for feeder head. According to the output of wind power, it is proposed that the calculation time can be divided dynamically by the output of wind power. With the improved equivalent capacity method, the line loss of distribution network with wind power is calculated, and the numerical examples verify the validity of this improved method.

Key words: wind power; equivalent capacity method; line loss

中图分类号: TM744 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2014)03-0067-03

0 前 言

电网线损是衡量电力系统的重要经济技术指标之一, 对电网线损的理论研究有助于降低网损, 提高电网经济效益。近年随着分布式电源接入容量的不断增加, 使电网潮流分布格局发生改变, 因此对分布式电源线损的研究越来越重要。文献 [1-5] 针对小电源并网的特点对线损的计算方法进行了研究, 对配电网的线损计算提供了理论依据。

风电由于其自身的特点, 通常认为它同时具备电源和负荷的双重特点, 风电的接入势必会对电网潮流流向产生影响, 进而影响线损。传统等效容量法主要适用于首端功率方向不变的网损计算, 对于潮流多变的含风电的配电网, 该方法存在一定的局限性。针对风电自身出力的特点, 合理划分时段, 分时计算网损, 在原有基础上对等效容量法进行改进, 提出了一种更加精确的含有风电的配电网的线损计算方法, 并以某含风电的配电网为算例, 对所提方法进行了验证。

1 等效容量法

等效容量法是在用等值电阻计算网损时, 将小

电源 (或均方根电流) 考虑为一种约束的方法。由于小电源侧的均方根电流已知, 就不需要假设与其连接的变压器容量成正比的关系, 也就不能像对用电量未知的用户那样按配电变压器容量划分总均方根电流, 于是引入了“等效容量”的概念, 就是指小电源的出力跟其余配电变压器的容量相比较产生的一种等效值, 小电源根据其等效容量和其余配电变压器共同“分享”首端均方根电流, 所得值应恰好等于小电源本身均方根电流; 同样, 其余变压器在分配首端均方根电流时也需要考虑小电源等效容量。配电变压器和中压负荷等都可视为负的小电源, 都可用等效容量法来处理。

电源等效容量为

$$S_s = \frac{-I_{jfs}}{I_{j0} + I_{jfs}} \sum S_i \quad (1)$$

式中 I_{j0} 为配电网首端均方根电流; I_{jfs} 为分布式电源注入的均方根电流; S_i 为每台配电变压器额定容量。

配电线路等值电阻 R_L 和配电变压器线圈等值电阻 R_T 分别为

$$R_L = (\sum_{i=1}^m S_{ei}^2 R_i) / (S_{e\Sigma} + S_s)^2 \quad (2)$$

$$R_T = (U_e^2 \sum \Delta P_{ki} \times 10^3) / (S_{T\Sigma} + S_s)^2 \quad (3)$$

式中 S_{ei} 为第 i 段线路的配电变压器额定容量; $S_{e\Sigma}$

为该条配电线路总配电变压器额定容量; S_s 为分布式电源等效容量; R_i 为第 i 段导线的电阻; U_e 为配电变压器高压侧额定电压; ΔP_{ki} 为第 i 节点配电变压器的额定短路损耗功率; m 为线路配电变压器总数。

电能损耗为

$$\Delta P_L = 3 \times 24 \times 10^{-3} I_{j0}^2 R'_L \quad (4)$$

$$\Delta P_T = 3 \times 24 \times 10^{-3} I_{j0}^2 R'_T + \sum \Delta P_{0i} \times 24 \quad (5)$$

综合上式可以看出: 由于式中 I_{j0} 为均方根电流, 不能反映出功率流动方向变化引起线损的变化。因此等效容量法只适用于功率由首端流向配电网的计算, 但在实际电网中, 负荷和电源的出力一个动态平衡的过程, 当小电源出力无法在配电网中完全消纳时会倒送入主网, 这就对等效容量法在线损中的计算提出了新的要求。

2 改进等效容量法

2.1 计算时段的选择

风电由于其自身的特点, 受风资源条件的制约, 出力随风速大小波动较大, 如以整点时刻的输出功率来计算线损, 均方根电流的计算误差较大, 从而严重影响线损计算值。因此, 对于含风电的配电网, 合理划分计算时段就显得尤为重要。这里提出在含风电的配电网中, 根据风电实时出力情况, 将一天合理分成若干个计算时段, 每时段风电出力波动较小, 分时计算, 且馈线首端潮流方向不变。

2.2 馈线首端的选择

风电出力不稳定, 即时会体现电源特性, 又会出现负荷特性, 这就决定了在配电变压器馈线首端外送时倒吸电量的情况出现。若单以配电网出口作为线损计算首端, 当配电网出口出现供电量较小时, 计算结果会与实际情况相差较大。因此合理选择馈线首端就成为计算线损的关键。

选择馈线首端时, 分为如下 3 个时段。

1) 风电单独供电时段。当风电注入功率能满足配电网时, 配电网出口作为一个空载及负载损耗为 0 的变压器, 与其他变压器一起参与分配首端的均方根电流, 风电体现电源特性, 此时风电等效容量为

$$S_s = \frac{-I_{jfs}}{I_{j0} + I_{jfs}} \sum S_i \quad (6)$$

2) 风电场注入功率小于 0 时, 选择配电网出口

作为馈线首端, 风电场体现负荷特性, 根据等效容量法分取首端均方根电流。风电等效容量为

$$S_s = \frac{I_{jfs}}{I_{j0} - I_{jfs}} \sum S_i \quad (7)$$

3) 配电网出口和风电场同时向配电网供电。

一般情况下, 选择配电网出口作为整条线路的馈线首端。但是, 如果配电网出口流过的功率变化比较频繁, 仍选择此点作为馈线首端的话, 线损理论计算将变得十分复杂, 在部分情况下 (如馈线首端电量为 0), 计算结果还会与实际情况不符。鉴于此种情况, 则提出如下方法: 由于风电的输出功率在不断变化, 要找到一个合理的风电出力点, 在这一点, 不论以风电为馈线首端还是以配电变压器出口为馈线首端计算线损, 其线损结果都相等, 以计算出的这风电出力 (主要是有功功率) 为分界点, 当风电出力大于这一出力时, 以风电场作为馈线首端, 反之, 则以配电网出口作为馈线首端。这种方法能很好地避开电网交换功率较小时引起线损较小, 线损出现误差的情况。

①以风电场作为首端, 计算线损公式为

$$A_1 = 3 \times \frac{P_f^2 + Q_f^2}{3 \times u \times t} \times R_0 \quad (8)$$

其中 P_f 、 Q_f 为风电有功功率和无功功率; t 为时间; R_0 为等效电阻。

②以配电网出口作为首端计算线损公式为

$$A_2 = 3 \times \frac{P_1^2 + Q_1^2}{3 \times u \times t} \times R_1 \quad (9)$$

其中 P_1 、 Q_1 为配电变压器出口有功功率和无功功率; t 为时间; R_1 为等效电阻。

最后, 将分段计算好的线损率相加, 即为总线损。所提出的改进等效容量法, 其基本思路如图 1。

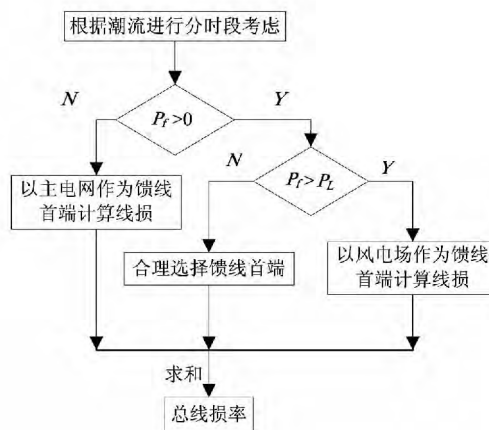


图 1 改进等效容量法示意图

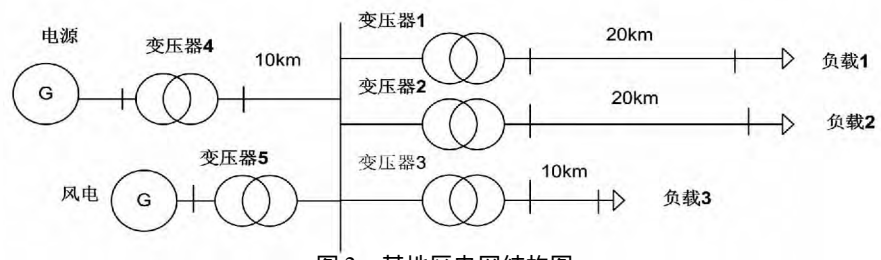


图 2 某地区电网结构图

3 改进等效容量法计算算例

为验证该方法的有效性,建立如图 2 所示的电网结构,该网架为 35 kV 配电网,配电变压器容量为 ST1 = 10 MVA, ST2 = 10 MVA, ST3 = 30 MVA, ST4 = 20 MVA, 共为 70 MVA,总短路损耗功率为 4 MW。算例中电网的分布和负荷节点装设的变压器额定容量成正比,各节点电压相同,且等于网络电压,不考虑电压降。

风电场出力如表 1。

表 1 某风电场有功功率出力

T /h	P /MW	T /h	P /MW
0:00 ~ 2:00	29.3 ~ 30.5	12:00 ~ 3:00	9.8 ~ 10.4
2:00 ~ 2:30	34.7 ~ 36.0	3:00 ~ 3:30	-3.3 ~ 4.4
2:30 ~ 3:00	26.0 ~ 29.0	3:30 ~ 4:00	-6.0 ~ 7.2
3:00 ~ 5:00	41.5 ~ 43.2	4:00 ~ 7:00	-1.3 ~ -2.0
5:00 ~ 7:00	19.8 ~ 20.7	7:00 ~ 9:00	14.7 ~ 16.0
7:00 ~ 8:00	22.0 ~ 24.5	9:00 ~ 11:00	19.7 ~ 21.0
8:00 ~ 10:00	16.2 ~ 16.8	11:00 ~ 11:20	34.5 ~ 36.2
10:00 ~ 12:00	13.0 ~ 13.9	11:20 ~ 12:00	39.8 ~ 40.2

基于以上信息,在 MATLAB 上编程计算传统等效容量法和改进等效容量法的理论线损、日线损电量及线损率,如表 2。

表 2 不同线损计算方法比较

计算方法	线损电量	线损率
风电出力按整点分段方法	77.844 6	8.03
馈线首端不分段方法	8.792 5	0.91
改进等效容量法	57.485 1	5.93

结果分析:从上表数据可以看出,当采用风电出力按整点分段方法计算时,计算出的线损率较改进等效容量法计算出的结果偏大,是因为风电出力在不停地波动,选取整点时刻的风电出力不能代表整个时间段的风电出力,若此时整点时刻的风电出力较大,就会引起线损计算结果的偏大。而采用馈线首端不分段的方法进行计算时,由于在馈线首端交换功率较小甚至为 0 时,计算出的线损也较小甚至为 0,因此采用此方法计算出的线损率会出现误差,较改进等效容量法计算出的结果小。因此,改进等

效容量法能较好地计算含风电的配电网线损。

4 结 论

通过对 3 种方法的比较研究,可以看出改进的等效容量法通过合理划分计算时段、灵活选择馈线首端有效地提高了线损计算的准确度,因此所提出的改进等效容量法可较好地适用于含风电的配电网理论线损计算,使计算结果更加符合实际情况。

参考文献

[1] 彭建春,江晖,颜炳坤,等. 有小水电供电的配电网技术线损的计算方法[J]. 华中电力,1996,9(6):18-22.

[2] 李小龙,张旭辉,曾岸理,等. 小电源接入配网后的线损理论计算方法研究[J]. 电工电能新技术,2011(4):30-34.

[3] 施流忠,罗毅芳,刘巍,等. 配网线损理论计算中小电源问题的解决办法[J]. 华中电力,1997,10(5):9-11.

[4] 罗毅芳,刘巍,施流忠,等. 配网线损理论计算中小电源问题的解决办法——等效容量法[J]. 华中电力,1997,10(5):9-11.

[5] 王主丁,霍佳丽,赵俊光. 配网线损计算中等效容量法的局限及改进[J]. 重庆大学学报,2008,31(11):1317-1322.

[6] 刘庆珍,蔡金锭. 计及电压调节和分布式电源的配电网潮流分析[J]. 电工电能新技术,2010,29(4):14-17.

[7] 汪洋,王淑红. 配电网中小电源等效容量法的比较研究[J]. 广东输电与变电技术,2007(1):21-24.

[8] 丁心海,罗毅芳,刘巍,等. 配网线损理论计算的实用方法——改进迭代法[J]. 电网技术,2000,24(1):70-72.

[9] 丁心海,罗毅芳,刘巍,等. 改进配网线损计算方法的几点建议[J]. 电力系统自动化,2001,25(13):57-60.

[10] 廖学琦. 农网线损计算分析与降损措施[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

作者简介:

陶奕彩(1971),工程师,主要从事电力系统规划设计工作。
(收稿日期:2014-01-11)

并联电容器对变压器差动保护的影响

陈 实^{1,2} 郭 晓^{1,2} 张 尧^{1,2} , 史华勃³

(1. 国电南京自动化股份有限公司 江苏 南京 211100;

2. 南京国电南自电网自动化有限公司 江苏 南京 211100;

3. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘 要: 对变压器低压侧区内故障差动保护动作较慢的情况做了详细分析,指出其原因为并联电容器中的串联电抗器引起故障时刻并联电容器发生振荡放电,导致变压器励磁涌流判据闭锁差动保护。并分析了并联电容器振荡放电频率与电容器选型的关系,其产生的谐波分量对变压器励磁涌流判据的影响。通过 EMTDC 进行了仿真研究,提出了对变压器差动保护的励磁涌流判据的建议。

关键词: 变压器差动保护; 并联电容器; 励磁涌流; 谐振

Abstract: According to the slower operation of differential protection of internal fault in low voltage side of transformer, the reason is analyzed that the selection of serial reactor in the parallel capacitors leads to the oscillation discharge during the fault. And the transformer differential protection is blocked by transformer inrush criterion. Then the relationship between the oscillation discharge frequency of parallel capacitor and the type selection of capacitor is analyzed as well as the effects of harmonic component on transformer inrush criterion. Through the EMTDC simulation, the advices for the inrush current criteria of transformer differential protection are proposed.

Key words: transformer differential protection; parallel capacitor; inrush current; resonance

中图分类号: TM771 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0070-03

提出了对变压器差动保护涌流判据的建议。

0 引 言

并联电容器作为电网内主要的无功补偿装置已得到广泛应用,保证了电网运行的电压质量。而为了消除系统谐波和限制合闸涌流,电容器中往往串接电抗器。当并联电容器电源侧发生故障时,会形成 RLC 串联回路对地放电,当故障点位于变压器低压侧区内时,RLC 串联回路放电过程中所产生的暂态电流会流经变压器低压侧电流互感器,从而使得变压器差动保护的差流中谐波含量上升。变压器差动保护中设有励磁涌流闭锁判据,导致现场多次发生涌流闭锁判据误闭锁差动保护,尤其对于高阻抗变压器,低压侧短路时故障电流小,受电容器放电回路的影响更大,从而使变压器差动保护拒动或动作较慢的情况发生。

下面分析了电容器放电产生的谐振频率与并联电容器的选型关系,其谐振谐波分量对变压器励磁涌流判据产生的影响,并应用 EMTDC 进行了仿真,

1 并联电容器侧放电电流的分析

额定电抗率为并联电容器中串联电抗器的感抗和电容器组容抗的比值,即 $K = X_L/X_C$,若系统谐波以 n 次谐波为主,则应选取串联电抗器感抗值 X_L 使得: $(nX_L - X_C/n) > 0$,即 $K > 1/n^2$,例如当系统主要谐波为 5 次及以上谐波时, $K > 4\%$,当系统主要谐波为 3 次谐波时, $K > 11\%$ 。考虑到 LC 抑制回路的谐振频率必须低于系统可能出现的最低次谐波频率以及低压并联电容器的容量在工作过程中会逐渐降低,使谐振点往上漂移^[3],所以为了取得一定的裕度,对于 5 次及以上谐波,取 $K > 6\%$,对于 3 次谐波,取 $K > 12\%$ 。6% 和 12% 的电抗率也是目前并联电容器选型中最常用的电抗率,工程上为了同时抑制上述谐波,也可采用以上两种电抗率的电容器混用^[2]。

如图 1 所示,当系统 K1 点变压器低压侧区内

发生故障时,并联电容器对地形成RLC串联放电回路,其等值电路图如图2,由于并联电容器中电阻 R 很小 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$,因此放电过程为振荡放电,放电电流表达式为

$$i = \frac{u_0}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t) \quad (1)$$

其中,

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2; \delta = \frac{R}{2L}$$

当 $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 = \frac{1}{LC}$ 时,振荡频率为

$$\omega^2 = \frac{\omega_0^2}{K} \quad (2)$$

若 $K=6\%$,则振荡放电电流频率约为基波频率的4倍。

由此可以看到,变压器低压侧区内故障时,电容器振荡放电电流流过低压侧开关TA,计入变压器差动保护电流中,从而使差流中的谐波含量增大。

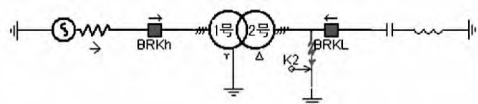


图1 系统接线图

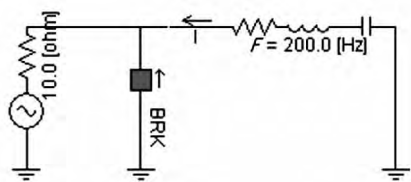


图2 故障时刻等值电路图

2 放电电流对变压器差动保护的影响

目前变压器保护应用鉴别励磁涌流的方法主要有2次谐波制动原理^[1]和波形对称原理^[4]。对于双重化配置的变压器保护,应使用不同原理的涌流识别判据,工程上的常规配置基本是一套使用2次谐波原理,一套使用波形对称原理。下面分别说明放电电流对两种涌流识别原理的影响。

2.1 对谐波制动原理的影响

谐波制动原理是根据励磁涌流中含有大量偶次谐波分量,其中又以2次谐波尤为明显,利用差流中2次谐波的含量来识别励磁涌流,

$$\frac{I_2}{I_1} = K_2 \quad (3)$$

式中 I_1 、 I_2 为差流中基波和2次谐波的幅值; K_2 为2次谐波制动比的整定值。

同时为了防止变压器差动转角或滤零计算中造成的2次谐波降低,一些保护还增加了3次谐波闭锁功能。

$$\frac{I_3}{I_1} = K_3$$

式中 I_1 、 I_3 为差流中基波和3次谐波的幅值; K_3 为3次谐波制动系数。

当并联电容器的放电振荡电流中含有大量2、3次谐波时,如并联电容器电抗率为 $K=12\%$ 时,变压器内部故障时,并联电容的振荡频率根据式(2)计算可知为 $\omega=906.9 \text{ rad/s}$,这就增大差流中的3次谐波分量,可能造成谐波闭锁判据闭锁差动保护。

