

★四川省一级期刊

• 万方数据数字化期刊群入网期刊

• 《中国学术期刊(光盘版)》入编期刊

• 《中国期刊全文数据库》收录期刊

• 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊

• 北极星中华期刊网入网期刊

• 中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊

• 中国农村电气化信息网

• 重庆维普中文科技期刊数据库

• 《超星数字图书馆》入网期刊

• 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录

# 四川電力技术

## SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954



9 771003 695159

四川省电机工程学会 四川电力科学研究院

Vol.38  
**2015**  
No.4



# 四川省电机工程学会高压专委会 学术年会会议纪要

四川省电机工程学会高压专委会学术年会于2015年7月17日在成都市召开。63名专家、学者和相关技术人员、论文作者，围绕特高电压技术的发展前沿技术和热点问题进行了广泛交流和深入探讨。会议选用13篇论文印成本文资料在会上交流。



王平理事长讲话

四川省电机工程学会副秘书长张治安和方文弟分别主持了大会和学术交流。

王平理事长作重要讲话。他说，学术交流是学会生存和发展的基础。开展学术交流活动，要满足广大会员的需求，符合电力发展的需要，不断改进选题和组织方式，增强活动的吸引力和凝聚力。要坚持理论创新与实用技术相结合，既推进理论技术储备，跟上国际国内先进技术发展水平，又要推进解决实际的技术问题，提高学术交流的实效性和实用性。高压专委会的承办单位是国网四川省电力公司电力科学研究院，努力实施科技引领、开拓创新，努力发挥了高压科技工作

者的作用，发挥了学会作用，推动我省高电压技术的发展。十二五期间，四川电网发展全面提速，形成了“四交四直”超特高压外送通道。随着电网规模的不断扩展和电网设备的不断增加，随着电网系统技术持续进步和电力标准的不断修订，电力系统防雷过电压、输电线路及高压电气设备试验存在较多技术问题需要进一步研讨。作为高压专委会的主力，川电博士后工作站在特高压的研究和实际工作进行了大量的工作，此次会议的召开将对特高压换流站技术监督工作进行交流，对光学电场原理的暂态过电压测试及数据进行分析，对特高压换流变压器局部放电的现场判定与定位等进行分析。会议对促进特高压技术的进步和保障电力系统安全运行将起到积极作用。期望专委会工作充满活力，充分发挥专委会优势，加强四川省内电力行业相关单位间的交流与沟通，整合各方资源，促进科技合作，共同推进特高压电网的技术进步，迎接“互联网+”的新时代。



会议现场

国网四川省电力公司电力科学研究所副总工、四川省电机工程学会高压专委会主任委员兼秘书长李建明，作了《基于光学电场原理的暂态过电压测试及数据分析》报告；国网四川省电力公司电力科学研究所博士后谢施君，作了《变电站雷电侵入过电压波形特征及其影响因素的仿真研究》报告；国网四川省电力公司电力科学研究所副主任苏明虹

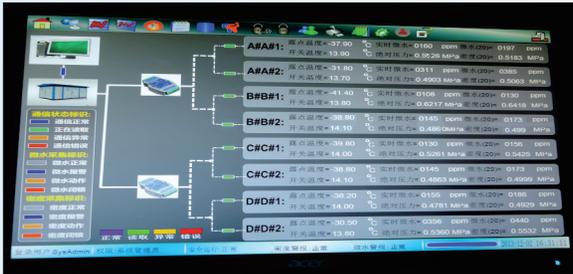
代表副总工兼特高压室主任刘凡，作了《特高压换流站技术监督工作交流》学术报告；国网四川省电力公司电力科学研究所陈凌博士作了《特高压换流变压器局部放电的现场判定与定位》报告；国网四川省电力公司电力科学研究所丁登伟博士，作了《HVDC单极运行时对500kV交流变压器的振动影响分析研究》报告。



学术报告

## RDWS100系列SF<sub>6</sub>气体密度和微水在线监测系统

能够在线监测SF<sub>6</sub>电气设备的SF<sub>6</sub>气体密度和SF<sub>6</sub>气体微水，因而能对SF<sub>6</sub>电气设备做出在线监测与故障诊断，可在线显示SF<sub>6</sub>电气设备的SF<sub>6</sub>气体密度，当SF<sub>6</sub>电气设备发生漏气时能够及时报警及闭锁；可在线显示SF<sub>6</sub>电气设备内部SF<sub>6</sub>气体微水，当SF<sub>6</sub>电气设备的SF<sub>6</sub>气体微水超标时能够及时报警。利用标准化的压力计算检测出是否存在突发的和微小的泄露，而在线露点测量为操作人员随时警示水分状态，保证电网安全运行。



### 系统主要特点:

1. 不但可以测量露点，同时还能测量压力和温度，进而计算出包括SF<sub>6</sub>密度在内的其他四个参量，对评估SF<sub>6</sub>绝缘状态提供了很好的依据。
2. 采用乐研独创的专利技术，真实反映SF<sub>6</sub>电气设备内部的微水。
3. 采用标准的通讯方式，符合IEC61850通讯要求。
4. 具备自动校准功能，自动纠正零点偏差，以保证测量的准确性。

### 主要技术指标:

1. 压力测量: 0.00 MPa ~ 1.000 MPa, 优于 ±0.5%FS
2. 密度测量: 0.00 MPa ~ 1.000 MPa, 优于 ±1.5%FS
3. 露点测量: -80°C ~ 20°C, ±2°C
4. 湿度测量: 10 ~ 10,000 PPMv, 优于 ±5%FS
5. 温度测量: -40°C ~ 80°C, ±1°C
6. 微水报警: 软件中可以任意设置; 密度报警闭锁: 软件中可以任意设置
7. 密封性能: 漏气率 ≤ 1 × 10<sup>-8</sup> mbar·l/s (氦气检漏), 定量检漏年泄露率 < 0.5%
8. 通讯方式: RS485接口, MODBUS通讯协议, 通过IED可以实现IEC61850
9. 监测点数: 不限
10. 抗电强度外壳与电源间: >2 000 V
11. 电磁兼容特性: 快速瞬变脉冲群GB/T17626.4-1999 3级
12. 雷击(浪涌): GB/T17626.5-1999 3级

**成功案例有: 德阳、银川、乌鲁木齐、长春、荆州……等多家供电公司。**

## RDM型远传式SF<sub>6</sub>气体密度继电器

RDM系列远传式SF<sub>6</sub>气体密度继电器是机械与电子的完美有机结合，机械部分实现密度显示、报警、闭锁功能；电子部分可将密度、压力、温度等信息实时采集、远距离传输。采用最新的微机技术及精确的SF<sub>6</sub>气体压力和温度之间关系的数学模型，选用高性能的数字智能式压力、温度传感器，使电网实现在线监测SF<sub>6</sub>电气设备的密度，实现设备状态检修，确保SF<sub>6</sub>电气设备的安全运行，满足国家智能化电网建设要求。

### 主要技术性能

精度等级: 机械部分为: 2.5级 (-40°C ~ 60°C)

电子部分为: 1.5级 (-40°C ~ 60°C)

测量范围: -0.1 ~ 0.9 MPa

工作电源: 10 V ~ 30 V (DC24 V时2 mA电流)

抗振性能: 200 m/s<sup>2</sup>

抗冲击性能: 500 m/s<sup>2</sup>

外壳防护等级: IP65

密封性能: 5.0 × 10<sup>-9</sup> mbar·l/s

触点容量: AC/DC 250 V 1 000 VA/500 W

环境温度: -40°C ~ +60°C

通信方式: RS485、4 ~ 20 mA、CAN、HART协议等。配合我公司集线器，符合IEC61850通讯要求



## RDF系列SF<sub>6</sub>气体密度继电器自动校验装配接头

一款非常经典的专利产品，会改变人们的工作方式



符合国网公司新十八项反措要求

全国5 000多套的成功运行经验

自动校验，具有防止校验误操作的功能

密封性能: ≤ 1 × 10<sup>-8</sup> mbar·l/s (氦气检验)

抗振性能: 30 m/s<sup>2</sup>

抗冲击性能: 100 g

工作环境: 温度为-60°C ~ +80°C

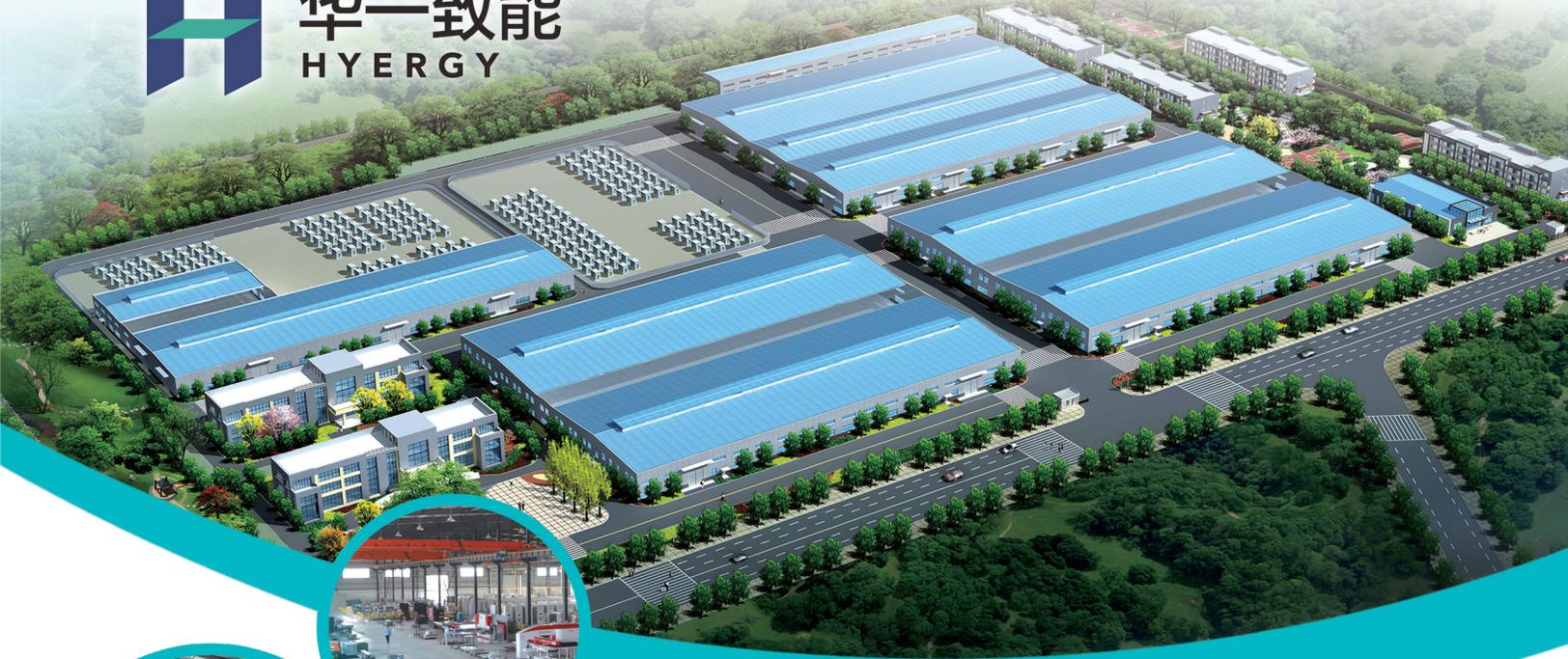
相对湿度 ≤ 95%RH

外壳防护等级: IP65

**乐研电气——拥有100多项专利技术，引领创新，创造卓越！出口欧美，多家国际电力巨头供应商。**



华一 致能  
HYERGY



四川华一电器有限公司座落于四川省广汉市(三星堆古文化遗址),距离成都市区38 km 具有良好的交通运输条件。公司注册资金10 160万元,占地230亩(其中生产厂房建筑面积67 000 m<sup>2</sup>);现有员工500余人,40%员工具有大专以上文化程度。

四川华一电器有限公司成立于2001年,是集研发、设计、制造、销售为一体的输配电成套设备制造企业。是四川省高新技术企业、四川省重合同守信用企业、省级企业技术中心,是低压成套开关设备CCC认证产品A类生产企业。

公司是西门子、ABB等世界知名电气公司战略合作伙伴及授权生产商。

公司主要产品:40.5 kV及以下高低压成套开关设备、户内和户外断路器、预装式变电站、开闭所、“三箱”类产品、电缆桥架、封闭式母线槽、变压器等。产品广泛应用于发电厂、变电站、石化、冶金、市政、轨道交通、机械、建材、军工等国民经济重要领域,畅销全国并出口越南、印度、阿塞拜疆、印度尼西亚、土耳其等国家。以其高品质及高效快捷的服务,赢得了广大客户的认同和好评。

公司按照ISO9001、ISO14001和OHSAS18001标准建立了质量、环境、职业健康与安全一体化的管理体系,使产品从设计、开发到生产、服务全过程都得到有效的管理和控制。所有产品均通过了国家级试验站型式试验,低压成套开关设备全部通过CCC认证。



四川华一电器有限公司

全国服务热线: 400-1698-678

地址: 四川省广汉市三亚路三段一号  
电话: 0838-5100668 0838-5105556

邮编: 618300  
传真: 0838-5100888

# 绵阳供电公司智能变电站



220kV劲松变电站220kV线路ECTEVCT



220kV劲松变电站220kV EVT

110 kV北川变电站于2010年9月29日启动投产，是国内首座智能变电站；220 kV劲松变电站于2011年12月28日启动投产，是绵阳供电公司首座220 kV智能变电站。两站均采用先进的智能设备，以全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化为基本要求，自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量等功能，具备程序化操作、智能告警、故障推理与分析决策等高级功能，采用统一的IEC-61850通信规约，实现了设备建模和信息传输的标准化、统一化，极大提高了设备的一致性和互换性。



110 kV北川变电站1



110 kV北川变电站2



110 kV北川变电站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 鄢小端  
李兴源 李建明 严平  
胡灿 徐波 唐茂林  
韩晓言 谢舫 甄威  
秘书 李世平  
吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN1003-6954  
CN51-1315/TM

2015年第38卷第4期(总238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:cdscdljs@163.com

印刷:四川经纬印务有限公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册6.00元

[期刊基本参数] CN51-1315/TM\* 1978\*

b\* A4\* 94\* zh\* P\* ¥6.00\* 4300\* 22\*

2015-08

目次

• 基金项目 •

电力系统低频振荡的类型判别研究与分析  
..... 周专 常喜强 张增强 王衡 张锋 贡剑(1)

±800 kV 特高压直流双极闭锁故障对高密度风电地区电压影响分析  
..... 常喜强 樊艳芳 张锋 王衡 郑少鹏 魏威 钟显(5)

配电网电压暂降状态估计单层神经网络法  
..... 汪颖 唐琳 李国栋 林芳 吕金炳(10)

LVRT 控制策略及风电场继电保护研究综述  
..... 钟显 樊艳芳 常喜强 魏威 苏洪兴(14)

750 kV 凤凰片区短路电流分析及抑制措施  
..... 张增强 吕盼 周专 宋新甫(20)

电网信息系统状态评价技术研究与应用 ..... 谢晓娜 常政威 陈亚军(24)

• 输电技术 •

特高压直流输电工程换流变压器抽头级数确定方法 ..... 赵辰鹏 马东(29)

新型超高压输电线路鸟害防范措施研究 ..... 王德吉 赵强 屈明(33)

基于网损灵敏度和禁忌搜索的配电网重构方法 ..... 余林 江东林 王霆(37)

配电网接地方式对用户安全性影响比较 ..... 崔东君(41)

直流电源系统绝缘监测装置的校验检测技术  
..... 李晶 罗洋 陈轲娜 王嘉易(44)

关于并网电厂涉网保护定值配合研究 ..... 安化龙 范小涛 陈默(46)

• 电网技术 •

基于 PMU/SCADA 混合量测状态估计及不良数据检测方法 ..... 许勇(51)

基于反馈线性化的静止同步串联补偿器变结构潮流控制研究  
..... 贺双双 曹建军 陈智迪(56)

改造录波系统提高故障定位精度的实用方法研究 ..... 刘明 巩俊强(62)

基于矩阵束算法的电压闪变检测新方法 ..... 罗志宏(66)

跨辖区一体化电能计量系统故障排查方法研究  
..... 王小波 张长春 刘钢 谢韵 雷婷 罗欢 刘璋(70)

变电站扩建工程电磁环境影响预测方法探讨 ..... 曾媛 何清怀 南方(74)

大截面电缆金具涡流损耗计算与分析 ..... 李娟 刘念 刘航宇 蒲丽娟(78)

四川省投资与电量关系实证研究 ..... 贺星棋 周桦 严平 鲜其军(83)

• 发电厂技术 •

SOFA 配风调整对超临界锅炉末级过热器偏差的影响  
..... 薛森贤 余盛杰 陈树科(88)

再热汽轮机性能试验系统修正的处理方法 ..... 张志恒 孙戈(91)

## CONTENTS

Research and Analysis of Type Discrimination of Low - frequency Oscillation of Power System .....	Zhou Zhuan Chang Xiqiang Zhang Zengqiang Wang Heng Zhang Feng Yun Jian (1)
Analysis on Influence of Bipole Tripping Fault in $\pm 800$ kV UHVDC Transmission Line on Voltage in High - density Wind Power Area .....	Chang Xiqiang Fan Yanfang Zhang Feng Wang Heng Zheng Shaopeng Wei Wei Zhong Xian (5)
Single Layer Neural Network Method for State Estimation of Voltage Sag in Distribution Network .....	Wang Ying Tang Lin Li Guodong Lin Fang Lv Jinbing (10)
Review of LVRT Control Strategy and Relay Protection for Wind Farm .....	Zong Xian Fan Yanfang Chang Xiqiang Wei Wei Su Hongxing (14)
Analysis of Short - circuit Current in 750 kV FengHuang Area and Its Suppression Measures .....	Zhang Zengqiang LV Pan Zhou Zhuan Song Xinfu (20)
Research on State Evaluation Technology for Grid Information System and Its Application .....	Xie Xiaona Chang Zhengwei Chen Yajun (24)
Calculation of Tap Series of Converter Transformer for UHVDC Transmission Project .....	Zhao Chenpeng Ma Dong (29)
Investigation on New Bird - resistant Devices for EHV Transmission Line .....	Wang Deji Zhao Qiang Qu Ming (33)
Reconfiguration Method for Distribution Network Based on Loss Sensitivity Index and Tabu Search .....	Yu Lin Jiang Donglin Wang Ting (37)
Influence Comparison of Grounding Modes in Distribution Network on Security of Power Consumer .....	Cui Dongjun (41)
Calibration and Detection Technology of Insulation Monitoring Device for DC Power System .....	Li Jing Luo Yang Chen Kena Wang Jiayi (44)
Research on Setting Cooperation for Grid - related Protection of Grid - connected Power Plants .....	An Hualong Fan Xiaotao Chen Mo (46)
Hybrid State Estimation and Bad Data Detection Based on PMU/SCADA Measurement .....	Xu Yong (51)
Study on Power Flow Control with Variable Structure Control for Synchronous Series Compensator Based on Feedback Linearization .....	He Shuangshuang Cao Jianjun Chen Zhidi (56)
Research on Practical Method of Improving Fault location Precision by Transforming Fault Recorder System .....	Liu Ming Gong Junqiang (62)
A New Method for Voltage Flicker Detection Based on Matrix Pencil Algorithm .....	Luo Zhihong (66)
Research on Trouble Clearing Methods for Inter - district Integrated Electric Energy Metering System .....	Wang Xiaobo Zhang Changchun Liu Gang Xie Yun Lei Ting Luo Huan Liu Zhang (70)
Discussion on Impact Forecasting Methods of Electromagnetic Environment on Extension of Substation .....	Zeng Yuan He Qinghuai Nan Fang (74)
Calculation and Analysis of Eddy Current Losses in Large Cross - section Power Cable by Finite Element Method .....	Li Juan Liu Nian Liu Hangyu Pu Lijuan (78)
Empirical Research on Relationship between Sichuan Investment and Electric Quantity .....	He Xingqi Zhou Hua Yan Ping Xian Qijun (83)
Effect of SOFA Air Distribution Adjustment on Deviation of Finishing Superheater in Supercritical Boiler .....	Xue Senxian Yu Shengjie Chen Shuke (88)
Methods of System Correction for Performance Test of Reheat Steam Turbine .....	Zhang Zhiheng Sun Ge (91)

**SICHUAN ELECTRIC POWER  
TECHNOLOGY**

2015 Vol. 38 No. 4  
(Ser. No. 238)

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

# 电力系统低频振荡的类型判别研究与分析

周专<sup>1</sup>, 常喜强<sup>2</sup>, 张增强<sup>1</sup>, 王衡<sup>2</sup>, 张锋<sup>2</sup>, 贡剑<sup>2</sup>

(1. 国网新疆电力公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830016;

2. 国网新疆电力调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830006)

**摘要:** 随着区域电网互联、电网规模不断扩大和快速励磁系统的大量应用, 电力系统动态稳定性问题也越来越突出, 逐渐成为影响电网安全和限制输电功率极限的主要因素。由于动态元件的大量投入, 改变了系统动态调节性能, 若动态稳定性差将容易引发系统低频振荡。系统低频振荡会导致系统出现频率、电压、功率等电气量不同程度振荡的现象, 持续恶化的互相作用最终将导致系统失稳、解列, 形成大规模的停电事故。因此电力系统低频振荡问题越来越受到人们的关注, 而如何正确、快速判别振荡性质成为难于解决的问题。对负阻尼振荡和强迫振荡的特性进行研究, 提出了基于起振阶段暂态响应包络线形状的振荡类型判别判据, 以某电网低频振荡为实例加以验证, 表明所提出的研究方法能有效判断低频振荡类型。对分析实际运行中低频振荡现象以及有效抑制系统低频振荡具有重要的指导意义。

**关键词:** 低频振荡; 负阻尼振荡; 强迫振荡; 响应特性

**Abstract:** With the large applications of the regional power grid interconnection, grid expanding and fast excitation systems, the dynamic stability problems of power system are more prominent, and gradually become the main factor influencing the grid security and power limit. Since a large number of dynamic elements being put into operation, the dynamic regulation performance is changed, and the poor dynamic stability will likely lead to low-frequency oscillation. Low-frequency oscillation can cause the system to have the oscillations of frequency, voltage, power and other electrical quantities in different degrees, the deteriorating interaction will eventually lead to system instability and splitting which will form large-scale blackouts. Therefore, low-frequency oscillation problem is getting more and more attention, and how to determine the oscillation properties correctly and quickly becomes a difficult problem. Therefore, the characteristics of negative damping oscillation and forced oscillation are studied, the oscillation distinguishing criterion for envelope shape based on transient response in start-up phase are proposed. It is verified by taking the low-frequency oscillation of one grid as example, and it shows that the proposed method can effectively determine the type of low-frequency oscillations, which has an important guiding significance for analyzing low-frequency oscillation and suppressing low-frequency oscillation in actual operation.

**Key words:** low-frequency oscillation; negative damping oscillation; forced oscillation; response characteristics

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0001-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.001

## 0 引言

20世纪60年代美国西北电力系统与西南电力系统进行互联时, 发生了功率的增幅振荡, 最终破坏了大系统的并联运行。日本、欧洲等国也先后发生过低频振荡。在中国, 随着电网规模的日益扩大以及快速励磁装置使用的增加, 也出现过多次低频振荡事故。电力系统一旦发生低频振荡, 将严重威胁电网的安全稳定运行, 甚至可能诱发连锁反应, 造成

基金项目: 国家自然科学基金项目(51267017)

更严重的后果, 故低频振荡问题一直是电力系统安全稳定运行中备受关注的重要问题之一, 对低频振荡进行深入研究具有十分重要的意义<sup>[1-3]</sup>。

系统低频振荡会导致系统出现频率、电压、功率等电气量不同程度振荡的现象, 持续恶化的互相作用最终将导致系统失稳、解列, 形成大规模的停电事故。随着区域电网互联、电网规模不断扩大和快速励磁系统的大量应用, 低频振荡出现的概率不断提高, 振荡类型越来越多, 且低频振荡扰动源定位越来越复杂, 加大了分析低频振荡原因及抑制低频振荡的难度<sup>[4]</sup>。

因此对负阻尼振荡和强迫振荡的特性进行研究,提出了基于起振阶段暂态响应包络线形状的振荡类型判别判据,以某电网低频振荡为实例加以验证,表明所提出的研究方法能有效判断低频振荡类型。对分析实际运行中低频振荡现象以及有效抑制系统低频振荡具有重要的指导意义。

## 1 低频振荡概述

电力系统中发电机经输电线并列运行时,在扰动下会发生发电机转子间的相对摇摆,并在缺乏阻尼时引起持续振荡,此时,输电线上功率也会发生相应振荡。由于振荡频率很低,一般为0.2~2.5 Hz,故称为低频振荡。而随着联网规模的不断增大,低频振荡频率也随之降低至0.1 Hz,甚至更低。

根据系统振荡频率的不同范围,将低频振荡分为本地振荡模式和区间振荡模式两种类型。区域内振荡模式:涉及一个发电厂内的发电机组与电力系统其他部分之间的摇摆,其振荡频率一般为1~2 Hz。区域间振荡模式:系统中某一个区域内的多台发电机与另一区域内的多台发电机之间的相对摇摆。当系统表现为两群发电机之间振荡时,振荡频率大致在0.1~0.3 Hz之间,当系统表现为多群发电机之间的振荡时,振荡频率大致在0.4~0.7 Hz之间<sup>[5-6]</sup>。

根据低频振荡性质主要分为两种:一种是负阻尼低频振荡,负阻尼振荡是逐渐增幅过程,若没有人干预,将持续保持增幅振荡,振荡的幅度越来越大,直到系统切机或失稳;另一种是强迫共振型的低频振荡,当扰动频率与系统自然振荡频率相同或接近时,产生共振,振荡振幅主要与扰动的幅度及系统阻尼水平有关,振荡过程中扰动源一直存在,振荡不会消失。

但由于两种振荡的表现形式很相似:

- 1) 振荡的起始阶段都表现为增幅振荡;
- 2) 增幅振荡都可能发展为等幅振荡。

这使得如何正确、快速判别振荡性质成为必须解决而又难于解决的问题。

## 2 两种低频振荡响应特性

### 2.1 负阻尼低频振荡的响应特性

• 2 •

发电机采用经典二阶模型(假定 $E'$ 恒定)线性化的状态方程为

对于 $N$ 维线性化系统状态方程:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x(t) \quad (1)$$

式中: $\Delta x$ 为增量形式的系统状态变量; $A$ 为系统状态矩阵。

对任一特征值 $\lambda_i$ ,对非零向量 $\varphi_i \in C^{N \times 1}$ 和 $\psi_i \in C^{N \times 1} (i=1, 2, \dots, N)$ 满足方程

$$\begin{cases} A\varphi_i = \lambda_i \varphi_i \\ \psi_i^T A = \lambda_i \psi_i^T \end{cases} \quad (2)$$

则称 $\varphi_i$ 和 $\psi_i$ 分别为与矩阵 $A$ 的特征值 $\lambda_i$ 相对应的右、左特征向量<sup>[7-8]</sup>。

为了方便、简明地表达系统振荡响应的特征,分别定义特征根对角矩阵 $\Lambda$ 、右特征向量矩阵 $\varphi$ 、左特征向量矩阵 $\psi$ 如下:

$$\begin{cases} \Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\} \\ \varphi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N] \\ \psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N]^T \end{cases} \quad (3)$$

由式(2)可以看出,每个状态变量的变化率与所有的状态变量都线性相关。为了消去状态变量之间的耦合,引入新的状态变量 $Z$ ,两种状态变量之间的模态坐标为

$$\Delta x = \varphi Z \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)中,可得

$$\dot{Z} = \varphi^{-1} A \varphi Z = \psi^T A \varphi Z = \Lambda Z \quad (5)$$

式(5)表示的 $N$ 个解耦的一阶微分方程的解为

$$Z_i(t) = Z_i(0) e^{\lambda_i t} \quad (6)$$

由式(4)可得用 $\psi_i$ 和 $\Delta x(0)$ 表示的 $Z_i(0)$ ,即

$$Z_i(0) = \psi_i^T \Delta x(0) e^{-\lambda_i t} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)中,可得

$$Z_i(t) = \psi_i^T \Delta x(0) e^{\lambda_i t} \quad (8)$$

将式(8)代入式(4)中,可得

$$\Delta x = \sum_{i=1}^N \varphi_i Z_i(t) = \sum_{i=1}^N \varphi_i \psi_i^T \Delta x(0) e^{\lambda_i t} \quad (9)$$