2.2 对波形对称涌流原理的影响

波形对称涌流原理是利用差流导数(即对差流采样点进行差分)的前半波与后半波进行对称比较,根据比较的结果去判断是否发生了励磁涌流,对于对称的定义为

$$K_w = \frac{|I'_d(t) + I'_d(t-2/T)|}{|I'_d(t) - I'_d(t-2/T)|} < K_{Set} \quad (5)$$

式中 $I'_d(t)$ 为当前点差分后差流的数值; $I'_d(t-2/T)$ 为当前点前半波的差分后差流数值; K_{Set} 为对称度门槛; K_w 值越小,说明波形对称度高,连续判别半个周波,满足式(2)的对称的点数大于要求点数时,判别为内部故障,否则为励磁涌流。

将差流进行傅里叶级数展开得

$$I_d(t) = I_{d0} + \sum_{n=1}^N I_m(n) \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (6)$$

差流对时间 t 进行求导得

$$\begin{aligned} I'_d(t) &= n\omega \sum_{n=1}^N I_m(n) \cos(n\omega t + \varphi_n) \\ &= n\omega \sum_{n=1}^N I_m(n) \cos(n\omega t + \varphi_n) \\ &\quad + n\omega \sum_{n=2}^N I_m(n) \cos(n\omega t + \varphi_n) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $I'_{d(odd)}(t) = n\omega \sum_{n=1}^N I_m(n) \cos(n\omega t + \varphi_n)$ 为奇数频分量; $I'_{d(even)}(t) = n\omega \sum_{n=2}^N I_m(n) \cos(n\omega t + \varphi_n)$ 为偶数频分量。

由式(6)可知,对于差流导数中的奇数频分量为

$$I'_{d(odd)}(t) + I'_{d(even)}(t-2/T) = 0 \quad (8)$$

而偶数频分量为

$$I'_{d(even)}(t) - I'_{d(even)}(t - 2/T) = 0 \tag{9}$$

根据式(8)、式(9)可知差流中的偶次谐波分量会增大式(5)计算得到的对称 K_w 值,判为波形不对称,而奇次谐波分量通过式(5)计算的对称 K_w 为 0。可以看到波形对称原理实际上是将差流中的奇次谐波分量作为对称判别的动作量,而偶次谐波分量作为对称判别的制动量,奇次谐波含量越高则波形越对称,偶次谐波含量越高则波形越不对称。

当并联电容器的放电振荡频率为偶次谐波时,如并联电容器电抗率为 $K=6\%$ 时,变压器内部故障时,并联电容的振荡频率根据式(2)计算可知 $\omega=1282.5\text{ rad/s}$,这就增大了差流中的 4 次谐波分量,可能造成谐波闭锁判据闭锁差动保护。

3 试验仿真

使用 EMTDC 建立并联电容器的系统仿真模型,仿真系统如图 1,变压器高低侧短路阻抗为 65%,低压侧电容器容量为主变压器容量的 30%,模拟 K2 点三相故障,分别取 6% 和 12% 两种典型并联电容器电抗率进行仿真,研究对谐波制动原理和波形对称原理的影响。仿真步长为 $50\text{ }\mu\text{s}$,保护采样频率为 1 000 Hz。

3.1 并联电容器电抗率为 6%

如表 1 所示,差流中 4 次谐波含量很高,其中 B 相 4 次谐波含量超过 30%。图 4、5、6 分别为 220~400 ms 时各采样时刻波形对称点数,在故障后 200 ms 内各采样时刻波形对称的点数均小于 5,波形对称将闭锁差动保护。

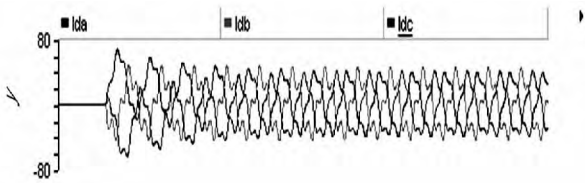


图 3 变压器低压侧故障差流波形(电抗率 6%)

3.2 并联电抗器电抗率为 12%

如表 2 所示,差流中 3 次谐波含量很高,其中 B 相 3 次谐波含量超过 30%,目前变压器保护的谐波整定门槛基本在 15%~20% 之间,所以含有 3 次谐波制动的差动保护会延时动作甚至是拒动。

表 1 差流各次谐波含量

通道	基波	直流	2 次谐波	3 次谐波	4 次谐波
Ida	24.449 A	7.597 A	0.248 A	0.160 A	4.915 A
		31.07%	1.02%	0.65%	20.10%
Idb	24.876 A	0.410 A	0.023 A	0.032 A	9.094 A
		1.65%	0.09%	0.13%	36.56%
Idc	24.419 A	8.007 A	0.265 A	0.176 A	4.987 A
		32.79%	1.09%	0.72%	20.42%

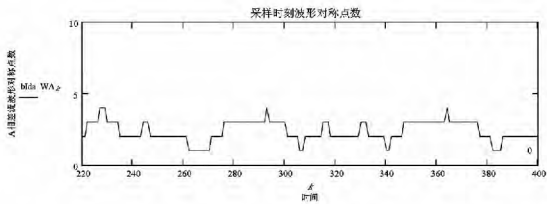


图 4 故障后 200 ms A 相差流波形对称点数(电抗率 6%)

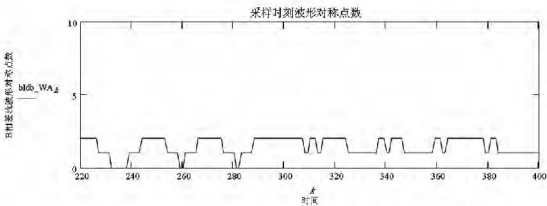


图 5 故障后 200 ms B 相差流波形对称点数(电抗率 6%)

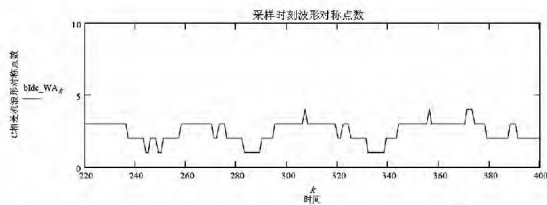


图 6 故障后 200 ms C 相差流波形对称点数(电抗率 6%)

波形对称分析如图 8、9、10,由于差流中奇次谐波含量很大,偶次谐波含量很小,因此各采样时刻的波形对称点数很多,电抗率为 12% 的并联电容器对波形对称原理并没有影响。

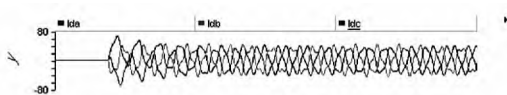


图 7 变压器低压侧故障差流波形(电抗率 12%)

表 2 差流各次谐波含量

通道	基波	直流	2 次谐波	3 次谐波	4 次谐波
Ida	23.791 A	18.363 A	0.515 A	4.361 A	0.641 A
		77.19%	2.17%	18.33%	2.70%
Idb	24.753 A	0.258 A	0.826 A	7.450 A	0.805 A
		1.04%	3.34%	30.10%	3.25%
Idc	23.747 A	18.621 A	1.098 A	4.224 A	0.242 A
		78.41%	4.62%	17.79%	1.02%

(下转第 76 页)

- (1): 242 - 246.
- [8] Reshadi ,MMishra ,R. Dutt ,N. Instruction Set Compiled Simulation: A Technique for Fast and Flexible Instruction Set Simulation [C]. Design Automation Conference , Proceedings 2003: 758 - 763.
- [9] 刘凤君. 现代逆变技术及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社 2006: 202 - 209.
- [10] 许道飞. 基于 DSP 的在线式数字 UPS 数字控制技术 [D]. 杭州: 浙江大学 2003.
- [11] 许爱国 , 谢少军. 电容电流瞬时值反馈控制逆变器的数字控制技术研究 [J]. 中国电机工程学报 2005 25

- (1): 49 - 53.
- [12] 徐鹏飞. 太阳能光伏逆变器的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2009.
- [13] 熊娥. 光伏独立逆变电源的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学 2009.
- [14] 冒波波. 微电网运行与控制的建模与仿真 [D]. 成都: 西南交通大学 2012.

作者简介:

余 涛 (1988), 硕士研究生, 研究方向为微电网运行控制技术。

(收稿日期: 2013 - 12 - 02)

(上接第 72 页)

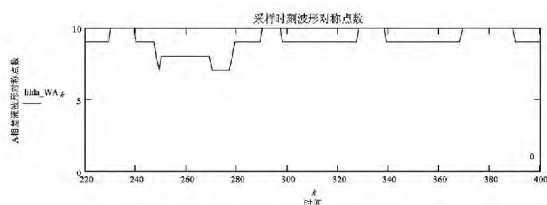


图 8 故障后 200 ms A 相差流波形对称点 (电抗率 12%)

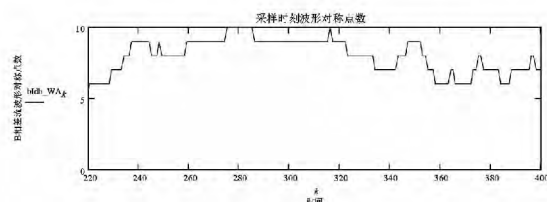


图 9 故障后 200 ms B 相差流波形对称点 (电抗率 12%)

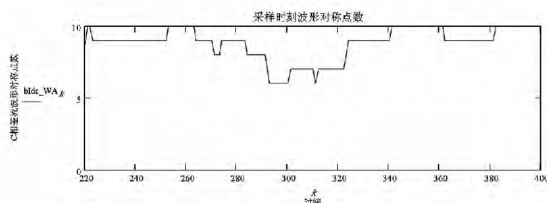


图 10 故障后 200 ms C 相差流波形对称点 (电抗率 12%)

4 结 语

对并联电容器中电抗率选择、系统故障时放电电流对变压器保护的影响进行了分析, 得出了以下结论: ①并联电容器在系统故障时会形成振荡放电回路, 其振荡频率与电容器中电抗率有紧密的关系。②当变压器区内发生故障时, 并联电容器的放电电流会计入差流, 增大差流中的谐波含量。③放电电流会造成变压器保护尤其是高阻抗变压器保护中励磁涌流判别元件误闭锁差动保护, 导致差动保护延时动作甚至拒动。④考虑到 3 次谐波判据为 2 次谐波制动判据的补充辅助判据, 但在电容器 12% 电抗率情况下 3 次谐波会闭锁差动保护, 建议在判为区内故障时取消 3 次谐波闭锁, 只保留 2 次谐波闭锁, 防止差动保护拒动。⑤在电容器 6% 电抗率情况

下, 波形对称原理会闭锁差动保护, 建议在判为区内故障时采用滤波算法滤除差流中含有的 4 次谐波, 防止 4 次谐波增大而导致判为不对称, 防止差动保护拒动。

综上所述, 变压器保护必须考虑并联电容器放电电流的影响, 采取措施提高差动保护的可靠性。

参考文献

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理及应用 (第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社 2001.
- [2] 王志杰, 季美红. 低压并联电容器装置中串联电抗器的选用 [J]. 电工电气 2009(8): 32 - 34.
- [3] 洪贞贤. 减少谐波电流对补偿电容器影响的措施 [J]. 电力电容器, 2007(5): 39 - 40.
- [4] 孙志杰, 陈云伦. 波形对称原理的变压器差动保护 [J]. 电力系统自动化, 1999(4): 42 - 46.
- [5] 孙志杰, 曾献华, 汤汉松, 等. 磁通制动原理在变压器差动保护中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(1): 160 - 164.
- [6] 李贵存, 刘万顺, 腾林, 等. 基于波形相关性分析的变压器励磁涌流识别新算法 [J]. 电力系统自动化, 2001 25(17): 25 - 28.
- [7] 赵永彬, 卢毅. 主设备变压器保护谐波制动改进 [J]. 电力自动化设备 2002 22(7): 1 - 5.
- [8] 杨帆, 李晓明, 郑秀玉, 等. 电力系统分数次谐波的产生机理、危害与特征 [J]. 高电压技术 2007 33(12): 153 - 156.
- [9] 束洪春. 电力工程信号处理应用 (第一版) [M]. 北京: 科学出版社 2009.
- [10] 吴国沛, 刘育权, 任震. 电力系统谐波对继电保护的影响 [J]. 电力自动化设备 2007 22(7): 78 - 79.

作者简介:

陈 实 (1985), 助理工程师, 硕士生在读, 主要从事电力系统继电保护的研究;

张 尧 (1984), 助理工程师, 硕士生在读, 主要从事电力系统继电保护的研究;

郭 晓 (1982), 工程师, 硕士, 主要从事电力系统继电保护的研究。

(收稿日期: 2014 - 03 - 04)

一种光伏系统控制策略仿真分析

余 涛 梁植淇 李武强

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 研究了单相光伏系统在 Matlab/Simulink 下的建模与仿真。基于状态空间平均法建立了单相电压型 PWM 逆变器的数学模型, 提出了增加直流侧电压控制环的双环控制策略, 构建了单相光伏系统的 Simulink 模型, 并进行了特性仿真。仿真结果表明, 基于该控制策略的光伏系统动态响应快, 输出电压总谐波畸变率低。

关键词: 光伏发电; 直流电压; 控制策略

Abstract: The modeling and simulation on Matlab/Simulink of single-phase photovoltaic (PV) system is studied. The mathematical model of single-phase voltage PWM inverter is set up based on state-space average method. The dual-loop control strategy with the dc-link voltage control loop is proposed. And the single-phase PV system is modeled and the simulation of performances is carried out. The simulation results verify that the inverter with the proposed control strategy has a rapid dynamic response and a low total harmonic distortion (THD) of the output voltage.

Key words: photovoltaic (PV) power generation; dc-link voltage; control strategy

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0073-04

0 引 言

随着国内光伏产业规模逐步扩大、技术不断提升, 光伏发电成本也逐步下降, 光伏容量将大幅增加。根据不同的分类方法, 光伏发电系统可以分为以下几类: 按照所接入的电压等级, 可分为中低压(小于 1 000 V)和高压(大于 1 000 V)发电系统; 按照功率等级, 可分为中小功率(一般小于 20 kW)和大功率(大于 50 kW)发电系统; 按照功率传递级别, 可分为单级式(一般应用于大功率系统)和两级式(一般应用于中小功率系统)光伏发电系统; 按照是否含有隔离变压器, 可分为隔离型和非隔离型光伏发电系统。

目前, 现有研究主要集中在逆变器的电路结构^[1-2]、逆变器的控制技术^[3]、并网孤岛检测^[4-5]及孤岛时逆变器控制方式的转换^[6]等方面。

1 系统结构

下面主要研究两级式非隔离型光伏独立发电系统^[7], 如图 1 所示主要由光伏阵列、BOOST 升压斩波器、电压源型单相逆变器和输出滤波器组成, 具有

电路结构简单、成熟, 前后级独立控制且易于模块化实现等特点, 适用于中小功率的分布式发电系统中。

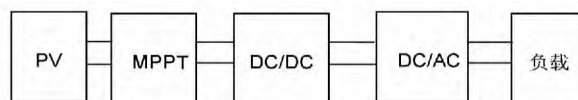


图 1 光伏系统基本结构框图

光伏独立逆变系统可以简化为图 2, 假设功率开关管是理想器件, 高频变压器是理想变压器, 整流器也假设为理想的, 那么 DC/DC 模块可以简化为一个被升压的直流电源 U_d , 即 $U_d = N \cdot V_{DC}$ 。 N 为高频变压器的匝数比; V_{DC} 为光伏电池 MPPT 输出电压。

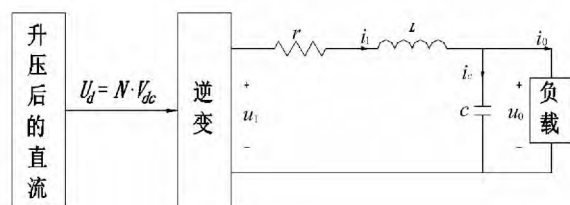


图 2 简化光伏独立逆变系统

其中 u_i 为逆变器输出电压; r 为考虑滤波电感 L 的等效串联电阻、开关管压降、线路电阻等各种阻尼因素的综合等效电阻; u_o 为逆变电源输出电压; i_l 为滤波电感 L 的电流; i_o 为负载电流, 可以把它看作是系

统的一个外部扰动输入量,这样处理的好处是既符合逆变电源负载多样性的要求,又可以建立一个形式简单又不依赖具体负载类型的逆变电源数学模型。

选择滤波电容 C 两端电压 u_0 和流过滤波电感的电流作为状态变量,可得到等效简单电路模型^[8,9]系统的状态空间表达式如式(1)。

$$\begin{pmatrix} \frac{du_0}{dt} \\ \frac{di_1}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{r}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_0 \\ i_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix} u_1 + \begin{pmatrix} -\frac{1}{C} \\ 0 \end{pmatrix} i_0 \quad (1)$$

则系统开环时,单相逆变器的线性化等效模型如图 3 所示。

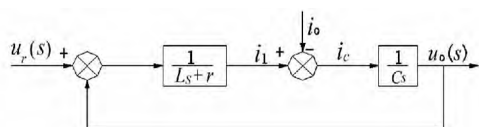


图 3 单相逆变器线性化等效模型

由逆变器的等效模型知,逆变器系统是一个多输入单输出系统,系统要保持输出电压 $U_0(s)$ 对调制信号 $U_r(s)$ 的快速准确跟踪,就必须对外部负载的扰动 $i_0(s)$ 具有抑制能力,无论系统带任何负载,系统的输出电压波形都不会发生畸变,达到完全跟随系统的给定信号^[10,11]。

2 控制策略

前级 DC/DC 环节采用文献[12]中 MPPT 输出电压,逆变器通常采用双环控制,逆变器的双环控制分两类^[13]:一类是以滤波电容电流为内环被控量的电

容电流内环电压外环控制,一类是以滤波电感电流为内环被控量的电感电流内环电压外环控制。在以滤波电感电流为内环被控量的双环控制方式下,负载电流 i_0 作为逆变器的外部扰动信号,处在电感电流内环环路之外,因此电感电流内环控制对负载扰动的抑制作用较差,输出电压波形不是很理想。

在双闭环的基础之上增加一个直流侧电压外环控制,该控制策略使电路在直流母线电容电压上升时,能自动调节输入功率以匹配输出功率,保证系统额定功率输出,避免系统因直流母线过电压故障导致的系统功率丢失,以提高光伏系统工作的可靠性。

控制策略控制框图如图 4 所示。

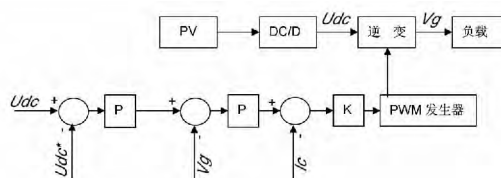


图 4 加直流外环控制控制策略框图

由于低压微网主要呈阻性,负载功率主要由其两端电压幅值决定。该控制策略下,当光伏输出功率与负载消耗功率不相匹配时,直流母线电压 U_{DC} 就会出现波动,其与给定信号 U_{DC}^* 的瞬时误差经过电压 PI 调节器后直接将这种变化信息传递给交流侧电压控制环节,从而达到提高负载功率与光伏输出功率变化匹配性能。