式(9)即为多机系统负阻尼振荡响应的解析表达式。

可以看出,负阻尼振荡模式的系统中,相对振荡的机组,功角与转速将同时发生变化,不能通过振荡先后来识别振荡源。在多机系统中,右特征向量各分量的模值反映了相应机组参与振荡模式的强弱程度,分量的模值越大,该机组的振荡就越强;右特征向量各分量的相位反映了机组对该振荡模式的同调

程度,负阻尼振荡的机组之间的相对相位将在振荡全程保持不变。

### 2.2 强迫低频振荡的响应特性

在包含  $N$  台发电机的多机系统中,由于主要关注振荡频率在  $0.1 \sim 2.5$  Hz 之间的机电模式,而它们主要由转子运动方程决定,所以可以只考虑转子运动方程。发电机采用经典二阶模型(假定  $E'$  恒定)其线性化状态方程为

$$\Delta \dot{x} = A x(t) + B(t) \quad (10)$$

式中:  $x(t)$  为系统状态;  $A$  为系统状态矩阵;  $B(t)$  为扰动向量<sup>[9]</sup>。

假定初始时刻为  $t_0$ ,系统的初始状态为  $\Delta x(t_0)$ 。利用矩阵微分方程的初值问题定理,式(10)解的形式如式(11)所示,其中  $\Delta x_1(t)$  表示系统的零输入(自由)响应,  $\Delta x_2(t)$  表示系统的零状态(强迫)响应。

$$\begin{aligned} \Delta x(t) &= \Delta x_1(t) + \Delta x_2(t) \\ &= e^{A(t-t_0)} \Delta x(t_0) + \int_{t_0}^t e^{-A(\tau-t)} B(\tau) d\tau \quad (11) \end{aligned}$$

假设系统的初始状态为  $\Delta x(t_0)$  为 0,利用积分公式:

$$\int e^{\alpha x} \sin \beta x dx = \frac{e^{\alpha x} (\alpha \sin \beta x - \beta \cos \beta x)}{\alpha^2 + \beta^2} \quad (12)$$

另外,假设  $t_0 = 0$  定义第  $r$  阶振荡模式的固有频率为  $\omega_{nr} = |\lambda_r|$ , 阻尼为  $-\zeta_r \omega_{nr}$ , 振荡频率  $\omega_{dr} = \sqrt{1 - \zeta_r^2} \omega_{nr}$ ,  $\lambda_r = \omega_{nr} \theta_r$ ,  $\theta_r = \alpha \cos(-\zeta_r)$ ; 设  $\varphi_{ir} = |\varphi_{ir}|$ ,  $\gamma_{ir} \psi_{ri} = |\psi_{ri}| \sigma_{ri}$ ,  $\psi_{ri} = |\psi_{ri}| \sigma_{ri}$ ,  $\Delta x_2(t)$  第  $i$  个分量为

$$\begin{aligned} \Delta x_{2i}(t) &= \sum_{r=1}^{n-1} \sum_{l=1}^m \frac{\Delta P_{ml} B_{1il}^r \sin(\omega_l t + \varphi_{il}^r)}{(\omega_{nr}^2 - \omega_l^2) + 4\xi_r^2 \omega_{nr}^2 \omega_l^2} \\ &+ \frac{ce^{-\xi_r \omega_{nr} t} \Delta P_{ml}}{(\omega_{nr}^2 - \omega_l^2) + 4\xi_r^2 \omega_{nr}^2 \omega_l^2} \quad (13) \end{aligned}$$

于是,可总结得到多机系统强迫功率振荡响应的特征如下:

1) 强迫振荡响应是系统受到持续的周期性扰动后的响应。如果系统初始状态的变化量为 0,该响应为系统的零状态响应;若系统的初始状态的变化量不为 0,则响应中还包含系统的零输入响应成分;

2) 多机系统强迫振荡的零状态响应是在所有扰动源的共同作用下、各阶振荡模式响应的叠加,由外施扰动源决定的强制(稳态)分量和由系统各阶振荡模式决定的自由(瞬态)分量组成;

3) 当系统各阶振荡模式的阻尼为正时,无论扰

动源的频率与系统振荡模式的频率相等与否,自由分量最终衰减为 0,只剩下类似于无阻尼等幅自由振荡的强制分量。这表明,只有从包含自由分量的强迫振荡起振(瞬态)阶段的响应中,才有可能提取得到系统振荡的阻尼<sup>[10]</sup>;

4) 某阶振荡模式下,不同系统状态响应之间的幅值比和相位差与系统初始条件和时间  $t$  无关,分别等于右特征向量响应分量的模值比和辐角差;

5) 第  $i$  个状态变量的响应  $\Delta x_{2i}(t)$  的幅值,与第  $l$  个机械功率扰动的幅值、第  $r$  阶振荡模式的阻尼大小有关;

6) 第  $i$  个状态变量的响应  $\Delta x_{2i}(t)$  的幅值,还与第  $r$  阶振荡模式的右、左特征向量的第  $i$  个和第  $l$  个分量的乘积  $|\varphi_{ir} \psi_{rl}|$  有关。这表明,响应的幅值与扰动源所在的机组参与强迫功率振荡的程度有很大关系,若机组参与该模式的程度较小,即使发生强迫功率振荡,振荡的幅值也不大。

## 3 辨别两种振荡类型的判据

设在阻尼振荡频率为  $\omega_d$  的系统上施加持续周期性小扰动  $x_1$ ,其中  $B_1$  为扰动幅值,  $\omega$  为扰动频率,则系统的响应为

$$x(t) = x_0 + x_1 \quad (14)$$

式中:  $x_0 = B_0 \sin(\omega_d t + \varphi)$  为强迫分量;  $x_1 = B_1 e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_d t + \psi)$  为自由分量。

可以证明:对于有较大幅值、影响电力系统安全运行的强迫振荡,通常有  $B_1 \approx -B_0$ ,  $\omega \approx \omega_d$ ,  $\omega_n \approx \omega$ ,  $\psi \approx \varphi$ 。不失一般性,发生低频振荡时,系统的响应曲线可以表示为

$$x = B \sin(\omega t) - B e^{\alpha t} \sin(\omega t) \quad (15)$$

设  $t = t_i$  时  $x = x(t_i)$  为振荡曲线  $x$  的上包络线上的一个极大值:

当  $\alpha > 0$  时,曲线在  $t_i = \frac{2k\pi + 0.5\pi}{\omega}$ ,  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$  时,达到每个振荡周期内的最大值  $x_{\max}(t) = -B + B e^{\alpha t}$ ;

当  $\alpha < 0$  时,曲线在  $t_i = \frac{2k\pi + 0.5\pi}{\omega}$ ,  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$  时,达到每个振荡周期内的最大值  $x_{\max}(t) = B - B e^{\alpha t}$ ;

在  $x(t)$  取得最大值点  $t_k$  依次对  $x_{\max}(t)$  求一次、

二次微分,可得:

$$\text{当 } \alpha > 0 \text{ 时 } \begin{cases} x'_{\max}(t_k) = \alpha B e^{\alpha t_k} > 0 \\ x''_{\max}(t_k) = \alpha^2 B e^{\alpha t_k} > 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{当 } \alpha < 0 \text{ 时 } \begin{cases} x'_{\max}(t_k) = -\alpha B e^{\alpha t_k} > 0 \\ x''_{\max}(t_k) = -\alpha^2 B e^{\alpha t_k} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

由式(16)可知,当  $\alpha > 0$  时,系统的阻尼为负,此时  $x'_{\max}(t_k) > 0, x''_{\max}(t_k) > 0$ , 振荡响应包络线的一次差分 and 二次差分二者同号, 依此可判断出振荡类型为系统阻尼为负导致的增幅振荡。由式(17)可知, 当  $\alpha < 0$  时,系统的阻尼为正,此时  $x'_{\max}(t_k) > 0, x''_{\max}(t_k) < 0$ , 振荡响应包络线的一次差分 and 二次差分二者异号, 依此可判断出是由于存在扰动源而引起的强迫振荡。经过以上的分析,得到基于起振阶段暂态响应包络线形状的振荡类型判别判据,如表 1 所示。

表 1 基于起振阶段暂态响应包络线形状的振荡类型判别判据

振荡类型	衰减系数	包络线的一次差分	包络线的二次差分
强迫功率振荡	负号	正号	负号
负阻尼自由振荡	正号	正号	正号

从表 1 可以看出,当  $\alpha > 0$  时可得  $x'_{\max}(t_k) > 0, x''_{\max}(t_k) > 0$ , 二者同号, 依此判断系统阻尼为负, 呈现的增幅振荡是由于阻尼为负而导致的负阻尼自由振荡; 当  $\alpha < 0$  时可得  $x'_{\max}(t_k) > 0, x''_{\max}(t_k) < 0$ , 二者异号, 依此判断系统阻尼为正, 振荡是由于存在扰动源而引起的强迫振荡; 因此工程分析中可以通过 WAMS 的数据获取实测功率振荡曲线, 求出功率振荡峰峰值, 做一次差分 and 二次差分计算, 根据计算结果判断为负阻尼振荡模式或强迫振荡模式。

## 4 实例验证

新疆某区域电网有 3 座火电厂, 仅通过 2 回 220 kV 线路与主网相连。2014 年 9 月 20 日, 区域电网与主网相连的联络断面出现低频振荡, 有功功率在 43 ~ 91 MW 范围内摆动。通过调取 PMU 数据发现, A 电厂、B 电厂、C 电厂机组均出现波动, 其中 A 电厂机组波动最明显, 有功出现 30 ~ 50 MW 波动, 振荡频率约为 0.5 Hz。图 1 为 PMU 记录的 A

电厂 1 号机组有功功率振荡曲线。

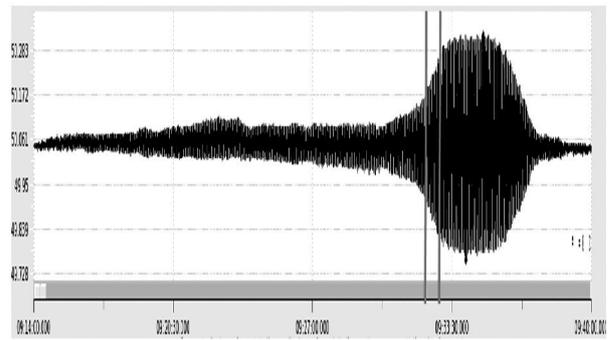


图 1 A 电厂 1 号机组有功功率振荡曲线

取振荡幅值较大的 A 电厂 1 号机组有功功率 PMU 录波曲线起振段的连续增幅振荡 7 个周波的峰峰值进行分析, 计算结果如表 2 所示。

表 2 用振荡类型判别法计算结果

$\Delta t/s$	$x'_{\max}(t_k)$	$x''_{\max}(t_k)$	判据
2	7.55	-0.762	异号
2	6.026	-0.197 5	异号
2	5.631	-0.137	异号
2	5.357	-0.263 5	异号
2	4.83	-0.698	异号
2	3.434	-0.343 5	异号
2	2.747	-0.123 5	异号

从表 2 计算结果可以看出:  $x'_{\max}(t_k) > 0, x''_{\max}(t_k) < 0$  符合表 1 中的基于起振阶段暂态响应包络线形状的振荡类型判别判据, 因此可以确定该起低频振荡事故为强迫功率振荡。这与该起事故分析结果一致, 通过计算分析以及现场相关试验后发现 A 电厂机组调速系统为该起事故的扰动源。

## 5 结论

通过对两种低频振荡响应特性进行研究, 分析两种低频振荡的特征及区别, 提出了基于起振阶段暂态响应包络线形状的振荡类型判别判据。该判据可以有效地利用 WAMS、PMU 的故障录波数据, 快速准确地判别出功率振荡的起因是由于系统缺乏阻尼还是由于系统内存在强迫振荡源, 从而有助于准确采取措施抑制振荡扩展, 快速平息振荡, 保证电网安全稳定运行。

(下转第 77 页)

## 4 结 论

通过对扩建变电站的电磁环境影响初步探讨,得出以下结论:

1) 变电站扩建后引起站外工频电场和工频磁场增加的因素为扩建的主变压器和出线间隔;

2) 在无法找到完全满足规范要求的类比变电站时,可通常对变电站扩建前电磁环境现状监测值按主变压器台数和出线回路数进行修正,修正值能保守反映变电站扩建后电磁环境影响的预测值;

3) 变电站主变压器扩建修正时可采用变电站扩建前电磁环境现状监测值乘以扩建后主变压器台数与原主变压器台数的比值进行修正;

4) 变电站出线回路数修正时可采用变电站扩建前电磁环境现状监测值乘以扩建后出线回路数与原出线回路数的比值进行修正。

### 参考文献

[1] HJ24-2014 环境影响评价技术导则输变电工程[S].

(上接第4页)

### 参考文献

[1] 王珍珍. 调速系统引发低频振荡的机理及抑制措施研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.

[2] 王铁强, 贺仁睦, 王卫国, 等. 电力系统低频振荡机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 21-25.

[3] 刘辉, 杨寅平, 田云峰, 等. 电力系统强迫功率振荡实例及机理分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 113-117.

[4] 徐衍会, 贺仁睦, 韩志勇. 电力系统共振机理低频振荡扰动源分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 83-87.

[5] 杨慧敏. 区域电网低频振荡特性分析与抑制方法的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.

[6] 魏云冰, 和萍, 李山德, 等. 电力系统低频振荡机理及控制策略研究[J]. 山东科技大学学报, 2008, 2(3): 23-26.

[2] 巩延果. 500 kV 变电站站内工频电磁场检测分析[J]. 广西电力, 2012, 35(4): 67-69.

[3] 刘岳定, 王里奥, 江玲燕. 重庆市典型变电站站场外工频电磁场实测分析[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(3): 138-140.

[4] 赵志勇, 宋晓东, 朱艳秋. 110~220 kV 高压变电站电磁环境影响因素分析[J]. 中国辐射卫生, 2010, 19(4): 452-453.

[5] 钱承萍, 杨琼分, 黄川友, 等. 关于新建110 kV 变电站电磁环境影响评价的几点建议[J]. 能源环境保护, 2012, 26(5): 53-55.

[6] 阮黎东, 宋福祥, 孙全红. 高压变电站对周围环境的影响与评价[J]. 电力环境保护, 2005, 21(3): 1-3.

[7] 赵素丽, 史玉柱. 设置变电站电磁环境影响防护控制区的必要性探讨[J]. 电力环境保护, 2008, 24(3): 50-53.

作者简介:

曾 媛(1981), 硕士, 工程师, 主要从事输变电工程环境影响评价

(收稿日期: 2015-02-20)

[7] 宋墩文, 杨学涛, 丁巧林, 等. 大规模互联电网低频振荡分析与控制方法综述[J]. 电网技术, 2011(10): 22-28.

[8] 耿天翔, 张竹竞, 项丽, 等. 基于起振特性的强迫振荡扰动源定位及解列方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015(6): 98-103.

[9] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[10] 王茂海, 孙昊. 强迫功率振荡源的在线定位分析技术[J]. 中国电机工程学报, 2014(34): 6209-6215.

作者简介:

周 专(1987), 硕士, 研究方向为电力系统规划、稳定与控制;  
常喜强(1976), 硕士, 研究方向为电力系统分析与控制;  
张增强(1984), 硕士, 研究方向为电力系统规划与分析。

(收稿日期: 2015-04-29)

# ± 800 kV 特高压直流双极闭锁故障对高密度风电地区电压影响分析

常喜强<sup>1</sup> 樊艳芳<sup>2</sup> 张 锋<sup>1</sup> 王 衡<sup>1</sup> 郑少鹏<sup>3</sup> 魏 威<sup>4</sup> 钟 显<sup>2</sup>

(1. 国网新疆电力调度控制中心 新疆 乌鲁木齐 830006; 2. 新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047; 3. 国网新疆电力科学研究院 新疆 乌鲁木齐 830016; 4. 国网新疆乌鲁木齐电力公司 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**近年来,交直流混联系统飞速发展,其规模庞大、结构复杂,导致电网运行的安全性、可靠性更加难以驾驭。伴随着风电、光伏等间歇性能源在直流送端的不断接入,交直流系统的运行特性也愈加复杂,给当前电网带来了一些新问题。其中直流闭锁故障对电压稳定性影响是限制电网电能输送的主要因素,闭锁故障后电网电压问题存在突发性和隐蔽性的特点,难以在事故前期洞察其征兆,无法及时采取有效措施。因此,分析了并网风电场电压波动原理及交直流混联系统的安全运行特点。当特高压直流发生闭锁故障时,通过采取不同的切机控制措施,将引起的交直流混联系统电压的差异,并针对新疆某地区风电场的电压分布特性进行研究分析,提出改善电压稳定能力的措施。通过模拟直流闭锁故障进行分析,对提高交直流混联系统的电压稳定性及减小电压波动对风机脱网影响具有重要的参考价值。

**关键词:**高密度风电; 特高压直流; 电压影响; 电压稳定; 双极闭锁

**Abstract:** Recently, the AC-DC hybrid systems develop rapidly with large scale and complex structure, which makes the security and reliability of power grid being more difficult to be controlled. With the wind power, solar energy and other intermittent energy come to the sending end of DC, the operating characteristics of AC-DC systems have become more complicated, and bring other new problems. DC blocking faults which affect the voltage stability is a major factor limiting power transmission, and because of its sudden occurrence and concealment, it is difficult to see through their signs clearly in the earlier stage of an accident and unable to take effective measures in time. Therefore, the principles of voltage fluctuations in the integrated wind farms and the operating characteristics of AC-DC hybrid system are analyzed. When blocking faults occur in UHVDC transmission system, the differences about voltage in AC-DC hybrid system will be analyzed through different control measures according to the voltage distribution characteristics of a wind farm in Xinjiang, and the measures for improving the voltage stability are proposed. Therefore, through simulating DC blocking faults, the analyses provide an important reference to improve the voltage stability of AC-DC hybrid system and reduce the impacts of voltage fluctuations on the off-grid wind turbines.

**Key words:** high-density wind power; HVDC; voltage influence; voltage stability; bipole tripping

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0005-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.002

## 0 引言

直流输电系统可远距离、大功率输电。利用直流输电,其不受同步运行稳定性问题的制约,对保证两端交流系统稳定运行性起了很大作用;同时避免交流系统容量过大带来的一系列稳定性问题。由直流功率传输特性可知,直流系统需要消耗大量的无功功率、直流系统故障导致功率大量转移等因素,将

基金项目:国家自然科学基金项目(51467019)

对交流系统产生一定冲击,使得混联电网暂态稳定问题突出,尤其是暂态电压稳定问题<sup>[1-2]</sup>。

当前,针对直流系统闭锁故障对交流系统的影响进行了大量的研究分析。文献[3]以±500 kV林枫直流双极闭锁故障为对象,分析了闭锁故障对交流系统潮流及电压的影响,并对交直流运行、直流仿真程序模型提出了改进建议。文献[4]提出了特高压直流送端电网“网源协调”的调压策略,通过优化网内常规能源机组出力,可提升系统暂态下无功支撑能力,有利于扰动下系统电压的稳定。文献[5]

指出提高交直流送端电网的短路电流水平可以减小直流闭锁对电压波动性的影响。文献[6]分析了电网电压的薄弱片区,提出了进行无功潮流优化及建立电压稳定性分析模型的措施,优化电网无功补偿和电网电压调整控制策略。

当前主要是针对直流闭锁故障,提出改善电网电压的控制措施,以及合理配置无功补偿设备与优化稳控策略的研究。而对于直流发生闭锁故障后,电压特性的对比分析研究则相对较少。以新疆天中特高压直流为例,对直流发生双极闭锁仿真分析,得出不同运行工况和稳控策略下电压的分布,并对哈密高密度风电地区电压进行深入分析。对于实际运行的交直流混联系统闭锁故障提高系统电压稳定性和减小风电场电压波动有重要的意义。

## 1 风电并网电压波动原理分析

风电作为间歇性能源,其出力跟随风速变化。当前大部分风电场主要分布在较为偏远的地区,一般位于网络的尾端。该位置网架结构薄弱,抗扰动性差。风电并网后,风机输有功的同时,还需吸收一定的无功。随接入风机容量的增大,电网电压的影响也更显著,并可导致系统的瓦解<sup>[7-8]</sup>。风电并网引起电网电压波动的本质是由于风机出力的波动性导致。风电并网等效网络如图1所示。

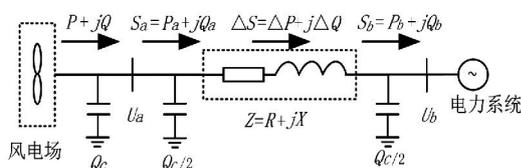


图1 风电并网等效网络

由图1等效网络可知:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_b + \left( \frac{S_b}{\dot{U}_b} \right)^* Z \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= U_b + \frac{P_b - jQ_b}{U_b} (R + jX) \\ &= \left( U_b + \frac{P_b R + Q_b X}{U_b} \right) + j \left( \frac{P_b X - Q_b R}{U_b} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

对于通常情况下,由于

$$U_b + \frac{P_b R + Q_b X}{U_b} \gg \frac{P_b X - Q_b R}{U_b} \quad (3)$$

所以公式(2)化简为

$$U_a \approx U_b + \frac{P_b R + Q_b X}{U_b} \quad (4)$$

由功率的流向可知:

$$P_b = P - \Delta P \quad (5)$$

$$Q_b = Q_c + 2Q_{c/2} - Q_c - \Delta Q \quad (6)$$

由分析可知:当风电场的有功出力增加时,线路无功损耗 $\Delta Q$ 也增大;当风电场所吸收的无功 $Q_c$ 与线路无功损耗 $\Delta Q$ 之和大于机端并联电容所提供的无功 $Q_c$ 和输电线路的充电功率 $2Q_{c/2}$ 之和时, $Q_b$ 是小于0的。若 $P_b R + Q_b X < 0$ ,则有 $U_a < U_b$ ,那么,随着风功率的随机波动,同理也 $U_a > U_b$ 情况。通过分析风电场接入电网后对并网点的电压影响,由理论分析知,风电场并网点的电压主要是由:风电场的有功出力波动、风电场自身的功率因数(无功特性)、风功率输送线路参数(阻抗值)及所并网点的电网情况等因素影响。

## 2 交直流混联系统运行特性分析

### 2.1 交直流混联系统输电特性

交直流混联系统既可发挥交流联网的优势,又可利用直流输电传输功率可快速调节的特点来改善系统的稳定,有利于综合发挥交流和直流输电的优势。但注意的是交直流系统间输送能力要有一个恰当比例。交流线路故障时,能借助于直流系统的功率调制等快速调节功能,保证系统稳定;直流线路故障时,其甩至与之并联的交流线上的功率应该不超过系统暂态稳定所能承受的程度。可见,采用“强直弱交”的联网运行方式将不利于系统的稳定<sup>[9-10]</sup>。

### 2.2 交直流混联系统安全运行的特点

特高压直流输电对比交流输电,其功率和运行方式有较强的可控性。运行中,直流系统输送有功功率大、吸收的无功多,一旦直流系统发生故障时,导致功率转向交流系统,大量的有功和无功将引起电压和频率的波动<sup>[11]</sup>。因此,对于交直流系统不同的故障,可采取的安全措施如下:①直流闭锁故障引起的潮流转移对交流系统形成冲击,系统应保持稳定,对于电源直接送出的直流线路单极闭锁故障,可采取切机措施;②对于电源直接送出的交流线路,发生三永短路故障,可考虑采取切机措施。受端换流站交流侧发生短路故障,虽然可能会出现换相失败,

但故障切除后直流系统应能够恢复正常运行;③利用直流调制减小交、直流系统故障对系统的冲击,有效地抑制故障后的系统振荡,以及增强系统的阻尼特性;④直流双极闭锁故障是严重的故障形式,故障极功率转移至交流系统,会引起交流线路功率和电压的振荡,为防止直流双极闭锁故障引起系统功角和电压失稳,可考虑采取的措施有在送端切除一定容量发电机组、解列电网等,可结合实际电网分析<sup>[12-14]</sup>。

### 3 新疆地区某电网运行特性分析

目前,新疆哈密地区电网已形成高密度风电基地,并且该地区风电汇集交流 750 kV 及 ±800 kV 天中直流外送通道,对于疆电外送作用重大。图 2 所示为哈密地区电网示意图。

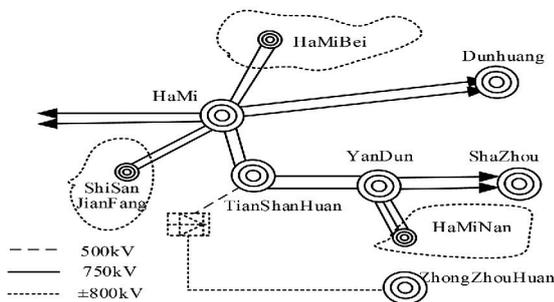


图 2 哈密地区电网示意图

由图 2 可知,哈密地区风电主要集群接入哈密北、十三间房、哈密南 3 个地区。高密度风电将严峻考验着交直流混输电系统,以及天中特高压直流系统发生闭锁故障导致风电上网功率变化、电压波动等影响。根据直流的运行机理,无功消耗量大,目前电网配置一定量的滤波器来提供无功补偿。此外,在天山换流站还配备了直流电源。由于天中直流配套电源未投运,天山换流站 500 kV 母线短路电流偏小(11 kA),发生单极或双极闭锁事件后,交流滤波器无法快速切除,存在一定的时间差。而且为了保证新疆与西北主网功角不失去稳定,需要切除新疆网内机组,造成哈密地区电压上升幅度大,同时直流近区风机因为高电压问题脱网,造成电压进一步上升。随着直流配套电源增加,天山换流站 500 kV 母线短路电流也逐步增大,电网调节能力有所增强。但天中直流传输功率也在不断增大,双极闭锁后,由于直流侧大量无功到送至交流侧,暂态电压上升幅度依然很大,甚至比无直流配套电源时还严重,近区

风机脱网,发生连锁故障的运行风险仍然存在。

因此,针对新疆哈密地区高密度风电及天中特高压直流故障引起的电压问题。以该直流发生双极闭锁故障为例,依据配套电源、哈密地区风电场、疆内电源的分布情况,针对不同的稳控切机策略下,分析哈密地区电网运行的电压分布。

### 4 仿真分析

根据直流输电系统电力组织情况,考虑直流外送电力 2 000 MW 与 5 000 MW 两种运行工况,当天中直流发生闭锁故障后仿真分析不同的稳定控制策略下哈密地区电压分布特性。(说明:哈密交直流混联系统 750 kV 交流外送通道的功率不平衡量考虑 1 200 MW。)

表 1 直流外送电力组织情况

运行方式	配套电源	哈密风电	联变下网功率
直流外送 2 000 MW	0 机运行	1 000 MW	1 000 MW
直流外送 5 000 MW	(6 机运行) 2 000 MW	1 000 MW	2 000 MW

#### 4.1 天中直流输送 2 000 MW 时电压分析

当天中直流输送功率 2 000 MW 时,根据电力组织情况其潮流运行如图 3 所示。

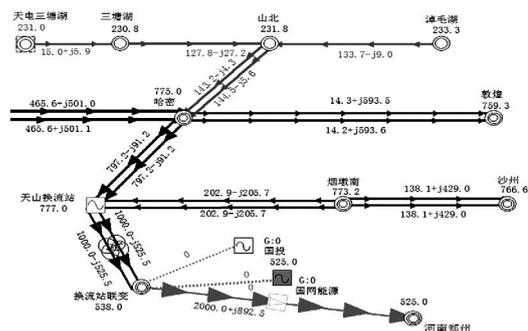


图 3 电力组织潮流示意图

当天中直流发生双极闭锁时,据新疆 750 kV 实际交流系统不平衡功率量 1 200 MW,稳控应切除 800 MW 网内上网机组。仿真分析对高密度风电地区电压波形如图 4 所示。

根据图 4 仿真结果显示,直流闭锁故障前,风机机端电压维持范围为 0.95 ~ 1.06 p.u,110 kV 母线电压维持范围为 1.035 ~ 1.06 p.u,220 kV 母线电压维持范围为 1.045 ~ 1.05 p.u。当发生直流闭锁故障后,该地区电压均出现上升趋势,其中风机机