3 仿真分析

在 Matlab/Simulink 中进行建模仿真,仿真模型如图 5 所示。

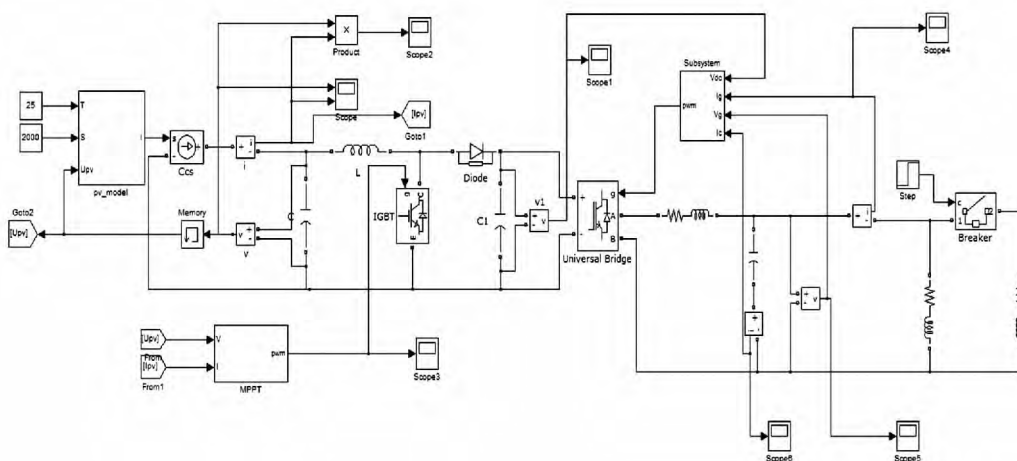


图 5 单相光伏系统仿真模型

光伏模块直接引用文献[14]中模块,仿真中参数设置如下, $T=25$, $S=2\ 000$,即光照强度增强至 $2\ 000\text{ W/m}^2$,直流电压外环的 PI 参数取 $K_p=0.41$, $K_i=0.1$,逆变器电压外环 PI 参数取 $K_p=10$, $K_i=2\ 000$,电流内环取 $K_p=0.5$,经 DC/DC 变换后的空载的输出电压波形如图 6 所示。

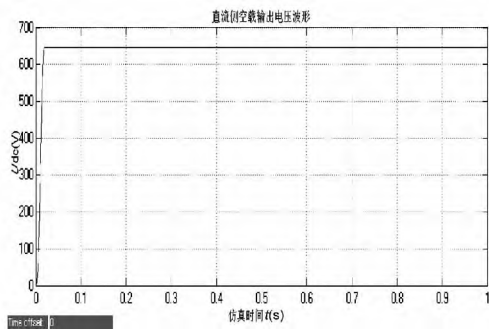


图 6 直流侧控制电压输出波形

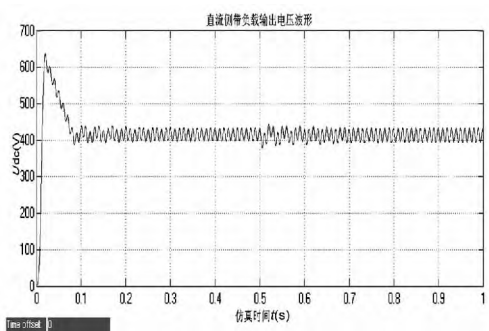


图 7 带负载后直流侧输出波形

该光伏系统接一个单相逆变器,所带负载为一个 $33\ \Omega$ 的电阻与一个 10 mH 的电感串联构成,待仿真运行到 0.5 s 时再并入一个相同的负载,仿真运行时间一共 1 s 。带负载运行后直流侧输出电压波形如图 7 所示。可以看出并入一个负载以后直流侧电压略有波动,但很快恢复平衡,且始终停在给定电压附近。输出的电压电流波形如图 8 所示。对输出电压进行 FFT 分析,分析结果如图 9 所示。

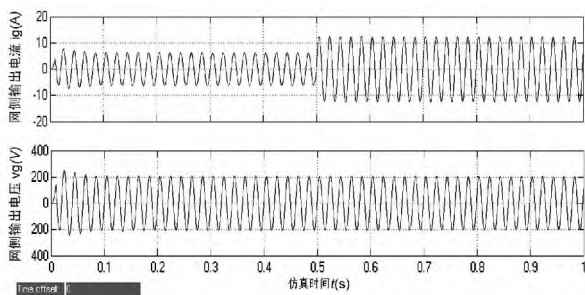


图 8 输出电压电流波形

从仿真结果可以看到,当系统进入稳定运行以后,电压波动基本不大,在增加负载时,经过短时间调整,也很快恢复稳定运行,其电压总谐波畸变率(THD)含量也相当低,低于 2% 。同时,而负载在 0.5 s 增加时,

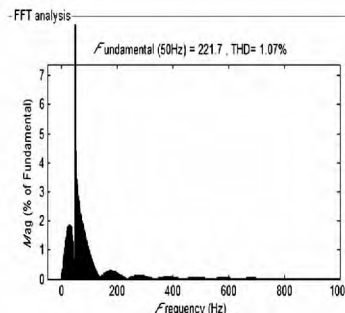


图 9 输出电压 FFT 分析

负载电流增大,直流侧电压略微下降,从而导致网侧电压幅值略微下降,从而在光伏功率一定的情况下,一定范围内调节输入功率与输出功率的功率匹配问题。

4 结 语

建立了以太阳能电池为基础的单相光伏发电系统的 Matlab/Simulink 模型,在控制策略中引入一个直流侧电压外环控制,该控制策略下,在光伏系统功率大于逆变电路功率时,自动调节直流侧流入功率仪匹配输出功率。从仿真波形中可以看到这种控制能有效地使直流母线电压稳定在预设电压值附近,同时满足系统额定功率输出,提高系统运行的可靠性。

参考文献

- [1] Xiao Huafeng, Xie Shaojun, Chen Yang, et al. An Optimized Transformerless Photovoltaic Grid-connected Inverter[J]. IEEE Trans. on Industry Electronics 2011, 58(5): 1887-1895.
- [2] Mazumder S K, Burra R K, Huang R, et al. A Universal Grid-connected Fuel-cell Inverter for Residential Application[J]. IEEE Trans. on Industry Electronics 2010, 57(10): 3431-3447.
- [3] Ahn S, Park J, Chung I, et al. Power-sharing Method of Multiple Distributed Generators Considering Control Modes and Configurations of a Microgrid[J]. IEEE Trans. On Power Delivery 2010, 25(3): 2007-2016.
- [4] Lopes L A C, Sun Huili. Performance Assessment of Active Frequency Drifting Islanding Detection Methods[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion 2006, 21(1): 171-180.
- [5] 刘方锐, 余蜜, 张宇, 等. 主动移频法在光伏并网逆变器并联运行下的孤岛检测机理研究[J]. 中国电机工程学报 2009, 29(12): 47-51.
- [6] Chen C, Wang Y, Lai J, et al. Design of Parallel Inverters for Smooth Mode Transfer Micro-grid Applications[J]. IEEE Trans. on Power Electronics 2010, 25(1): 6-15.
- [7] 张浙波, 刘建政, 梅红明, 等. 两级式三相光伏并网发电系统无功补偿特性[J]. 电工技术学报, 2011, 26

- (1): 242 - 246.
- [8] Reshadi ,MMishra ,R. Dutt ,N. Instruction Set Compiled Simulation: A Technique for Fast and Flexible Instruction Set Simulation [C]. Design Automation Conference , Proceedings 2003: 758 - 763.
- [9] 刘凤君. 现代逆变技术及应用[M]. 北京: 电子工业出版社 2006: 202 - 209.
- [10] 许道飞. 基于 DSP 的在线式数字 UPS 数字控制技术[D]. 杭州: 浙江大学 2003.
- [11] 许爱国 ,谢少军. 电容电流瞬时值反馈控制逆变器的数字控制技术研究[J]. 中国电机工程学报 2005 25

- (1): 49 - 53.
- [12] 徐鹏飞. 太阳能光伏逆变器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2009.
- [13] 熊娥. 光伏独立逆变电源的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学 2009.
- [14] 冒波波. 微电网运行与控制的建模与仿真[D]. 成都: 西南交通大学 2012.

作者简介:

余 涛(1988), 硕士研究生, 研究方向为微电网运行控制技术。

(收稿日期: 2013 - 12 - 02)

(上接第 72 页)

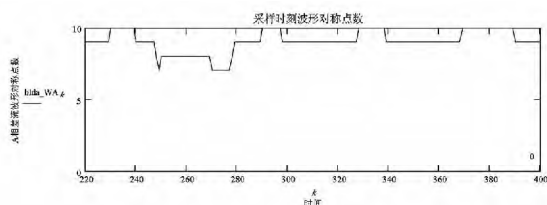


图 8 故障后 200 ms A 相差流波形对称点(电抗率 12%)

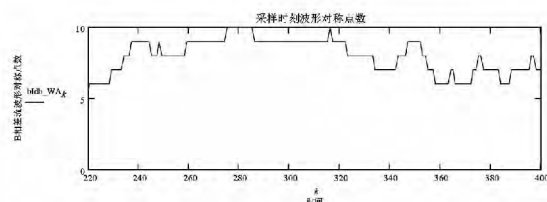


图 9 故障后 200 ms B 相差流波形对称点(电抗率 12%)

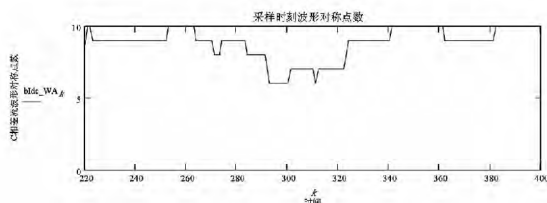


图 10 故障后 200 ms C 相差流波形对称点(电抗率 12%)

4 结 语

对并联电容器中电抗率选择、系统故障时放电电流对变压器保护的影响进行了分析, 得出了以下结论: ①并联电容器在系统故障时会形成振荡放电回路, 其振荡频率与电容器中电抗率有紧密的关系。②当变压器区内发生故障时, 并联电容器的放电电流会计入差流, 增大差流中的谐波含量。③放电电流会造成变压器保护尤其是高阻抗变压器保护中励磁涌流判别元件误闭锁差动保护, 导致差动保护延时动作甚至拒动。④考虑到 3 次谐波判据为 2 次谐波制动判据的补充辅助判据, 但在电容器 12% 电抗率情况下 3 次谐波会闭锁差动保护, 建议在判为区内故障时取消 3 次谐波闭锁, 只保留 2 次谐波闭锁, 防止差动保护拒动。⑤在电容器 6% 电抗率情况

下, 波形对称原理会闭锁差动保护, 建议在判为区内故障时采用滤波算法滤除差流中含有的 4 次谐波, 防止 4 次谐波增大而导致判为不对称, 防止差动保护拒动。

综上所述, 变压器保护必须考虑并联电容器放电电流的影响, 采取措施提高差动保护的可靠性。

参考文献

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理及应用(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社 2001.
- [2] 王志杰, 季美红. 低压并联电容器装置中串联电抗器的选用[J]. 电工电气 2009(8): 32 - 34.
- [3] 洪贞贤. 减少谐波电流对补偿电容器影响的措施[J]. 电力电容器, 2007(5): 39 - 40.
- [4] 孙志杰, 陈云仑. 波形对称原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1999(4): 42 - 46.
- [5] 孙志杰, 曾献华, 汤汉松, 等. 磁通制动原理在变压器差动保护中的应用[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(1): 160 - 164.
- [6] 李贵存, 刘万顺, 腾林, 等. 基于波形相关性分析的变压器励磁涌流识别新算法[J]. 电力系统自动化, 2001 25(17): 25 - 28.
- [7] 赵永彬, 卢毅. 主设备变压器保护谐波制动改进[J]. 电力自动化设备 2002 22(7): 1 - 5.
- [8] 杨帆, 李晓明, 郑秀玉, 等. 电力系统分数次谐波的产生机理、危害与特征[J]. 高电压技术 2007 33(12): 153 - 156.
- [9] 束洪春. 电力工程信号处理应用(第一版)[M]. 北京: 科学出版社 2009.
- [10] 吴国沛, 刘育权, 任震. 电力系统谐波对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备 2007 22(7): 78 - 79.

作者简介:

陈 实(1985), 助理工程师, 硕士生在读, 主要从事电力系统继电保护的研究;

张 尧(1984), 助理工程师, 硕士生在读, 主要从事电力系统继电保护的研究;

郭 晓(1982), 工程师, 硕士, 主要从事电力系统继电保护的研究。

(收稿日期: 2014 - 03 - 04)

三次产业用电特性及负荷结构研究

任志超 张全明 杜新伟 王海燕 曹开江

(国网四川省电力公司经济技术研究院 四川 成都 610094)

摘 要: 全社会用电负荷曲线由三次产业用电负荷曲线及居民生活用电负荷曲线组成。通过大用户负荷曲线叠加, 测算了典型行业及居民生活的用电负荷曲线, 研究了用电特性及其发展规律, 并以类似方法估算了三次产业的最大用电负荷, 揭示了负荷结构与产业结构的关系。结果表明, 四川地区三次产业典型行业均具有明显的季节特征; 第一产业用电负荷比重极小, 第二产业用电负荷比重较大, 第三产业用电负荷迅速发展, 居民生活质量不断改善。

关键词: 三次产业; 用电特性; 负荷结构; 产业结构

Abstract: Power consumption curve of the whole society is composed of three industries' electricity load curve and residential electricity load curve. Through the superposition of electricity load curve of large customers, the electricity load curve of typical trade and residents is calculated. The characteristics of electricity loads and its law of development are studied. The maximum electricity load of three industries is also evaluated in a similar way, and the relationship between load structure and industrial structure is investigated. The results show that the electricity load of the typical trade in three industries presents obvious seasonal characteristics in Sichuan area. The electricity load proportion of primary industry is relatively small, and the load proportion of second industry is relatively large. Particularly, the electricity load of third industry develops rapidly, and the quality of residential life is being improved continuously.

Key words: three industries; electricity load characteristics; load structure; industrial structure

中图分类号: TM716 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0077-05

0 引 言

准确把握电网负荷特性及其发展变化趋势是做好电力规划、计划、生产运行工作的重要基础。近年来, 世界经济复苏明显放缓, 国内经济下行压力不断加大, 四川坚持把经济结构战略性调整作为加快转变经济发展方式的主攻方向, 提升产业层次和核心竞争力, 促进三次产业协调发展^[1]。电力工业作为国民经济发展的晴雨表, 对产业结构的调整既具有较大的调节性, 又具有较强的依赖性^[2]。

在前人工作的基础上^[3-5], 利用负控采集的大用户历史负荷数据, 通过叠加估算以及用电量校核, 描绘了四川地区三次产业典型行业及居民生活的用电负荷曲线, 研究了用电特性及其发展规律, 并进一步估算了三次产业的最大用电负荷, 分析了全社会用电负荷的具体结构, 探讨了负荷结构变化与产业结构调整的内生联系, 研究成果为电网发展规划及用电市场拓展提供了一定的科学依据。

1 负荷曲线测算

1.1 典型日选取

各地气候条件不同, 四季对应的月份存在差异。一般情况下, 春季为 3 至 5 月、夏季为 6 至 8 月、秋季为 9 至 11 月和冬季 12 至次年 2 月。目前典型日的选取没有统一的规定, 主要有以下 3 种方法。

第 1 种: 选取日负荷率与期间(季节、月)平均日负荷率最接近、且负荷曲线无异常畸变的日负荷曲线作为该期间(季节、月)的典型日负荷曲线。

①当月各工作日的平均日负荷曲线为

$$L(h) = \frac{1}{N} \sum_{d=1}^N L(d, h) \quad h=0, 1, 2, 3, \dots, 23 \quad (1)$$

其中 $L(h)$ 为当月各工作日负荷曲线的平均, 即平均日负荷曲线; $L(d, h)$ 为各工作日的负荷曲线; h 为每日 24 个整点; N 为当月工作日的天数。

②从当月所有工作日负荷曲线 $L(d, h)$ 中找出与上述平均日负荷曲线 $L(h)$ 最“相似”(接近)的某

一日负荷曲线 $L(d^* h)$ 作为典型日负荷曲线。

这里的“相似”(接近)的定义是如下的距离(偏差)最小。

$$\sum_{h=0}^{23} |L(d^* h) - L(h)|^2 = \min_{1 \leq d \leq N/h=0} \sum_{h=0}^{23} |L(d h) - L(h)|^2 \quad (2)$$

第2种:选取期间(季节、月)某一固定工作日,比如取某月第3周第3个工作日作为典型日。

第3种:选取最大负荷日作为典型日。

1.2 负荷曲线测算

第1步,按照上述方法选取典型日日期。第2步,通过负控采集等渠道获取典型行业用电量较大的用户在典型日的负荷曲线。第3步,这些用户的负荷曲线的叠加(记为 L_1),可以代表本地区典型行业的负荷曲线形状。根据 L_1 可以得到这些用户当日的合计用电量(C_1)。第4步,根据典型行业的当月用电量除以天数,得到日用电量(C)。第5步,计算所选用户用电量占该行业用电量的比重, $M = C/C_1$ 。第6步,将 L_1 各点负荷放大 M 倍即为典型日负荷曲线。

2 用电负荷特性研究

2.1 产业典型行业负荷特性

(1) 第一产业典型行业负荷特性分析

第一产业选取排灌行业作为研究对象。本行业春季无用电早高峰,夏、秋、冬季用电早高峰一般出现在6~7点;春、冬季用电午高峰一般出现在11~12点,夏、秋季用电午高峰一般出现在12~13点;春季用电晚高峰一般出现在20~21点,夏季晚用电高峰一般出现在21~22点,秋、冬季用电晚高峰一般出现在19~20点。

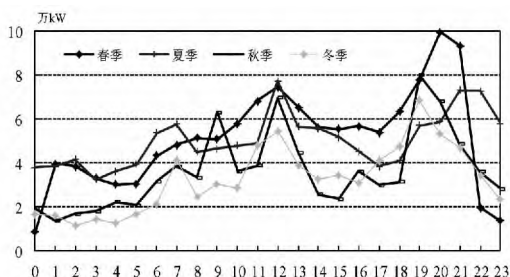


图1 四川排灌业四季典型日负荷曲线

2010—2012年,四川地区排灌业典型日负荷特性如表1所示。典型日负荷率夏季较大、秋季较小,逐年下降趋势明显;典型日最小负荷率夏季较大,春

季较小,逐年下降趋势明显;典型日峰谷差率春季较大,夏季较小,逐年上升趋势明显。

表1 2010—2012年四川排灌业典型日负荷特性

年份	季节	日期	最大负荷 /MW	峰谷 差	负荷 率	最小 负荷率	峰谷 差率
2010	春	4/21	95.6	8.72	0.521	0.087	0.913
	夏	8/18	76.7	4.30	0.662	0.439	0.561
	秋	10/20	76.3	6.21	0.462	0.186	0.814
	冬	12/15	84.4	6.88	0.487	0.185	0.815
2011	春	4/20	111.0	10.05	0.520	0.096	0.904
	夏	8/17	77.9	4.37	0.662	0.439	0.561
	秋	10/19	110.0	9.06	0.461	0.172	0.828
	冬	12/21	71.8	5.93	0.488	0.173	0.827
2012	春	4/18	99.6	9.10	0.515	0.086	0.914
	夏	8/15	77.3	4.48	0.654	0.421	0.579
	秋	10/17	79.9	6.63	0.456	0.171	0.829
	冬	12/19	68.5	5.68	0.481	0.171	0.829

(2) 第二产业典型行业负荷特性分析

第二产业选取化学纤维业作为研究对象。本行业春季用电早高峰一般出现在5~6点,秋季用电早高峰一般出现在6~7点,夏、冬季用电早高峰一般出现在7~8点;春季用电午高峰一般出现在14~15点,夏季用电午高峰一般出现在11~12点,秋、冬季用电午高峰一般出现在10~11点;春季晚用电高峰一般出现在21~22点,夏季用电晚高峰一般出现在17~18点,秋、冬季用电晚高峰一般出现在18~19点。

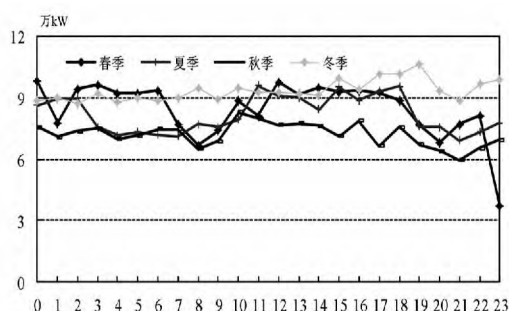


图2 四川化学纤维业典型日负荷曲线

2010—2012年,四川地区化学纤维业典型日负荷特性如表2所示。行业典型日最大负荷逐年加大;典型日负荷率冬季较大、夏季较小,逐年上升趋势明显;典型日最小负荷率冬季较大,春季较小,逐年上升趋势明显;典型日峰谷差率春季较大,冬季较小,逐年下降趋势明显。受国际金融危机影响,东部地区一些劳动密集型和能源、资源消耗量大的传统产业,因成本上升,生产难以为继,开始大量向西部地区转移,导致四川地区个别高耗能企业过热发展。

表 2 2010~2012 年四川化学纤维业典型日负荷特性

年份	季节	日期	最大负荷 /MW	峰谷差	负荷率	最小负荷率	峰谷差率
2010	春	4/21	62.1	3.91	0.857	0.371	0.629
	夏	8/18	78.2	2.23	0.851	0.714	0.286
	秋	10/20	75.8	2.18	0.867	0.712	0.288
	冬	12/15	66.9	1.28	0.871	0.808	0.192
2011	春	4/20	84.8	5.31	0.859	0.374	0.626
	夏	8/17	87.7	2.48	0.852	0.717	0.283
	秋	10/19	84.8	2.42	0.868	0.715	0.285
	冬	12/21	65.4	1.24	0.872	0.811	0.189
2012	春	4/18	98.0	6.10	0.861	0.378	0.622
	夏	8/15	96.1	2.68	0.854	0.721	0.279
	秋	10/17	83.0	2.33	0.870	0.719	0.281
	冬	12/19	107.0	1.96	0.875	0.816	0.184

(3) 第三产业典型行业负荷特性分析

第三产业选取住宿餐饮业作为研究对象。本行业春季用电早高峰一般出现在 7~8 点,夏季无用电早高峰,秋季用电早高峰一般出现在 8~9 点,冬季用电早高峰一般出现在 6~7 点;春、冬季用电午高峰一般出现在 11~12 点,夏季用电午高峰一般出现在 16~17 点,秋季用电午高峰一般出现在 12~13 点;春季用电晚高峰一般出现在 20~21 点,夏季用电晚高峰一般出现在 22~23 点,秋、冬季用电晚高峰一般出现在 21~22 点。

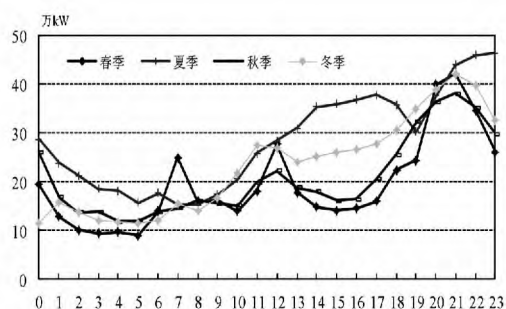


图 3 四川住宿餐饮业典型日负荷曲线

2010—2012 年,四川地区住宿餐饮业典型日负荷特性如表 3 所示。行业典型日最大负荷逐年加大;典型日负荷率及最小负荷率夏季较大、春季较小,逐年上升趋势明显;典型日峰谷差率春季较大,夏季较小,逐年下降趋势明显。

2.2 居民生活负荷特性

居民用电负荷主要由基本负荷和季节性负荷两部分组成。基本负荷主要由电冰箱、电炊具、照明等组成,季节性负荷则是指夏季降温负荷(由空调、电扇等组成)和冬季取暖负荷(由空调、油汀等组成)。

2010—2012 年,四川地区居民生活用电具有明

表 3 2010—2012 年四川住宿餐饮业典型日负荷特性

年份	季节	日期	最大负荷 /MW	峰谷差	负荷率	最小负荷率	峰谷差率
2010	春	4/21	312	24.9	0.460	0.202	0.798
	夏	8/18	376	25.6	0.609	0.318	0.682
	秋	10/20	319	22.4	0.541	0.300	0.700
	冬	12/15	319	23.6	0.549	0.260	0.740
2011	春	4/20	411	32.6	0.462	0.207	0.793
	夏	8/17	393	26.6	0.611	0.322	0.678
	秋	10/19	335	23.3	0.543	0.304	0.696
	冬	12/21	332	24.4	0.551	0.264	0.736
2012	春	4/18	421	33.1	0.464	0.213	0.787
	夏	8/15	465	31.2	0.614	0.329	0.671
	秋	10/17	381	26.2	0.546	0.312	0.688
	冬	12/19	421	30.7	0.554	0.272	0.728

显的季节特征。春季用电早高峰一般出现在 6~7 点,夏季无用电早高峰,秋季用电早高峰一般出现在 7~8 点,冬季用电早高峰一般出现在 6~7 点;春、秋季用电午高峰一般出现在 11~12 点,夏季用电午高峰一般出现在 15~16 点,冬季用电午高峰一般出现在 12~13 点;春秋冬三季用电晚高峰一般出现在 18~19 点,夏季用电晚高峰一般出现在 21~22 点。

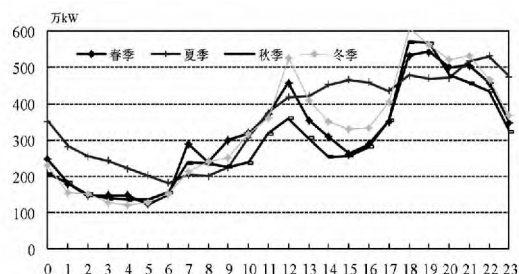


图 4 四川居民生活用电典型日负荷曲线

2010—2012 年,四川地区居民生活典型日负荷特性如表 4 所示。居民生活典型日最大负荷逐年加大;典型日负荷率及最小负荷率夏季较大、秋季较小,基本呈下降趋势;典型日峰谷差率冬季较大,夏季较小,基本呈上升趋势。

3 用电负荷结构研究

3.1 用电负荷结构分析

第一产业用电负荷比重极小。四川地区第一产业的代表性用电行业是排灌业,依据第一产业与排灌业用电量的关系,可以得到第一产业用电负荷近似曲线。以春季为例,2012 年四川地区第一产业最大用电负荷约为 255 MW,同比减少 1.16%。

第二产业用电负荷比重较大。四川地区第二产

表 4 2010—2012 年四川居民生活典型日负荷特性

年份	季节	日期	最大负荷 /MW	峰谷 差	负荷 率	最小 负荷率	峰谷 差率
2010	春	4/21	4 670	362	0.580	0.224	0.776
	夏	8/18	4 400	291	0.678	0.339	0.661
	秋	10/20	5 190	394	0.515	0.242	0.758
	冬	12/15	4 720	375	0.542	0.205	0.795
2011	春	4/20	5 150	394	0.584	0.234	0.766
	夏	8/17	4 600	301	0.683	0.347	0.653
	秋	10/19	5 740	437	0.514	0.239	0.761
	冬	12/21	5 080	403	0.544	0.207	0.793
2012	春	4/18	5 430	420	0.581	0.227	0.773
	夏	8/15	5 310	350	0.678	0.340	0.660
	秋	10/17	5 710	436	0.512	0.236	0.764
	冬	12/19	6 080	488	0.539	0.198	0.802

业的代表性用电行业是钢铁、氯碱、化学纤维、水泥制造、肥料制造以及黄磷等,依据典型大工业用户用电实际情况,可以得到第二产业用电负荷近似曲线。以春季为例,2012 年四川地区第二产业最大用电负荷约为 21 490 MW,同比仅增长 1.56%。

第三产业用电负荷迅速发展。四川地区第三产业的代表性用电行业为住宿餐饮业,采用类似于上述的方法,可以得出第三产业用电负荷近似曲线。以春季为例,2012 年四川地区第三产业最大用电负荷约为 21 490 MW,同比增长 7.64%。随着第三产业的迅速发展以及居民生活质量的不断改善,第三产业用电负荷及居民用电负荷同比增速逐年提升,在一定程度上,降低了全网的负荷率水平。

表 5 2010—2012 年四川三次产业负荷结构

年份	季节	日期	第一产业 最大负荷 /MW	第二产业 最大负荷 /MW	第三产业 最大负荷 /MW	居民生活 最大负荷 /MW
2010	春	4/21	330	17 180	4 480	4 670
	夏	8/18	189	17 220	4 310	4 400
	秋	10/20	208	18 250	3 900	5 190
	冬	12/15	240	16 650	4 100	4 720
2011	春	4/20	258	21 160	5 370	5 150
	夏	8/17	187	22 140	4 940	4 600
	秋	10/19	275	21 100	4 650	5 740
	冬	12/21	248	20 400	4 670	5 080
2012	春	4/18	255	21 490	5 780	5 430
	夏	8/15	211	22 790	5 550	5 310
	秋	10/17	252	21 750	5 140	5 710
	冬	12/19	249	21 570	5 630	6 080

3.2 产业结构调整及其影响

“十一五”以来,四川省产业结构比例由 2005 年的 20.1:41.5:38.4 调整到 2010 年的 14.4:50.5:

35.1,2011 年调整至 14.2:52.4:33.4,2012 年进一步调整至 13.8:52.8:33.4。四川产业结构的变化趋势为第一产业比重平稳下降,第二产业比重大幅上升,第三产业比重趋于稳定。产业结构的变化,使得第一产业和第三产业的最高负荷增幅均低于第二产业最大负荷增幅。第三产业发展在一定程度上增大了负荷峰谷差,降低了全社会最大负荷利用小时数。

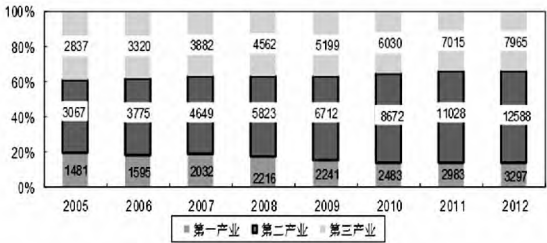


图 5 2005—2012 年四川产业结构变化(按当年价)

四川坚持走新型工业化道路,着力在扩大增量中调整结构、在加快发展中转变方式,工业效益走在全国前列,初步探索出一条创新驱动、绿色低碳、高端切入、开放合作、加速推进的工业化路子。

从总量上看,2012 年,四川工业用电占到整个电力消耗的 70.3% 左右,工业负荷也占四川电网总负荷较大的比例。“十一五”以来,由于产业结构的调整,工业增加值占省内生产总值的比重由 34.2% 上升到 42.0%,工业总量保持快速增长,以工业为主的第二产业最大用电负荷持续增加。

从工业结构看,2012 年规模以上工业中,重工业增加值增长 16.0%,轻工业增加值增长 16.4%,重轻工业的比为 66.8:33.2,自 2005 年以来,呈上升趋势。走新型工业化道路,调整工业内部结构,必将抑制一批高耗能、高污染企业的发展,造成其用电负荷增幅减小。新型的工业产业,以 IT 业、电子信息、新材料、新能源等为代表的新型工业产业的用电负荷逐年稳步上升。

预计到 2015 年,三次产业结构由“十一五”的 14.4:50.5:35.1 调整为 10.2:50.8:39。第二产业继续充当“火车头”,但其前进的动力会更多来自自主创新和升级。

4 结 论

(1) 四川地区排灌业春季无用电早高峰,典型

日负荷率夏季较大、秋季较小。化学纤维业冬季负荷曲线较为平滑,典型日负荷率冬季较大、夏季较小。住宿餐饮业夏季无用电早高峰,典型日负荷率夏季较大,春季较小。

(2) 四川地区居民生活用电夏季、冬季无早高峰,典型日负荷率及最小负荷率夏季较大、秋季较小,基本呈下降趋势;典型日峰谷差率冬季较大,夏季较小,基本呈上升趋势。

(3) 四川地区第一产业用电负荷比重极小,第二产业用电负荷比重较大。随着第三产业的迅速发展以及居民生活质量的不断改善,在一定程度上,降低了全网的负荷率水平。

参考文献

[1] 四川省人民政府. 四川省国民经济和社会发展第十二

个五年规划纲要[N]. 四川日报 2011-1-28(1).

[2] 康重庆,李顺福,夏清,等. 用电市场的结构分析及其对市场营销的启示[J]. 电力系统自动化,2003,27(14):27-31.

[3] 江峰青,郑淮,李荣民. 上海电网负荷结构分析及特性预测[J]. 华东电力,2008,36(9):51-52.

[4] 陆燕,谈健. 江苏电网负荷结构分析[J]. 华东电力,2007,35(7):26-29.

[5] 霍成军. 电力系统负荷特性分析研究[D]. 天津:天津大学,2007.

作者简介:

任志超(1980),博士研究生,研究方向为电力市场、电网规划等。

(收稿日期:2014-02-13)

(上接第 13 页)

[8] Schwan H. P.. Electrical Properties of Tissue and Cell Suspensions [J]. Advances in Biological and Medical Physics, Weinheim and New York: VCH Publishers, 1957(5): 147-209.

[9] Schwan H. P., Takashima, S.. Electrical Conduction and Dielectric Behavior in Biological Systems [J]. Encyclopedia of Applied Physics, Weinheim and New York: VCH Publishers, 1993(5): 177-200.

[10] A. De Lorenzo, A. Andreoli, J. Matthie, et al. Predicting Body Cell Mass with Bioimpedance by Using Theoretical Methods: A Technological Review [J]. Appl. Physiol, 1997, 82: 1542-1997.

[11] 唐敏. 生物阻抗测量原理与测量技术[J]. 生物医学工程学杂志, 1997, 14(2): 152-155.

[12] International Electrotechnical Commission. Methods of Measurements of Touch Currents and Protective Conductor Current [S]. IEC 60990, 1999.

[13] Jean-Louis Damez, Sylvie Clerjon, Said Abouelkaram, et al. Dielectric Behavior of Beef Meat in the 1~1500

kHz Range: Simulation with the Fricke/Cole-Cole Model [J]. Meat Science, 2007, 77: 512-519.

[14] White Erick A, Orazem Mark E, Bunge Annette L. Characterization of Damaged Skin by Impedance Spectroscopy: Mechanical Damage [J]. Pharmaceutical Research, 2013, 30(8): 2036-2049.

[15] 肖湘宁,等. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[16] 孟润泉,梁翼龙,宋建成,等. 基于谐波检测的井下高压电网选择性漏电保护系统[J]. 继电器, 2001, 29(5): 37-40.

[17] 杨黎鹏. 油田电网谐波分析及软件开发研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

作者简介:

李浩(1986),硕士研究生,主要从事剩余电流保护技术和防止人体触电方面的研究工作;

肖先勇(1968),博士,教授,博士生导师,从事不确定性理论在电力系统中的应用、电能质量和绿色智能电网方面的教学和研究工作。

(收稿日期:2014-03-04)

汽轮机性能试验热耗率不确定度的分析计算

张志恒 孙 戈 钟农兵

(四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610072)

摘 要: 介绍了汽轮机性能试验不确定度的主要来源和评定方法, 对测量参数的测量不确定度、影响系数和热耗不确定度进行了分析探讨, 并给出了一台 315 MW 机组汽轮机性能试验热耗率不确定度的分析计算实例, 对解析微分法和扰动分析法求影响系数进行了比较, 并指出了影响热耗率不确定度的主要因素和解决办法。

关键词: 汽轮机; 性能试验; 热耗率不确定度

Abstract: The main source and evaluation method for the uncertainty of turbine performance test are introduced, and the measurement uncertainty of measuring parameters, the influencing coefficients and the uncertainty of heat rate are analyzed and discussed. An example for the uncertainty of heat rate is given for a 315 MW steam turbine, and the differential methods to calculate the influencing coefficients are compared such as the analytical differentiation and small disturbance analysis method. Finally, the main factors affecting the uncertainty of heat rate and the solutions are pointed out.