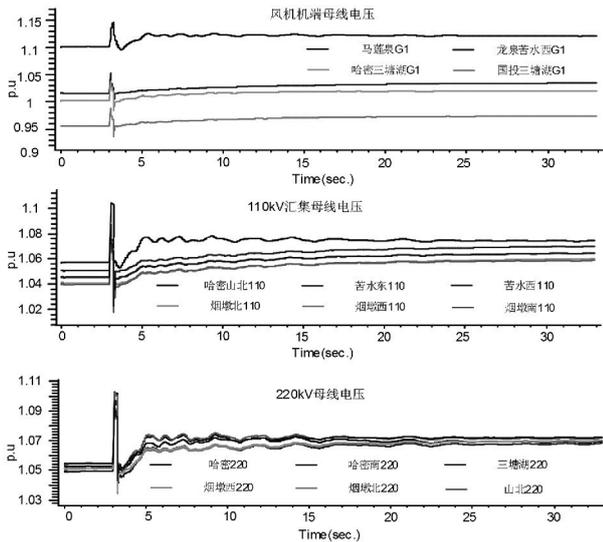


图4 直流故障稳控动作后高密度风电地区电压变化  
端电压变化幅度为0.017 1~0.017 5 p.u, 110 kV  
母线电压变化幅度为0.017 1~0.018 3 p.u 220 kV  
母线电压变化幅度为0.016 2~0.182 p.u。

#### 4.2 天中直流输送5 000 MW时电压分析

当天中直流输送功率5 000 MW时,根据电力  
组织情况其潮流运行如图5所示。

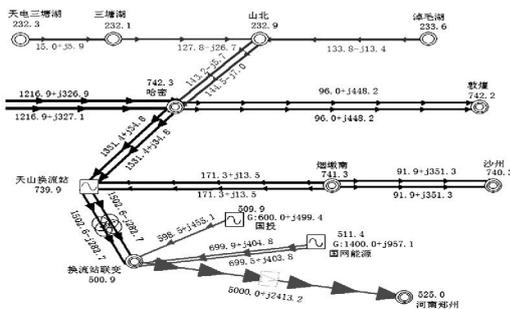


图5 电力组织潮流示意图

当天中直流发生双极闭锁时,据新疆750 kV  
实际交流系统不平衡功率量1 200 MW 稳控应切除  
3 800 MW 网内上网机组。此时考虑电力组织潮流  
中直流配套电源不同的保留情况,构成直流配套电  
源全切(稳控策略1)与保留2台机组(稳控策略2)  
运行的稳控策略。

1) 稳控策略1: 配套电源2 000 MW 机组全切 +  
切哈密风电800 MW + 切疆内火电机组1 000 MW。  
此时高密度风电地区电压波形如图6所示。

根据图6仿真结果显示,直流闭锁故障前,风  
机机端电压维持范围为0.95~1.08 p.u, 110 kV 母  
线电压维持范围为1.012~1.029 p.u 220 kV 母  
线电压维持范围为1.03~1.038 p.u。当发生直流闭  
锁故障后,该地区电压均出现上升趋势,其中风机机

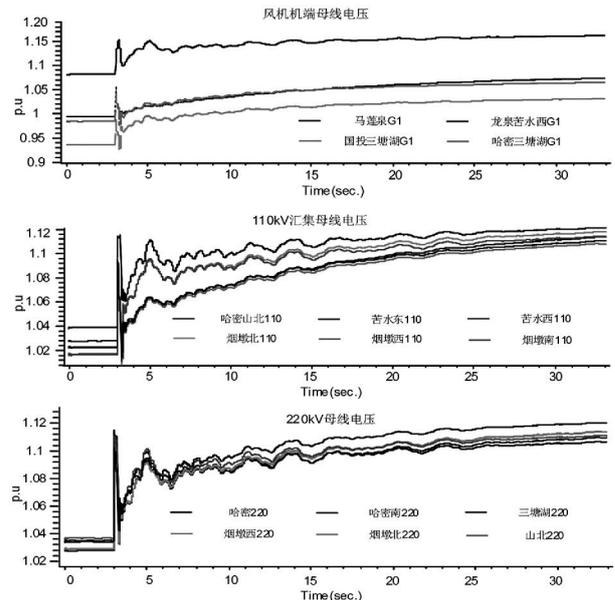


图6 直流故障稳控1动作后高密度风电地区电压变化  
端电压变化幅度为0.072~0.09 p.u, 110 kV 母  
线电压变化幅度为0.073~0.091 p.u 220 kV 母  
线电压变化幅度为0.068~0.082 p.u。

2) 稳控策略2: 切部分配套电源1 000 MW 机组  
+ 切哈密风电800 MW + 切疆内火电机组2 000  
MW。此时高密度风电地区电压波形如图7所示。

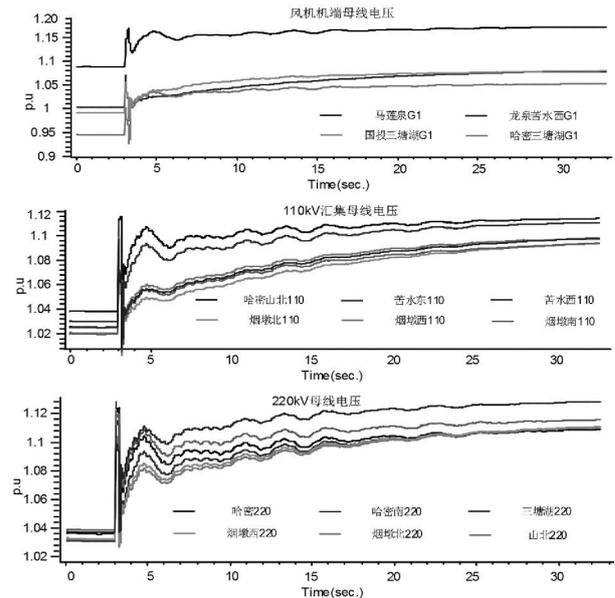


图7 直流故障稳控2动作后高密度风电地区电压变化  
根据图7仿真结果显示,直流闭锁故障前,风  
机机端电压维持范围为0.95~1.08 p.u, 110 kV 母  
线电压维持范围为1.012~1.029 p.u 220 kV 母  
线电压维持范围为1.03~1.038 p.u。当发生直流闭  
锁故障后,该地区电压均出现上升趋势,其中风机机  
端电压变化幅度为0.073~0.106 p.u, 110 kV 母  
线

表2 电压波动幅度对比分析

运行方式	风电场机端母线	110 kV 母线	220 kV 母线	对比说明
直流外送 2 000 MW/p.u	0.017 1 ~ 0.017 5	0.017 1 ~ 0.018 3	0.016 2 ~ 0.182	其中三塘湖风电场压升最大为 0.017 5 ,110 kV 烟墩南母线压升最大为 0.018 3 ,220 kV 烟墩北母线压升最大为 0.182。
直流外送 5 000 MW 稳控策略 1/p.u	0.072 ~ 0.09	0.073 ~ 0.091	0.068 ~ 0.082	其中三塘湖风电场压升最大为 0.09 ,110 kV 烟墩北母线压升最大为 0.091 ,220 kV 烟墩北母线压升最大为 0.082。
直流外送 5 000 MW 稳控策略 2/p.u	0.073 ~ 0.106	0.073 ~ 0.086	0.075 ~ 0.092	其中三塘湖风电场压升最大为 0.106 ,110 kV 烟墩北母线压升最大为 0.086 ,220 kV 三塘湖母线压升最大为 0.092。

电压变化幅度为 0.073 ~ 0.086 p.u ,220 kV 母线电压变化幅度为 0.075 ~ 0.092 p.u。

根据上述不同运行工况的稳控策略作用下 ,电压波动范围对比分析如表 2 所示。

当直流输电系统不同的传输功率工况下 ,直流发生双极闭锁稳控策略作用后 ,由表 2 的对比分析可知: ①无论何种工况下三塘湖风电场母线电压波动幅度均较大; 110 kV 母线电压波动幅度较大均出现在烟墩区域 ,但不同厂站电压波动幅度差异; 220 kV 母线电压波动幅度较大出现在不同的区域。②对比直流配套电源切机情况 ,全切机组较部分机组保留而言 ,系统整体稳态压升幅度较高 ,易对系统产生较大影响。对疆内机组而言 ,过多切除机组易造成交流通道功率大规模的转移 ,进而带来系统稳定性问题。③无论何种工况运行下直流故障稳控策略作用后 ,都易导致哈密高密度风电地区机端暂态电压过高 ,风机存在潜在的脱网威胁。

### 5 结 论

通过对哈密地区天中直流发生闭锁故障 ,对不同的工况下仿真分析电压分布特性得出如下结论:

- 1) 直流大功率运行配套电源全投入时 ,当直流发生闭锁故障后 ,稳控策略保留部分配套电源运行 (1 ~ 2 台机组) 有利于电压稳定。同时辅以无功控制利于系统稳定;
- 2) 考虑不同稳控策略的影响 ,直流闭锁故障后需综合考虑风电、疆内火电和配套电源的稳控策略 ,避免防止疆内过多切除火电导致线路过载 ,同时避免风电过多切除导致高电压的问题 ,将进一步导致风电大规模脱网;
- 3) 对于直流闭锁故障稳控策略后 ,风电集群接

入区域电压波动较大 ,尤其是烟墩区域、出现电压波动幅度较大 ,需要提升风机的耐高压 (1.15 p.u) 能力 ,进一步提升风电稳定运行能力。

因此 ,针对哈密高密度风电、交直流混联系统的稳定运行及电压分布特性研究 ,有一定的工程应用价值。

#### 参考文献

- [1] 赵晚君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社 2004: 1 - 17.
- [2] 刘振亚, 舒印彪, 张文亮, 等. 直流输电系统电压等级序列研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 128 - 135.
- [3] 常喜强, 樊艳芳, 钟显, 等. 高密度风电接入地区电压波动因素分析与研究 [J]. 四川电力技术, 2014, 37(6): 5 - 9.
- [4] 李国栋, 皮俊波, 郝力, 等. ±500 kV 林枫直流双极闭锁故障案例仿真分析 [J]. 电网技术, 2014, 38(4): 877 - 881.
- [5] 郑超, 汤涌, 马世英, 等. 网源稳态调压对暂态无功支撑能力的影响研究 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 115 - 122.
- [6] 王衡, 姚秀萍, 常喜强, 等. 特高压直流故障对风电场送出可靠性的影响及改进措施 [J]. 电工电气, 2014(5): 29 - 32.
- [7] 王成祥, 王志勇, 宋兴光. 南方电网无功电压运行特性的分析与探讨 [J]. 电力设备, 2006, 7(5): 62 - 64.
- [8] 孙涛, 王伟胜, 戴慧珠. 风力发电引起的电压波动和闪变 [J]. 电网技术, 2003, 27(12): 62 - 66.
- [9] 丁明, 李宾宾, 韩平平. 双馈风电机组运行方式对系统电压稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2010, 34(10): 26 - 31.
- [10] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗祖. 电网和电网技术发展的回顾及展望——试论三代电网 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 1 - 11.

(下转第 19 页)

[29] 胡书举,李建林,许洪华. 永磁直驱风电系统低电压运行特性的分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 73-77.

[30] 姚俊,廖勇,庄凯. 电网故障时永磁直驱风电机组的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 91-96.

[31] 蔺红,晁勤. 电网故障下直驱式风电机组建模与控制仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 189-195.

[32] 文玉玲. 风电场短路特性及对电网继电保护影响的研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2009.

[33] 苏常胜,李凤婷,武宇平. 双馈风电机组短路特性及对保护整定的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 86-91.

[34] 杨国生,李欣,周泽昕. 风电场接入对配电网继电保护的影响与对策[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 87-91.

[35] Comech M P, Montanes M A, Garcia M G. Overcurrent Protection Behavior Before Wind Farm Contribution [C]. The 14th IEEE Mediterranean Electro technical Conference, MELECON, Acacia 2008: 762-767.

[36] Jang S I, Choi J H, Kim J W, et al. An Adaptive Relaying for the Protection of a Wind Farm Interconnected with Distribution Networks [C]. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, Dallas 2003: 296-302.

[37] 文玉玲,晁勤,吐尔逊·伊布拉音. 关于风电场适应性继电保护的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 47-51.

[38] 何世恩,董新洲. 大规模风电接入对继电保护的影响与

对策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 21-27.

[39] 张保会,王进,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(四)——风电场送出线路保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 1-6.

[40] 张保会,张金华,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 1-6.

[41] 李生虎,贾树森,孙莎莎. 风电系统距离 III 段保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 31-35.

[42] 何世恩,索南加乐,杨铨,等. 适应于酒泉风电送出的 750kV 线路纵联保护原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 87-91.

[43] Pradhan A K, Joos G. Adaptive Distance Relay Setting for Lines Connecting Wind Farms [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 206-213.

[44] 樊艳芳,钟显,常喜强,等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.

作者简介:

钟显(1989), 硕士研究生, 主要研究方向为集群风电并网技术及其继电保护;

樊艳芳(1971), 副教授、硕士生导师, 主要研究方向为新能源并网技术及电力系统保护与控制研究;

常喜强(1976), 高级工程师, 主要从事电力系统分析与控制、调度自动研究;

魏威(1985), 学士, 主要从事电网调度与控制工作;

苏洪兴(1990), 学士, 主要从事电力系统继电保护工作。

(收稿日期: 2015-04-28)

(上接第9页)

[11] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

[12] 颜伟,张海,兵田甜. 交直流系统的动态无功优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(29): 43-46.

[13] 陈树勇,逢博,陈得治,等. 新疆电网多送出直流输电系统运行特性分析[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 102-107.

[14] 樊艳芳,钟显,常喜强,等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.

作者简介:

常喜强(1976), 高级工程师, 从事电力系统分析与控制、调度运行控制工作;

樊艳芳(1971), 副教授、硕士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制;

张锋(1978), 高级工程师, 从事电力系统分析与控制、调度运行控制工作;

王衡(1984), 工程师, 从事电力系统分析与控制工作;

郑少鹏(1985), 工程师, 从事电力系统分析与控制工作;

魏威(1985), 学士, 主要从事电网调度与控制工作;

钟显(1989), 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2015-06-24)

# 配电网电压暂降状态估计单层神经网络法

汪颖<sup>1</sup> 唐琳<sup>1</sup> 李国栋<sup>2</sup> 林芳<sup>1</sup> 吕金炳<sup>2</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384)

**摘要:**应用单层线性神经网络求解电压暂降状态估计问题。对比单层线性神经网络和多层线性神经网络的结构和输入输出特性,并使用 Matlab 神经网络工具箱对 IEEE 30 节点可靠性测试系统进行仿真,证明两种网络有相同功能,能达到相同误差精度。但单层线性神经网络结构更简单,能大幅提升计算速度。

**关键词:**电压暂降; 状态估计; 区域电网; 单层线性神经网络

**Abstract:** Single layer linear neural network is used to solve the state estimation problems of voltage sag. The structure and input/output characteristics of single layer linear neural network are compared with that of multi-layer linear neural network, and the simulation of IEEE-30 bus reliability test system (RTS) is carried out by using Matlab neural network toolbox. The results demonstrate that these two kinds of networks have the same function, and can achieve the same error precision. But single layer linear neural network can significantly increase the computation speed because of its simpler structure.

**Key words:** voltage sag; state estimation; regional power grid; single layer linear neural network

中图分类号: TM74 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0010-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.003

## 0 引言

电压暂降状态估计(voltage sag state estimation, VSSE)是利用系统内有限监测点的暂降频次信息和状态估计方程估计其余节点的暂降频次。实际中由于监测点数量有限,状态估计方程是高欠定方程<sup>[1]</sup>,其求解算法是值得研究的重要课题。

状态估计欠定线性方程的求解,现已有的整数线性规划法<sup>[1]</sup>、遗传算法<sup>[2]</sup>、bp 神经网络<sup>[3]</sup>等,均存在计算时间过长的的问题。bp 网络含多层神经元,结构复杂,导致计算时间增加;bp 网络隐层神经元数的确定目前还没有统一的方法,都是依靠经验选取,通常设计 bp 网络都用较高的结构冗余性满足较低的精度要求,造成计算时间大幅增加。

根据 VSSE 方程的线性特点,选择单层线性神经网络,该网络结构简单只含一层神经元,极大精简了神经网络结构,去除冗余部分神经元。因此,单层线性神经网络求解 VSSE 方程能在保证精度的同时,大幅减少计算时间。

基金项目:高等学校博士学科点专项基金资助项目(20130181110004);国网天津市电力公司电力科学研究院项目

将单层线性神经网络和多层线性的 bp 神经网络的结构和输入输出特性做对比,从理论上证明两者拥有相同的传递功能,但单层线性网络结构更简单;用 IEEE 30 节点可靠性测试系统进行仿真测试,从仿真中证明两者能达到相同精度,但单层线性网络速度更快,更具优越性;因此,在求解 VSSE 欠定线性方程上,单层线性神经网络完全可以取代 bp 神经网络。

## 1 电压暂降方程

状态估计通用的数学方程式如下<sup>[1]</sup>:

$$H = MX + E \quad (1)$$

式中,  $H$  表示测量向量;  $X$  是待估计的状态向量;  $M$  是测量矩阵;  $E$  向量代表测量噪声,在 VSSE 中,该向量被忽略<sup>[4]</sup>。任意的一个电力系统,假设有  $N$  个节点,  $L$  条线路和  $M$  个监测点,在该问题中  $M < N$ 。

对于设定的电压暂降阈值  $t_1$ ,式(1)在 VSSE 应用中的具体含义如下:

1) 测量向量  $H^1$ : 测量向量  $H^1$  表示所有监测点监测到的剩余电压  $\leq$  设定电压阈值  $t_1$  的电压暂降频次。它是从安装监测装置的  $M$  个监测点直接获

取的,能构成  $M$  行的向量  $H^1$ 。

2) 状态变量  $X$ : 向量  $X$  由待估计的状态变量组成。其中每一个变量表示在对应线路分段上发生故障的次数。线路故障分段的概念和具体方法见文献[1]。相同线路分段上发生多次故障,对同一个母线节点是否发生暂降的影响是相同的。如果总的线路分为  $P$  段,则  $X$  向量为  $P$  维。

3) 测量矩阵  $M^1$ : 测量矩阵  $M^1$  是  $(M \times P)$  维的  $0-1$  矩阵。对于任意的一个元素  $m^1(m_i, p_i)$ , 若对应故障分段  $p_i$  上发生的故障,会导致节点  $m_i$  的剩余电压低于阈值  $t$  从而导致暂降,则取值为1;反之,如果该故障不会导致暂降,则该元素为0。

4) 求解: 式(1)是一个欠定线性方程,采用单层线性神经网络求解得到状态变量  $X$  的值,然后通过状态估计方程求取待估计节点的暂降频次。对于任意的非监测节点  $i$ , 测量矩阵  $M_i$  和前面测量矩阵  $M^1$  的求取方法相同,表征对应线路分段发生故障是否会导致非监测点  $i$  发生暂降。任意待估计非监测点的暂降频次  $h_i$  的表达式为

$$h_i = M_i^T X \quad (2)$$

考虑多种暂降阈值和多种故障类型的 VSSE 方程拓展见文献[1]。

## 2 单层线性神经网络和 bp 神经网络在该问题中的对比

应用线性神经网络对 VSSE 方程进行求解,可以设计简单的单层线性神经网络(*newlind*),或者利用 bp 神经网络的创建函数(*newff*)设计含有一个(或以上)隐层的多层线性神经网络,参见文献[3]。下面证明单层线性神经网络和 bp 设计的多层线性神经网络具有相同的输入输出特性。

### 2.1 单层线性神经网络

如图1所示是具有  $r$  个输入  $s$  个输出的单层线性神经网络模型,在该网络中,全部神经元都选线性传递函数。其中,  $[p_1, p_2, \dots, p_r]^T$  是输入向量,偏差和权重如图1中所示,输入层的输出为  $a1_j$  [5]:

$$a1_j = \sum_{i=1}^r w1_{ji} p_i \quad i \in [1, r] \quad j \in [1, s] \quad (3)$$

输出层的输出为  $a2_j$ :

$$a2_j = a1_j + b_j = \sum_{i=1}^r w1_{ji} p_i + b_j \quad i \in [1, r] \quad j \in [1, s] \quad (4)$$

### 2.2 多层线性神经网络

以含有一个隐层的两层线性神经网络为例,其输入向量仍是  $r$  维,所有的神经元都选线性传递函数。

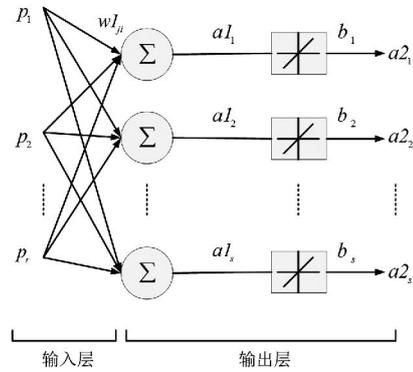


图1 单层线性神经网络结构

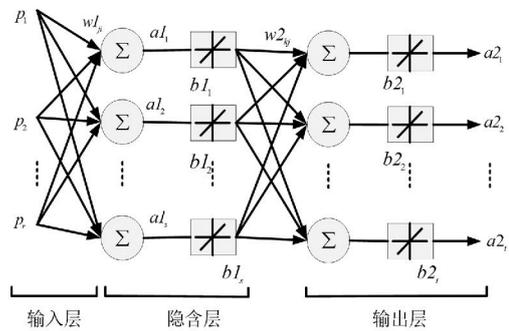


图2 多层线性神经网络结构

其中,  $[p_1, p_2, \dots, p_r]^T$  是输入向量,偏差和权重如图2所示,隐含层的输出为  $a1_j$ ,  $a1_j = \sum_{i=1}^r w1_{ji} p_i + b1_j$ ;  $i \in [1, r]$   $j \in [1, s]$ 。输出层的输出为  $a2_k$  [5]:

$$\begin{aligned} a2_k &= \sum_{j=1}^s w2_{kj} a1_j + b2_k \\ &= \sum_{j=1}^s w2_{kj} \left( \sum_{i=1}^r w1_{ji} p_i + b1_j \right) + b2_k \\ &= \sum_{j=1}^s w2_{kj} \sum_{i=1}^r w1_{ji} p_i + \sum_{j=1}^s w2_{kj} b1_j + b2_k \\ &= \sum_{i=1}^r \left( \sum_{j=1}^s w2_{kj} w1_{ji} \right) p_i + \sum_{j=1}^s w2_{kj} b1_j + b2_k \quad (5) \end{aligned}$$

式中  $i \in [1, r]$   $j \in [1, s]$   $k \in [1, t]$ 。

由于  $w2_{kj}, b1_j, b2_k, w1_{ji}$  都是实数,所以公式  $\sum_{j=1}^s w2_{kj} w1_{ji}$  和公式  $\sum_{j=1}^s w2_{kj} b1_j + b2_k$  也将是实数,于是可以用新的权重  $w_{ki}$  及偏差  $\beta_k$  来代替它们:

$$w_{ki} = \sum_{j=1}^s w2_{kj} w1_{ji}$$

$$\beta_k = \sum_{j=1}^s w_{kj} b_{1j} + b_{2k} \quad (6)$$

那么,公式(5)可以写成式(7):

$$a_{2k} = \sum_{i=1}^r w_{ki} p_i + \beta_k \quad (7)$$

所以,含有一个隐层的多层线性网络的输入输出关系可以用式(7)表示。把式(4)与式(7)比较,发现它们在形式上是相同的,只是多层线性网络比单层线性网络具有更复杂的权重和阈值。因此两者具有相同的能力。但多层网络结构更为复杂,计算时间也更长,所以多层线性网络完全可以被单层线性网络所替代<sup>[5]</sup>。使用神经网络方法求解 VSSE 方程  $H = MX$ ,应用单层线性网络就已经足够。该方法能在保证精度的情况下,大幅提升计算速度。

### 3 单层线性网络求解 VSSE 方程

神经网络训练数据需要输入和对应的标准输出。对于式(1),把  $H$  作为输入,而  $X$  作为输出。

用蒙特卡洛法<sup>[6]</sup>生成故障点,这些故障点包括任意的故障类型,可以落在系统内所有线路的任意位置上。随机生成选定次数的故障后,统计每个线路分段内的故障次数,即是生成了一组状态变量  $X$ ,由于测量矩阵  $M$  已知,根据方程(1)就可以求到对应的测量向量  $H$ ,从而生成了一组训练数据  $H$  和  $X$ 。如此重复  $n$  次,则得到  $n$  组训练数据。

利用 Matlab 神经网络工具箱的 *newlind* 函数,建立自适应的单层线性神经网络模型,对输入  $H$  和输出  $X$  进行训练,得到网络 *net*。将实际监测到的一组  $H$  作为测试数据输入,经过 *net* 可以得到单层线性神经网络给出的状态变量  $X$  的结果。再根据方程(2)可得任意节点的电压暂降频次估计值。

### 4 案例仿真

将所提方法应用于 IEEE 30 系统进行仿真,该系统有 30 个节点,37 条线路<sup>[7]</sup>。根据<sup>[8]</sup>的方法,选定 0.9 p.u. 阈值下的监测点为 7、24 共 2 个,系统结构如图

3。在此监测装置配置情况下对发生的 0.9 p.u. 电压暂降进行估计。

表 1 是应用单层线性神经网络在 0.9 p.u. 阈值下的计算结果和误差。其中, MSE (mean square error) 均方误差表征估计值相对实际值的误差大小。表 1 中,电压暂降估计值与实际值误差很小,说明线性神经网络能很好地应用于 VSSE 问题,证明了所提方法的可行性和准确性。

表 1 单层线性神经网络计算结果

节点	实际值	估计值	百分误差/%
1	12	11	-8.333
2	15	16	6.667
3	20	20	0
4	22	21	-4.545
5	7	8	14.286
6	22	21	-4.545
7	20	20	0
8	18	17	-5.556
9	23	23	0
10	24	24	0
11	0	1	-
12	22	22	0
13	1	2	100
14	24	23	-4.167
15	24	23	-4.167
16	24	23	-4.167
17	24	24	0
18	24	24	0
19	24	24	0
20	24	24	0
21	25	25	0
22	25	25	0
23	25	25	0
24	25	25	0
25	25	25	0
26	25	25	0
27	25	25	0
28	23	23	0
29	25	25	0
30	25	25	0
MSE		0.367	

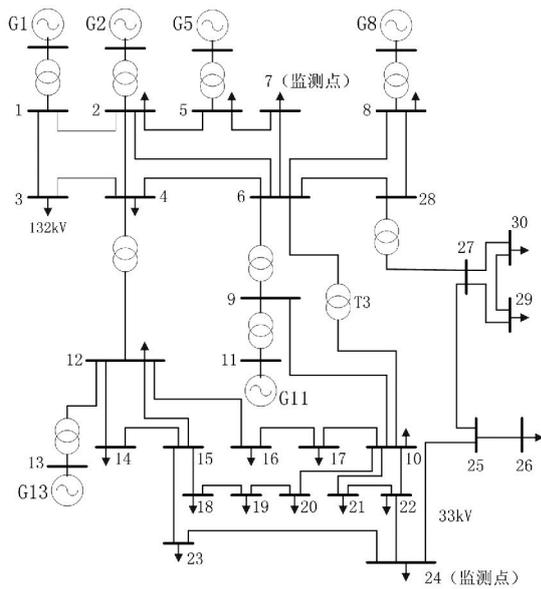


图3 IEEE 30节点系统结构图

表2是在达到给定精度要求的条件下,两种神经网络所需计算时间对比。

表2 相同精度要求下两种神经网络计算时间对比

MSE 精度要求	单层线性神经网络所需时间/s	bp神经网络所需时间/s
MSE ≤ 6	0.028	0.400
MSE ≤ 4	0.028	0.277
MSE ≤ 2	0.046	2.406
MSE ≤ 1	0.053	55.124
MSE ≤ 0.8	0.098	167.473
MSE ≤ 0.7	0.118	1 161.534
MSE ≤ 0.6	0.216	1 417.777
MSE ≤ 0.5	1.159	3 153.243
MSE ≤ 0.4	5.892	3 820.300

从表2可以看出,在达到相同等级的误差精度情况下,单层线性神经网络比bp神经网络所需要的时间更短,而且随着精度的提高,计算速度上的优势明显增大。综上所述,单层线性神经网络比bp神经网络更简单快速,能大幅提升计算速度,更适用于VSSE计算。

## 5 结论

由于VSSE方程是欠定线性方程,采用单层线

性神经网络和bp神经网络都可求解,但bp神经网络设计的多层线性网络结构复杂且具有高度冗余性,而单层线性神经网络结构更为精简,相同功能下选择结构简单的单层线性网络更为合适。应用单层线性神经网络求解VSSE方程,在保证精度的同时大幅提升计算速度。在VSSE问题上,单层线性神经网络优于bp神经网络,更能满足工程实际的需要。

## 参考文献

- [1] E. Espinosa - Juárez, A. Hernández. A Method for Voltage Sags State Estimation in Power Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2517 - 2526.
- [2] J. Lucio, E. Espinosa - Juárez, A. Hernández. Voltage Sag State Estimation in Power Systems by Applying Genetic Algorithms [J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2011, 5(2): 223 - 230.
- [3] Elisa Espinosa - Juárez, Espinoza Tinoco J R, Araceli Hernández. Neural Networks Applied to Solve the Voltage Sag State Estimation Problem: An Approach Based on the Fault Positions Concept [C]. 2009 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, IEEE computer society, 2009: 88 - 93.
- [4] Matair S S, Watson N R, Wong K P. Harmonic State Estimation: A Method for Remote Harmonic Assessment in a Deregulated Utility Network [C]. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2000, City University, London, 2000: 41 - 46.
- [5] 崔小平. 几种前馈型神经网络分类性能的比较分析研究[D]. 太原: 中北大学, 2011: 18 - 20.
- [6] 刘晓娟, 肖湘宁, 陶顺. 基于EMTDC电压暂降随机预估的仿真研究[J]. 现代电力, 2005, 22(5): 13 - 17.
- [7] R. Christie. Power Flow Test Cases, 30 Bus Power Flow Test Case [EB/OL]. 1993 [2013 - 8 - 20]. <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.
- [8] Olguin G, Vuinovich F, Bollen A M H J. An Optimal Monitoring Program for Obtaining Voltage Sag System Indexes [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 378 - 384.