Key words: steam turbine; performance test; uncertainty of heat rate

中图分类号: TK267 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0082-04

汽轮机热力性能试验是在规定的热力循环系统中, 用热工测量的方法获取各种有关的试验值。根据试验目的选择相应的试验标准, 是汽轮机热力性能试验的首要任务。但由于各种原因, 试验要求与标准规定是有所偏差的, 因此需要对热耗率不确定度进行分析计算。

1 试验不确定度的主要来源

1.1 不确定度是选择出来的

汽轮机性能试验的不确定度由试验所参照的标准来控制, 如 ASME PTC6-2004 试验热耗率的不确定度约为 0.25%^[1]。可以认为, 选定试验标准本身所具有的不确定度即为试验的基本不确定度。

1.2 测量次数和试验工况对试验不确定度的影响

测量次数越大, 试验标准偏差越可靠, 一般要求测量次数应充分大。试验工况在一定小范围内应该是稳定的, 所有热力性能试验标准对工况的稳定及参数波动范围均有明确规定, 控制参数是使试验不确定度达到或接近期望值, 同时减少修正计算的量。

1.3 系统隔离对试验不确定度的影响

试验系统隔离对试验结果的不确定度影响是比较大的, 一般情况下, 系统不明泄漏率对试验热耗率

的影响是 1:1。如 ASME PTC6-2004 规定, 试验时不明泄漏量不能超过满负荷时主蒸汽流量的 0.1%^[1]。

1.4 测量仪表对试验不确定度的影响

仪表不确定度反映了仪表及二次测量系统的测量精度, 它包括仪表的精密性、仪表的量程与该参数的大小之比、仪表因环境偏差而造成的各种附加误差和二次测量系统的不确定度。试验前, 需要对各个仪表进行校验, 并根据校验报告, 对测量参数进行仪表修正, 以确保得到试验标准要求的最小不确定度, 如果使用未经校准的仪表, 将使不确定度更大。

2 试验不确定度的评定

2.1 不确定度的 A、B 评定

不确定度依其评定方法可分为 A、B 两类, 当不确定度是采用统计方法得到的称 A 类评定, 当用非统计方法得到的称 B 类评定。不确定度的 A 类评定和 B 类评定并无本质差别, 只是评定方式不同而已。A 类评定通常根据重复读数和多重测点, 如试验中的压力等参数的时间和空间的不确定度采用 A 类评定; B 类评定一般根据其他信息进行不确定度估计, 如用仪器的校证书, 试验中仪器的不确定度采用 B 类评定。

2.2 合成不确定度

影响测量结果不确定度的因素很多,为了计算总不确定度,需要将各不确定度分量进行合成。在计算合成不确定度之前,需要确定各输入量的不确定度是否彼此相关。对汽轮机性能试验而言,各输入量函数关系为确定关系,认为互不相关,因此合成不确定度可由 A 类和 B 类评定所计算得到的多个不确定度用方和根方法进行合成得到。

2.3 扩展不确定度

扩展不确定度是将合成不确定度和所选的包含因子相乘得到,在工程技术领域中,测量结果的不确定度大都要求用扩展不确定度表示。如 ASME PTC6 标准中不确定度是扩展不确定度 U_{95} ,即置信概率取 95%,但包含因子直接取 2,且要求自由度大于 30^[2]。

3 试验不确定度的计算

在汽轮机试验中,测量不确定度包括直接测量不确定度和间接测量不确定度两个部分。如压力、温度的不确定度属于直接测量不确定度,功率、流量的不确定度属于间接测量不确定度。

3.1 直接测量参数不确定度

直接测量参数不确定度由仪器的不确定度、时间的不确定度和空间的不确定度三部分组成。

3.1.1 仪器的不确定度

仪表本身的不确定度是测量不确定度的主要来源,仪表不确定度反映了仪表及二次测量系统的测量精度,它包括仪表的精密性、环境温度影响、二次测量系统的不确定度等。

$$U'_I = \sqrt{U_1 \cdot \frac{FS}{\bar{X}} + U_1^2 + U_{sys}^2 + \dots}$$

其中 U'_I 为单台仪器的不确定度; U_1 为仪表或变送器的精密性; FS 为仪表或变送器的量程; $\bar{X}$ 为参数的平均值; U_t 为环境温度影响,对带有自动温度补偿的智能型变送器,此项一般不予考虑; U_{sys} 为二次测量系统的不确定度,对于采用数字输出的智能型变送器,此项为 0。

若被测量参数是通过相同类型和精度等级的多重测点测量得到的,则该平均值的不确定度为

$$U_I = U'_I / \sqrt{m}$$

其中, U_I 为仪表造成的测量平均值的不确定度; m

为试验时仪器的台数。

3.1.2 时间的不确定度

时间不确定度来自试验工况的稳定性,由试验标准差表征。一般情况下,试验标准均给出了最小的样本数量的要求,其计算公式如下。

$$S_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n-1)}$$

$$U'_T = \frac{t_v}{\bar{X}} \cdot \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$

其中 S_x 为试验标准差; U'_T 为单台仪器因采样时间变化造成的读数平均值的不确定度; X_i 为单次采集的数据; n 为测量次数; v 为自由度, $v = n - 1$; t_v 为置信度为 95% 的学生 t 氏分布值,可查表得到,当 $2 \leq n \leq 10^5$ 时,

$$t_v \approx \exp\left[\frac{0.498n + 0.242}{0.74n - 1}\right]$$

若用多台仪器测量,然后再取平均值,则

$$U_t = \frac{t_v}{\bar{X}} \cdot \frac{\bar{S}}{\sqrt{m \cdot n}}$$

$$\bar{S} = \sqrt{\sum_{i=1}^n S_i^2 / m}$$

其中 $\bar{S}$ 为各台仪器的测量值计算的 S 的平均值; U_t 为多台仪器因采样时间变化造成的读数平均值的不确定度; 自由度 $v = m \times (n - 1)$; $\bar{X}$ 为 m 个测点实测数据平均值的平均值。

3.1.3 空间的不确定度

因测量位置不同,同一被测参数的测量值会出现差异,即产生空间不确定度,如试验中的排汽压力。如样本数量大于 10 个,用计算时间的不确定度的方法;如样本数量小于 10 个,用下面公式估算。

$$U_s = \frac{t'_m \cdot R}{\bar{X}}$$

其中 U_s 为因采样位置不同使被测量参数出现差异造成的不确定度; t'_m 为自由度 $v = m$ 的代用 t 分布值,可查表得到; R 为 m 个测点实测数据平均值的范围,即最大平均值与最小平均值的差值 $R = \bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}$ 。

3.1.4 测量不确定度的合成

一旦确定上述三方面的不确定度,则被测参数的测量不确定度为

$$U_p = \sqrt{U_I^2 + U_t^2 + U_s^2}$$

其中, U_p 为被测参数的测量不确定度。

3.2 间接测量参数不确定度

试验中,有些计算变量是由若干测量参数计算而得到的,它们的不确定度是由相关测量参数的不确定度合成确定的。由下式决定为

$$U_R = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial R}{\partial P_i} \cdot U_{pi} \right)^2}$$

式中 $\partial R / \partial P_i$ 为影响系数,即计算变量 R 对测量 P_i 参数的变化的敏感性; U_{pi} 为测量参数的测量不确定度。

3.2.1 主蒸汽流量的不确定度

如试验是以主凝结水流量为主流量,则主蒸汽流量的不确定度不仅取决于实测的系统主流量和各辅助流量的测量不确定度,而且与系统不明漏率有关。主蒸汽流量的不确定度计算如下。

$$\frac{dF_{ms}}{F_{ms}} \approx \sqrt{\left(\frac{dF_{cw}}{F_{cw}} \right)^2 + \left(\frac{F_{un}}{F_{ms}} \right)^2 + \left(\sum \frac{F_{aux}}{F_{ms}} \cdot \frac{dF_{aux}}{F_{aux}} \right)^2}$$

其中, dF_{ms} / F_{ms} 为主蒸汽流量不确定度; dF_{cw} / F_{cw} 为主凝结水流量测量不确定度; F_{un} / F_{ms} 为系统不明泄漏量率; F_{aux} / F_{ms} 为辅助流量与主蒸汽流量的比值; dF_{aux} / F_{aux} 为辅助流量的测量不确定度。

本次试验中,凝结水流量不确定度为 0.213 9%,系统不明泄漏率为 0.2%,由于辅助流量的不确定度对主蒸汽流量不确定度影响较小,暂不考虑,则主蒸汽流量的不确定度为

$$\frac{dF_{ms}}{F_{ms}} \approx \sqrt{0.2139^2 + 0.2^2} / 100 = 0.2928\%$$

3.2.2 功率测量不确定度

功率测量不确定度取决于功率测量元件、电压互感器、电流互感器和数据采集系统的测量不确定度,计算如下。

$$U_p = \sqrt{U_I^2 + U_{PT}^2 + U_{CT}^2 + U_{sys}^2}$$

式中 U_I 为功率的测量不确定度; U_{PT} 为电压互感器的不确定度; U_{CT} 为电流互感器的不确定度; U_{sys} 为二次测量系统的不确定度,对于数字输出,此项为 0。

本次试验中,功率的测量不确定度为 0.103 5%,电压互感器的不确定度为 0.057 7%,电流互感器的不确定度为 0.028 9%,则功率的不确定度为

$$U_p = \sqrt{0.1035^2 + 0.0577^2 + 0.0289^2} / 100 = 0.122\%$$

3.3 热耗率的不确定度

与测量参数的不确定度一样,热耗率的不确定度是其计算式中的各个计算变量的不确定度的方和根。公式如下。

$$U_{HR} = \sqrt{\sum_{i=1}^k U_{HRI}^2}$$

其中, U_{HRI} 为热耗率各计算变量的不确定度,等于变量对热耗率的影响系数与各变量的测量不确定度的乘积。

计算热耗率不确定度的关键在于确定各个变量的影响系数,对于影响系数,可采用查表法、解析微分法和小扰动分析法来计算。

3.3.1 查表法

查表法是指利用文献中给出的参数变量不确定度对热耗率的影响系数来计算热耗率的不确定度,但是有适用范围和使用局限性。对于试验中热耗率的修正产生的附加影响,可利用修正曲线来获得修正参数的影响系数。

3.3.2 解析微分法

解析微分法计算影响系数,首先要获得热耗率对试验中各个测量参数的数学表达式,然后通过对每个参数求偏导数的方法来获得参数对热耗率的影响系数。标准 ANSI/ASME PTC6 REPORT-1985 对解析方法的计算过程做了详细的阐述^[2],该方法主要适用于测量主给水流量的热力性能试验,对于包含各级抽汽加热器参数和主凝结水流量较复杂的热力性能试验,通过解析法求取主蒸汽流量对热耗率的影响系数计算则比较复杂。

3.3.3 小扰动分析法

对于较为复杂的汽轮机性能试验,采用编制的热耗率计算程序,分别使用某一变量的两个数值对试验进行两次评估并注意其差别,从而得到各个变量对热耗率的影响系数。

4 热耗率不确定度的试验示例

以某电厂 315 MW 机组为例,按照 ASME PTC6-2004 标准进行性能试验,其中压力、绝压和差压变送器的精度等级为 0.1,温度测点用等级精度为 0.4 热电偶进行测量,功率采用精度为 0.1 级的 GXM305 多用校验仪测定。数据采集用输力强 IMP 分散式数据采集系统,由计算机控制采集和存储。试验时间为 2 h,每 30 s 记录一次,总共 240 个数据点。试验数据计算如下:表 1 为主要参数的测量不确定度,其中,主蒸汽温度、背压 4 个测点,主蒸汽压力、再热压力、再热温度、冷再压力、冷再温度、最终给水温度 2 个测点;表 2 给出了解析微分法和小扰动分析法计算变量参数对热耗率的影响系数,两种

表 1 直接测量参数的测量不确定度

参数名称	平均值	仪表量程	仪器 /%	时间 /%	空间 /%	合成 /%
主汽压力	16.45 MPa	25 MPa	0.107 5	0.027 7		0.111 0
主汽温度	538.72 °C		0.200 0	0.010 3		0.200 3
高排压力	3.76 MPa	6 MPa	0.112 8	0.012 9		0.113 6
高排温度	336.29 °C		0.282 8	0.018 5		0.283 4
热再压力	3.42 MPa	6 MPa	0.124 1	0.013 3		0.124 9
热再温度	536.15 °C		0.282 8	0.021 1		0.283 6
背压	7.96 kPa	200 kPa	1.255 7	0.043 0	0.450 0	1.334 5
最终给水压力	18.79 MPa	32 MPa	0.170 3	0.030 3		0.172 9
最终给水温度	277.32 °C		0.282 8	0.002 9		0.282 9
凝结水压力	1.48 MPa	4 MPa	0.271 2	0.043 2		0.274 6
凝结水温度	109.88 °C		0.400 0	0.010 9		0.400 1
凝结水差压 1	111.98 kPa	200 kPa	0.178 6	0.137 2		0.225 3
凝结水差压 2	111.14 kPa	200 kPa	0.179 9	0.138 1		0.226 8
电功率	318.16 MW		0.100 0	0.026 8		0.103 5

表 2 解析微分法与小扰动分析法计算变量参数对热耗率的影响系数

测量参数	小扰动分析法			解析微分法		
	影响热耗率 不确定度 /% A	修正附加 影响 /% B	变量对热耗率的 影响系数 /% $C = A - B$	影响热耗率 不确定度 /% A	修正附加 影响 /% B	变量对热耗率的 影响系数 /% $C = A - B$
主蒸汽流量	1.005 1		1.005 1	1.000 0		1.000 0
电功率	-1.000 0		-1.000 0	-1.000 0		-1.0000
主蒸汽压力	-0.070 9	-0.090 4	0.019 5	-0.073 0	-0.090 4	0.017 4
主蒸汽温度	0.580 3	-0.146 9	0.727 3	0.584 9	-0.146 9	0.731 8
最终给水压力	-0.006 6		-0.006 6	0.000 0		0.000 0
最终给水温度	-0.525 3		-0.525 3	-0.557 6		-0.557 6
再热压力	-0.010 8	0.091 7	-0.102 5	-0.010 4	0.091 7	-0.102 1
再热温度	0.380 0	-0.142 8	0.522 8	0.385 9	-0.142 8	0.528 7
冷再压力	0.029 5	0.091 7	-0.062 2	0.032 8	0.091 7	-0.058 9
冷再温度	-0.257 8		-0.257 8	-0.263 2		-0.263 2
排汽压力	0.000 0	-0.010 2	0.010 2		-0.010 2	0.010 2

表 3 热耗率总不确定度

测量参数	小扰动分析法			解析微分法	
	测量不确定度 /% D	热耗率不确定度 /% $E = C \times D$	$F = E_2$	热耗率不确定度 /% $E = C \times D$	$F = E^2$
主蒸汽流量	0.292 8	0.294 3	0.086 6	0.292 8	0.085 7
电功率	0.122 0	-0.122 0	0.014 9	-0.122 0	0.014 9
主蒸汽压力	0.111 0	0.002 2	0.000 0	0.001 9	0.000 0
主蒸汽温度	0.200 3	0.145 6	0.021 2	0.146 6	0.021 5
给水压力	0.172 9	-0.001 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0
给水温度	0.282 9	-0.148 6	0.022 1	-0.157 7	0.024 9
再热压力	0.124 9	-0.012 8	0.000 2	-0.012 8	0.000 2
再热温度	0.283 6	0.148 3	0.022 0	0.149 9	0.022 5
冷再压力	0.113 6	-0.007 1	0.000 0	-0.006 7	0.000 0
冷再温度	0.283 4	-0.073 1	0.005 3	-0.074 6	0.005 6
排汽压力	1.334 5	0.013 6	0.000 2	0.013 6	0.000 2
ΣF			0.172 5		0.175 4
热耗率总不确定度 $\sqrt{\Sigma F}$ /%			0.415 4		0.418 8

(下转第 90 页)

5 结 论

(1) 针对一管多机长引水系统水电站的动态响应特点,提出适应电力系统中长期稳定分析的水轮机降阶模型。

(2) 针对水电站调压井结构复杂、阻抗系数难以确定等特点,提出以调压井结构系数动态修正调压井溢流时间常数的方法,提高仿真模型的准确性。

(3) 与电网实测扰动数据的对比分析表明,该模型能够正确反映中长期过程中水电机组的动态响应,可用于此类特殊布置水电站的安全稳定性分析。

参考文献

- [1] 高慧敏,刘宪林,徐政.水轮机详细模型对电力系统暂态稳定分析结果的影响[J].电网技术,2005,29(2):5-9.
- [2] 李华,史可琴,范越,等.电力系统稳定计算用水轮机调速器模型结构分析[J].电网技术,2007,31(5):25-30.
- [3] 汤涌,宋新立,刘文焯,等.电力系统全过程动态仿真中的长过程动态模型——电力系统全过程动态仿真软件开发之三[J].电网技术,2002,26(11):20-25.
- [4] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies. Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies[J]. Transactions on Power System, 1992, 7(1): 167-179.

(上接第 85 页)

方法计算出的影响系数差别不大,因此,对于复杂的函数建议采用小扰动分析法;从表 3 知,热耗率的不确定度超出了标准的要求,主要是主蒸汽流量的不确定度太大,功率不确定度也没达到标准要求。

5 结 论

主要介绍了汽轮机热耗率不确定度的分析计算过程,并给出了计算实例,从数据中可以看出,主蒸汽流量、功率和温度对热耗率产生的不确定度影响比较大,压力测点对测量结果的不确定度影响较小。因此,可在试验过程中考虑降低这些参数的不确定度,如增加重要测点个数、用精度较高的温度测温元

- [5] Hannett L. N, Feltes J. W, Fardanesh B, et al. Modeling and Control Tuning of a Hydro Station with Units Sharing a Common Penstock Section [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(4): 1407-1414.
- [6] 曾云,张立翔,郭亚昆,等.共用管段的水力解耦及非线性水轮机模型[J].中国电机工程学报,2012,32(14):103-108.
- [7] Kundur P. Power System Stability and Control [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [8] DL/T 5058-1996,水电站调压室设计规范[S].
- [9] 程永光,杨建东.用三维计算流体力学方法计算调压室阻抗系数[J].水力学报,2005,36(7):787-792.
- [10] 付亮,王义国.有调压井水电站甩负荷试验与仿真分析[J].水电能源科学,2012,30(6):154-157.

作者简介:

汤 凡(1984),硕士,工程师,主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制技术研究;

丁理杰(1981),博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制技术研究;

张 华(1985),硕士,工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析;

滕予非(1984),博士,工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析;

魏 巍(1984),博士,工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析。

(收稿日期:2014-02-11)

件和减少系统不明泄漏率等。

参考文献

- [1] ASME PTC-2004. Steam Turbines Performance Test Codes [S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2005.
- [2] ANSI/ASME PTC-6 REPORT 1985. Guidance for Evaluation of Measurement Uncertainty in Performance Tests of Steam Turbines [S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 1986.

作者简介:

张志恒(1977),硕士研究生,工程师,主要从事发电厂设备调试和性能试验方面的研究。

收稿日期:2014-04-08)

电力系统中长期稳定分析用联合供水水电机组 非线性仿真模型

汤 凡,丁理杰,张 华,滕予非,魏 巍

(国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘 要: 针对共用长引水系统的水电机组间的水力耦合关系,推导建立其数学模型,并根据电力系统仿真计算的需求,对模型进行降阶处理。针对水电站调压井结构复杂的特点,提出以调压井结构系数动态修正调压井溢流时间常数的方法。模型综合考虑了调压井和共用引水管段对电力系统中长期动态过程的影响,仿真结果与实测扰动响应的对比表明,模型具有较高的精度,可作为现有电力系统仿真计算用水电机组模型的有效补充。

关键词: 水轮机模型; 中长期稳定; 电力系统仿真; 水力耦合; 结构系数

Abstract: Based on the theoretical derivation of hydro-mechanical coupling relationship between the hydroelectric generating sets sharing the long common conduit, the nonlinear hydro turbine model with sharing long diversion system is established and order-reduced in accordance with the demand of power system simulation. According to the characteristics of complex structure of surge shaft, a method to correct the overflow time constant of surge shaft with its structure coefficients is proposed. This hydro turbine model can reflect the influence of surge shaft and sharing common conduit on the long term dynamic process in power system, the accuracy of model is proved by the comparison of simulation results and actual recording data in power system, which can be used as part of the hydroelectric generating set model for the simulation and calculation of the existing power system.