(收稿日期: 2015 - 06 - 01)

# LVRT 控制策略及风电场继电保护研究综述

钟 显<sup>1</sup> 樊艳芳<sup>1</sup> 常喜强<sup>2</sup> 魏 威<sup>3</sup> 苏洪兴<sup>4</sup>

1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;
2. 国网新疆电力调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830006;
3. 国网新疆乌鲁木齐电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830011;
4. 国网湖南新晃电力有限责任公司, 湖南 怀化 419200)

**摘要:** 对当前国内外风电系统 LVRT 控制策略及风电场继电保护问题进行了综述。首先分析不同类型风电机组的 LVRT 控制策略, 讨论其对保护的影响, 其次分析了风电机组和风电场的故障特征, 最后讨论了风电场内集电线路、风电场送出线路的故障特征和相应的保护策略。针对传统风电场继电保护的适应性问题, 建议构建满足风电机组本体保护条件和风电并网技术要求, 并兼顾各类风电机组 LVRT 实现方式和附加硬件结构的风电机组 LVRT 协调控制策略, 进一步在该协调控制策略作用下进行风电场的继电保护研究, 开发适用于风电场集电线路、送出线路保护新原理与新技术, 解决风电场继电保护面对的问题。

**关键词:** LVRT; 风电场; 继电保护; 协调控制策略; 集电线; 送出线

**Abstract:** The current LVRT control strategy and relay protection of wind farms at home and abroad are summarized. Firstly, the LVRT control strategies for different types of wind turbines are analyzed, and their impacts on the protection are discussed. Secondly, the fault characteristics of wind turbines and wind farms are analyzed. Finally, the fault characteristics of collecting power lines in wind farms and outgoing lines of wind farms are also discussed as well as the corresponding protection strategies. Aiming at the suitability of traditional relay protection for wind farms, it is suggested to construct a coordinated control strategy which not only considers WTG body protection condition and wind power technology requirements, but also gives a consideration to the means of LVRT realization and additional hardware structure of various types of wind turbines. And then, the research goes further into the relay protection of wind farms under the proposed coordinated control strategy, and it will develop the new applicable principles and technologies for collecting power lines and outgoing lines of wind farms, which can effectively solve the relay protection problems faced by wind farms.

**Key words:** LVRT; wind farm; relay protection; coordinated control strategy; collector wires; outgoing line

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0014-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.004

## 0 引言

继电保护是电网安全稳定运行的第一道防线,能够在故障发生时快速可靠地识别并有效地隔离故障,对遏制系统运行状况的进一步恶化,保障电能高效稳定的传输和利用都具有重要的意义。近年来,中国风电发展迅速,其装机规模已达到世界第一,不同于欧洲分散式风电发展模式,中国风电发展具有集群开发、弱电网接入、长距离外送的特点。其大规模应用,必然带来集中接入、远距离传输以及风电场

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51467019)

内部集电线路网络化等问题,从而改变电力系统的运行特征。

风机具备低电压穿越(low-voltage ride through, 简称 LVRT)能力是《风电场接入电力系统技术规定》要求, LVRT 控制策略作用下风电接入系统的继电保护问题属于智能电网的兼容性范畴。对接入点而言,规模化的风电场对系统运行的影响,已不能象早期小型风电接入一样被完全忽略掉,这已不仅仅是风电调度的问题,继电保护所面临的故障特征同样也发生了显著的变化。同时,大型风电场内部的机组和机群越来越多地采用 35 kV 电压等级以网络的形式汇集电能,传统的配电网保护原理和装置能否满足风电场内部集电线路的要求以及风电场送出

线传统保护的适应性,也是必须给予重要关注考虑的问题。

从风电系统继电保护面对的问题、风电机组 LVRT 控制策略、风电场的故障特征、风电场集电线路与风电场送出线路的继电保护 4 个方面,对目前国内外的相关研究热点及成果进行了回顾和分析,并提出 LVRT 控制策略下的风电场继电保护研究,以期能对风电场的相关继电保护问题研究有所助益。

## 1 风电系统继电保护问题的提出

风电不同于常规能源,随机性、波动性很大,运行方式多变,目前大规模集群风电的并网运行,给系统的安全稳定运行、风电接入系统的保护配置带来巨大挑战。为保护风电场及其接入系统的安全稳定运行,风电机组本体、风电场集电线路、风电场送出线、集群风电场送出线都将必须结合风电特性配置保护。

前期调研结果发现,中国风电机组、风电场及其接入系统的保护整定配置方面存在配置不合理,各部分保护配合不协调等问题。主要表现为电网继电保护以“维护系统稳定”为目标,要求风电场按照国标 GB/T 19963-2011《风电场接入电力系统技术规定》执行:电力系统发生不同类型故障,风电场并网电压跌至 20% 标称电压时,风电场内的风电机组应保证不脱网连续运行 625 ms。并且要求风电场在 LVRT 过程中提供无功功率(电压)支撑,其动态响应时间不大于 75 ms,持续时间应不少于 550 ms。而风机本体电气量保护以“保护风机”为目标,二者之间存在一定的矛盾。当电网发生故障造成电压跌落时,风机本体保护以保护风机为目标采取切除风机的简单作法,以及风电场集电线路、风电场/群送出线的保护由于在整定配置时对风电运行特性及其对保护的影响考虑较少,有可能误动或拒动,会导致大量风电机组脱网,严重影响电网电压和频率的稳定,造成短时间内局部电网指标大幅波动,带来系统稳定问题。近年来中国甘肃酒泉、新疆等风电基地多次发生的因电网小故障造成大面积风机集中脱网事故,直接威胁到电网整体安全稳定运行案例,也说明了风电保护存在的问题。

## 2 风电场 LVRT 控制策略研究现状

电网电压跌落与恢复时,不同类型风电机组的 LVRT 实现方式不尽相同<sup>[1]</sup>。电网电压跌落期间,电磁转矩降低造成定速异步风电机组转速不断增加,因而定速异步风电机组 LVRT 的最简单方法是利用快速变桨减小输入机械转矩,限制转速上升<sup>[2]</sup>。在附加硬件方面,异步风电机组利用串联制动电阻(SDBR)<sup>[3]</sup>、串联动态电压恢复器(DVR)<sup>[4]</sup>、改进型功率逆变方案<sup>[5]</sup>等来提高 LVRT 能力。双馈风电机组具有特殊的结构和运行控制方式,在电压跌落期间双馈风电机组的暂态过程更加复杂,威胁也更大。其 LVRT 不仅需要解决功率不平衡引起的直流母线电压的突增,还要避免转子过电流损坏电力电子器件以及抑制电磁转矩衰减导致的转速上升。目前双馈风电机组 LVRT 的典型实现方案主要包括<sup>[6-10]</sup>:转子 Crowbar 保护、直流母线电压控制、定子电压动态补偿、短暂中断的控制策略等。电压跌落时永磁直驱风电机组的主要问题是输出功率不平衡引起的直流母线电压上升,可通过储存或消耗多余能量的方法解决功率平衡问题来抑制冲击电压<sup>[11-12]</sup>。还有直驱风电机组通过减小机侧换流器输入功率<sup>[13-14]</sup>、增大网侧换流器输出功率能力<sup>[27]</sup>等方案来提高 LVRT 能力。

研究风电机组 LVRT,还必须考虑风电机组本体保护配合和无功功率控制策略与 LVRT 之间的关系。文献[15]指出风电机组本体保护配置不协调对风电机组的 LVRT 将产生直接的影响,当系统或者相邻风电场内部发生故障时,在系统保护或相邻风电场内部保护动作切除故障之前,风电机组已经脱网,无法实现保护的选择性,但是具体怎样整定没有讨论。文献[16]分析了某风电场风电机组现有的电压越限保护和频率越限保护与国标规定的风电并网运行要求不协调,电网故障时会导致风机本体保护先动作,造成风机大量脱网并引发系统连锁故障。由此可见风电机组具备 LVRT 能力后,需要在兼顾风电机组自身保护和 LVRT 并网要求前提下,合理有效地进行风电机组本体保护配置。文献[17-18]研究指出风电场加装动态无功补偿装置,能有效帮助风电机组在故障后恢复电压,帮助风电机组提高 LVRT 能力。文献[19]在此基础上仿真分

析了安装在双馈风电机组出口升压变压器高压侧的 SVC 在风电机组故障穿越期间,能够提高风电机组的出口电压,并增大向系统提供的短路电流,显然 SVC 作用不能忽略。

分析可见:目前文献研究的主要是如何实现各类型风电机组的 LVRT,而对 LVRT 控制策略对风电系统故障特征的影响缺乏深入的研究。显然风电机组 LVRT 使得在电力系统故障分析中计及风电机组的故障输出变得更加重要,并且为了实现 LVRT 所采用的附加硬件及控制会造成故障期间风电机组暂态特性发生变化,使得风电接入系统的故障分析变得更加困难。

### 3 风电机组和风电场的故障特征分析

对于继电保护尤其是快速动作的主保护而言,主要关注风电机组提供短路电流的能力。另外,由于距离保护等保护的能与系统的等效正负序阻抗密切相关,风电机组和风电场的等效正负序阻抗特征也应该得到足够的重视。

文献[20-21]分别根据磁链平衡方程和频域分析法理论推导得出了双馈发电机的短路电流计算公式,但未考虑 Crowbar 保护电路对短路电流的影响。文献[22-23]通过电磁暂态仿真软件研究了双馈型发电机 Crowbar 保护发挥作用后短路电流强制分量和自由分量的衰减规律,其结论与理论分析结果吻合。文献[24-25]所关注的问题并不是双馈风电机组的短路电流,研究了不平衡电压和电压跌落激起的双馈型风力发电机电磁过渡过程,但 LVRT 功能的设计以及电压跌落情况下双馈发电机的性能研究对故障特征的分析具有一定的参考作用。

永磁直驱同步发电机短路电流相关研究比较少,文献[26]通过仿真分析发现采用全功率变频器的直驱式风电机组在三相对称短路故障情况下,变频器可以实现故障的有效隔离,其注入电网的短路电流是可以控制的。文献[27]认为短路电流可以按照不超过并网换流器额定电流来考虑。文献[28-31]是在进行永磁直驱同步发电机 LVRT 控制研究时,给出了电网故障时的仿真波形。经过比较发现,电网故障后的短路电流随着不同风电机组采用不同的控制策略而具有明显的不同,这也给继电保

护的整定带来了巨大的障碍。

以上分析可见:双馈和直驱风电机组的 LVRT 控制策略将直接影响机组故障特征,目前 Crowbar 保护已得到充分的考虑,但是故障情况下变流器限流限压控制环节、不对称故障时消除负序分量影响、风电机组发无功控制、风电场动态无功补偿装置影响等 LVRT 综合控制策略考虑不够充分,具有 LVRT 能力风电机组故障特征研究缺乏深入,尤其是永磁直驱风电机组故障特征并未得到充分研究。

## 4 风电场继电保护研究

大规模风电场内部以及机群之间广泛采用 35 kV 电压等级组成集电网络,通过风电场送出线路直接与并网点相连接。集电网络与配电网具有相同的网络结构,但针对辐射型配电网设计的继电保护直接应用于风电场集电网络保护时会存在适应性问题,对于风电场送出线路传统保护的适应性也值得进一步探讨。

### 4.1 风电场集电线路保护

文献[32-33]论述了对于快速动作的保护必须考虑潮流反向的影响而在必要时装设方向式过流保护,在其整定时也必须考虑风电场馈出的短路电流。文献[34]指出风电场接入辐射型配电网,会造成接入母线的下一级输电线路电流速断保护范围增大,从而使得保护造成失去选择性,同时也会造成该母线上一级输电线路定时限电流速断保护范围缩小。文献[35]利用继电保护测试设备和实际的继电保护装置,仿真研究了过电流保护受风电场影响的情况。由于感应电机故障之后仅能提供短时故障电流,反时限过电流保护可能因为故障电流的衰减而不能正确动作。文献[36-37]提出了能够自适应故障类型、短路电流水平以及风电出力的自适应保护,通过自适应保护动作时间来保证隔离故障以及风电场的可靠稳定运行。

风电场 35 kV 集电系统由于采用中性点不接地或经消弧线圈接地,未配或所配的小电流选线装置选线正确率低,无法及时发现单相接地隐患,容易导致故障扩大化。文献[38]建议优先选用性能优异的行波选线装置,并要求在选线告警的基础上增加选线跳闸功能。为了能够快速切除单相接地故障,风电场 35 kV 集电系统增设接地变压器,改造为小

电阻接地系统,需要进一步研究集电线路、接地变压器的零序电流保护配置和配合问题。

#### 4.2 风电场送出线路保护

为了单相重合闸以及距离保护判断故障相别等的需要,还需保护具备故障选相的能力。文献[39]对具备LVRT能力双馈式风电场送出线路保护进行动作性能测试,实验结果表明电流差动保护(分相稳态量差动和故障分量差动元件)均可正确判断区内外故障,但保护灵敏度降低;相量故障分量方向元件、正序方向元件和负序方向元件受风电接入影响很大;对称分量选相和相电流差突变量选相元件的故障相别判断出现错误。文献[40]分析了双馈式风电场由于送出线的保护安装处电压与电流主要频率分量不一致,导致基于工频傅氏算法的相量距离保护元件的动作性能受到严重影响,而基于解微分方程算法距离保护宜在风电场送出线路的距离保护中使用。文献[41]分析了异步发电机对送出线距离Ⅲ段保护动作特性的影响,指出根据保护安装处的电压和电流计算得到的异步发电机阻抗特性为负电阻和正电抗特性,由此在阻抗平面上其轨迹可能落入第2象限,从而降低了距离Ⅲ段保护的裕度。文献[42]针对中国西北大规模风电基地输送实际采用可控串补和可控电抗器,提出一种考虑风电波动性的基于综合阻抗的输电线路纵联保护新原理,仿真结果表明该原理具有较好的性能和对风电送出线保护的适用性。文献[43]提出一种大规模风电场送出线距离保护的自适应整定方法,根据测量电压、电流以及风电场开机情况,自适应地调整距离保护的整定值,从而消除风电场输出功率的波动性对并网联络线距离保护的影响。

综上所述可见:作为一种特殊的电源形式,风电对输电网继电保护具有一定的负面影响,或者说传统的继电保护原理并非都能够适应风电的接入。风电保护方面的研究大多针对单个风电场设备或单个风电场送出线展开研究,没有对大规模风电场、风电场群及接入系统的保护配置展开深入研究。风电场具备LVRT能力后其故障特征将发生很大变化,传统的继电保护设备在大规模风电接入电网系统中能否正确工作,尚无系统的分析研究。目前少数的研究也是针对双馈式风电场展开,对于直驱式风电场以及多种机型混合式风电场、风电场群现有保护的動作特性及配置配合关系需要进一步开展研究,并

对现有保护原理和目前已有研究的智能保护新原理在风电场保护中的适应性问题展开进一步探讨。

## 5 结论及展望

随着中国大规模风电的建设发展,未来电网中风电电源的比例将会进一步上升。从目前的研究现状看,对于大规模风电对继电保护的影响在国内外并没有一个统一的看法,LVRT控制策略作用下风电场继电保护研究相关工作也未系统地展开。需从以下几个方面来进一步展开研究工作:

1) LVRT协调控制策略研究。根据风电机组结构、无功控制方式研究风电机组本体保护与国标要求的LVRT相互关系机理,构建满足风电机组本体保护条件和风电并网技术要求并兼顾各类风电机组LVRT实现方式和附加硬件结构的风电机组LVRT综合协调控制策略。

2) LVRT协调控制策略作用下的风电机组故障特征研究是解决继电保护问题的基础。就现状看,集中于不同类型风机的LVRT控制策略研究,但没有对附加控制——LVRT协调控制策略对风电系统故障特征的影响开展深入的研究。

3) LVRT协调控制策略作用下风电场集电线路、送出线路保护原理的应用开发。在不同的LVRT控制策略下风电故障特征将发生很大变化,传统的继电保护设备在大规模风电接入电网系统中能否正确工作,尚无系统的分析研究。

因此,为满足风电并网技术规程,提高风电系统稳定运行能力,LVRT协调控制策略作用下风电场继电保护研究显得尤为重要。

#### 参考文献

- [1] 张兴,张龙云,杨淑英,等.风力发电低电压穿越技术综述[J].电力系统及其自动化学报,2008,20(2):1-8.
- [2] Abbey C, Joos G. Effect of Low Voltage Ride Through (LVRT) Characteristic on Voltage Stability [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, USA, 2005.
- [3] Andrew C, David J A, Alan J. Fault Ride-through of Large Wind Farms Using Series Dynamic Braking Resistors [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(3): 966-975.

- [4] Ananthababu P, Trinadha B, Ramcharan K. Performance of Dynamic Voltage Restorer (DVR) against Voltage Sags and Swells Using Space Vector PWM Technique [C]. International Conference on Advances in Computing Control and Telecommunication Technologies, Karnataka, IEEE, 2009: 206 - 210.
- [5] 张元栋, 秦世耀, 李庆, 等. 笼型异步风电机组低电压穿越改造方案的比较研究 [J]. 电网技术, 2013, 37(1): 235 - 241.
- [6] Niiranen J. Voltage Dip Ride Through of a Doubly-fed Generator Equipped with an Active Crowbar [C]. Proceedings of Nordic Wind Power Conference, Sweden, 2004.
- [7] 李建林, 赵栋利, 李亚西, 等. 适合于变速恒频双馈感应发电机的 Crowbar 对比分析 [J]. 可再生能源, 2006(5): 57 - 60.
- [8] Janos Rajda, Anthony William Galbraith, Colin David Schauder. Device, System and Method for Providing a Low-voltage Fault Ride-through for a Wind Generator Farm. United States, US.
- [9] 贺益康, 何鸣明, 赵仁德, 等. 双馈风力发电机交流励磁用变频电源拓扑浅析 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 105 - 112.
- [10] Petersson A, Lundberg S, Thiringer T. A DFIG Wind Turbine Ride-through System: Influence on the Energy Production [J]. Wind Energy 2005 8(3): 251 - 263.
- [11] Haque M E, Negnevitsky M, Muttaqi K M. A Novel Control Strategy for a Variable-speed Wind Turbine with a Permanent-magnet Synchronous Generator [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(1): 331 - 339.
- [12] Abbey G, Joos G. Super Capacitor Energy Storage for Wind Energy Applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(3): 769 - 776.
- [13] Yang Xiaoping, Duan Xianfeng, Feng Fan, et al. Low Voltage Ride-through of Directly Driven Wind Turbine With Permanent Magnet Synchronous Generator [C]. Power and Energy Engineering Conference, Wuhan, China, 2009: 1 - 5.
- [14] Abedini A, Nasiri A. PMSG Wind Turbine Performance Analysis During Short Circuit Faults [C]. IEEE Canada Electrical Power Conference. Montreal, Canada, IEEE, 2007: 160 - 165.
- [15] 张保会, 王进, 李光辉, 等. 具有低电压穿越能力的风
- 电接入电力系统继电保护的配合 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 1 - 7.
- [16] 毕天姝, 李彦宾, 马丽红, 等. 风场及其送出线保护配置与整定研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 45 - 50.
- [17] Molinas M, Jon Are Suul. Low Voltage Ride Through of Wind Farms with Cage Generators: STATCOM versus SVC [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1104 - 1117.
- [18] 陈伟伟, 李凤婷, 张玉, 等. 风电 T 接双电源系统对距离保护的影响分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 108 - 114.
- [19] 熊小伏, 张涵轶, 欧阳金鑫. 含 SVC 双馈风电机组暂态输出特计算模型 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 38 - 43.
- [20] 石一辉, 鲁宗相, 闵勇, 等. 双馈感应发电机三相短路电流解析系统继电保护的配合 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 1 - 7.
- [21] Vicatos M S, Tegopoulos J A. Transient State Analysis of a Doubly-fed Induction Generator Under Three Phase Short Circuit [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1991, 6(1): 62 - 68.
- [22] 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]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 61 - 64.
- [23] Kawady T, Feltes C, Erlich I, et al. Protection System Behavior of DFIG Based Wind Farms for Grid-faults with Practical Considerations [C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1 - 6.
- [24] 杨淑英, 张兴, 张崇巍, 等. 电压跌落激起的双馈型风力发电机电磁过渡过程 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 85 - 91.
- [25] 胡家兵, 贺益康, 郭晓明, 等. 不平衡电压下双馈异步风力发电系统的建模与控制 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 47 - 56.
- [26] 栗然, 高起山, 刘伟. 直驱永磁同步风电机组的三相短路故障特性 [J]. 电网技术, 2011, 35(10): 153 - 158.
- [27] Morren J, Pierik J T G, de Haan S W H. Voltage Dip Ride-through of Direct-driven Wind Turbines [C]. Proceedings of 39th International Universities Power Engineering Conference, 2004: 934 - 938.
- [28] 赵紫龙, 吴维宁, 王伟. 电网不对称故障下直驱风电机组低电压穿越技术 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 87 - 91.

[29] 胡书举,李建林,许洪华. 永磁直驱风电系统低电压运行特性的分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 73-77.

[30] 姚俊,廖勇,庄凯. 电网故障时永磁直驱风电机组的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 91-96.

[31] 蔺红,晁勤. 电网故障下直驱式风电机组建模与控制仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 189-195.

[32] 文玉玲. 风电场短路特性及对电网继电保护影响的研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2009.

[33] 苏常胜,李凤婷,武宇平. 双馈风电机组短路特性及对保护整定的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 86-91.

[34] 杨国生,李欣,周泽昕. 风电场接入对配电网继电保护的影响与对策[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 87-91.

[35] Comech M P, Montanes M A, Garcia M G. Overcurrent Protection Behavior Before Wind Farm Contribution [C]. The 14th IEEE Mediterranean Electro technical Conference, MELECON, Acacia 2008: 762-767.

[36] Jang S I, Choi J H, Kim J W, et al. An Adaptive Relaying for the Protection of a Wind Farm Interconnected with Distribution Networks [C]. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, Dallas 2003: 296-302.

[37] 文玉玲,晁勤,吐尔逊·伊布拉音. 关于风电场适应性继电保护的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 47-51.

[38] 何世恩,董新洲. 大规模风电接入对继电保护的影响与

对策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 21-27.

[39] 张保会,王进,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(四)——风电场送出线路保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 1-6.

[40] 张保会,张金华,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 1-6.

[41] 李生虎,贾树森,孙莎莎. 风电系统距离 III 段保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 31-35.

[42] 何世恩,索南加乐,杨铨,等. 适应于酒泉风电送出的 750kV 线路纵联保护原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 87-91.

[43] Pradhan A K, Joos G. Adaptive Distance Relay Setting for Lines Connecting Wind Farms [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 206-213.

[44] 樊艳芳,钟显,常喜强,等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.

作者简介:

钟显(1989), 硕士研究生, 主要研究方向为集群风电并网技术及其继电保护;

樊艳芳(1971), 副教授、硕士生导师, 主要研究方向为新能源并网技术及电力系统保护与控制研究;

常喜强(1976), 高级工程师, 主要从事电力系统分析与控制、调度自动研究;

魏威(1985), 学士, 主要从事电网调度与控制工作;

苏洪兴(1990), 学士, 主要从事电力系统继电保护工作。

(收稿日期: 2015-04-28)

(上接第9页)

[11] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

[12] 颜伟,张海,兵田甜. 交直流系统的动态无功优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(29): 43-46.

[13] 陈树勇,逢博,陈得治,等. 新疆电网多送出直流输电系统运行特性分析[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 102-107.

[14] 樊艳芳,钟显,常喜强,等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.

作者简介:

常喜强(1976), 高级工程师, 从事电力系统分析与控制、调度运行控制工作;

樊艳芳(1971), 副教授、硕士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制;

张锋(1978), 高级工程师, 从事电力系统分析与控制、调度运行控制工作;

王衡(1984), 工程师, 从事电力系统分析与控制工作;

郑少鹏(1985), 工程师, 从事电力系统分析与控制工作;

魏威(1985), 学士, 主要从事电网调度与控制工作;

钟显(1989), 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2015-06-24)

# 750 kV 凤凰片区短路电流分析及抑制措施

张增强, 吕盼, 周专, 宋新甫

(国网新疆电力公司经济技术研究院 新疆 乌鲁木齐 830016)

**摘要:** 由于大量大容量机组集中接入以及网架结构的不断加强,导致系统短路电流水平不断上升,750 kV 凤凰片区短路电流已经超出断路器的遮断电流(50 kA),运行方式难以安排。随着后续机组不断接入,短路电流问题更加突出,短路电流超标已成为困扰电网安全稳定运行的关键问题。因此以750 kV 凤凰片区短路电流现状为基础,结合规划网架结构,分阶段对凤凰片区短路电流水平进行计算,分析各工程对凤凰片区短路电流的影响大小。同时分别从调整运行方式、加装中性点小电抗、改变中性点接地方式等几方面对限制凤凰片区短路电流进行计算分析,并得出相应的结论,为凤凰片区运行方式安排以及后续的电网规划和电网建设项目可行性研究工作提供了重要的参考。

**关键词:** 凤凰片区; 运行方式; 短路电流; 中性点小电抗

**Abstract:** Due to the integration of a large number of large-capacity units and the continuous strengthening of grid structure which causes the continuous rising of short-circuit current, the short-circuit current in 750 kV Fenghuang area has exceeded the breaking current of relay (50 kA), so the operating mode is difficult to arrange. With the integration of the following units, short-circuit current problem becomes more prominent, and the excessive short-circuit current has become a key problem influencing the safe and stable operation of power grid. So based on the actual situation of short-circuit current in 750 kV Fenghuang area and combined with the grid structure planning, the level of short-circuit current in Fenghuang area is calculated in stages, and the effects of each project on the short-circuit current in Fenghuang area are analyzed. At the same time, as viewed from adjusting operating mode, installing small reactor on neutral point and changing neutral grounding mode, the restrictions on short-circuit current in Fenghuang area are analyzed and calculated, and the corresponding conclusions are obtained, which provides an important reference for the arrangement of operating modes and the following feasibility research of grid plan and grid construction in Fenghuang area.