Key words: hydro turbine model; middle and long term stability; power system simulation; hydro-mechanical coupling; structure coefficient

中图分类号: TM769 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0086-05

特殊的地理条件使得一些水电站使用长引水涵洞与上游水库相连,并在涵洞下游末端采用分叉压力钢管。由于水轮机出力由水头和流量共同决定,因此共用引水管段的水力耦合特性导致末端水电机组出力和调节特性存在关联作用。这对电力系统的 AGC 控制、安控布置以及中长期稳定过程等均带来一定程度的影响。

要准确分析水电厂在扰动后的动态响应及对电力系统的影响,必须依赖全过程动态仿真中控制保护和动态元件的模型准确度^[1]。但目前对于含长引水系统的一管多机水电站仍缺乏准确的计算模型。电力系统暂态仿真程序广泛使用的理想水轮机模型和刚性水击模型仅适用于一管一机系统^[2]。全过程动态仿真程序^[3]虽然提供了一管多机水轮机模型,但该模型不能计及长引水管道条件下调压井的动态响应对机械转矩的影响。针对大扰动下水电站动态特性对系统行为的影响,IEEE 联合工作组

于 1992 年提出了包括刚性水击、弹性水击的单引水管水轮机模型和共用引水管水轮机模型^[4],为电力系统的仿真计算提供了有力参考。而后陆续有文献^[5-6]针对不含调压井的一管多机系统的建模和解耦控制问题开展研究。实际应用中,针对共用长引水管道水电机组,必须综合考虑调压井和涵洞中的水力耦合作用对动态过程的影响,现有模型库无法满足该需求。

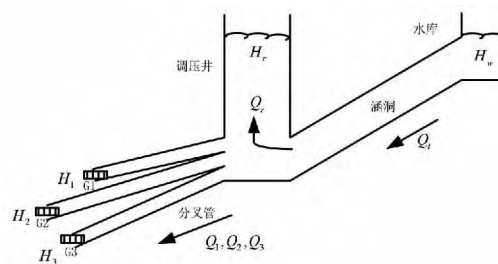


图 1 含调压井的水力系统

基于理论推导,提出一种共用长引水系统的水电机组仿真模型,综合考虑调压井和长引水隧洞水

力过程对机组动态特性的影响,仿真结果与实测数据的对比表明,模型能够正确反映中长期过程中水电机组的动态响应。

1 含调压井的弹性水击模型

对于任意一段引水管道,考虑水管的弹性后,由水力方程^[7]

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -g \frac{\partial H}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -\alpha \frac{\partial H}{\partial t}$$

可解得

$$H_b = H_a \operatorname{sech}(T_e s) - Z_0 Q_b \tanh(T_e s) \quad (2)$$

$$Q_a = Q_b \cosh(T_e s) + \frac{1}{Z_0} H_b \sinh(T_e s)$$

式中 H_a 、 H_b 分别为水管两端的水头; Q_a 、 Q_b 为两端流量; T_e 为水管的弹性时间,由管长 L 与波速 a 决定,即

$$T_e = \frac{L}{a} = \frac{L}{\sqrt{g/\alpha}} \quad (3)$$

式中 α 由管壁厚度、管道面积、水体压缩模量、管材弹性模量等因素决定。

对图 1 中的涵洞,运用式(2),并以标幺值方式表示,有

$$h_r = h_w \operatorname{sech}(T_e T s) - Z_T q_T \tanh(T_e T s) \quad (4)$$

涵洞上游端的水头偏差为 0,即 $h_w = 1$,因此式(4)写为

$$h_r = 1 - Z_T q_T \tanh(T_e T s) \quad (5)$$

再利用涵洞与调压井和分叉管间的流量关系,有

$$q_T = q_r + q_1 + q_2 + q_3 \quad (6)$$

忽略调压井中的波动过程,有调压井流量和水头间的关系

$$Q_r \Delta t = (H_r - H_{r0}) S_r \quad (7)$$

则

$$Q_r = \frac{\partial (H_r - H_{r0}) S_r}{\partial t} = \frac{\partial H_r}{\partial t} S_r \quad (8)$$

以标幺值和微分算子表示式(8),有

$$q_r = s T_s h_r \quad (9)$$

式中 T_s 为调压井的溢水时间常数, $T_s = S_r$ = 调压井面积。

将式(6)、(9)代入式(5)得

$$h_r = \frac{1 - Z_T (q_1 + q_2 + q_3) \tanh(T_e T s)}{1 + s Z_T T_s \tanh(T_e T s)} \quad (10)$$

同样对每条分叉管,应用式(4),可得

$$h_i = h_r \operatorname{sech}(T_{ei} s) - Z_i q_i \tanh(T_{ei} s) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (11)$$

式中 T_{ei} ($i = 1, 2, 3$) 分别为 3 条分叉管的弹性时间; Z_i ($i = 1, 2, 3$) 为 3 条引水管的水力阻抗,因此

$$h_i = \frac{1 - Z_T (q_1 + q_2 + q_3) \tanh(T_e T s)}{1 + s Z_T T_s \tanh(T_e T s)} \operatorname{sech}(T_{ei} s) - Z_i q_i \tanh(T_{ei} s) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (12)$$

上式不适应于大规模电力系统仿真计算,因此考虑对模型进行降阶处理。

2 降阶模型

因为

$$\tanh(T_s) = \frac{1 - e^{-2T_s}}{1 + e^{-2T_s}} = \frac{s T \prod_{n=1}^{\infty} \left[1 + \left(\frac{s T}{n \pi} \right)^2 \right]}{\prod_{n=1}^{\infty} \left[1 + \left(\frac{2s T}{(2n-1) \pi} \right)^2 \right]} \quad (13)$$

则当 $n = 0$ 时,

$$\tanh(T_s) = T s \quad (14)$$

即假设水柱是无弹性的,针对图 1 中水力系统,可将式(4)改写为

$$H_r = H_w - Z_T Q_T T_e T s \quad (15)$$

再考虑调压井水头和流量的关系以及涵洞与调压井和分叉管间的流量关系,可推导出

$$H_r = \frac{H_w - Z_T (Q_1 + Q_2 + Q_3) T_e T s}{1 + Z_T T_s T_e T s^2} \quad (16)$$

由于涵洞上游水库水头偏差为 0,则

$$H_w - H_r = \frac{Z_T (Q_1 + Q_2 + Q_3) T_e T s}{1 + Z_T T_s T_e T s^2} \quad (17)$$

对每个分叉管而言

$$H_r - H_i = \frac{L_i}{S_i g} \frac{dQ_i}{dt} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (18)$$

设 Q_{i0} ($i = 1, 2, 3$) 为各分叉管的额定流量,定义 q_i ($i = 1, 2, 3$) 为对应的流量标幺值。

$$q_i = \frac{Q_i}{Q_{i0}} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (19)$$

则式(17)和式(18)变换为

$$H_w - H_r = \frac{Z_T T_e T s (Q_{10} q_1 + Q_{20} q_2 + Q_{30} q_3)}{1 + Z_T T_s T_e T s^2} \quad (20)$$

$$H_r - H_i = \frac{L_i}{S_i g} s (Q_{i0} q_i) \quad (i = 1, 2, 3)$$

即

$$H_w - H_i = \frac{Z_T T_{eT} s}{1 + Z_T T_{eT} s^2} (Q_{10} q_1 + Q_{20} q_2 + Q_{30} q_3) + \frac{L_i}{S_i g} s (Q_{i0} q_i) \quad (i=1, 2, 3) \quad (21)$$

令 H_B 为额定水头, 并令 $H_B = H_w$, 式 (21) 两边同除以 H_B , 有

$$1 - h_i = \frac{Z_T T_{eT} s}{(1 + Z_T T_{eT} s^2) H_B} (Q_{10} q_1 + Q_{20} q_2 + Q_{30} q_3) + \frac{L_i Q_{i0}}{S_i g H_B} s q_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (22)$$

令

$$T_{wTi} = Z_T T_{eT} \frac{Q_{i0}}{H_B} \quad C_{si} = T_s \frac{H_B}{Q_{i0}} \quad (i=1, 2, 3) \quad (23)$$

$$T_{wpi} = \frac{L_i Q_{i0}}{S_i g H_B}$$

T_{wTi} 、 T_{wpi} 、 C_{si} 分别为以 3 条引水管额定参数规格化的涵洞、分叉管水锤时间常数和调压井溢水时间常数, 则

$$\begin{bmatrix} 1 - h_1 \\ 1 - h_2 \\ 1 - h_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_{wT1}}{1 + T_{wT1} C_{s1} s^2} + T_{wP1} & \frac{T_{wT2}}{1 + T_{wT2} C_{s2} s^2} & \frac{T_{wT3}}{1 + T_{wT3} C_{s3} s^2} \\ \frac{T_{wT1}}{1 + T_{wT1} C_{s1} s^2} & \frac{T_{wT2}}{1 + T_{wT2} C_{s2} s^2} + T_{wP2} & \frac{T_{wT3}}{1 + T_{wT3} C_{s3} s^2} \\ \frac{T_{wT1}}{1 + T_{wT1} C_{s1} s^2} & \frac{T_{wT2}}{1 + T_{wT2} C_{s2} s^2} & \frac{T_{wT3}}{1 + T_{wT3} C_{s3} s^2} + T_{wP3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s q_1 \\ s q_2 \\ s q_3 \end{bmatrix} \quad (24)$$

由此可建立含调压井和分叉管的水轮机模型, 当图 1 中 3 条分叉管的参数一致时, 其仿真模型可以图 2 中框图表示。

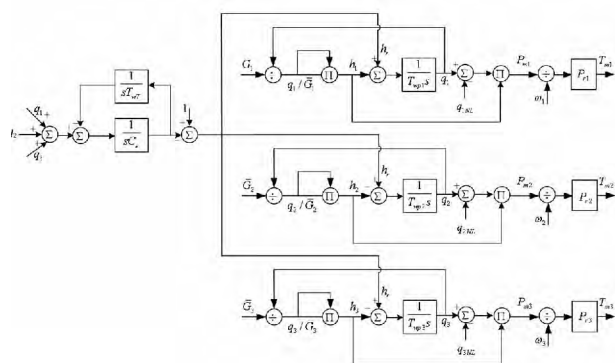


图 2 共用长引水管道的水轮机模型

3 特殊调压井的处理

图 1 中调压井尺寸均匀, 上下孔径一致, 实际许

多水电站的调压井可能由竖井和上室组成, 并且调压井连接管与竖井内径也不相同, 如图 3 所示。对于图 3 所示的阻抗式调压室, 由于水流在阻抗孔口处消耗了部分能量, 可以有效减小调压井中水位波动振幅。但阻抗的存在, 也导致水波不能完全反射, 使得压力引水管道受到水击的影响。

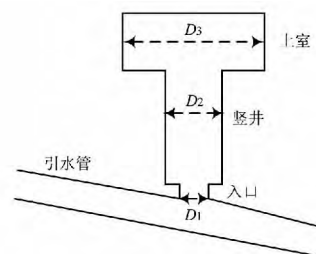


图 3 阻抗型调压井模型

特殊的结构使得调压井的阻抗系数很难确定, 并且其值也随着过渡过程中流量、水位等不断变化。在水力过渡过程计算中, 调压井阻抗系数一般依据 Gardel 公式、模型试验和 CFD^[8-10] 计算来取值。对于电力系统时域仿真而言, 需要阻抗系数随工况动态取值, 利用显式公式表示不但繁杂而且也无法准确表示某些特殊结构下的准确值。这里提出调压井结构系数 k 动态修正调压井溢水时间常数, 以模拟过渡过程中压力引水管道受到阻抗口影响的水头变化。

图 4 所示为含结构系数 k 的引水管和调压井部分仿真模型, C_s 为竖井段的溢流时间常数, 结构系数 k 随调压井水头变化, 准确值可通过机组负荷试验或详细的流体力学计算获得。简单起见, 可利用分段函数近似表示 k 为

$$k \approx \begin{cases} K_1 & (h \leq h_1) \\ K_2 & (h_1 < h \leq h_2) \\ K_3 & (h_2 < h) \end{cases} \quad (25)$$

式中 h_1 、 h_2 分别表示了调压井在不同截面积处的高度。

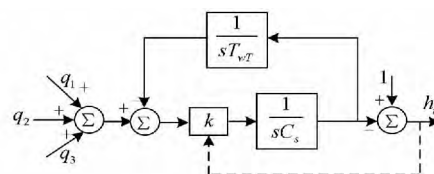


图 4 含结构系数的引水管和调压井模型

4 仿真计算

算例 1: 某采用一管三机的水电站, 其额定水头

92 m, 单机引用流量 $62 \text{ m}^3/\text{s}$, 引水隧洞长 22.975 km, 衬砌后截面积 45.3 m^2 , 圆筒型调压井内径 22 m, 压力钢管内径 5.8 m, 总长 391.3 m。试验运行工况为: 3 号机停机, 1 号、2 号机以开度模式运行, 一次调频功能投入, 1 号机 AGC 退出运行, 2 号机 AGC 闭环。

图 5、图 6 中虚线分别为 1、2 号机在 2 号机 AGC 闭环试验时的机组有功功率曲线。可见, 由于 1、2 号机共用引水隧洞, 2 号机快速降出力, 导致水压升高, 使得 1 号机在定开度模式下出力明显抬升, 抬升峰值接近机组额定功率的 20%。由于该电厂 AGC 只下发一次 AGC 指令, 监控系统在功率到位后即退出功率闭环, 因此机组间的水力耦合将影响到电厂 AGC 的执行精度。

由于试验中机组调速系统采用开度模式, 并且功率调节过程中一次调频未参与动作, 因此图 5 中功率曲线代表了该复杂引水系统在受扰后的响应, 能够反映引水系统和水轮机的动态特性。按照式 (23) 计算机组参数, 并采用图 2 所示模型模拟引水系统和水轮机, 仿真结果如图 5、图 6 所示。可见仿真结果与实测曲线吻合较好。

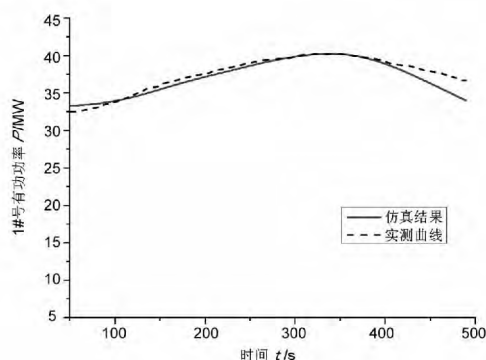


图 5 1 号机组有功功率曲线

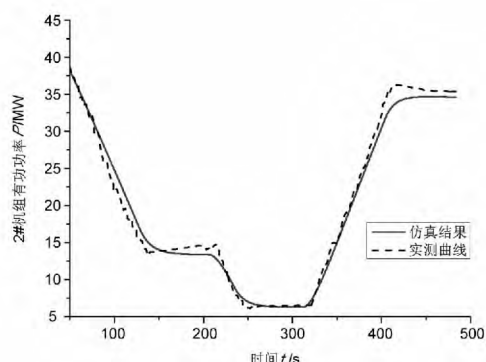


图 6 2 号机组有功功率曲线

算例 2: 某采用一管两机系统, 其额定水头 288

m, 单机引用流量 $232.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 引水隧洞长度 16.67 km, 衬砌后截面积 100.1 m^2 , 阻抗型调压井、竖井段直径 21 m, 压力钢管内径 6.5 m, 长度 584 m。该电站为某特高压直流输电工程的龙头电站, 其特殊的引水隧洞和调压井结构对电力系统动态过程具有较大影响。

图 7 所示为某次直流双极闭锁故障下 2 号机组安控切机后的 1 号机组功率曲线。由于 2 号机组断路器动作后迅速关闭阀门, 导致 1 号机水压升高, 造成机组出力抬升, 峰值接近额定容量的 21%。由于机组容量大, 在系统中地位重要, 1 号机的动态响应特性加大了事故后交流断面功率越限的风险。并且, 该电站作为直流工程的配套电源, 某些方式下可能采取孤岛运行方式, 其引水系统的动态过程也将对直流送端孤岛系统的频率稳定性产生影响。

采用含结构系数的调压井和引水系统模型, 并采用分段函数近似描述结构系数 k , 建立该电站的仿真模型, 按照故障前方式设置模型运行条件, 仿真结果如图 7 所示。可见, 仿真结果在有功功率波动峰值、变化率等方面均具有较高精度。而对于阻抗型调压井, 如果不考虑调压井的阻抗系数变化, 虽然机组有功波动峰值一致, 但其动态过程会与实际情况存在较大误差, 如图 7 所示。因此对于含阻抗型或其他复杂类型调压井的水电站, 应在仿真模型中详细计入调压井的动态特性影响。

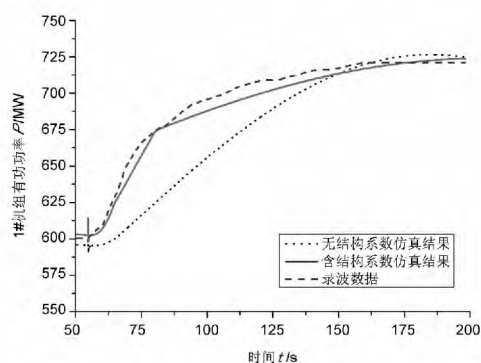


图 7 2 号机组安控切机后 1 号机组有功功率曲线

由于对引水涵洞、分叉压力钢管和调压井时间常数的计算仅利用了部分尺寸参数, 因此不可避免与实际录波曲线存在误差。但该方法可应用于已知少量水力参数条件下的前期规划研究和快速建模分析。水电站投产后, 通过原动机建模试验开展对水锤时间常数的实测可有效提高模型的精确度。

5 结 论

(1) 针对一管多机长引水系统水电站的动态响应特点,提出适应电力系统中长期稳定分析的水轮机降阶模型。

(2) 针对水电站调压井结构复杂、阻抗系数难以确定等特点,提出以调压井结构系数动态修正调压井溢流时间常数的方法,提高仿真模型的准确性。

(3) 与电网实测扰动数据的对比分析表明,该模型能够正确反映中长期过程中水电机组的动态响应,可用于此类特殊布置水电站的安全稳定性分析。

参考文献

- [1] 高慧敏,刘宪林,徐政.水轮机详细模型对电力系统暂态稳定分析结果的影响[J].电网技术,2005,29(2):5-9.
- [2] 李华,史可琴,范越,等.电力系统稳定计算用水轮机调速器模型结构分析[J].电网技术,2007,31(5):25-30.
- [3] 汤涌,宋新立,刘文焯,等.电力系统全过程动态仿真中的长过程动态模型——电力系统全过程动态仿真软件开发之三[J].电网技术,2002,26(11):20-25.
- [4] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies. Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies[J]. Transactions on Power System,1992,7(1):167-179.