**Key words:** Fenghuang area; operating mode; short-circuit current; neutral small reactance

中图分类号: TM713 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0020-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.005

## 0 引言

随着电网规模的不断扩大,大量大容量机组接入电网,导致系统短路电流水平不断提升。短路电流水平超标问题,不但威胁系统的安全、稳定运行,而且直接影响电网运行的经济性。解决短路电流问题有两个方向,一是直接更换开关设备,二是采取限制短路电流的措施。更换开关设备适用于局部短路电流过大的情况,当整个系统短路电流水平提高时,更换开关设备的费用很大,这时应考虑采取限制短路电流的措施,改善电网结构就是其中行之有效的方法<sup>[1]</sup>。

750 kV 凤凰变电站是连接新疆西北部和乌昌

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51267017)

城网的枢纽变电站。凤凰片区短路电流形势较为严峻,根据《新疆电网2015年度运行方式》,全接线方式下750 kV 凤凰变电站220 kV 侧短路电流已经超过50 kA(三相:52.39 kA,单相:56.65 kA)<sup>[2]</sup>。目前采取750/220 kV 电磁环网解环方式可以将短路电流降低至50 kA以下。但是根据电网规划凤凰片区还将接入大量电源,网架结构不断增强。凤凰片区短路电流将严重超标,限制凤凰片区运行方式安排,制约凤凰地区机组接纳以及电力送出能力,严重影响系统安全稳定运行。

因此以750 kV 凤凰片区短路电流现状为基础,结合规划网架结构,分阶段对凤凰片区短路电流水平进行计算,分析各工程对凤凰片区短路电流的影响大小。同时分别从调整运行方式、加装中性点小电抗、改变中性点接地方式等几方面对限制凤凰片

区短路电流进行的计算分析,并得出相应的结论。为凤凰片区运行方式安排以及后续的电网规划和电网建设项目可行性研究工作提供了重要的参考。

## 1 凤凰片区网架结构及存在问题

### 1.1 网架结构介绍

750 kV 凤凰变电站是连接新疆西北部和乌昌城网的枢纽变电站,主要负责新疆西北部地区、昌吉西部地区电力外送,同时是向昌吉西部大用户以及天业电网供电。目前接入凤凰片区机组容量约为 17 270 MW,其中火电 13 450 MW,占总容量的 77.8%。凤凰片区机组分布如图 1 所示。

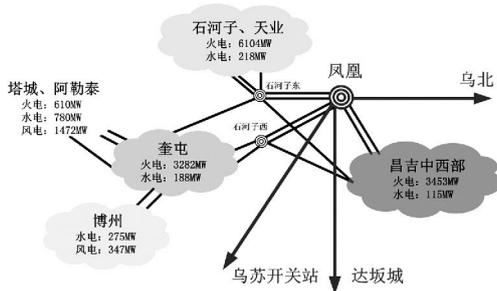


图 1 凤凰片区机组分布图

从图 1 可以看出,750 kV 凤凰变电站接带大量机组,多为火电机组且电气距离较短,同时 750 kV 凤凰变电站处于电网核心位置。由于新疆电网电压等级级差大,从 220 kV 直接升压至 750 kV,导致 750 kV 变电站 220 kV 侧进出线较多,从而导致 750 kV 变电站 220 kV 侧短路电流严重超标。

### 1.2 存在问题

目前 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧母线采用双母双分段形式,出线共有 12 回,220 kV 母线间隔排列方式如图 2 所示。

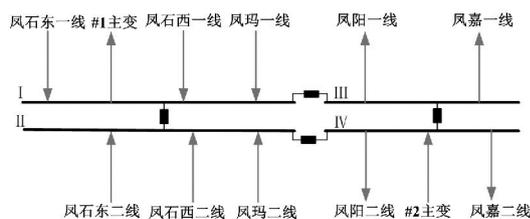


图 2 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧母线排列位置图

由图 2 可以看出,凤石东一线、220 kV 凤石西一线、220 kV 凤玛一线接在 I 母,同时 1 号主变压器连接在 I 母上,220 kV 凤石东二线、220 kV 凤石

西二线、220 kV 凤玛二线接在 II 母,220 kV 凤阳一线、220 kV 凤嘉一线接在 III 母,220 kV 凤阳二线、220 kV 凤嘉二线、2 号主变压器接在 IV 母。由于新疆西北部剩余电力全部通过凤石东一、二线,凤石西一、二线,凤玛一、二线送出,若将 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧母线分列运行,将导致 750 kV 凤凰变电站的 1 号主变电站满载,玛电、玛电三期以及西部电力送出受阻,而 2 号主变压器处于轻载状态。因此 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧母线间隔排列不利于 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧母线分列运行。

## 2 限制短路电流水平的主要技术措施

随着电网的发展,系统不断增强,短路电流持续攀升成为威胁电网安全的突出矛盾。如何在控制电网短路电流的同时提高系统安全稳定运行水平,成为电网规划与运行亟待解决的问题。限制电网短路电流水平的主要技术措施如下<sup>[3-6]</sup>:

1) 合理规划电源接入电压等级、接入方式。电源接入不宜过度集中,接入点的选择应充分考虑对系统短路电流水平的影响,注意给电网短路电流水平留有一定的发展空间,发电厂宜以单元接线型式接入系统,大电厂间尽可能不要有直接的联络线,大电厂不宜串在环网中运行。网内新建大容量电源应尽可能采用高电压等级接入。

2) 合理规划电网网架结构。对网架合理的分层、分区可以有效地控制短路电流。在更高电压等级骨干网架形成后依托该电压等级变电站采取低电压等级电网分片区运行能有效抑制电网短路电流水平。

3) 采用高阻抗变压器。负荷中心地区网络紧密,可适当提高电厂升压变压器的短路阻抗,从源头上控制注入电网的短路电流。同时对于电源接入相对集中的变电站亦可考虑采用高阻抗变压器抑制分支短路电流水平。

4) 加装限流电抗器。加装限流电抗器对限制短路电流亦具有一定的效果,但限流电抗器的限流效果与电网运行方式密切相关。限流电抗器通常加装在线路潮流较轻而对系统短路电流影响较大的线路中,可有效地减少局部区域系统短路电流<sup>[7-8]</sup>。

5) 加装变压器中性点小电抗。在变压器中性点加装小电抗便利,投资较小,该阻抗值在零序网络中将放大3倍,因此在单相短路电流过大而三相短路相对较小的场合很有效。

6) 采取电网运行方式调整。主要包括母线、变压器分列运行、线路开断等。采取该措施时需结合电网供电可靠性、供电能力等方面综合考虑,防止电网可靠性、供电能力等出现明显下降。

### 3 凤凰片区短路电流水平分析

#### 3.1 现状短路电流水平分析

根据当前凤凰片区机组投运情况和电网网架结构,对凤凰片区进行短路电流计算。在全接线方式下750 kV 凤凰变电站220 kV 侧三相短路电流为52.39 kA,单相短路电流为56.65 kA。

通过调整凤凰片区运行方式,将750/220 kV 电磁环网(凤-乌、凤-达)解环运行。正常运行方式安排如图3所示。

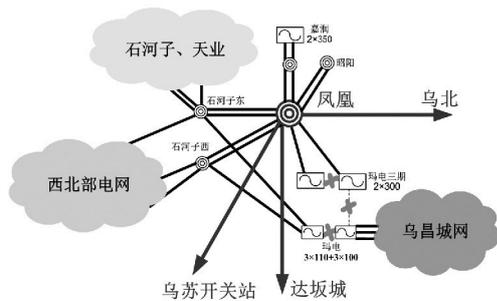


图3 凤凰片区运行方式

从图3可以看出,为了限制750 kV 凤凰变电站220 kV 侧短路电流水平,采取运行方式调整,将220 kV 玛电母联分列(I母带玛石东线、玛石西线,II母带玛三联络线、玛乐三回线)、220 kV 玛电三期母联分列、220 kV 玛三联络线断开。基于当前网架结构,采取上述运行方式可以将750 kV 凤凰变电站短路电流降低至额定遮断电流以下(三相短路电流为44.7 kA,单相短路电流为39.65 kA)。随着昌吉中西部火电机组的大量并网,采取上述运行方式可能导致昌吉中西部电力送出受阻。

#### 3.2 各项工程对短路电流贡献分析

根据电网规划,凤凰片区还将继续接入大量火电机组,如嘉润一期二列(2 × 350 MW)、天伟电厂

(2 × 330 MW)、宝塔石化电厂(2 × 350 MW)等一系列大容量机组。同时根据电网规划,750 kV 凤凰变电站与各区域电网联系更加紧密,如750 kV 乌苏开关站增容工程、750 kV 亚中变电站输变电工程等电网建设项目。随着电网项目的不断建设,750 kV 凤凰变电站与各地区电网联系更加紧密,从而导致750 kV 变电站220 kV 侧短路电流严重超标。根据规划网架结构,分析各项工程项目对750 kV 凤凰变电站220 kV 侧短路电流贡献大小。依据可研审查意见及投运时序,各项工程对750 kV 凤凰变电站220 kV 侧短路电流影响的计算结果如表1所示。

表1 各项工程短路电流计算结果/kA

工程项目	三相短路电流 /kA	单相短路电流 /kA	贡献大小	
			三相 /kA	单相 /kA
天伟电厂	45.4	49.9	5.47	4.9
嘉润一期二系列电厂	48.75	53.25	3.35	3.35
宝塔石化电厂	49.44	53.76	0.69	0.51
750 kV 亚中输变电工程	50.25	54.7	0.81	0.94
天池能源电厂	50.37	54.87	0.12	0.17
750 kV 乌苏开关站增容工程	50.53	55.23	0.16	0.36

从表1可以看出,天伟电厂(2 × 330 MW)接入电网,提高750 kV 凤凰变电站220 kV 侧母线三相、单相短路电流约5.47 kA、4.9 kA,届时750 kV 凤凰变电站220 kV 侧母线单相短路电流已接近额定遮断电流,严重影响电网安全稳定运行。随着凤凰片区各项工程相继投运,750 kV 凤凰变电站220 kV 侧母线短路电流不断升高,尤其是单相短路电流严重超过750 kV 凤凰变电站220 kV 侧额定遮断电流。为了保证电网安全稳定运行,需要采取有效措施降低凤凰片区短路电流。

### 4 抑制凤凰片区短路电流水平措施

通过上述各项工程对凤凰片区短路电流影响分析,天伟电厂投运后,凤凰片区短路电流已接近额定遮断电流。因此在对抑制凤凰片区短路电流水平措施分析时,以天伟电厂投运为基础,结合凤凰片区网架结构,提出以下3种降低短路电流措施。

#### 4.1 调整凤凰片区运行方式

针对凤凰片区网架结构,研究该地区运行电网运行方式,通过调整运行方式以降低凤凰片区短路电流。经分析提出以下3种运行方式:

方式1:220 kV 玛电母联分列(I母带玛石东线、玛石西线,II母带玛三联络线、玛乐三回线)、220 kV 玛电三期母联分列、220 kV 玛乐三回线断开。

方式2:220 kV 玛电母联分列(I母带玛石东线、玛石西线,II母带玛三联络线、玛乐三回线)、220 kV 玛电三期母联分列、220 kV 玛三联络线断开。

方式3:220 kV 玛石东线、220 kV 玛石西线断开,220 kV 玛电三期母联分列,220 kV 玛三联络线断开。

按照上述3种运行方式,凤凰片区短路电流计算结果如表2所示。

表2 750 kV 凤凰变 220 kV 短路电流计算结果

调整运行方式	三相短路电流/kA	单相短路电流/kA	变化量/kA	
方式1	48.21	52.44	—	—
方式2	45.4	49.9	-2.8	-2.5
方式3	43.3	48.3	-4.9	-4.1

从表2可以看出,通过调整运行方式可以降低750 kV 凤凰变电站220 kV 侧母线短路电流,其中方式3短路电流降低最多。以方式3运行可以满足电网安全稳定运行,但是导致玛电及其昌吉中西部电流送出受阻,出现严重窝电现象,同时随着后续各项工程的相继投运,仅采取调整运行方式无法满足电网安全稳定运行。

#### 4.2 调整220 kV 变电站中心性点接地方式

由于750 kV 凤凰变电站220 kV 侧母线单相短路电流大于三相短路电流,正常情况下,单相短路电流首先出现超标。调整变电站中性点接地方式可以改变电网零序网络结构,从而降低单相短路电流。因此,通过调整750 kV 凤凰变电站附近220 kV 变电站中性点接地方式可以降低750 kV 凤凰变电站220 kV 侧单相短路电流。

结合凤凰片区网架结构,调整凤凰片区220 kV 变电站中性点接地方式,取消玛电6号机升压变压器接地、玛电3号机升压变压器接地、玛电三期高备

接地、嘉润一期主变压器接地、昭阳1号变压器接地、天伟电厂1号机升压变压器接地、天辰电厂7号机升压变压器接地。凤凰片区短路电流计算结果如表3所示。

从表3可以看出,通过调整750 kV 凤凰变电站附近220 kV 变电站中性点接地方式,可以降低750 kV 凤凰变电站220 kV 侧单相短路电流,但是降低效果不明显,调整后750 kV 凤凰变电站220 kV 侧短路电流仍接近额定遮断电流,无法满足后续各项工程的相继投运,同时调整变电站中性点接地方式,对电网中继电保护影响较大,需要重新整定、更改保护定值。

表3 750 kV 凤凰变电站 220 kV 短路电流计算结果

	三相短路电流/kA	单相短路电流/kA	变化量/kA	
调整前	48.21	52.44	—	—
调整后	48.21	49.78	0	-2.66

#### 4.3 750 kV 凤凰变电站主变压器中性点加装小电抗

由于750 kV 变压器采用的是自耦变压器,正常运行情况下,变压器中性点必须接地,从而导致750 kV 变电站220 kV 侧单相短路电流大于三相短路电流。根据单相短路电流计算原理,为了减小单相短路电流,可以改变零序网络,适当增大零序网络阻抗值。在750 kV 变电站主变压器中性点加装小电抗,可以将增大系统的零序阻抗值,降低单相短路电流。

假设在750 kV 凤凰变电站两台主变压器中性点分别加装12 Ω 小电抗,计算结果如表4所示。

表4 750 kV 凤凰变电站 220 kV 短路电流计算结果

	三相短路电流/kA	单相短路电流/kA	变化量/kA	
加装前	48.21	52.44	—	—
加装后	48.21	40.42	0	-12.02

从表4可以看出,在750 kV 凤凰变电站两台主变压器中性点加装12 Ω 小电抗之后,可以降低750 kV 凤凰变电站220 kV 侧单相短路电流12.02 kA,可以有效地降低750 kV 凤凰变电站220 kV 单相短路电流,但是加装中性点小电抗只能降低单相短路电流,不能降低三相短路电流。随着后续凤凰片区各项工程的相继投运,仅依靠加装中性点小电抗不能满足要求,需采取几种措施联合降低短路电流。

(下转第82页)

[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (4): 1763 - 1769.

[3] S. Liu, J. K. Peng. An Improved Optimal Design Scheme for High Voltage Cable Accessories [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21 (1): 5 - 11.

[4] 聂永峰, 王建辉, 孟毓. 输电电缆支架涡流损耗的计算与分析 [J]. 电网技术, 2008, 32(S1): 142 - 145.

[5] 徐莎, 金先龙, 庞峰, 等. 大电流母线桥三维涡流场的有限元分析 [J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(12): 2097 - 2100.

[6] 陈平, 薛毓强, 郭建钊, 等. 大电流母排三维涡流场 - 温度场耦合分析 [J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(3): 68 - 71.

[7] 颜威利, 杨庆新, 汪友华. 电气工程电磁场数值分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[8] 刘志珍, 朱常青, 励庆浮. 计算导体涡流分布的 FEM - IEM 混合数学模型 [J]. 电工技术学报, 2001, 16(6):

46 - 49.

[9] 王泽中, 王炳阁, 卢斌先, 等. 三维开域涡流场 A - V 位有限元与边界耦合分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 1 - 4.

[10] D Labridis, P Dokopoulos. Finite Element Computation of Eddy Current Losses in Nonlinear Ferromagnetic Sheaths of Three - phase Power Cables [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(4): 1407 - 1415.

[11] 谢德鑫, 白保东, 等. 三维涡流场的有限元分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

[12] Pyungwoo Jang, Bonghan Lee. Effects of Insulator Resistivity on Eddy Current Loss of Compressed Powder Cores Studied by FEM [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(6): 2781 - 2783.

[13] 李晓松, 陈乔夫, 胡贵. 超导变压器绕组环流损耗 [J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 1 - 4.

(收稿日期: 2015 - 05 - 13)



(上接第23页)

## 5 结 论

通过对凤凰片区现状短路电流水平分析, 得出 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧短路电流已接近额定遮断电流, 制约电网运行方式安排, 影响系统安全稳定运行。根据电网规划, 凤凰片区各项电网工程对 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧短路电流均有一定的贡献, 短路电流超标严重影响凤凰片区安全稳定运行。针对凤凰片区短路电流水平超标问题, 结合该地区网架结构特点, 提出了 3 种抑制短路电流的措施, 3 种措施均能降低 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧短路电流水平。但随着各项电网项目的相继投运, 仅靠单一的措施无法满足电网发展需要, 需要多种措施并举才能降低 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧短路电流, 保证电网安全稳定运行, 同时在后续电网规划中应重点关注凤凰片区短路电流问题, 合理规划、合理分配 750 kV 凤凰变电站接带电源容量, 形成 750/220 kV 分片区运行。

### 参考文献

[1] 周坚, 胡宏, 庄侃沁, 等. 华东 500kV 电网短路电流分析及其限制措施探讨 [J]. 华东电力, 2006, 34(7): 55

- 59.

[2] 国网新疆电力公司. 新疆电网 2015 年度运行方式 [R]. 2015.

[3] 韩戈, 韩柳, 吴琳. 各种限制电网短路电流措施的应用与发展 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 141 - 151.

[4] 江道灼, 敖志香, 卢旭日, 等. 短路限流技术的研究与发展 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(3): 8 - 19.

[5] 袁娟, 刘文颖, 董明齐, 等. 西北电网短路电流的限制措施 [J]. 电网技术, 2007, 31(10): 42 - 45.

[6] 孙奇珍, 蔡泽祥, 李爱民, 等. 500kV 电网短路电流超标机理及限制措施适应性 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 92 - 96.

[7] 杨雄平, 李力, 李扬絮, 等. 限制广东 500kV 电网短路电流运行方案 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 104 - 107.

[8] 叶幼君, 鲍爱霞, 程云志. 浙江 500kV 电网短路电流的控制 [J]. 华东电力, 2006, 34(3): 11 - 15.

作者简介:

张增强 (1982), 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统规划与分析;

吕盼 (1984), 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统规划与分析;

周专 (1987), 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统规划、稳定与控制。

(收稿日期: 2015 - 05 - 11)

# 电网信息系统状态评价技术研究与应用

谢晓娜<sup>1</sup>, 常政威<sup>2</sup>, 陈亚军<sup>3</sup>

1. 成都信息工程学院控制工程学院, 四川 成都 610225;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072;
3. 华北电力大学, 河北 保定 071003)

**摘要:** 针对电网信息系统状态检修提出了一种电网信息系统状态评价及短期预测方法。通过充分探讨建立了信息系统状态评价指标体系, 并根据各级指标重要程度赋予其相应权重。实现对 B/S 构架信息系统整体状态的监控和评价, 并以信息系统历史状态作为训练样本预测其短期状态, 成果将作为重要部分应用于电网信息系统状态检修。

**关键词:** 信息系统; 状态评价; 短期预测; 状态检修

**Abstract:** Focusing on condition-based maintenance of grid information system, the state evaluation and short-term prediction methods for grid information system are proposed. The state evaluation index system of information system is established through full discussion, and the corresponding weight is given according to the important degree of each index. The monitoring and evaluation for the overall state of information system with B/S architecture are realized, and its short-term state is predicted taking the history of information system as training samples. The results will be served as an important part of condition-based maintenance for grid information system.

**Key words:** information system; state evaluation; short-term prediction; condition-based maintenance

中图分类号: TM764.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0024-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.006

## 0 引言

“十二五”期间, 国家电网公司全面建设坚强智能电网, 推动公司和电网创新发展、集约发展、安全发展, 信息化工作已成为国家电网公司实现战略发展目标的基础工程和重要保障<sup>[1]</sup>。国家电网公司 SG186 信息系统、SG-ERP 系统等业务信息系统<sup>[2]</sup>的大量投入运用, 在对公司业务工作支撑力不断提升和主营业务大幅度融合的同时, 也使信息系统的规模急剧膨胀, 而新系统、新技术的不断应用, 使系统出现故障的可能性也随之加大, 对系统稳定性和系统管理者的要求也随之提高。如何提高信息系统检修的工作效率、工作质量、安全、稳定等问题也随之突显。因此, 采用创新的管理思想和现代计算机技术手段, 保障信息系统的安全、降低生产成本、提高企业竞争力, 成为电网企业的当务之急。正是在这种背景下, 信息系统状态检修已然成为电网检修模式改变的一种必然趋势。

信息系统状态检修的基础是对于信息系统状态的监控与评价, 国家电网公司企业信息系统现阶段主要采用 B/S 构架, B/S 模式信息系统主要结构包括应用服务器和数据库服务器, 因此对于应用服务器和数据库服务器内部状态和外部状态的监控与评价成为信息系统状态评价研究中最为重要的环节。

信息系统检修是信息运维人员工作的重要内容, 信息系统的状态检修也是必然发展趋势<sup>[3-4]</sup>。目前国内对于信息系统状态检修的研究还处于起步阶段, 大部分研究者对于信息系统状态的监控和评价仅停留在整体的设计思路上面, 并没有继续向下延伸到各具体部分状态的研究。也正是基于此, 给出了一种对于 B/S 信息系统状态全面监控与评价的方法, 并给出对于信息系统状态短期预测的方法, 为信息系统状态检修提供更为具体的研究思路 and 实现技术参考。

## 1 评价系统总体设计

国家电网公司企业信息系统现阶段主要采

基金项目: 国网四川省电力公司研究开发项目(52199713504A)

用 B/S 构架,下面主要针对 WebLogic 服务器和 Oracle 数据库服务器搭配技术路线的大型信息系统开展研究。图 1 为信息系统状态评价系统的总体设计框架。

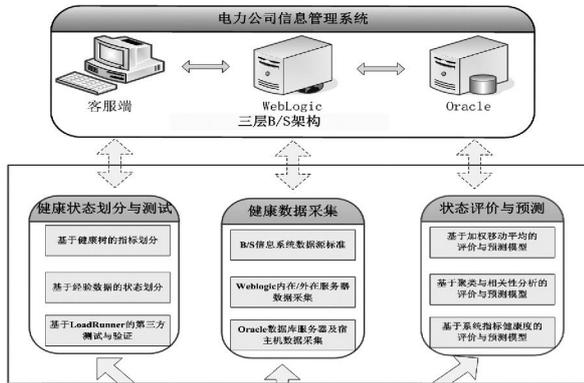


图 1 信息系统状态评价系统的总体设计框架

由图 1 可知,所述系统主要包括健康状态划分与测试、健康数据采集、状态评价与预测和健康状态存储系统这 4 个部分。健康状态划分与测试主要是建立所述评价系统的评价指标体系以及对于信息系统健康度的合理划分;健康数据采集模块是实现对 WebLogic 服务器和 Oracle 数据库服务器内在及外在状态数据的监控,并将监控数据存储于健康状态存储数据库中,为状态评价模块提供实时数据来源;状态评价与预测模块实现对信息系统当前状态的评价,并结合信息系统历史状态数据给出对信息系统状态的短期预测;健康状态存储系统即建立的存储数据库,负责所述评价系统涉及的所有数据的存储。

## 2 健康状态划分与测试

### 2.1 健康状态划分

根据 B/S 架构系统的特性,将整个系统状态划分成两部分,即 WebLogic 服务器状态和 Oracle 服务器状态。这两个服务器又有各自不同的子状态,这些状态量根据 WebLogic 和 Oracle 数据库的官方文档、书籍介绍和运维人员的建议,对采集到的指标进行了状态划分,每一种状态有相应的阈值,这些阈值也是参考的文档、书籍以及运维人员的经验,得到每一个状态量都划分为 4 种状态:正常状态、注意状态、异常状态、危险状态,各状态对应给出分数如表 1 所示。

表 1 状态划分表

各级指标	正常状态	注意状态	异常状态	危险状态
得分	75 ~ 100	50 ~ 75	25 ~ 75	0 ~ 25

### 2.2 基于 LoadRunner 的测试实验

LoadRunner 是一种预测系统行为和性能的负载测试工具<sup>[5]</sup>。测试分析是根据 LoadRunner 自动生成的各项指标测试结果统计图,如测试简述图、事务平均时间响应图、系统资源图等,从中了解和判断被测系统在不同压力测试下的运行状况以及系统资源的使用情况,对它们进行关联分析,从而确定系统指标不同状态的阈值。通过模拟上千万用户实施并发负载和实时性监测的方式来确认和查找问题,将测试得到的性能指标值与定义的指标状态阈值进行对比,从而验证阈值的正确性。同时,经过测试实验,定义了各级指标权重如表 2 所示。

## 3 状态数据采集

根据 B/S 系统的分层,将状态监视采集系统也分成相应的子模块分别对每层进行监视。状态监视采集系统由 3 个子状态监视采集系统构成<sup>[6-7]</sup>。分别是 Weblogic 服务器数据采集程序、Oracle 数据库数据采集程序、Oracle 宿主机数据采集程序。它们对相应的模块按照设定的频率进行采集,将采集到的数据持久化后,由主程序进行读取,然后按照状态定义分别对数据进行相应状态的划分,最后得出当前系统状态的评价。

### 3.1 Weblogic 服务器数据采集程序

Weblogic 服务器数据采集程序<sup>[8]</sup>能够获得服务器内 JMS 信息、进程信息、线程信息、JVM 内存信息、CPU 使用率等一系列服务器数据。在获得信息状态数据之后,可以对数据进行分析,从而得出服务器现阶段状态。

逻辑流程如图 2 所示。程序启动后,首先检测 Weblogic 服务器是否启动,如果没有启动,则进行报错,提示服务器没有正常启动。如果 Weblogic 服务器正常启动后,则启动系统数据采集子程序以及 Weblogic 服务器数据采集子程序,相应的子程序按照相应的时间频率刷新重新采集相应指标,主程序按照相应的时间频率获得相应数据后,程序将数据写入到 MySQL 数据库中。

表2 指标权重定义

一级指标	二级指标	权重	三级指标	权重	四级指标	权重	
系统状态	Oracle 服务器	40	Oracle 数据库	25	数据库后台进程	7	
					数据库表空间	7	
					数据库命中率	5	
					数据库响应时间	6	
	Oracle 服务器外在状态	30				cpu	8
						硬盘	4
						交换区	7
						内存	6
						网络质量	5
						WebLogic server 线程	8
	WebLogic 服务器	60		WebLogic 内在状态	25	server 队列	6
						WebLogic 内存	5
						jvm 堆	6
						cpu	8
WebLogic 服务器外在状态	30				硬盘	4	
					内存	6	
					交换区	7	
					网络质量	5	

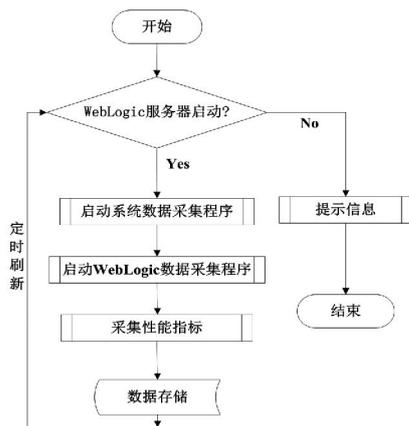


图2 Weblogic 服务器数据采集程序运行流程

### 3.2 Oracle 数据库数据采集程序

Oracle 数据库数据采集程序能够获得服务器内执行队列、等待执行队列、数据库命中率、SQL 读写数、数据库使用率等一系列数据库服务器状态。在获得信息状态数据之后，将数据写入到 MySQL 数据库中。

流程逻辑如图3所示。程序启动后，首先实例化3个子数据采集程序，并设置相应的采集频率。设置完毕后，则按照相应的频率各子程序采集数据，

并将采集得到的数据存储到数据库中。

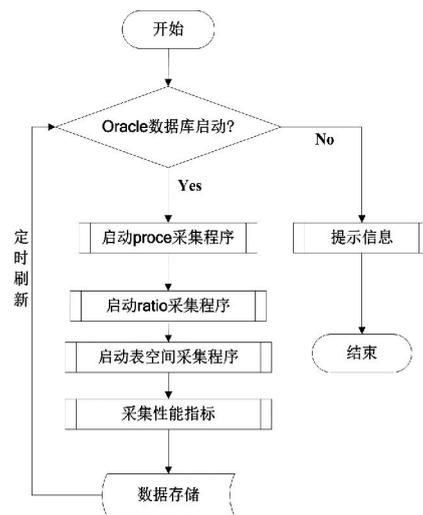


图3 Oracle 数据库监控程序运行流程

### 3.3 Oracle 宿主机数据采集程序

Oracle 宿主机数据采集程序能够获得客户端服务器的CPU 状态信息、交换区信息、内存信息、硬盘信息等一系列客户端服务器状态信息。在获得状态信息数据之后，可以将数据储存到 MySQL 数据库中。

流程逻辑如图4所示。程序启动后，首先实例化

4个子程序监控系统,并设置相应的采集频率。设置完毕后,则按照相应的频率各子程序采集数据,并将采集得到的数据反馈到服务器上。在获得相应数据后,程序对数据进行分析并进行相应的状态提醒。

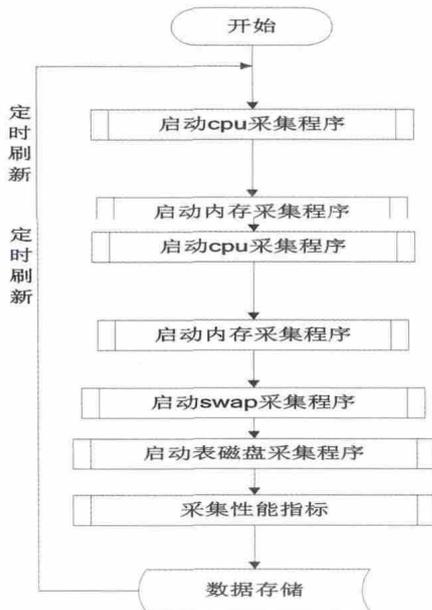


图4 Oracle 宿主机数据采集程序运行流程

## 4 状态评价与预测

### 4.1 基于聚类回归的状态评价模型

一般研究认为低负载的系统健康度高于高负载的系统,然而在实际系统运行过程中,一个系统正常态可能是适中的负载,也可能是高负载的。正是考虑到这样的情况存在,专门设计了一个基于系统历史状态聚类与回归的评价模型。

实际系统运行过程中,对于稳定运行的系统而言,可以认为多数情况下系统是正常的,因此利用聚类的方法,将训练集合或者采集到的历史数据划分成  $K$  类,取数量最多的前  $N$  类作为系统正常态的代表。选取每一个指标中心点,各指标偏离中心点一定范围,依靠线性扣分,超出范围,以指数扣分,分数扣完为止。依据指标得分健康数目,划分等级,每个指标得分不到其分配得分的  $\beta$  ( $\beta$  默认取 0.6),则认为指标异常,结合利用 M5Rules 回归模型,计算各个指标相互间的回归关系,以偏离回归方程的 4 级指标前  $n$  个,且偏离比例超过 0.3 (计算方式为  $(|实际值 - 回归值|) / 回归值$ ) 的指标作为异常指标。如果有  $n$  个指标,所有指标正常则为正常,如果超过  $0.1 * n$  个指标出现异常为整个系统为注意状态,超过  $0.2 * n$  个指标异常为异常状态,  $0.3 * n$  个指标出

现异常则为危险状态。

这种模型不仅可以避免对于本身就是高负载系统的状态评价误差,而且不仅是通过由低级指标直接线性组合成为高级指标判断系统状态,其对每一个底层指标聚类分析,指导判断每一个指标的健康度,充分考虑了影响信息系统状态的因素,从指标的健康度来度量系统整体的健康度,避免误报、漏报。

### 4.2 基于隐马尔科夫的短期状态预测模型

隐马尔可夫模型(hidden Markov model, HMM)是马尔可夫链的一种,它的状态不能直接观察到,但能通过观测向量序列观察到,每一个观测向量都是通过某些概率密度分布表现为各种状态,每一个观测向量是由一个具有相应概率密度分布的状态序列产生。所以,隐马尔可夫模型是一个双重随机过程,即具有一定状态数的隐马尔可夫链和显示随机函数集。在充分研究各经典预测模型并结合电网信息系统状态特性的基础上,选择引入隐马尔可夫模型建立了信息系统状态短期预测模型。

这种模型以大量系统状态历史数据作为训练样本,对模型进行充分训练。对于当评价模型正常运行一段时间后,按照时间顺序记录系统四级指标的得分,便可以通过隐马尔可夫模型预测将来的一次或多次得分,最终预测三级、二级和一级指标状态。为了保证预测的实时性和有效性,周期性更新隐马尔可夫模型。

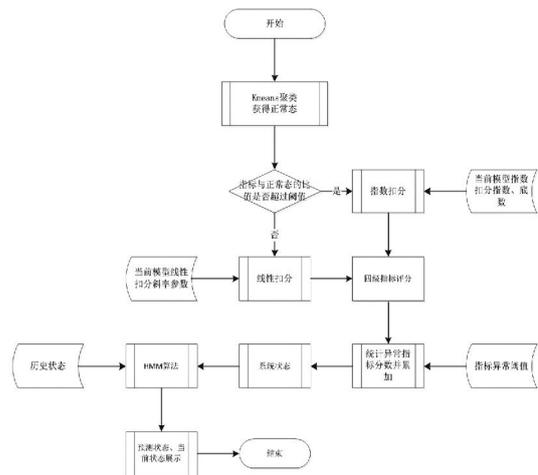


图5 评价预测整体模型流程图

## 5 实验验证

将所述状态评价系统应用于四川省电力公司 SG186 安全监督与管理业务应用系统,它的应用服

表 3 测试场景

	基本用户数	执行时间	测试
场景 1	10	35 min	3 个用户,每 4 min 加载 1 个用户,运行 15 min,每 5 min 退出 1 个用户
场景 2	20	35 min	6 个用户,每 4 min 加载 2 个用户,运行 15 min,每 5 min 退出 2 个用户
场景 3	40	35 min	12 个用户,每 4 min 加载 4 个用户,运行 15 min,每 5 min 退出 4 个用户

表 4 数据采集功能测试结果示例

	Oracle 服务器				Weblogic 服务器			
	cpu 使用率 /%	内存使用率 /%	swap 利用率 /%	User Transaction Per Sec	cpu 使用率 /%	内存使用率 /%	swap 利用率 /%	Weblogic thread total
场景 1	<55	<70	62	1.8	<52	<68	51	29
场景 2	<80	<75	65	1.96	<74	<73	59	37
场景 3	<98	<78	67	2.1	<83	<77	62	60

表 5 评价预测功能测试结果示例

	1 min		2 min		.....	17 min		18 min		.....
	当前状态	预测状态	当前状态	预测状态		当前状态	预测状态	当前状态	预测状态	
场景 1	正常	正常	正常	正常	.....	正常	正常	正常	正常	.....
场景 2	正常	正常	正常	正常	.....	注意	正常	正常	正常	.....
场景 3	正常	正常	正常	正常	.....	注意	注意	注意	注意	.....

务器和数据库服务器分别是 Weblogic 和 Oracle。为测试所述评价系统数据采集以及评价预测功能,设置如表 3 所示测试场景,可得到结果如表 4、表 5 所示。

从表 4 数据分析可以看出,Oracle 服务器采集程序能够采集此宿主机的硬件的动态信息。从场景 1 到场景 3,cpu、内存、swap 的使用率是递增的,这与测试用户数成倍增长相符,说明采集的数据是正确的,User Transaction Per Sec 的最大值从场景 1 的 1.8 到场景 2 的 1.96,再到场景 3 的 2.1 依次递增,与场景的用户数递增相符,说明采集程序的 Oracle 数据库采集模块能够正常工作。同样,Weblogic 服务器采集程序正常工作。从表 5 数据分析可以看出,评价系统充分评价信息系统当前状态,并能有效预测 1 min 后信息系统状态。在充分训练预测模型的前提下,预测时间可以更长。

## 6 总结与展望

提出了一种电网信息系统状态评价方法。通过充分探讨建立了信息系统状态评价指标体系,并根据各级指标重要程度赋予其相应权重。实现对 B/S 构架信息系统整体状态状态的监控和评价,并以信

息系统历史状态作为训练样本预测其短期状态,成果将作为重要部分应用于电网信息系统状态检修。

### 参考文献

- [1] 李向荣,郝悍勇,樊涛,等. 构筑数字化电网建设信息化企业[J]. 电网技术,2007(17):1-5.
- [2] 曾德君. SG186、ERP、IPSS 三者关系论述[J]. 华东电力,2009(9):1442-1444.
- [3] 刘贤杰,刘旭生. 信息通信状态检修系统中状态评价体系的探索与实践[J]. 电力信息化,2012(5):64-69.
- [4] 张涵. 开展信息系统状态检修提高系统运维水平[J]. 农村电气化,2014(6):32-34.
- [5] Xiaojiao Yan, Fuan Wen, Chunmei Fan et al. Performance Testing of Open Laboratory Management System Based on LoadRunner[C]. Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Motion Control, 2011.
- [6] 陈伟. 基于网络的服务器状态监控系统研究与实现[D]. 保定:华北电力大学,2014.
- [7] 吴岩. 电力信息系统智能巡检系统的设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2012.
- [8] 周卫华,马如军,谭成翔. WebLogic Server 安全技术概述及其在电子政务应用中的实现[J]. 计算机应用研究,2003,20(9):79-81.

(收稿日期:2015-05-14)

# 特高压直流输电工程换流变压器抽头级数确定方法

赵辰鹏, 马东

(国核电力规划设计研究院, 北京 100095)

**摘要:** 换流变压器参数是直流输电工程设计的重要部分, 为换流站的接线及布置方案论证提供支持, 其合理性关系整个直流输电系统的运行特性和技术经济指标。以呼盟—山东  $\pm 800$  kV 直流输电工程为例, 根据其对系统条件、主回路参数以及运行特性等的要求, 应用新公式对换流变压器抽头级数的计算过程进行了详细论述, 所提计算方法为首次应用, 并通过与实际取值比较验证了所提方法的合理性。

**关键词:** 高压直流输电系统; 换流变压器; 最大空载电压; 最小空载电压; 抽头级数

**Abstract:** The parameters of converter transformer are an important part of the design of HVDC project, which provides the support for the main connection and layout of converter substation, and its rationality will influence the operating characteristics and technological economical index of whole HVDC system. Taking Humeng—Shandong  $\pm 800$  kV HVDC project for example, according to the requirements to system condition, main circuit parameters and operating characteristics, the calculation process of tap series of converter transformer is discussed in detail based on self-compiled program. The proposed calculation method is applied to HVDC project for the first time, and the rationality of the proposed method is verified by the comparison with the actual values.

**Key words:** HVDC transmission system; converter transformer; maximum no-load voltage; minimum no-load voltage; tap series

中图分类号: TM721.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0029-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.007

## 0 引言

特高压直流系统换流变压器的参数设计是特高压直流输电系统设计的主要内容, 是系统运行控制和工程成套设计的基础和关键。其主要内容包括: 短路阻抗、最大最小空载直流电压、触发角、熄弧角、抽头级数等。为其他研究, 如无功功率补偿及控制、交流滤波器以及系统过电压与绝缘配合等提供基本条件。

在主回路参数研究中, 换流变压器参数是最重要的内容之一, 这是由于换流变压器处在交流电与直流电互相变换的核心位置, 设备制造技术较复杂, 设备费用昂贵。另外换流变压器的可靠性及可用性对整个系统来说也是至关重要的。

以呼盟—山东  $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程的交流系统条件和直流系统性能要求为基础, 依据特高压直流输电理论, 对换流变压器参数进行设计, 如额定空载电压、最大和最小空载电压、调压抽头级数等, 重点研究换流变压器抽头级数。最终给出计

算结果, 并与实际应用值相比较验证了其正确性, 为该特高压直流工程后续各项研究的顺利开展提供依据, 也为今后高压直流工程研究提供参考。

## 1 换流站基础条件

根据特高压直流输电工程的技术条件和目前的制造水平, 中国一般采用每极两个 12 脉动换流器 (400 kV + 400 kV) 串联的接线方式, 如图 1 所示。

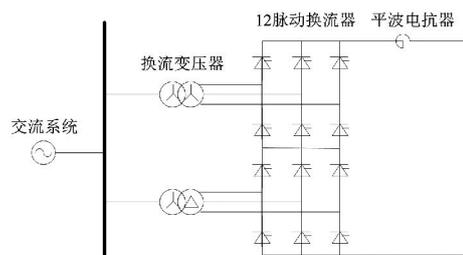


图1 12脉动换流器原理接线图

这种换流器接线方式使得系统的运行方式灵活多变, 主要有7种运行方式: 1) 完整双极运行方式, 每站每极两个12脉动换流器均串联投入运行; 2) 1/2双极

运行方式,每站每极均只有一个12脉动换流器投入运行;3)完整单极大地回路运行方式,一极停运,另一极有两个12脉动换流器串联运行,由大地返回;4)1/2单极大地回路运行方式,一极停运,另一极只有一个12脉动换流器运行,由大地返回;5)完整单极金属回路,一极停运,另一极有两个12脉动换流器串联运行,由金属回路返回;6)1/2完整单极金属回路,一极停运,另一极只有一个12脉动换流器运行,由金属回路返回;7)一极完整,另一极1/2不平衡运行方式,双极中的一极有两个12脉动换流器串联运行,另一极只有一个12脉动换流器运行。

在进行换流变压器抽头级数计算时,抽头级数最大值计算选用完整双极运行方式,抽头级数最小值计算选用完整单极金属回路运行方式;其中以完整双极平衡运行方式且功率正送时的常规运行方式计算系统参数额定值。

## 2 计算所需基础参数

### 2.1 交流系统基础参数

整流侧及逆变侧的交流系统电压及运行范围见表1。

表1 交流系统电压

换流站	整流侧	逆变侧
额定运行电压/kV	535	525
最高稳态电压/kV	550	550
最低稳态电压/kV	500	500
最高极端电压/kV	550	550
最低极端电压/kV	475	475

### 2.2 直流系统基础参数

#### 1) 直流电压

正常全压运行方式下的直流电压为 $\pm 800$  kV,正常半压运行方式下直流电压为 $\pm 400$  kV,定义在线路端极母线与中性点之间。每极都应具有在直流降压至70%~100%正常直流电压内连续运行的能力。

#### 2) 线路参数

逆变侧换流器、换流变压器容量设计与直流电路电阻密切相关。在完整双极平衡运行方式下,整流侧直流电压为额定值800 kV,在额定直流时,逆变侧直流电压完全由直流线路电阻决定,进而决定逆变侧的换流容量。

该工程直流线路导线型号为LGJ-6×1250,

线路长度约1720 km;极端最高温度为40℃,极端最低温度为-25℃,换流变压器参数计算中采用的直流电阻值见表2。

表2 直流线路电阻

所采用的	电阻/ $\Omega$		
	最小值 $R_{dmin}$	额定值 $R_{dN}$	最大值 $R_{dmax}$
直流线路电阻( $R_d$ )	5.36	6.57	14.22

### 3) 控制系统参数

表3 直流控制参数

参数	描述	范围/值
$P_{dN}/MW$	额定功率(双极/单级)	8000/4000
$I_{dN}/A$	额定直流电流	5000
$\alpha_N/(\circ)$	额定触发角	15
$\Delta\alpha/(\circ)$	$\alpha$ 的稳态控制范围	$\pm 2.5$
$\alpha_{min}/(\circ)$	控制系统的最小限制角	5
$\gamma_N/(\circ)$	额定熄弧角	17
$\Delta\gamma/(\circ)$	$\gamma$ 的稳态控制范围	$+ 2.5$
	分接头变化一档	$\pm 1.25\%$
$\Delta U_{d(R \cdot I)}$	对应的整流侧直流电压变化范围	$U_{dRN}/2$

### 4) 设备和测量误差

根据目前特高压设备的生产能力,在换流变压器参数设计中考虑设备制造公差和测量误差,列于表4。

表4 设备和测量误差

参数	描述	误差
$d_x$	正常直流电压运行范围内换流变压器相对感性压降的最大制造公差( $\delta d_x$ )	$\pm 5\% I_{dN}$
$U_d$	测量误差 $\delta U_{dmeas}$	$\pm 1\% U_{dRN}$
$I_d$	测量误差 $\delta I_{dmeas}$	$\pm 0.5\% I_{dN}$
$\gamma$	测量误差 $\delta_\gamma$	$\pm 1.0^\circ$
$\alpha$	测量误差 $\delta_\alpha$	$\pm 0.5^\circ$
$U_{dio}$	电容分压式电压互感器的测量误差 $\delta_{vdio}$	$\pm 1.0\% U_{dioN}$

### 5) 换流器直流电压降

依据以往工程经验,两端换流站每个12脉动换流器的相对阻性压降 $d_r$ 分别为0.3%、0.4%,相对感性压降 $d_x \approx \frac{1}{2}u_k$ ,换流阀前向压降 $U_T$ 分别为0.3 kV、0.4 kV。

### 6) 换流变压器短路阻抗

该工程整流侧换流站换流变压器的短路阻抗 $u_k$ 在换流变压器参数设计中采用20%,逆变侧采用19%计算。

### 3 计算所需中间参数

#### 3.1 额定空载直流电压计算

整流侧、逆变侧额定直流空载电压  $U_{\text{dioNR}}$ 、 $U_{\text{dioNI}}$  分别按照式(1)、式(2)进行计算,整流侧额定触发角  $\alpha_N$  选取为  $15^\circ$ ,逆变侧额定熄弧角  $\gamma_N$  为  $17^\circ$ 。

$$U_{\text{dioNR}} = \frac{\frac{U_{\text{DNR}}}{n} + U_{\text{TR}}}{\cos\alpha_N - (d_{\text{xNR}} + d_{\text{rNR}})} \quad (1)$$

$$U_{\text{dioNI}} = \frac{\frac{U_{\text{dNR}} - R_{\text{dN}} \times I_{\text{dN}}}{n} - U_{\text{TI}}}{\cos\gamma_N - (d_{\text{xNI}} - d_{\text{rNI}})} \quad (2)$$

式中:  $U_{\text{dN}}$  为直流正常运行电压;  $n$  为阀组数;  $I_{\text{dN}}$  为额定直流电流;  $R_{\text{dN}}$  为直流电阻;  $d_{\text{x}}$  和  $d_{\text{r}}$  分别为换流变压器感性和阻性压降;  $U_{\text{T}}$  为换流阀通态压降,下标 N 表示额定, R 表示整流侧, I 表示逆变侧。

#### 3.2 换流变压器阀侧空载直流电压计算

在直流空载电压计算时,需要考虑各种测量误差、设备制造公差以及触发角、熄弧角的调整范围等因素,根据式(3)、式(4)可计算出两侧  $U_{\text{dio}}$  的上、下限值( $U_{\text{diomax}}$ 、 $U_{\text{diomin}}$ )。

$$U_{\text{dioR}} = \frac{\frac{U_{\text{dR}}}{n} + U_{\text{TR}} + (d_{\text{xR}} + d_{\text{rR}}) \times \frac{I_{\text{d}}}{I_{\text{dN}}} \times U_{\text{dioNR}}}{\cos\alpha} \quad (3)$$

$$U_{\text{dioI}} = \frac{\frac{U_{\text{dR}} - R_{\text{d}} \times I_{\text{d}}}{n} - U_{\text{TI}} + (d_{\text{xI}} - d_{\text{rI}}) \times \frac{I_{\text{d}}}{I_{\text{dN}}} \times U_{\text{dioNI}}}{\cos\gamma} \quad (4)$$

换流变压器分接开关最小抽头级数由最大空载直流电压决定。此时直流全压过负荷运行,直流电流取额定值 1.05 倍时,抽头位置处在最小抽头位置。

分接开关最大抽头级数由单极金属返回、70% 降压运行方式下的最小空载直流电压决定。在降压运行时为保证谐波干扰水平,换流站的无功平衡以及换流站的损耗在所允许的范围内,经常同时也要求降低额定直流电流值。如果直流电压降到 70%,直流电流也降到 70%,则直流输送功率为额定直流功率的 49%,单级输送功率的最小值取其 10%,并且触发角(或熄弧角)为最大允许角度。取触发角(或熄弧角)为最大允许角度  $40^\circ$ ,若超过  $40^\circ$  则可能增加换流站的造价或降低直流输电某些运行性能的要求。

下面基于系统参数及测量误差,系统控制方式

为整流侧定电流,逆变侧定电压,具体描述换流站阀侧最大、最小空载电压的计算过程。未见文献应用过所提计算方法,此处为首次应用。

当计算  $U_{\text{diomaxR}}$  时,考虑直流电流取额定值 1.1 倍,代入式(3)的相关参数如下:

$$U_{\text{dR}} = U_{\text{dN}} (1 + \delta U_{\text{dmeas}})$$

$$d_{\text{xR}} = d_{\text{xN}} (1 + \delta d_{\text{x}})$$

$$I_{\text{d}} = I_{\text{dN}} (1.05 + \delta I_{\text{dmeas}})$$

$$\alpha = \alpha_N + \Delta\alpha + \delta\alpha$$

当计算  $U_{\text{diominR}}$  时,考虑直流电压降到 70%,直流电流也降到 70%,直流输送功率为额定直流功率的 49%,单级输送功率的最小值取其 10%,并且触发角为最大允许角度,代入式(3)的相关参数如下:

$$U_{\text{dR}} = U_{\text{dN}} (0.7 - \delta U_{\text{dmeas}})$$

$$d_{\text{xR}} = d_{\text{xN}} (1 - \delta d_{\text{x}})$$

$$I_{\text{d}} = \frac{P_{\text{dN}} \times 49\% \times 10\%}{U_{\text{dN}} (0.7 - \delta U_{\text{dmeas}})}$$

$$\alpha = \alpha_{\text{max}} - \delta\alpha$$

将  $U_{\text{diomaxR}}$  和  $U_{\text{diominR}}$  分别代入式(5)和式(6)并结合式(7)即可得到整流侧换流变压器的最大、最小抽头级数。

当计算  $U_{\text{diomaxI}}$  时,考虑直流电阻取最小值,代入式(4)的相关参数如下:

$$U_{\text{dR}} = U_{\text{dN}} (1 + \delta U_{\text{dmeas}})$$

$$d_{\text{xI}} = d_{\text{xN}} (1 + \delta d_{\text{x}})$$

$$I_{\text{d}} = I_{\text{dN}} (1.05 + \delta I_{\text{dmeas}})$$

$$\gamma = \gamma_N + \Delta\gamma + \delta\gamma$$

$$R_{\text{d}} = R_{\text{dmin}}$$

当计算  $U_{\text{diominI}}$  时,考虑直流电阻最大情况下的单级金属回线降压 70% 运行方式,且单级输送功率为最小值,熄弧角为最大允许角度,代入式(4)的相关参数如下:

$$U_{\text{dR}} = U_{\text{dN}} (0.7 - \delta U_{\text{dmeas}})$$

$$d_{\text{xI}} = d_{\text{xN}} (1 - \delta d_{\text{x}})$$

$$I_{\text{d}} = \frac{P_{\text{dN}} \times 49\% \times 10\%}{U_{\text{dN}} (0.7 - \delta U_{\text{dmeas}})}$$

$$\gamma = \gamma_{\text{max}} - \delta\gamma$$

$$R_{\text{d}} = R_{\text{dmax}}$$

将  $U_{\text{diomaxI}}$  和  $U_{\text{diominI}}$  分别代入式(5)和式(6)并结合式(7)即可得到逆变侧换流变的最大、最小抽头级数。

式中:  $U_{\text{dR}}$  为整流侧直流电压;  $I_{\text{d}}$  为直流电流,其余参

数如前表所列。

## 4 换流变压器抽头级数计算

换流变压器的最大及最小变比  $\eta$  按如下公式计算。

$$\eta_{\max} = \frac{U_{1\max}}{U_{1N}} \times \frac{U_{\text{dioN}}}{U_{\text{diomin}}} \quad (5)$$

$$\eta_{\min} = \frac{U_{1\min}}{U_{1N}} \times \frac{U_{\text{dioN}}}{U_{\text{diomax}}} \quad (6)$$

换流变压器调节开关级数的计算公式为

$$-TC_{\text{step}} = \frac{\eta - 1}{\Delta\eta} \quad (7)$$

这样 换流变压器的有载调压抽头级数范围如下。

换流变压器抽头级数最大值为

$$-TC = \frac{\eta_{\max} - 1}{\Delta\eta} \quad (8)$$

换流变压器抽头级数最小值为

$$+TC = \frac{\eta_{\min} - 1}{\Delta\eta} \quad (9)$$

## 5 换流变压器抽头级数算例分析

以呼盟—山东特高压  $\pm 800$  kV 直流工程为例, 校验上述的计算过程。呼盟直流额定输送功率 8 000 MW 相关参数如表 1 ~ 表 4 所示。按照上述公式计算换流变抽头级数, 结果如表 5 所示, 由表 5 可看出, 所用公式的计算结果与实际应用值基本一致, 验证了所提计算方法的正确性。

表 5 换流变压器抽头级数计算结果

	整流侧		逆变侧	
	计算值	实际应用值	计算值	实际应用值
额定空载电压 $U_{\text{dioN}} / \text{kV}$	231.16	231.16	223.24	223.24
最大空载电压 $U_{\text{diomax}} / \text{kV}$	235.98	—	228.36	—
最小空载电压 $U_{\text{diomin}} / \text{kV}$	180.08	—	178.46	—
最大抽头级数	+25.6	+26	+24.8	+25
最小抽头级数	-6.7	-6	-5.5	-4

## 6 结 论

根据两端换流站交直流系统的参数, 在数学上

推导了换流变压器参数计算新公式, 即最大和最小空载电压, 然后计算出换流变压器抽头级数。最后通过呼盟—山东  $\pm 800$  kV 特高压直流算例验证了所提计算方法的合理性和正确性。

### 参考文献

- [1] Kunder P. Power system stability and control [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 648 - 689.
- [2] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 153 - 167.
- [3] 赵晚君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 10 - 25.
- [4] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [5] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [6] 牛涛, 钱康, 张英娇.  $\pm 800$  kV 直流输电系统主回路参数研究 [J]. 智能电网, 2013(3): 48 - 52.
- [7] 陈锡磊, 周浩, 沈扬, 等. 溪洛渡—浙西  $\pm 800$  kV/7 500 MW 特高压直流输电工程主回路参数设计 [J]. 电网技术, 2011, 35(12): 26 - 32.
- [8] 王峰, 徐政, 薛英林. 高压直流输电换流变压器参数确定方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 98 - 103.
- [9] 段玉倩, 饶宏, 黎小林. 高压直流输电系统主回路参数稳态特性计算方法 [J]. 电力系统及其自动化, 2007, 31(16): 53 - 57.
- [10] 刘宝宏, 段威扬, 杨志栋, 等.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电系统主回路参数研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 17 - 21.
- [11] 王峰, 徐政, 黄莹, 等. 高压直流输电主回路稳态参数计算 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 135 - 140.
- [12] 刘宝宏, 马为民, 段威扬. 三沪直流输电系统主回路参数研究 [J]. 电力建设, 2007, 28(11): 1 - 4.
- [13] 杨汾艳, 徐政. 直流输电系统换流变压器短路阻抗的选择 [J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1628 - 1632.
- [14] 刘志阳, 文俊, 韩民晓. 特高压直流输电稳态参数的分析与计算 [C]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十二届学术年会, 2006.
- [15] 刘艳华. 云广直流特高压换流变压器短路阻抗的选择 [C]. 高电压技术, 2006, 32(9): 100 - 102.

作者简介:

赵辰鹏(1981), 高级工程师, 主要研究方向为电力系统前期规划咨询及稳定与控制;

马东(1986), 工程师, 主要从事电力系统输电线路设计工作。  
(收稿日期: 2015-03-17)

# 新型超高压输电线路鸟害防范措施研究

王德吉 赵强 屈明

(国网四川省检修公司绵阳运维分部 四川 成都 621000)

**摘要:** 鸟害跳闸对超高压输电线路及附近直流系统稳定运行带来很大的影响。基于超高压输电线路鸟害跳闸故障特征,提出了超高压线路防范鸟害应重视的运行维护基础工作。通过对传统防鸟害措施效果进行梳理分析,改进传统防鸟害装置形成新型防鸟害措施,并在超高压输电线路得到成功应用。通过对安装方式的创新,便拆式防鸟罩提高了防鸟效果,降低了检修作业的强度,对输电线路安全稳定运行起到了良好的作用;风车驱鸟刺在防鸟驱鸟功能、能源利用率等方面有所创新,有效降低了线路鸟害事故的发生。

**关键词:** 超高压输电线路; 鸟害; 新型防鸟装置

**Abstract:** Tripping caused by bird damage has great effects on long-term stable operation of EHV transmission lines and near-by DC transmission lines. Based on the properties of tripping caused by bird damage on EHV transmission lines, the daily operational maintenance work is proposed to prevent bird damage for EHV transmission lines. Through analyzing the effects of traditional bird-resistant devices, new bird-resistant devices are investigated and have been successfully applied to EHV transmission lines. The new type bird shields provide an effective bird-resistant effect, reduce the maintenance intensity, and play a good role in the safe and stable operation of transmission lines through improving the installation of conventional bird shields. The new windmill-sting is innovated in the effectiveness of bird-resistant, bird-dispersal and energy utilization, which effectively reduces the tripping caused by bird damage.