(上接第 85 页)

方法计算出的影响系数差别不大,因此,对于复杂的函数建议采用小扰动分析法;从表 3 知,热耗率的不确定度超出了标准的要求,主要是主蒸汽流量的不确定度太大,功率不确定度也没达到标准要求。

5 结 论

主要介绍了汽轮机热耗率不确定度的分析计算过程,并给出了计算实例,从数据中可以看出,主蒸汽流量、功率和温度对热耗率产生的不确定度影响比较大,压力测点对测量结果的不确定度影响较小。因此,可在试验过程中考虑降低这些参数的不确定度,如增加重要测点个数、用精度较高的温度测温元

- [5] Hannett L. N, Feltes J. W, Fardanesh B, et al. Modeling and Control Tuning of a Hydro Station with Units Sharing a Common Penstock Section [J]. IEEE Transactions on Power Systems,1999,14(4):1407-1414.
- [6] 曾云,张立翔,郭亚昆,等.共用管段的水力解耦及非线性水轮机模型[J].中国电机工程学报,2012,32(14):103-108.
- [7] Kunder P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill,1994.
- [8] DL/T 5058-1996,水电站调压室设计规范[S].
- [9] 程永光,杨建东.用三维计算流体力学方法计算调压室阻抗系数[J].水力学报,2005,36(7):787-792.
- [10] 付亮,王义国.有调压井水电站甩负荷试验与仿真分析[J].水电能源科学,2012,30(6):154-157.

作者简介:

汤 凡(1984),硕士,工程师,主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制技术研究;

丁理杰(1981),博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制技术研究;

张 华(1985),硕士,工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析;

滕予非(1984),博士,工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析;

魏 巍(1984),博士,工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析。

(收稿日期:2014-02-11)

件和减少系统不明泄漏率等。

参考文献

- [1] ASME PTC-2004. Steam Turbines Performance Test Codes[S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers,2005.
- [2] ANSI/ASME PTC-6 REPORT 1985. Guidance for Evaluation of Measurement Uncertainty in Performance Tests of Steam Turbines[S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers,1986.

作者简介:

张志恒(1977),硕士研究生,工程师,主要从事发电厂设备调试和性能试验方面的研究。

收稿日期:2014-04-08)

电力系统中长期稳定分析用联合供水水电机组 非线性仿真模型

汤 凡,丁理杰,张 华,滕予非,魏 巍

(国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘 要: 针对共用长引水系统的水电机组间的水力耦合关系,推导建立其数学模型,并根据电力系统仿真计算的需求,对模型进行降阶处理。针对水电站调压井结构复杂的特点,提出以调压井结构系数动态修正调压井溢流时间常数的方法。模型综合考虑了调压井和共用引水管段对电力系统中长期动态过程的影响,仿真结果与实测扰动响应的对比表明,模型具有较高的精度,可作为现有电力系统仿真计算用水电机组模型的有效补充。

关键词: 水轮机模型; 中长期稳定; 电力系统仿真; 水力耦合; 结构系数

Abstract: Based on the theoretical derivation of hydro-mechanical coupling relationship between the hydroelectric generating sets sharing the long common conduit, the nonlinear hydro turbine model with sharing long diversion system is established and order-reduced in accordance with the demand of power system simulation. According to the characteristics of complex structure of surge shaft, a method to correct the overflow time constant of surge shaft with its structure coefficients is proposed. This hydro turbine model can reflect the influence of surge shaft and sharing common conduit on the long term dynamic process in power system, the accuracy of model is proved by the comparison of simulation results and actual recording data in power system, which can be used as part of the hydroelectric generating set model for the simulation and calculation of the existing power system.

Key words: hydro turbine model; middle and long term stability; power system simulation; hydro-mechanical coupling; structure coefficient

中图分类号: TM769 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0086-05

特殊的地理条件使得一些水电站使用长引水涵洞与上游水库相连,并在涵洞下游末端采用分叉压力钢管。由于水轮机出力由水头和流量共同决定,因此共用引水管段的水力耦合特性导致末端水电机组出力和调节特性存在关联作用。这对电力系统的 AGC 控制、安控布置以及中长期稳定过程等均带来一定程度的影响。

要准确分析水电厂在扰动后的动态响应及对电力系统的影响,必须依赖全过程动态仿真中控制保护和动态元件的模型准确度^[1]。但目前对于含长引水系统的一管多机水电站仍缺乏准确的计算模型。电力系统暂态仿真程序广泛使用的理想水轮机模型和刚性水击模型仅适用于一管一机系统^[2]。全过程动态仿真程序^[3]虽然提供了一管多机水轮机模型,但该模型不能计及长引水管道条件下调压井的动态响应对机械转矩的影响。针对大扰动下水电站动态特性对系统行为的影响,IEEE 联合工作组

于 1992 年提出了包括刚性水击、弹性水击的单引水管水轮机模型和共用引水管水轮机模型^[4],为电力系统的仿真计算提供了有力参考。而后陆续有文献^[5-6]针对不含调压井的一管多机系统的建模和解耦控制问题开展研究。实际应用中,针对共用长引水管道水电机组,必须综合考虑调压井和涵洞中的水力耦合作用对动态过程的影响,现有模型库无法满足该需求。

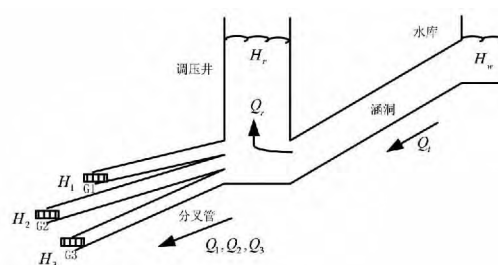


图 1 含调压井的水力系统

基于理论推导,提出一种共用长引水系统的水电机组仿真模型,综合考虑调压井和长引水隧洞水

力过程对机组动态特性的影响,仿真结果与实测数据的对比表明,模型能够正确反映中长期过程中水电机组的动态响应。

1 含调压井的弹性水击模型

对于任意一段引水管道,考虑水管的弹性后,由水力方程^[7]

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -g \frac{\partial H}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -\alpha \frac{\partial H}{\partial t}$$

可解得

$$H_b = H_a \operatorname{sech}(T_e s) - Z_0 Q_b \tanh(T_e s) \quad (2)$$

$$Q_a = Q_b \cosh(T_e s) + \frac{1}{Z_0} H_b \sinh(T_e s)$$

式中 H_a 、 H_b 分别为水管两端的水头; Q_a 、 Q_b 为两端流量; T_e 为水管的弹性时间,由管长 L 与波速 a 决定,即

$$T_e = \frac{L}{a} = \frac{L}{\sqrt{g/\alpha}} \quad (3)$$

式中 α 由管壁厚度、管道面积、水体压缩模量、管材弹性模量等因素决定。

对图 1 中的涵洞,运用式(2),并以标幺值方式表示,有

$$h_r = h_w \operatorname{sech}(T_e T s) - Z_T q_T \tanh(T_e T s) \quad (4)$$

涵洞上游端的水头偏差为 0,即 $h_w = 1$,因此式(4)写为

$$h_r = 1 - Z_T q_T \tanh(T_e T s) \quad (5)$$

再利用涵洞与调压井和分叉管间的流量关系,有

$$q_T = q_r + q_1 + q_2 + q_3 \quad (6)$$

忽略调压井中的波动过程,有调压井流量和水头间的关系

$$Q_r \Delta t = (H_r - H_{r0}) S_r \quad (7)$$

则

$$Q_r = \frac{\partial (H_r - H_{r0}) S_r}{\partial t} = \frac{\partial H_r}{\partial t} S_r \quad (8)$$

以标幺值和微分算子表示式(8),有

$$q_r = s T_s h_r \quad (9)$$

式中 T_s 为调压井的溢水时间常数, $T_s = S_r$ = 调压井面积。

将式(6)、(9)代入式(5)得

$$h_r = \frac{1 - Z_T (q_1 + q_2 + q_3) \tanh(T_e T s)}{1 + s Z_T T_s \tanh(T_e T s)} \quad (10)$$

同样对每条分叉管,应用式(4),可得

$$h_i = h_r \operatorname{sech}(T_{ei} s) - Z_i q_i \tanh(T_{ei} s) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (11)$$

式中 T_{ei} ($i = 1, 2, 3$) 分别为 3 条分叉管的弹性时间; Z_i ($i = 1, 2, 3$) 为 3 条引水管的水力阻抗,因此

$$h_i = \frac{1 - Z_T (q_1 + q_2 + q_3) \tanh(T_e T s)}{1 + s Z_T T_s \tanh(T_e T s)} \operatorname{sech}(T_{ei} s) - Z_i q_i \tanh(T_{ei} s) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (12)$$

上式不适应于大规模电力系统仿真计算,因此考虑对模型进行降阶处理。

2 降阶模型

因为

$$\tanh(T_s) = \frac{1 - e^{-2T_s}}{1 + e^{-2T_s}} = \frac{s T \prod_{n=1}^{\infty} \left[1 + \left(\frac{s T}{n \pi} \right)^2 \right]}{\prod_{n=1}^{\infty} \left[1 + \left(\frac{2s T}{(2n-1) \pi} \right)^2 \right]} \quad (13)$$

则当 $n = 0$ 时,

$$\tanh(T_s) = T s \quad (14)$$

即假设水柱是无弹性的,针对图 1 中水力系统,可将式(4)改写为

$$H_r = H_w - Z_T Q_T T_e T s \quad (15)$$

再考虑调压井水头和流量的关系以及涵洞与调压井和分叉管间的流量关系,可推导出

$$H_r = \frac{H_w - Z_T (Q_1 + Q_2 + Q_3) T_e T s}{1 + Z_T T_s T_e T s^2} \quad (16)$$

由于涵洞上游水库水头偏差为 0,则

$$H_w - H_r = \frac{Z_T (Q_1 + Q_2 + Q_3) T_e T s}{1 + Z_T T_s T_e T s^2} \quad (17)$$

对每个分叉管而言

$$H_r - H_i = \frac{L_i}{S_i g} \frac{dQ_i}{dt} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (18)$$

设 Q_{i0} ($i = 1, 2, 3$) 为各分叉管的额定流量,定义 q_i ($i = 1, 2, 3$) 为对应的流量标幺值。

$$q_i = \frac{Q_i}{Q_{i0}} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (19)$$

则式(17)和式(18)变换为

$$H_w - H_r = \frac{Z_T T_e T s (Q_{10} q_1 + Q_{20} q_2 + Q_{30} q_3)}{1 + Z_T T_s T_e T s^2} \quad (20)$$

$$H_r - H_i = \frac{L_i}{S_i g} s (Q_{i0} q_i) \quad (i = 1, 2, 3)$$

92 m, 单机引用流量 $62 \text{ m}^3/\text{s}$, 引水隧洞长 22.975 km, 衬砌后截面积 45.3 m^2 , 圆筒型调压井内径 22 m, 压力钢管内径 5.8 m, 总长 391.3 m。试验运行工况为: 3 号机停机, 1 号、2 号机以开度模式运行, 一次调频功能投入, 1 号机 AGC 退出运行, 2 号机 AGC 闭环。

图 5、图 6 中虚线分别为 1、2 号机在 2 号机 AGC 闭环试验时的机组有功功率曲线。可见, 由于 1、2 号机共用引水隧洞, 2 号机快速降出力, 导致水压升高, 使得 1 号机在定开度模式下出力明显抬升, 抬升峰值接近机组额定功率的 20%。由于该电厂 AGC 只下发一次 AGC 指令, 监控系统在功率到位后即退出功率闭环, 因此机组间的水力耦合将影响到电厂 AGC 的执行精度。

由于试验中机组调速系统采用开度模式, 并且功率调节过程中一次调频未参与动作, 因此图 5 中功率曲线代表了该复杂引水系统在受扰后的响应, 能够反映引水系统和水轮机的动态特性。按照式 (23) 计算机组参数, 并采用图 2 所示模型模拟引水系统和水轮机, 仿真结果如图 5、图 6 所示。可见仿真结果与实测曲线吻合较好。

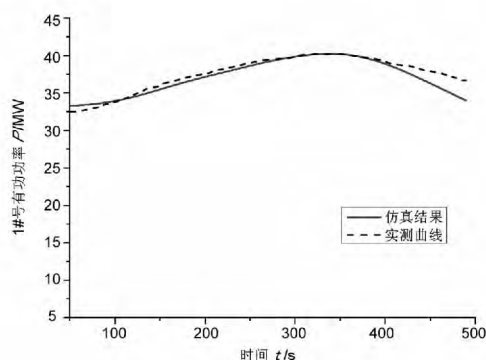


图 5 1 号机组有功功率曲线

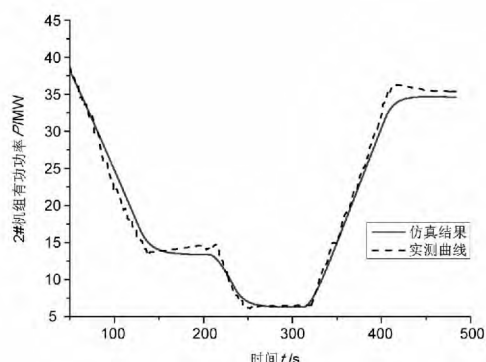


图 6 2 号机组有功功率曲线

算例 2: 某采用一管两机系统, 其额定水头 288

m, 单机引用流量 $232.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 引水隧洞长度 16.67 km, 衬砌后截面积 100.1 m^2 , 阻抗型调压井、竖井段直径 21 m, 压力钢管内径 6.5 m, 长度 584 m。该电站为某特高压直流输电工程的龙头电站, 其特殊的引水隧洞和调压井结构对电力系统动态过程具有较大影响。

图 7 所示为某次直流双极闭锁故障下 2 号机组安控切机后的 1 号机组功率曲线。由于 2 号机组断路器动作后迅速关闭阀门, 导致 1 号机水压升高, 造成机组出力抬升, 峰值接近额定容量的 21%。由于机组容量大, 在系统中地位重要, 1 号机的动态响应特性加大了事故后交流断面功率越限的风险。并且, 该电站作为直流工程的配套电源, 某些方式下可能采取孤岛运行方式, 其引水系统的动态过程也将对直流送端孤岛系统的频率稳定性产生影响。

采用含结构系数的调压井和引水系统模型, 并采用分段函数近似描述结构系数 k , 建立该电站的仿真模型, 按照故障前方式设置模型运行条件, 仿真结果如图 7 所示。可见, 仿真结果在有功功率波动峰值、变化率等方面均具有较高精度。而对于阻抗型调压井, 如果不考虑调压井的阻抗系数变化, 虽然机组有功波动峰值一致, 但其动态过程会与实际情况存在较大误差, 如图 7 所示。因此对于含阻抗型或其他复杂类型调压井的水电站, 应在仿真模型中详细计入调压井的动态特性影响。

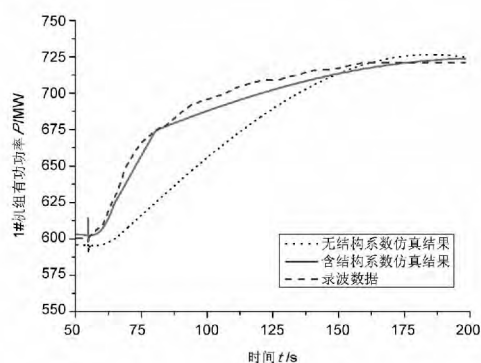


图 7 2 号机组安控切机后 1 号机组有功功率曲线

由于对引水涵洞、分叉压力钢管和调压井时间常数的计算仅利用了部分尺寸参数, 因此不可避免与实际录波曲线存在误差。但该方法可应用于已知少量水力参数条件下的前期规划研究和快速建模分析。水电站投产后, 通过原动机建模试验开展对水锤时间常数的实测可有效提高模型的精确度。

5 结 论

(1) 针对一管多机长引水系统水电站的动态响应特点,提出适应电力系统中长期稳定分析的水轮机降阶模型。

(2) 针对水电站调压井结构复杂、阻抗系数难以确定等特点,提出以调压井结构系数动态修正调压井溢流时间常数的方法,提高仿真模型的准确性。

(3) 与电网实测扰动数据的对比分析表明,该模型能够正确反映中长期过程中水电机组的动态响应,可用于此类特殊布置水电站的安全稳定性分析。

参考文献

- [1] 高慧敏,刘宪林,徐政.水轮机详细模型对电力系统暂态稳定分析结果的影响[J].电网技术,2005,29(2):5-9.
- [2] 李华,史可琴,范越,等.电力系统稳定计算用水轮机调速器模型结构分析[J].电网技术,2007,31(5):25-30.
- [3] 汤涌,宋新立,刘文焯,等.电力系统全过程动态仿真中的长过程动态模型——电力系统全过程动态仿真软件开发之三[J].电网技术,2002,26(11):20-25.
- [4] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies. Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies[J]. Transactions on Power System,1992,7(1):167-179.

(上接第 85 页)

方法计算出的影响系数差别不大,因此,对于复杂的函数建议采用小扰动分析法;从表 3 知,热耗率的不确定度超出了标准的要求,主要是主蒸汽流量的不确定度太大,功率不确定度也没达到标准要求。

5 结 论

主要介绍了汽轮机热耗率不确定度的分析计算过程,并给出了计算实例,从数据中可以看出,主蒸汽流量、功率和温度对热耗率产生的不确定度影响比较大,压力测点对测量结果的不确定度影响较小。因此,可在试验过程中考虑降低这些参数的不确定度,如增加重要测点个数、用精度较高的温度测温元

- [5] Hannett L. N, Feltes J. W, Fardanesh B, et al. Modeling and Control Tuning of a Hydro Station with Units Sharing a Common Penstock Section [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(4): 1407-1414.
- [6] 曾云,张立翔,郭亚昆,等.共用管段的水力解耦及非线性水轮机模型[J].中国电机工程学报,2012,32(14):103-108.
- [7] Kunder P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [8] DL/T 5058-1996,水电站调压室设计规范[S].
- [9] 程永光,杨建东.用三维计算流体力学方法计算调压室阻抗系数[J].水力学报,2005,36(7):787-792.
- [10] 付亮,王义国.有调压井水电站甩负荷试验与仿真分析[J].水电能源科学,2012,30(6):154-157.

作者简介:

汤 凡(1984),硕士,工程师,主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制技术研究;

丁理杰(1981),博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制技术研究;

张 华(1985),硕士,工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析;

滕予非(1984),博士,工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析;

魏 巍(1984),博士,工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析。

(收稿日期:2014-02-11)

件和减少系统不明泄漏率等。

参考文献

- [1] ASME PTC-2004. Steam Turbines Performance Test Codes[S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2005.
- [2] ANSI/ASME PTC-6 REPORT 1985. Guidance for Evaluation of Measurement Uncertainty in Performance Tests of Steam Turbines[S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 1986.

作者简介:

张志恒(1977),硕士研究生,工程师,主要从事发电厂设备调试和性能试验方面的研究。

收稿日期:2014-04-08)

不同通风条件下某水电厂电缆室火灾数值模拟分析

孙大根

(国电大渡河瀑布沟水力发电总厂 ,四川 雅安 625000)

摘 要: 为分析进、排风对于电缆室电缆火灾的发展以及室内火灾危险性的影响,并探求最合理的电缆火灾排烟方案,利用火灾场模拟软件 FDS,对不同进、排风量情况下电缆室电缆火灾的发展情况以及火灾危险性进行了模拟分析,结果表明,通风系统可以有效降低电缆火灾的危险性,并且进、排风量越大,优化效果越好,但是另一方面增加通风系统会延长火灾持续时间,可能会带来更大的火灾损失,因此在电缆室的消防设计中,应根据实际情况设计合理的通风系统。

关键词: 水电厂火灾; 电缆火灾; 数值模拟; 通风系统

Abstract: In order to analyze the influences of intake and exhaust ventilation on the development of cable chamber fire and consequent hazard, and to find a reasonable smoke exhaust scheme, FDS is adopted to simulate the cable chamber fire. The obtained results show that, the employed smoke exhaust scheme could reduce the hazard of cable chamber fire. Moreover, the effectiveness would be better within a larger blast capacity. However, the smoke exhaust scheme would increase the fire duration and bring more losses possibly on the other hand. So in the fire-fighting design of cable chamber, the reasonable ventilation system should be selected according to the actual situation.