**Key words:** EHV transmission line; bird damage; new bird-resistant device

中图分类号: TM723 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0033-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.008

## 0 引言

近年来,随着环境保护意识的增强以及经济的发展,各地区生态环境愈发适应鸟类的繁衍栖息,这给超高压输电线路的安全运行带来了较大威胁。面对日益频繁的鸟类活动,有效采取防鸟害措施,减少鸟害故障的发生,确保电网的安全运行是超高压输电线路运行维护的重要工作之一<sup>[1-4]</sup>。

对超高压输电线路鸟害造成线路跳闸故障特征进行分析,提出了超高压线路防范鸟害差异化的运行维护基础工作;对传统防鸟害措施效果进行梳理,改进了防鸟害装置,形成了新型的有效防鸟害措施。

## 1 超高压输电线路鸟害跳闸故障特征

### 1.1 超高压输电线路鸟害跳闸原因

超高压输电线路发生鸟害跳闸对电网安全运行

及附近直流系统会造成一定的扰动。鸟害造成线路跳闸原因一般可分为4类:1) 鸟类在线路导线和铁塔附近活动,大型鸟类身体或张开的翅膀造成线路相间或单相接地故障;2) 绝缘子上方构筑鸟窝的材料如树枝、杂草等下落或被吹落,造成横担和导线之间电气距离不足,引起线路跳闸;3) 鸟类在铁塔绝缘子上方活动,鸟粪掉落在绝缘子表面,然后沿绝缘子伞群边沿下滑,污染严重的绝缘子发生闪络;4) 鸟粪从绝缘子表面以外一定距离处下落,鸟粪由于重力作用下落拉长,具有一定导电性的鸟粪通道的介入使绝缘子周围的电场分布发生严重畸变,鸟粪通道的前端与绝缘子高压端之间的空气间隙的电场强度大大增加,绝缘子承受的大部分电压都加在了这一段空气间隙上,空气间隙击穿,造成线路单相接地故障。

超高压输电线路塔头及相间电气距离较大,第一类鸟害对超高压线路威胁不大;超高压输电线路绝缘子片数多、距离长,第二类鸟害情况也不多见;

而第三类鸟害情况引起的超高压输电线路跳闸比重较大;第四种由鸟粪下落引发的事故,鸟粪残留痕迹可能很不明显或根本找不到,因此在无法确定原因的事故中,有不小比例是属于鸟粪事故<sup>[5]</sup>。

### 1.2 鸟害易发区环境特征和时间分布

鸟害易发区域具有典型的环境特征和时间分布特性。地形地貌多在靠近河流(排水渠)、稻田、鱼池、低洼潮湿地带,有较大树木和村庄少、僻静开阔的庄稼地带;鸟类一旦选择在某基铁塔上筑巢,在一段时间内即便是受到外界较大的干扰也不会轻易离开,即使将铁塔上的鸟巢清除掉,鸟类依然会在原地筑巢,而且搭建的鸟巢比先前的还要紧密结实。输电线路鸟害跳闸具有一定的时间分布规律性:随着季节变化,鸟害跳闸在鸟类迁徙时候居多;从时段上看,多为夜间21:00~06:00点左右,鸟一般在凌晨觅食前排出大量的粪便,因此鸟粪事故多出现在这段时间。

### 1.3 差异化线路防鸟害日常运维工作

根据上述鸟害故障的地形地貌、季节、顽固等特征,防范线路鸟害应做好如下日常运维工作:

1) 准确划分超高压线路鸟害区域。针对鸟害故障时间分布特性、地形地貌特征,在线路日常运维工作中加强对鸟类活动迹象的观察,摸清靠近冬季不干枯的河流、湖泊、水库和鱼塘的杆塔,位于山区、丘陵植被较好且群鸟和大鸟活动频繁的塔位,以及筑有鸟巢和发生过鸟害的塔位,合理划定鸟害区,为输电线路防鸟害工作提供支撑。

2) 及时发现并积极消除鸟害隐患。鸟类活动频繁时期加强对防鸟重点区段的特巡工作,特别加强对线路附近有河道、林区、水库、养鱼池及鸟食种植地等鸟害易发区段的巡视力度,观察铁塔塔身、塔头及横担上是否有鸟类筑巢现象,及时开展鸟巢清除工作,尤其是针对横担上的鸟巢及时进行带电清除,避免因鸟巢散落发生绝缘子串短路故障。对筑巢塔位进行记录存档,并加强日后的巡视工作,防范鸟巢重筑等鸟害现象;重视鸟害区绝缘子表面脏污情况的观察,对鸟粪污染和表面脏污的绝缘子及时安排带电清扫;关注防鸟设施,发现损坏的和有必要增添防鸟设施的情况,及时更换和补充。适时开展已采取的防鸟措施效果评估,并科学合理选择有效的防鸟措施。

## 2 传统防鸟害装置有效性分析

防鸟害装置形式多样,从预防效果上可分为3类<sup>[6-8]</sup>:1) 防止鸟类在铁塔上栖息,即驱鸟措施;2) 防止鸟粪形成放电通道,即隔离措施;3) 主动帮助鸟类在铁塔不宜造成鸟害故障的地方搭建人工鸟巢,即引鸟措施。目前四川地区现在主要采取前两种预防措施,现对其分别进行效果分析。

### 2.1 防鸟罩

500 kV的德宝直流线路的所有悬垂绝缘子串顶部均安装有防鸟罩(如图1(a)所示),但由于其盘径较小,直径仅40 cm,能起到的防鸟害作用有限,在2013年5月8日00时51分,德宝直流40号塔极Ⅱ线路就发生了鸟害故障。同时,该防鸟罩安装方法繁琐,不便于高处作业时装卸。

### 2.2 常规防鸟刺

防鸟刺安装在悬垂绝缘子挂点处,隔离鸟类在绝缘子挂点位置活动,防止产生鸟粪故障。常规防鸟刺为一端集束固定,一端呈30°向上半圆式散开,如图1(b)所示。常规防鸟刺价格低、安装方便、对低电压线路防鸟害工作有一定的效果;但由于其放射状面积较小,且长时间运行后,钢材质的鸟刺容易锈蚀断落,防鸟效果降低,因此在超高压输电线路实际运维中,常规防鸟刺的效果并不理想,在线路巡视中多次发现鸟巢就筑在铁塔防鸟刺旁,如图1(b)所示。

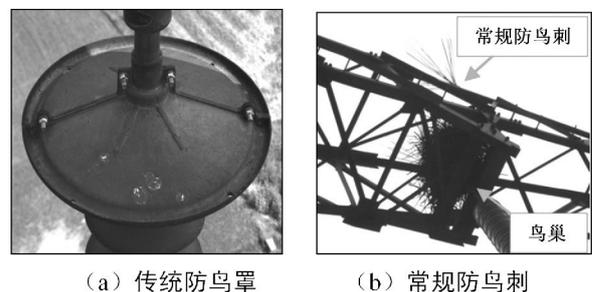


图1 传统防鸟害装置

### 2.3 智能驱鸟装置

智能驱鸟装置具有雷达主动感知判断鸟类的靠近和远离,使用多普勒和声音辅助方式对鸟类的靠近进行有效监测并通过内部算法发送不同频率的声音,局部恶化鸟生存环境,从而达到有效的驱鸟作用。但经过两年多的运行来看,其驱鸟的效果并不理想,部分已安装驱鸟器的塔位仍然存在鸟儿筑巢

情况,如图2所示。分析原因为其提供的变频声波时间长了后被鸟类适应所致。



图2 智能驱鸟装置

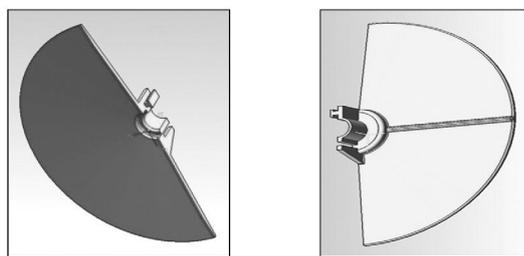
综上所述,传统防鸟害装置在防范鸟害及运行维护方面仍存在很多不足,各种防、驱鸟的装置在功能和实际效果上都存在一定的缺陷。仅依靠传统方鸟装置很难达到超高压输电线路防鸟害需求。

### 3 新型防鸟害装置

选择科学有效的防鸟措施,是做好防鸟害工作的关键,通过分析上述传统防鸟措施功能的特点及缺陷,对防鸟害装置进行了技术革新改进,形成了新型防鸟害措施。

#### 3.1 便拆式防鸟罩

传统防鸟罩罩面直径设计小,利用多颗螺栓对防鸟罩进行对接安装,应用在500 kV及以上输电线路绝缘子串上效果不佳,而且安装、拆卸繁琐,不利于检修作业等缺点。



(a) 左半圆 (b) 右半圆

图3 便拆式防鸟罩结构示意图

从“驱、隔、引”3个防鸟害方面分别着手分析防鸟害现状,主要以“隔”鸟为原则,根据500 kV输电线路绝缘子串长度,放大设计防鸟罩伞边半径(盘径在800 mm左右),利用新型FNBW高分子绝缘材质喷绘红色涂料制作而成。该防鸟罩巧妙设计防分离式对接结构,如图3所示,极大方便检修作业时安装、拆卸,带电、停电作业均可,有效降低作业强度。这种新型防鸟罩具备隔断散落鸟巢的功能,避免鸟

粪污染绝缘子,可以有效防止500 kV及以上输电线路因鸟粪污秽引起绝缘子串闪络和鸟粪下落引发电场畸变导致线路跳闸事故的发生。

图4给出便拆式防鸟罩鸟粪下落分析图解,绝缘子瓷瓶直径为 $d$ ,绝缘子串长度为 $H$ ,当设计风速达到最大 $V_{max}$ 时,鸟粪下落作抛物线运动,假设鸟粪下落到最下层绝缘子时所需的时间为 $t$ ,取重力加速度为 $g$ ,可知

$$H = \frac{1}{2}gt^2$$

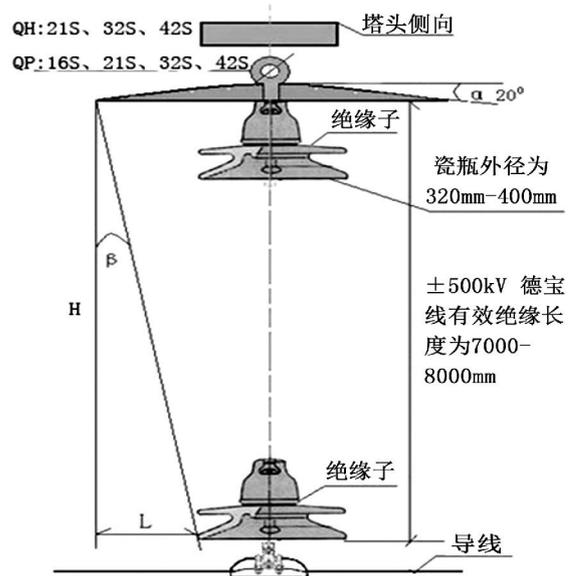


图4 便拆式防鸟罩分析图解

鸟粪下降到最底部的绝缘子串时经过的水平距离 $L$ 为

$$L = V_{max} \times t = V_{max} \sqrt{2H/g}$$

因此便拆式防鸟罩伞罩设计直径 $D$ 为

$$D = 2 \times (0.5d + L)$$

$$\beta = \tan^{-1}(L/H) = \tan^{-1}(V_{max} \sqrt{2l/(Hg)})$$

由上式可知防鸟伞罩越大, $\beta$ 角越大,获得的保护范围也就越强,防鸟罩伞径根据不同绝缘子外径及有效绝缘长度具体确定。同时,为防止雨水堆积对防鸟罩的损害,防鸟罩外延设计 $20^\circ$ 弧度。

#### 3.2 风车驱鸟刺

基于传统防鸟害装置具有隔鸟不能驱鸟、驱鸟不能隔鸟的弊端,绵阳运维分部设计了驱隔功能相结合的一体式防鸟装置——风车驱鸟刺,有效地解决了传统隔鸟、驱鸟各自单一的弊端,通过自身整体旋转所占有立体空间结合反光材料反光和防鸟刺阻隔综合作用达到“驱隔结合”。图5给出风车驱鸟刺实物图。

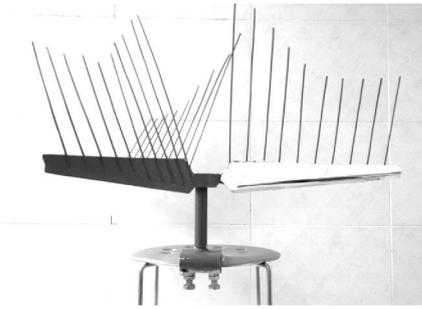


图5 风车驱鸟刺实物图

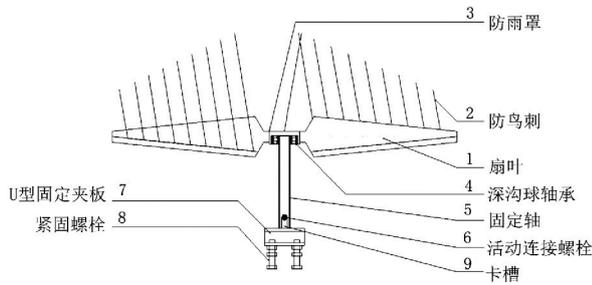


图6 风车驱鸟刺整体结构简图

图6给出风车驱鸟刺整体结构设计简图。为了便于安装及检修时拆卸,风车驱鸟刺由紧固构件和转动构件两部分组成<sup>[9]</sup>。U型固定夹板用于与铁塔横担或塔头处角钢进行连接,通过双螺帽紧固螺栓加以固定。在U型夹板上焊接活动杆件,活动杆件与转动构件的连接管内嵌连接,通过活动连接螺栓与卡槽固定。当铁塔处于检修状态时,铁塔上作业人员可先将转动构件直接分离取下,并将活动杆件转动90°使其保持水平状态。转动构件将风能转化为机械能,是整个产品设计的核心部分。通过连接管与深沟球轴承作紧连接,连接管与紧固构件中的活动杆件内嵌连接作为固定轴。轴承外置轴承保护钢套,防止雨水或其他外部因素对轴承损坏。轴承保护套侧边平均焊接3面长度为300~400mm定长的扇叶,扇叶外边侧点焊9~10根不锈钢针,钢针由产品内侧向外侧长度递减,目的使其转动时形成刺猬状。当扇叶受风力作用将带动风车驱鸟刺整体旋转,当风速达不到启动风速时,静止的风车可以阻隔鸟类栖息。扇叶外侧用红色喷漆进行色标,内侧用反光镜纸进行粘贴,充分利用鸟类对红色和太阳光的敏感性进行驱鸟并不伤害鸟类,同时增大了驱鸟的实际范围。

#### 4 小结

超高压线路的安全运行关系着国家社会稳定、经

济发展和人民的用电需求,日益活动频繁的鸟类活动给输电线路安全运行带来了较大的威胁。防鸟害工作越来越引起电力企业的重视和关注,线路鸟害防范工作应在注重日常运行维护的基础工作上。传统防鸟害装置具有一定的局限性,应结合鸟害特征和传统防鸟害措施的优缺点综合分析,从“驱、隔、引”3个方面开拓思路,积极研发更加有效的新型防鸟害装置,增强线路防鸟害效果,确保电网安全运行。

1) 便拆式防鸟罩通过对安装方式的创新,大大降低了检修作业的强度,同时防鸟伞径的合理增大也提高了防鸟伞罩的防鸟效果,对输电线路安全稳定运行起到了良好的作用。

2) 风车驱鸟刺在防鸟驱鸟功能、能源利用率、安装拆卸便捷性等方面有了极大的提升,应用在输电线路上将大大降低线路鸟害事故的发生。

#### 参考文献

- [1] 聂琼,周远祥. 复合绝缘子鸟粪闪络的仿真计算[C]. 中国电机工程协会高压专委会2007年学术年会论文集,2007.
- [2] 王肃,孔庆军,王靖勤. 500 kV合成绝缘子线路鸟害事故浅析[J]. 高电压技术,2002,28(11): 52-53.
- [3] 王少华,叶自强. 架空输电线路鸟害故障及其防治技术措施[J]. 高压电器,2011,47(2): 61-67.
- [4] 袁检,张建荣,方志,等. 国外电网的鸟害事故与对策[J]. 电工技术,2002(11): 5-6.
- [5] 梁曦东,黄峻,王绍武,等. 合成绝缘子鸟粪闪络与不明原因闪络[J]. 电网技术,2001,25(1): 13-16.
- [6] 关志成. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [7] 刘波. 输电线路鸟害综合防治措施[J]. 电力安全技术,2008,10(11): 13-14.
- [8] Fengshan Li, Mary Anne Bishop, Tsamchu Drolma. Power Line Strikes by Black-necked Cranes and Bar-headed Geese in Tibet Autonomous Region [J]. Chinese Birds 2011,2(4): 167-173.
- [9] 王德吉. 风车驱鸟刺[Z]. CN203884532U, 2014.

作者简介:

王德吉(1989),助理工程师,从事输电线路安全管理工作;

赵强(1975),高级工程师,从事输电线路安全管理工作;

屈明(1963),经济师,从事输电线路安全管理工作。

(收稿日期:2015-05-11)

# 基于网损灵敏度和禁忌搜索的配电网重构方法

余林<sup>1</sup> 江东林<sup>2</sup>, 王鑫<sup>1</sup>

(1. 国网衡水供电公司, 河北 衡水 053000; 2. 国网德阳供电公司, 四川 德阳 618000)

**摘要:** 为应对配电网重构中频繁改变开关状态并多次进行潮流计算的寻优效率低下、无法全局寻优等缺陷, 以降低配电网运行网损为目标, 提出了基于网损灵敏度及禁忌搜索的重构新方法。该方法通过定义网损相对开关状态的网损灵敏度指标, 按启发式规则依次开闭开关并进行潮流计算可得到网损灵敏度开关排序表, 以此为基础为禁忌搜索算法构造合理搜索邻域, 在利用禁忌搜索全局寻优后最终可得到网路最佳重构方案且寻优时间满足应用需求, 最后通过算例验证了该方法的有效性。

**关键词:** 配电网重构; 网损灵敏度; 禁忌搜索

**Abstract:** In order to deal with the poor efficiency and locally optimal solutions in reconfiguration of distribution network, which is caused by frequently state change of switches and multiple call of power flow calculations, a new reconfiguration method based on loss sensitivity and tabu search is proposed to reduce the active power loss. Firstly, the loss sensitivity index is defined by loss and switching state, and then a stored switch list can be obtained by power flow calculation and loss sensitivity index. On this basis, a reasonable search neighborhood is constructed by tabu search algorithm, the best available network reconfiguration scheme can be obtained after the global optimization by tabu search, and the optimization time can meet the application requirements. The results of calculation examples show that the proposed method is effective.

**Key words:** reconfiguration of distribution network; loss sensitivity; tabu search

中图分类号: TM74 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0037-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.009

## 0 引言

随着坚强智能电网发展规划的提出及逐步推进, 配电自动化已在国内多个城市试点建设, 而配电网重构作为配电自动化系统的重要功能<sup>[1-2]</sup>, 其对于提高配电网运行的经济性有着重要意义。

目前针对网络重构的研究主要以降低网损<sup>[3-4]</sup>、提高静态电压稳定性及均衡支路传输功率等为目标<sup>[5-6]</sup>。不论选取何种目标函数, 采用方法通常是在每次网络拓扑改变后进行一次潮流计算, 进而对整个网络的网损、电压及负载率等指标进行评估, 而根据所采用方法不同其在寻优过程中通常会多次重复改变网络拓扑<sup>[7-8]</sup>, 从而导致多次重复的潮流计算, 降低算法的效率。

在配电网中根据各物理量间的相对变化关系, 可构造多种灵敏度指标<sup>[9-10]</sup>。在灵敏度分析中, 按照各变量的数学作用, 可分为参数变量、状态变量、控制变量及输出变量等4类。实际运行中, 当控制变量发生微小变动时, 输出变量或状态变量均会发

生一定程度的微小变化, 用二者之间的这种微分关系来表示这种变化趋势, 即称为灵敏度指标。综上, 若能够通过求取单个开关变动导致的某一指标变化的灵敏度, 则可大大提高配电网重构的效率。

下面以降低配电网运行网损为目标, 在构造网损相对开关状态灵敏度指标的基础上, 通过启发式开关打开策略, 利用网损灵敏度排序后可得到的以网损为据的开关排序表, 构造合理搜索邻域后利用禁忌搜索全局寻优, 得到网络最佳重构方法且寻优时间满足应用需求。

## 1 配电网重构模型

### 1.1 目标函数

选择配电网运行的有功网损作为重构的目标函数, 配电网有功损耗可表示为

$$\min P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^m R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (1)$$

式中:  $F$  为系统网损;  $m$  为闭合系统支路数;  $i$  为支路编号;  $R_i$  为支路  $i$  的电阻;  $P_i$  和  $Q_i$  分别为支路  $i$  末

端传输的有功功率和无功功率;  $V_i$  为支路  $i$  的末端节点电压。

### 1.2 约束条件

重构后的网络应满足如下约束条件:

#### 1) 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $n$  为系统节点数;  $P_i$  和  $Q_i$  分别为节点  $i$  有功和无功注入功率;  $V_i$  为节点  $i$  电压;  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别为导纳矩阵的实部和虚部;  $Q_{ij} = Q_i - Q_j$  是  $i$ 、 $j$  两节点电压的相位差。

#### 2) 节点电压约束

$$V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax} \quad (3)$$

式中:  $V_{imax}$  和  $V_{imin}$  分别为节点  $i$  电压的上下限。

#### 3) 支路电流约束

$$I_i \leq I_{imax} \quad (4)$$

式中:  $I_{imax}$  为支路  $i$  电流上限。

#### 4) 辐射型网络约束

对单一网络而言,其节点与闭合支路的数量关系可表示为

$$m + 1 = n \quad (5)$$

## 2 网损灵敏度和禁忌搜索的配电网重构

### 2.1 网损灵敏度

基于网损灵敏度(power loss sensitivity, PLS)的配电网重构以网损相对于单个开关状态变化的变化量为基础,在拓扑分析校验网络连通约束后,经潮流计算对各开关引起的网损进行排序,最后依次选择网损最小的开关打开,直至网络满足辐射状约束,其中网损灵敏度定义如式(6)所示。

$$\Delta P_{loss} = \frac{\partial P_{loss}}{\partial x_i} \Delta Z_i \quad (6)$$

式中:  $x_i$  为支路  $i$  的开闭状态;  $Z_i$  为支路  $i$  的阻抗。

基于 PLS 的配电网重构总体流程如图 1 所示。算法详细步骤如下:

1) 读取网络基本参数,对  $n$  节点  $M$  支路的网络,生成确定开关状态表(decided switch status table, DSST) 和临时开关状态表(temporary switch status table, TSST) 用于记录所有  $M$  个开关开闭状态。DSST 和 TSST 均为  $1 \times M$  行向量,其第  $i$  个元素为 0 或 1 分别代表开关  $i$  打开或闭合,将 DSST 所有元素

值置为 1。

2) 令  $j = 1$ 。

3) 令 TSST 等于 DSST,若 TSST 中第  $j$  个元素为 1 则将其变为 0;根据 TSST 代表的开关状态进行拓扑分析,校验网络中是否存在孤岛;若存在则转至步骤 5),否则转至步骤 4)。

4) 进行潮流计算,记录开关  $j$  打开的网损。

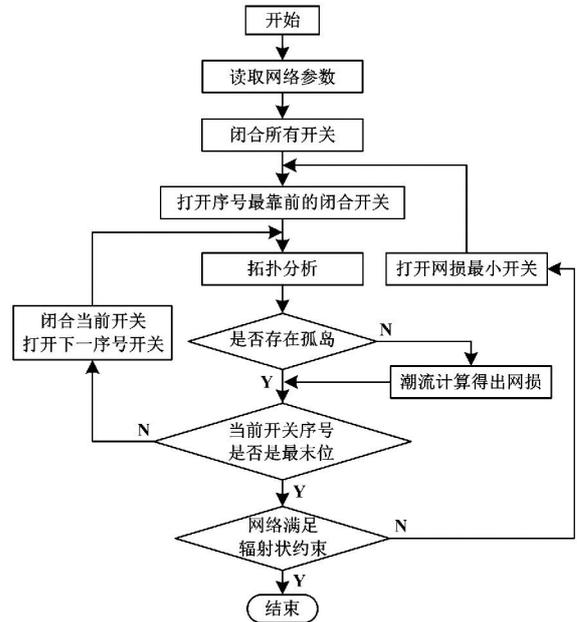


图 1 算法流程

5) 令  $j = j + 1$ ; 校验  $j$  是否大于  $M$ , 若不大于转至步骤 4); 否则转至步骤 7)

6) 选择网络最小的开关,若为开关  $k$ ,则将 DSST 的第  $k$  个元素置为 0;根据 DSST 校验网络是否满足辐射状约束,即 DSST 中值为 1 的元素个数是否大于等于  $n$ ,若不满足则进行步骤 2),否则转至步骤 7)。

7) 给出计算结果,退出。

综上所述,PLS 作为配电网重构中一种与最优流法(optimal flow pattern, OFP) 相似的启发式方法,其从初始开关状态到最优网络拓扑的搜索是一个逐步确定打开开关的过程。最优流法每次选取某一环网中流过电流最小一开关打开,其对于非均一网络并不能代表网损最小,而网损灵敏度法则采用更为明确的网损指标。在每一轮迭代寻优中,网损灵敏度分析是基于当前已打开开关并寻找下一个最佳打开开关,其受到上一轮打开开关影响,而本轮打开开关结果也将影响下一轮网损灵敏度分析结果。因此,寻优过程必定受到开关打开的先后次序影响,而基于网损灵敏度的标准配电网重构方法对于打开先后次序没有明确

的启发式规则,故不能保证全局最优。

### 2.2 网损灵敏度和禁忌搜索的配电网重构

禁忌搜索算法(tabu search, TS)<sup>[11-12]</sup>是对局部领域搜索的一种扩展,属于全局迭代寻优算法。TS的独特思想是对一段时期内已搜索的局部最优解进行标记,并在后续迭代搜索中尽量避开这些对象。由于TS保证对不同有效途径的探索并一定程度提高寻优效率,因此其在电力系统中经济调度、检修计划、无功优化及电网规划等方面得到了广泛应用。

在TS中,其主要参数包括邻域、禁忌表、禁忌长度、候选解、特赦规则、终止规则,于是在PLS基础上提出一种用于配网重构的网损灵敏度禁忌搜索法(power loss sensitivity tabu search, PLSTS),其利用PLS已找到的局部最优解构造合理的搜索空间,采用TS进行全局搜索以找到网损最小的开关组合方案,其具体步骤如下:

#### 1) 构造邻域

对n节点M支路的网络,要保持网络辐射状需打开M-n+1个开关,采用2.1节网损灵敏度法进行网络重构,以其找到的最优解作为禁忌搜索的初始解,初始解邻域包括如下两部分:①取网损灵敏度法在寻优过程中会形成M-n+1个按网损大小的开关排序表。选择各排序表的前若干个开关。

②对作为初始解的M-n+1开关而言,当闭合其中某一特定开关时原网络必然形成一个环网,取环网中与特定开关相邻的若干个开关。

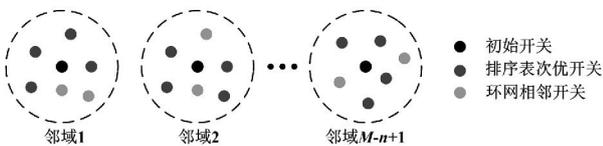


图2 邻域构造示意图

综上所述,通过囊括开关排序表中的网损次优开关及实际连接关系上的相邻开关并构造邻域,可尽量扩大搜索空间已保证搜到全局最优解。

#### 2) 禁忌表

将一段时期内已搜到局部最优解的打开开关记录在禁忌表中,当禁忌搜索每次从邻域中搜到新解时,均利用禁忌表判断其禁忌属性,在不属于禁忌对象的情况下再进行潮流计算以得到其网损,可避免大量重复的潮流计算。

#### 3) 特赦规则

比较当前搜索点的开关状态的网损值与目前为

止搜索到的最优开关状态的目标函数值,若前者更大,则满足特赦规则。

#### 4) 终止条件

以如下作为PLSTS的终止条件:

①设定禁忌对象的最大禁忌频率,即开关状态及网损禁忌频率超过某一阈值;