Key words: fire of hydroelectric power station; cable fire; numerical simulation; ventilation system

中图分类号: TM81 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0091-04

电缆在电厂电力传输方面具有重要作用,在电厂中应用十分广泛。然而由于设计、施工和运行管理方面等原因,电缆火灾在电厂中时有发生,在带来重大经济损失的同时,也给人员和设备安全带来了威胁^[1]。电缆往往成捆设置,因此一条电缆发生火灾极易引燃其他电缆,从而造成火势的迅速蔓延,同时电厂中电缆使用时间往往较长,设备老化等问题也成为了电缆火灾频发的原因之一^[2]。通过以上分析可以看出,电缆火灾在火灾后果以及发生概率两个方面均具有较大的火灾危险性,因此采用科学方法对电缆火灾的防控进行分析研究具有重要的意义。

电缆火灾对于人员和设备的威胁主要是高温烟气,发生火灾时,开启排烟和补风设备对室内烟气进行有效控制是减小电缆火灾损失的有效途径,然而分析表明,过大的进、排风量可能会加剧电缆火灾的蔓延,因此合理的通风设置对于控制电缆火灾的发展以及减小其损失都具有重要意义。

基于以上分析,下面以某电厂电缆室中电缆火灾为例,利用美国 NIST 公司开发的火灾场模拟软件

FDS,对不同进、排风量情况下电缆室电缆火灾的蔓延情况以及室内火灾危险性进行了模拟分析,模拟结果对电缆室的排烟系统设计具有定性的指导意义。

1 数值计算原理及模型建立

1.1 模拟软件简介

FDS(fire dynamics simulator) 是美国国家标准研究所(NIST) 建筑火灾研究实验室开发的模拟火灾中流体运动的计算流体力学软件。该软件采用数值方法求解火灾浮力驱动的低马赫数流动的 N-S 方程,重点计算火灾中烟气流动和热量传递过程^[3]。

1.2 FDS 模型建立

以某水电厂电缆室中的电缆火灾为研究对象。电缆室几何尺寸为 7 m(长) × 4 m(宽) × 3.4 m(高)。在房间内距地面 3 m 处设有一个 7 m 长的金属电缆槽,电缆槽上铺设了若干松散的电缆。电缆室通过一扇 1 m(宽) × 2 m(高) 的门与外界相连,在火灾情况下假设此门是开启的。电缆室及室

表 1 模型中各种材料热物性参数^[4]

材料	比热/($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
混凝土	0.88	1.0	2 100
钢铁	0.46	45.8	7 850
塑料	1.50	0.2	1 500
铜	0.38	387.0	8 940

表 2 模拟工况设计表

工况	进风量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	进风口位置	排风量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	排风口位置
模拟工况 1	0	距地面 0.5 m	0	距地面 2.5 m
模拟工况 2	0.06	距地面 0.5 m	0.12	距地面 2.5 m
模拟工况 3	0.12	距地面 0.5 m	0.24	距地面 2.5 m
模拟工况 4	0.24	距地面 0.5 m	0.48	距地面 2.5 m

内电缆模型示意如图 1 所示。

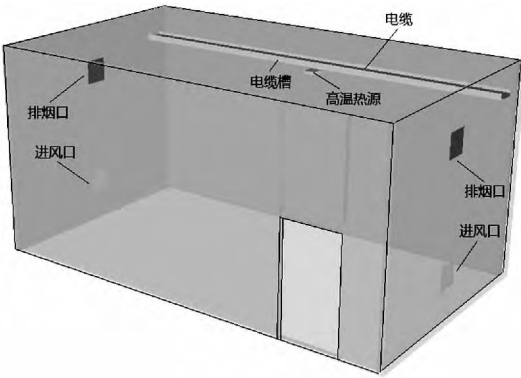


图 1 模型示意图

模型中在电缆上方 5 cm 处布置了一排热电偶,通过热电偶的测量温度来分析电缆引燃时间以及火焰熄灭时间。热电偶数量共 13 个,相邻两个热电偶间距为 0.5 m,两端热电偶与墙壁的距离也为 0.5 m。

模型中电缆室维护结构材料为混凝土,电缆槽的材料为钢铁,电缆的材料近似设定为塑料与铜的混合物,各种材料的热物性如表 1 所示。

模型中的起火形式设定为高温热源引燃电缆,高温热源表面温度为 1 100 ℃。电缆室内设有两个排烟口和两个进风口,尺寸均为 0.4 m×0.4 m,模型中各个进风口和排风口风量及其位置按照模拟工况表中的要求进行设定。

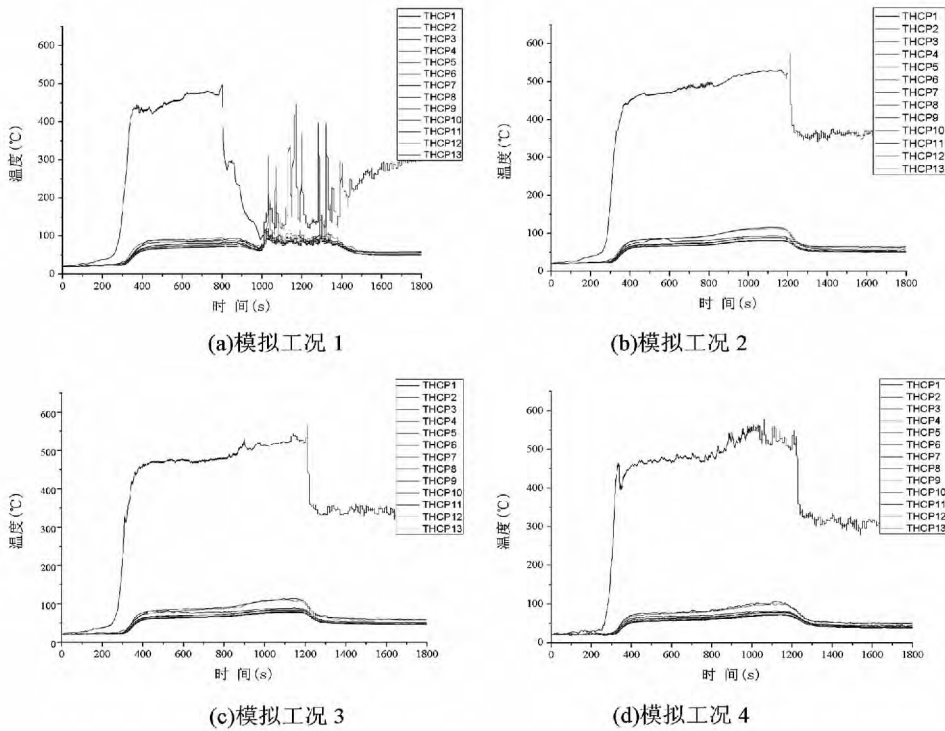


图 2 不同模拟工况下热电偶组所测温度随时间变化曲线

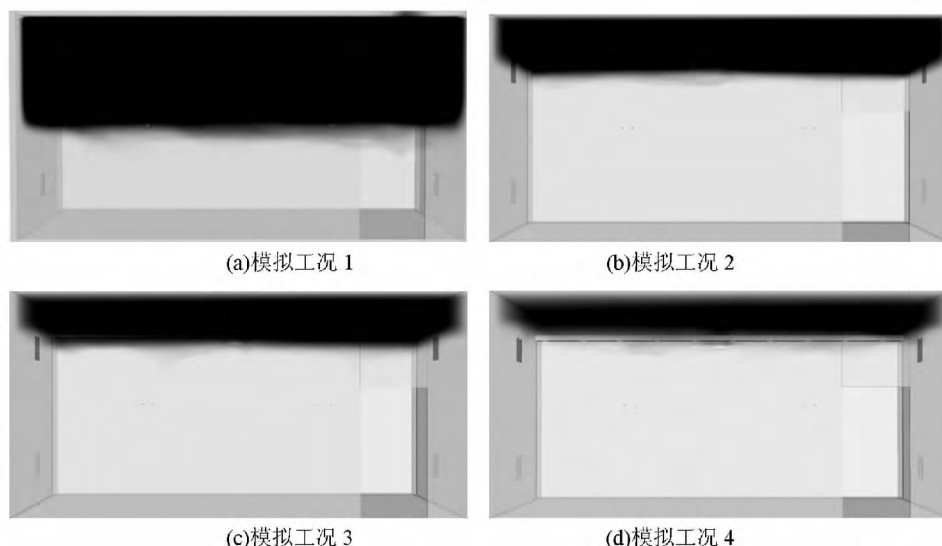


图 3 不同模拟工况下烟气流动稳定后烟气下沉情况示意图

1.3 模拟工况设定

电缆火灾通过热量和烟气对电缆室内的人员和设备安全造成影响,通风系统作为火灾情况下排出室内热量和烟气的有效途径,是控制电缆火灾影响的有效手段。但是研究表明,通风系统在降低火场温度、排出火灾烟气的同时,也会使得新鲜空气进入火场而造成火势的扩大,因此进行合理的进、排风量设计,对于控制电缆火灾损失具有重要的意义。考虑通风系统中不同的进、排风量,设计模拟工况如表 2 所示。

2 模拟结果分析

2.1 火灾持续时间分析

由于模型中电缆室内空间相对较小,且仅通过一扇 $1\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的门与外界连通,因此在火灾发展到一定程度后,火焰会因为氧气含量不足而熄灭,而火灾时的通风系统会通过改变火场氧气浓度而对火灾的持续时间产生影响,因此不同工况下火灾持续时间是不同的,可通过电缆上方热电偶组测量温度随时间变化曲线进行分析。工况 1 至工况 5 中,热电偶组所测温度随时间变化曲线如图 2 所示。

由图 2 可以看出 4 种模拟工况下,电缆均在约 200 s 时被引燃。模拟工况 1 中,由于没有进风和排风,约 800 s 时,被引燃的电缆由于火场氧气不足而熄灭,此时火灾为通风控制型;在模拟工况 2 中,由于增加了进风和排风,直至 1 200 s 热电偶所测温度开始下降,即火灾开始熄灭,同时增大进风量和排风量(模拟工况 3 和模拟工况 4),电缆火灾仍在约 1 200 s 时

开始熄灭,与模拟工况 2 相比几乎没有差异,这说明,模拟工况 2 至模拟工况 4 中,火灾类型变为了燃料控制型。通过对图 2(a) ~ 图 2(c) 的分析可以看出,随着进、排风量的增大,尽管火灾持续时间没有明显变化,但是起火点处的热电偶在熄火稳定后所测得的温度出现了较为明显的降低。

2.2 烟气蔓延情况分析

火灾烟气具有高温、毒性、遮光性等特性,是对火场内最具威胁性的火灾产物,因此火灾后烟气的蔓延和沉降情况对于灭火和火灾对于人员和设备的损伤具有很大影响。下面以 4 个模拟场景中,烟气流动稳定后烟气下沉情况示意图以及烟气层高度随时间变化曲线如图 3 和图 4 所示。

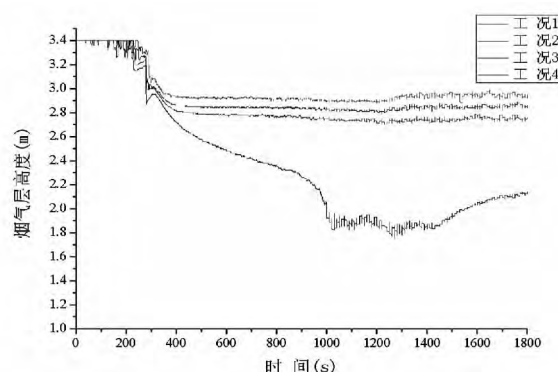


图 4 不同工况下烟气层高度随时间变化曲线

由图 3 可以定性看出,随着通风系统中进、排风量的增大,电缆室内的烟气稳定时的沉降高度逐渐升高。在模拟工况 1 中,由于没有进、排风,烟气层最终稳定在门的上沿处,而在模拟工况 2 ~ 4 中,由于增加了通风系统,因此烟气层高度基本稳定在排烟口处,

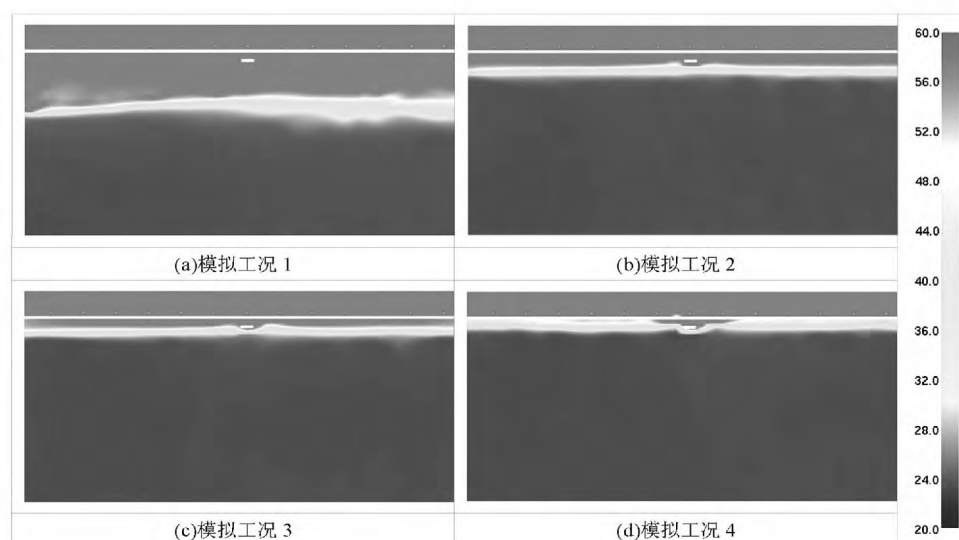


图 5 不同工况下 1 000 s 时电缆处温度分布

并且排风量越大 稳定后烟气层位置越高。

由图 4 的曲线图可以看出 在工况 1 中 1 000 s 左右时 烟气层稳定在距地面约 2 m 位置处;在工况 2 至工况 4 中 300 s 左右时 烟气层高度分别稳定在距地面约 2.8 m、2.9 m 和 3 m 的位置处。

由以上分析可以看出:在有通风系统的工况中(工况 2、3、4) 烟气层高度明显高于无通风系统的工况(工况 1) 同时 由工况 2、3、4 的模拟结果可以看出 随着通风系统中进、排风量的增加 烟气层高度逐渐升高 即火灾危险性降低。

2.3 电缆室内温度分析

起火房间内温度是表征火场危险程度的一个重要参数。火场中的高温不仅会影响人员逃生和灭火行动 同时还会对起火房间内其他可燃物带来威胁。当火场温度达到一定值时 可能会导致起火房间内的所有可燃物全部燃烧 此时则达到了通常意义上的轰然状态。本模拟中 不同工况下 1 000 s 时电缆所在截面($Y=0.4$) 处的温度切片如图 5 所示。

由图 5 可以看出 在火灾情况下增加通风系统可以有效降低电缆室内起火电缆下部区域的温度 这对于减小火灾对于人员和设备的损害具有重要意义。同时由图 5(a) ~ (c) 的对比可以看出 随着进、排风量的增大 起火电缆下方温度持续降低。

3 结 论

为分析通风条件对于电缆火灾蔓延情况以及起

火后室内火灾危险性的影响 以某电厂电缆室中电缆火灾为例 利用火灾场模拟软件 FDS 对 4 种不同进、排风量的火灾工况进行了模拟分析 结果表明 对于本模拟中此类通风控制型的火灾 增加通风系统会导致火灾时间的增长 但是从烟气层沉降和室内温度角度分析 增加通风系统可以有效降低火灾危险性 同时进、排风量越大 火灾危险性越小。通过前面的分析可以看出 通风系统对于电缆火灾发展及其危险性的影响是较为复杂的 因此 在对电缆室或存放有电缆的房间进行防火设计时 应根据建筑物的实际防火需求设计通风系统。

参考文献

- [1] 任海峰,李树刚,林海飞,等. 电缆火灾致因因素分析[J]. 安庆师范学院学报 2009,15(3):62-64.
- [2] 张红玲. 电缆火灾成因及防火技术[J]. 内蒙古科技与经济 2006(16):106-107.
- [3] Kev In Mcgrattan, Bryan Klein, Simo Hostikka, et al. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, 2010.
- [4] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman and A. S. Lavine. Fundamentals of Heat and Mass Transfer[M]. John Wiley & Sons, 2006.

作者简介:

孙大根(1986),助理工程师,从事水电站运行维护工作,主要负责水电站机组仍运行管理以及设备的日常维护和电气二次部分检修工作。

(收稿日期:2014-01-27)



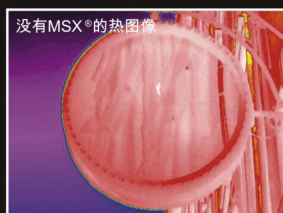
用于电力及工业检测的红外热像仪



FLIR® T400-系列红外热像仪 性价比高



具有MSX®的热图像



没有MSX®的热图像

FLIR MSX 技术令 FLIR T600, T400, Exx, Ex 系列热像仪获得的热图像内的细节纤毫毕现。

FLIR T400系列红外热像仪专为注重高性价比的用户而设计。它将符合人体工程学的出色设计和高品质红外图像质量(320x240像素)融为一体；可旋转的镜头使您无论以何种角度进行测量和拍照都十分舒适。

T400系列红外热像仪包括2种型号：T420和T440，两种型号都配备了FLIR创新的多波段动态成像(MSX)功能。与传统热叠加技术不同，FLIR采用的全新MSX在红外热像视频和图像中提供了数码相机级的拍摄细节，出色的热图像清晰度，能确切标出问题所在，更快速的目标定位。



更多其他型号供您选择.....

FLIR 中国公司总部：

前视红外光电科技（上海）有限公司

全国咨询热线：400-683-1958

邮箱：info@flir.cn

www.fir.com

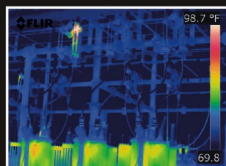
FLIR 授权经销商：

成都英孚德科贸有限公司

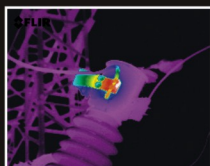
咨询电话：028-8525 0223/8525 9930

邮箱：xdr_xiejun@163.com

www.cdinfrared.com



在安全距离内检测变电站故障



整机保修*



探测器保修*

*可在www.fir.com进行产品注册后享有