②当达到指定迭代次数最优解未发生改变或达到最大迭代次数。

## 3 算例分析

IEEE 33节点系统有33个节点、37条支路,其中支路33~37属联络开关在正常运行时打开,系统总负荷为5 084.26 kW和2 547.32 kvar,系统如图3所示,网络参数见附录。

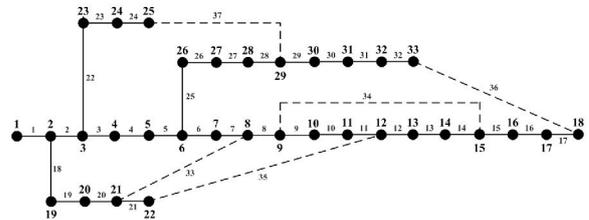


图3 IEEE 33节点配电网系统

首先采用PLS对该网络进行重构,通过5轮启发式寻优后,得到最佳重构方案如表1。为进行比较,同时采用OFP对该网络进行重构后的方案如表1。

表1 网损灵敏度法及最优流法最佳重构方案

状态	打开开关	网损/kW	耗时/s
初始状态	33 34 35 36 37	202.7	
OFP	7 10 13 14 37	138.7	0.287
PLS	7 10 13 28 34	137.7	3.650

由表1可知,相对于PLS,OFP在每轮选择最优打开开关时仅进行一次潮流计算,故在计算效率上优于PLS,但其重构方案的网损较PLS略大。由于两种方案均不属于全局寻优算法,故其重构方案的网损均高于IEEE 33系统最低网损。

以PLS最佳重构方案为TS搜索初始解,按2.2节选择各开关排序表前5个开关及网络中与初始解左右相邻的开关,剔除重复开关后共同组成的初始解搜索邻域如表2所示。为进行比较同时采用对交叉及变异概率做出自适应改进的改进遗传算法(improved genetic algorithm, IGA)进行计算,其中改进遗传算法种群数为100。

表2 初始解搜索邻域

邻域	可选开关集合
邻域1	6 7 8 9 10 11 13 33
邻域2	9 10 11 13 34
邻域3	12 13 14 15 34
邻域4	8 9 14 15 16 17 34
邻域5	25 26 27 28 29 37

采用 PLSTS 得出的重构方案及对应网损如表 3 所示。由表 3 中内容对比可知, OFP 及 PLS 虽用时较少, 但由于其采用启发式规则, 未进行全局搜索故不能找到全局最优解。IGA 和 PLSTS 均找到网损 137.65 kW 的最优重构方案, 但由于 IGA 搜索空间较大且属随机搜索, 故用时超出 PLSTS 的 5.5 + 3.65 s, 所提方法用时分为两阶段, 其中 3.65 s 用于 PLS 生成开关排序表, 5.5 s 为禁忌搜索所用时间。

表3 配电网简化处理

	打开开关	网损/kW	耗时/s
OFP	7 10 13 14 37	138.91	0.287
PLS	7 10 13 28 34	137.67	3.650
PLSTS	7 11 14 28 34	137.65	3.65 + 5.5
IGA	7 11 14 28 34	137.65	43

采用所提重构方案后, 系统各节点电压如图 4 所示, 其中 PLSTS 搜索过程中最优解如图 5 所示。由图 5 与 IGA 对比可知, PLSTS 由于搜索初始值网损已很低, 故在搜索过程中不能明确看出网损下降趋势, 但在约迭代 60 次时找到最佳重构方案; 而 IGA 由于搜索空间较大且属随机搜索, 搜索效率较低, 在迭代 100 次时仍未找到最佳重构方案, 因此 PLSTS 由于合理构造邻域, 使得在未降低搜索解质量的情况下搜索效率优于改进遗传算法的随机搜索。

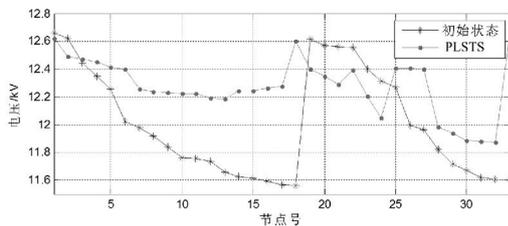


图4 重构后系统节点电压

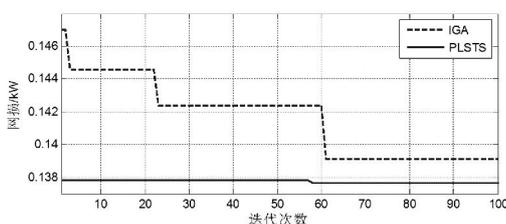


图5 最优解搜索过程

## 4 结 论

1) PLS 作为一种启发式方法, 其利用网损灵敏度排序用于配电网重构问题相对 OFP 虽用时较多, 但满足实际需求, 求解质量更高。

2) PLSTS 在 PLS 网损灵敏度排序表基础上可为全局搜索构造更合理的搜索邻域, 以避免 PLS 启发式方法陷入局部最优, 其用于节点较多的实际配电网重构时, 在求解时间及求解质量上具有明显的优势。

### 参考文献

- [1] 李伟, 车方毅, 李鹏. 湖北电网配电自动化建设思路[J]. 湖北电力, 2012, 36(6): 22-23.
- [2] 郑毅, 刘天琪, 洪行旅, 等. 中心城市大型配电自动化设计方案与应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 62-66.
- [3] 魏玉仁, 杨玉华, 王磊, 等. 基于二进制粒子群算法的配电网重构[J]. 电工电气, 2012(3): 33-35.
- [4] 肖蔚, 伍伟斌, 廖兰珍. 基于改进模拟植物生长算法的配电网重构[J]. 电工电气, 2012(6): 22-25.
- [5] 刘健, 武晓朦, 余健明. 考虑负荷不确定性和相关性的配电网重构[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 54-59.
- [6] 江东林, 刘天琪, 李樊. 采用动态时段划分和分层优化策略的配电网重构[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 153-157.
- [7] 李晓明, 黄彦浩, 尹项根. 基于改良策略的配电网重构遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 49-54.
- [8] 李振坤, 陈兴莺, 余昆, 等. 配电网重构的混合粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 35-41.
- [9] 袁骏, 段献忠, 何仰赞, 等. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述[J]. 电网技术, 1997, 21(9): 7-10.
- [10] 姜勇, 周双喜, 朱凌志. 基于系统网损灵敏度的二阶指标研究[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(20): 16-18.
- [11] 王明兴. 连续禁忌搜索算法改进及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [12] 董百强. 基于禁忌搜索算法的配电网重构研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.

### 作者简介:

余林(1985), 本科, 助理工程师, 研究方向为电力系统调度及其自动化;

江东林(1986), 硕士, 助理工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制;

王霆(1986), 本科, 助理工程师, 研究方向为电力系统运行与控制。

(收稿日期: 2015-04-22)

# 配电网接地方式对用户安全性影响比较

崔东君

(国网北京市电力公司顺义供电公司 北京 101300)

摘要: 以目前常见的中性点不接地和经消弧线圈接地方式与中性点经小电阻接地方式为研究对象,结合北京地区电网的实际情况,通过分析两类接地方式在不同短路情况下对用户用电安全的影响,得出目前使用小电阻接地方式在安全性、适用性方面具有优势的结论。

关键词: 接地方式; 小电阻接地; 安全性

Abstract: Taking the common grounding modes, that is, neutral point unearthed and neutral point earthed via arc-suppression coil, and neutral grounding through low resistance as studying objects, the influences of these kinds of grounding modes on the security of using electricity under different short circuits are analyzed combining with the actual situation of power grid in Beijing area, and it is obtained that at present using low resistance grounding has its advantages in security and applicability.

Key words: grounding mode; low resistance grounding; security

中图分类号: TM727 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2015)04-0041-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.010

## 0 引言

随着社会的发展,配电网的结构和特性也发生着变化。以北京市配电网发展为例,2000年以前,全市10 kV配电网以中性点不接地和经消弧线圈接地为主。2000年以后,随着全市配电网中电缆使用量的增加,造成电容电流数值大幅增加,北京市部分变电站将中性点接地方式改为了经小电阻接地,在发生接地故障时保护装置动作切断故障电流。这种接地方式的改变也影响着配电网的配置和用户的用电安全。

下面将以北京市配电网为例比较不接地或中性点经消弧线圈接地系统与中性点经小电阻接地系统的特点,以及这两类接地方式对用户用电安全的影响。

## 1 配电网接地标准

IEC国际电工委员会将低压配电系统接地方式分为:TT系统、TN系统、IT系统<sup>[1]</sup>。TN、TT、IT 3种形式均使用了两个字母,以表示三相电力系统和电气装置的外露的可导电部分(设备外壳、底座等)的对地关系。第1个字母表示电力系统的对地关系,即T表示一点直接接地(通常为系统中性点);I表

示不接地(所有带电部分与地隔离),或通过阻抗(电阻器、电抗器)及通过等值线路接地。第2个字母表示电气装置外露可导电部分的对地关系,即T表示独立于电力系统可接地点而独立接地;N表示与电力系统可接地点直接进行电气连接。

### 1.1 TN系统

在TN系统中,为了表示中性线和保护线的组合关系,有时在TN代号后面还可附加以下字母:S表示中性线和保护线在结构上是分开的;C表示中性线和保护线在结构上是合一的(PEN线)。

TN系统常见的接线形式如下:

1) TN-S系统:整个系统的中性线与保护线是分开的,见图1。

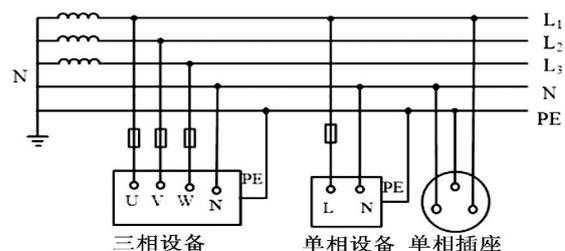


图1 TN-S接地系统

2) TN-C-S系统:系统中有一部分中性线与保护线是合一的,见图2。

3) TN-C系统:整个系统的中性点与保护线是合一的,见图3。

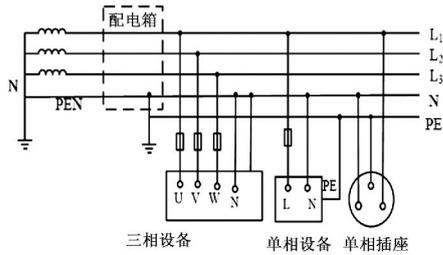


图 2 TN-C-S 接地系统

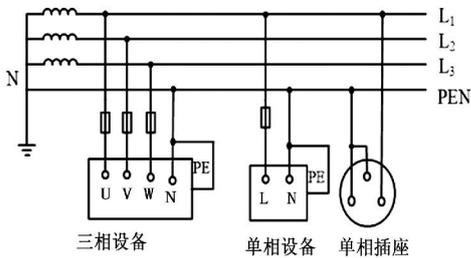


图 3 TN-C 接地系统

### 1.2 TT 系统

TT 系统有 1 个直接接地点,电气装置的外露导电部分接至电气上与低压系统的接地点无关的接地装置。

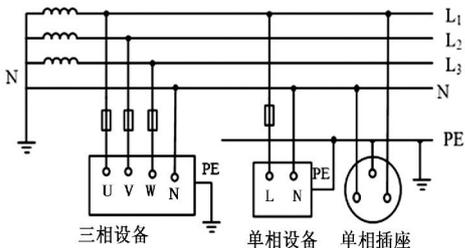


图 4 TT 接地系统

### 1.3 IT 系统

IT 系统的带电部分与大地间不直接连接(经阻抗接地或不接地),而电气装置的外露导电部分则是接地的。

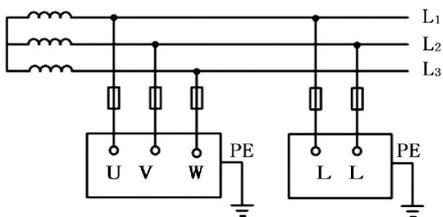


图 5 IT 接地系统

## 2 两类接地系统在故障时对用户的影响分析

为分析低压配电系统不同接地方式对用户的影响,选择高压侧为 10 kV 的配电变压器为研究对象。

10/0.1 kV 配电变压器既是 10 kV 配电系统的负荷侧,又是 220/380 V 系统的电源侧,因此它既需做 10 kV 侧的设备外壳的接地(保护接地),也需要做低压侧中性点的接地(工作接地)。

中性点不接地或经消弧线圈接地系统与中性点经小电阻接地系统两类接地方式在发生单相接地时对用户的影响在于单相接地时入地电流的大小不同以及故障切除时间的差别,下面将从高压侧外壳击穿和高压侧对低压侧击穿两种故障情况进行分析。

### 2.1 配电变压器高压侧对外壳击穿

#### 2.1.1 对不接地或经消弧线圈接地系统影响

不接地或经消弧线圈接地系统中的接触电位差不应超过下列数值:

$$U_r + 50 + 0.05\rho \quad (1)$$

此时土壤电阻率取干燥的混凝土地面等于  $1\,000\ \Omega \cdot \text{m}$ ,不接地或经消弧线圈接地系统中接地点最高接触电位差应小于 100 V。

当 10 kV 配电系统中性点不接地或经消弧线圈接地时,10 kV 配电系统发生高压侧对外壳击穿时,接地电流将不大于 10 A,该电流在配电变压器接地装置上将产生约 40 V 的电压(按照电力行业标准,假设配电变压器的保护接地装置的接地电阻符合标准,且按照最严重情况考虑为  $4\ \Omega$ ),由于工作接地与保护接地是共用的,这个电压将沿低压侧中性线传递到用电器具的金属外壳上,从而可能在高压侧发生对外壳击穿时,使接触用电器具金属外壳的人员触电,但是由于该电压小于前述的接触电位 100 V,所以对人身来说是安全的,而且用户在线路入户处做了重复接地,配电变压器的接地电阻非常小,所以实际传递到用户用电器具的金属外壳的电压是非常小的<sup>[2]</sup>。

#### 2.1.2 对经小电阻接地系统影响

小电阻接地系统接触电位差不应超过下列数值:

$$U_r = (174 + 0.17\rho) \sqrt{t} \quad (2)$$

北京市电力公司规定小电阻接地系统中发生单相接地故障时跳闸时间取 0.2 s(保护动作时间 + 开关动作时间),且按照 IEC 规定,低电阻接地系统中故障情况下 0.2 s 跳闸时所允许的故障电压应小于 450.0 V。

在 10 kV 配电系统中性点经小电阻接地系统中,按照北京现在这种配电网低压中性线的接线方式,如果此时配电系统发生高压侧对外壳击穿时,此

时接地电流较不接地系统或经消弧线圈接地系统的短路电流大。北京实测的电流约为 430 A,考虑极严重情况接地电阻为 4 Ω,此时该电流在配电变压器接地装置上将产生略小于 2 000 V 的电压降,远大于允许的接触电位,此电压将沿低压侧中性线传递到用电器具的金属外壳上,从而给人身安全也带来危险。其实这种极严重情况是不可能出现的,因为配电变压器中性点为并联连接,假设接地电阻为 1 Ω(即仅有 4 台变压器的接地装置并联),此时的电压将为 430 V,小于允许的数值。所以小电阻接地系统发生高压侧对外壳击穿时,用户用电是安全的<sup>[3]</sup>。

### 2.1.3 对用户影响分析

1) 虽然小电阻接地系统在发生高压侧对外壳击穿时入地电流较大;但是由于公共地线的并联分流效果,对于用户的用电安全仍然是有保证的,并不会因为接地方式的改变而使用户受到电气上的危害。

2) 两种接地系统在发生高压侧对外壳击穿时,对用户的电气危害是非常小的。

## 2.2 配电变压器高压侧对低压侧击穿

### 2.2.1 对不接地或经消弧线圈接地系统影响

若发生高压侧对低压侧击穿故障,电流将沿着进户线(火线或零线)串入用户,将危及用电设备及用户的安全;但因不接地或经消弧线圈接地系统短路电流数值较小,接触电压也不高,若配电变压器的保护接地装置的接地电阻符合  $R \leq 50/I$  要求且不超过 4 Ω 时,低压系统电源接地点可以与该变压器保护接地共用接地装置。

### 2.2.2 对经小电阻接地系统影响

在小电阻接地系统中,短路电流较大,接触电压也较高,需要按照配电变压器安装在室内或室外两种情况进行分析。

1) 当配电变压器安装在建筑物外时,对于低压零线接在一起的多台配电变压器的等效接地电阻在 0.5 Ω 或以下时(相当于接地电阻为 4 Ω 的 8 个或以上连入公共零线的接地装置并联),保护接地与工作接地可以分开;

如果低压零线接在一起的多台配电变压器等效接地电阻在 0.5 Ω 以上时,应该采取措施降低配电变压器的接地电阻,使等效接地电阻等于或小于 0.5 Ω;对于单独接地的配电变压器,如果接地电阻在 4 Ω 及以下时,保护接地与工作接地

分开的距离不得小于 5 m;

如果单独接地的配电变压器接地电阻大于 4 Ω 时,公式  $L(m) = R(\Omega) + 1$  选取保护接地与工作接地分开的距离  $L$ 。

2) 当配电变压器安装在建筑物内时,配电变压器保护接地的接地装置接地电阻符合  $R \leq 2000/I$  的要求,且建筑物内采用(含建筑物钢筋的)总等电位连接时,低压系统电源接地点可与该变压器保护接地共用接地装置。

### 2.2.3 对用户影响分析

中性点不接地或经消弧线圈接地系统由于其接地电流较小,所以在防止短路故障对用户造成危害的措施方面较为简单,即仅需要考虑接地电阻的要求;中性点经小电阻接地系统应该充分考虑环境、接线形式等因素,采用适当方式降低接地电阻<sup>[4]</sup>。

## 3 两类接地方式在防雷方面的区别

10 kV 城市配电网系统的防雷主要是防止感应雷对系统的危害,对于接地方式的不同,防雷方面需要做的措施区别不大,即选择合适的避雷器安装在合适的位置等。

但是在此需要注意的是:原有中性点接地方式(不接地或经消弧线圈接地)中的氧化锌避雷器主要是防雷击过电压。而对于系统中的操作过电压等是采取躲避的方式。即要求此时避雷器不工作;但是在系统采取中性点经小电阻接地方式后,由于操作过电压的大幅降低,即此时避雷器不仅可以作为防雷的设备,还可以用来限制操作过电压。这也给氧化锌避雷器在 10 kV 系统中的大量推广使用提供了条件<sup>[5-6]</sup>。

## 4 结 论

接地方式对于人身的安全影响主要体现在两个方面,一方面是由于接地方式不同,单相接地时的入地电流不同,而引起地电位抬高、接触电压过大而使人发生触电的事故;另一方面是由于人体直接接触带电线路而发生触电的事故,从前面的分析得出,中性点经小电阻接地这种方式与不接地或经消弧线圈接地方式相比具有一定的优势。

(下转第 55 页)

仅有 SCADA 量测量的状态估计的区别主要包括:

1) 量测量的冗余度不同: 传统状态估计的量测量只是通过 SCADA 量测系统获得, 冗余度较低, 系统中存在关键量测量; 而混合量测状态估计的量测量包含 SCADA 量测量和 PMU 量测量, 冗余度高, 不存在关键量测量。2) 估计方式不同: 传统状态估计只通过非线性状态估计获得估计结果, 估计结果精度不高; 而混合量测状态估计方法将利用非线性状态估计结果和 PMU 量测信息进行二次线性状态估计, 状态估计结果的精度大大提高。

混合量测状态估计方法的优点主要包括: 状态估计结果精度高, 能够检测关键量测量中出现的不良数据。不足之处在于需要进行两次状态估计, 需要多耗费一些时间。

#### 4 结 语

充分利用 PMU 量测及 SCADA 量测值, 讨论并发展了一种基于 PMU/SCADA 混合量测的电力系统状态估计及不良数据检测方法。特别是当 SCADA 量测系统的关键量测量出现不良数据时, 通过 PMU 量测量增加系统冗余度, 同时利用二次线性状态估计更新残差协方差矩阵的方式来对 SCADA 量测量中的关键量测量中的不良数据进行检测, 通过 IEEE 30 节点系统对该方法进行了试验, 效果较好。

(上接第 43 页)

1) 不接地或经消弧线圈接地系统改成经小电阻接地这种方式, 不会由于入地电流增大而对低压 (380/220 V) 用户造成种种电气危险。

2) 由于人体直接接触带电线路而发生触电这种方式与中性点的接地方式并没有绝对的关系; 而与触电者接触带电体的方式及触电后脱离的时间有着密切关系, 对于北京的配电线路而言, 由于电缆的大量使用(四环以内主要以电缆为主), 裸架空线换成了绝缘线等因素, 四环以内配电系统采用中性点经小电阻接地与不接地或经消弧线圈接地有一定优势。

#### 参考文献

[1] 朱仲鸣. 6~35 kV 电缆系统采用中性点经电阻接地[J]. 电力安全技术, 1996(5).

#### 参考文献

[1] 李从善, 刘天琪, 李兴源, 等. 用于电力系统状态估计的 WAMS/SCADA 混合量测数据融合方法[J]. 高压技术, 2013, 39(11): 2686-2691.

[2] 刘晓义, 宋佳音, 蒋辉雄, 等. 基于 PMU/SCADA 混合量测的电力系统状态估计[J]. 电测与仪表, 2012, 49(559): 11-15.

[3] 薛辉, 贾清泉, 王宁, 等. 基于 PMU 量测数据和 SCADA 数据融合的电力系统状态方法[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 44-49.

[4] 李强, 周京阳, 于尔铿, 等. 基于混合量测的电力系统状态估计混合算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 31-35.

[5] G. N. Korres, N. M. Manousakis. State Estimation and Bad Data Processing for Systems Including PMU and SCADA Measurements[J]. Electric Power Systems Research 2011(81): 1514-1524.

[6] P S Castro Vide, F P Maciel Barbosa, I M Ferreira. Combined Use of SCADA and PMU Measurements for Power System State Estimator Performance Enhancement[C]. Energetics (IYCE), Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on. IEEE, 2011: 1-6.

[7] R. F. Nuqui, A. G. Phadke. Hybrid Linear State Estimation Utilizing Synchronized Phasor Measurements[J]. Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, 1665-1669.

作者简介:

许勇(1988), 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统状态估计。

(收稿日期: 2015-03-09)

[2] M. Clement, D. Daniel, J. Borgeal. Developments in MV Neutral Control at Electricite De France[J]. Cired 1991 (2): 14.

[3] 中国电机工程学会, 高压专委会, 过电压与绝缘配合分专业委员会. 过电压讨论会论文集[C]. 1997.

[4] 贺景亮. 电力系统电磁兼容[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.

[5] DL 5033-94 送电线路对电信线路危险影响设计规程[S].

[6] DL/T 5063-1996 送电线路对电信线路干扰影响设计规程[S].

作者简介:

崔东君(1984), 工学硕士, 工程师, 主要从事供电方案制定、工程组织方面的工作。

(收稿日期: 2015-03-29)

# 直流电源系统绝缘监测装置的校验检测技术

李 晶, 罗 洋, 陈轲娜, 王嘉易

( 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072 )

**摘 要:** 直流电源系统是为控制、保护、通信等负荷提供正常运行电源和电网故障后快速恢复运行的事故用电源; 是保障发电厂升压站、变电站、换流站等安全运行的重要设备; 而绝缘监测装置则是保证直流电源系统正常运行的重要手段之一。绝缘监测装置的性能直接影响直流电源系统的安全运行, 因此, 必须开展相关的检测或考核验证。探讨了变电站直流电源系统绝缘监测装置的校验检测技术, 阐述并分析了校验装置的检测电路原理, 为有效地开展绝缘监测装置的校验提供了参考。

**关键词:** 直流电源系统; 绝缘监测装置; 检测技术

**Abstract:** DC auxiliary power system provides working supply and emergency supply for control, protection, communication and other loads, and it is the important device to guarantee the safe operation of booster station, substation and converter station. Especially, insulation monitoring device is one of the important methods for ensuring the normal operation of DC auxiliary power system. The properties of insulation monitoring device directly affect the safe operation of DC auxiliary power system. Therefore, the relevant detection or calibration must be carried out. The calibration and detection technologies for insulation monitoring device of DC auxiliary power system in substation are discussed. The principle of detection circuit is described and analyzed for calibration device, which provides a reference for effective calibration of insulation monitoring device.

**Key words:** DC power system; insulation monitoring device; detection technology

中图分类号: TM934.3 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0044-02

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.011

## 0 引 言

直流电源系统的绝缘监测装置作为对直流电源系统正负极接地、系统外电源窜入等故障造成的电压异常进行监测和告警<sup>[1-3]</sup>的专用装置, 其重要性不言而喻。虽然国家电网公司企业标准 Q/GDW 1969-2013《变电站直流系统绝缘监测装置技术规范》已经颁布实施, 由于直流电源系统绝缘监测装置技术规范的长期缺失, 目前在运的直流电源系统绝缘监测装置与新颁标准的要求存在一定的差距, 为避免由此带来的事故隐患, 开展装置参数和功能的测评、校验就显得尤为重要。

下面探讨了变电站直流电源系统绝缘监测装置的校验检测技术, 阐述并分析了校验装置的工作原理, 为有效地开展绝缘监测装置的校验提供了参考。

## 1 直流电源系统绝缘监测装置

变电站直流电源系统绝缘监测装置通过监测直流母线电压的变换量, 确定直流母线是否发生接地

故障。当接地故障发生时, 启动绝缘监测装置支路巡检中的“选线功能”侦测出故障支路, 同时发出告警信号。

微型绝缘监测装置的工作原理如图 1 所示。其主要由平衡桥检测电阻  $R$ 、不平衡桥检测电阻  $R_s$ 、直流电源系统正极对地绝缘电阻  $R_z$ 、直流电源系统负极对地绝缘电阻  $R_f$ 、采样计算电路模块、通信电路模块等构成<sup>[4]</sup>。直流母线接地故障的监测是采用平衡桥电路和不平衡桥电路。不平衡桥电路是为了弥补(正、负)两极等值接地时, 平衡桥电路监测盲区的补充监测方法。

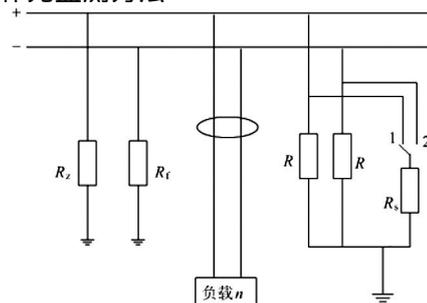


图 1 微型绝缘监测装置原理图

在直流电源系统发生绝缘下降和接地故障时，为了缩小故障范围，减少故障处理时间，目前采用有直流漏电流、交流注入、变阻激励等多种技术侦测选出接地支路，称为“选线功能”。但电网公司出于安全性考虑，一般不采用交流注入的侦测方式。

## 2 校验检测的基本原理和方法

### 2.1 校验检测的基本原理

校验检测的基本原理图见图2。采用可调整流模块模拟站用直流电源系统的正、负极母线及相应的直流电压，并且连接数条直流输出支路。支路接有可调的电阻器和电容器用于设置不同的直流接地状况，模拟变电站站用直流电源系统的运行工况。

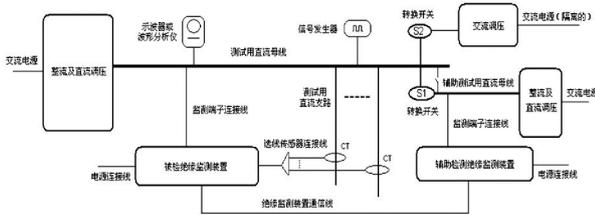


图2 绝缘监测装置校验的原理图

交流电源通过转换开关叠加在平衡桥检测电阻上，模拟外部工频交流量的窜入和对检测桥交流电压的耐受能力测试。

接入母线的信号发生器用于交流窜入的检测或考核验证被检直流电源绝缘监测装置对外部窜入交流量的测量、记录和分析能力。

接入母线的示波器，用于测量、记录和分析直流母线电压位移和波动的波形。

此外，可另接一个可调整流模块，测试两段直流母线发生同极或异极互窜和环网时（两段独立的直流母线仅一极出现的非正常连接为互窜，两极出现的连接为环网），直流电源绝缘监测装置的故障判断能力。

### 2.2 校验检测方法的实现

按照 Q/GDW 1969 - 2013 的要求评测的项目有接地故障监测、接地选线、交流窜入、直流互窜、直流合环及相应测记功能等，就接地故障监测和接地选线为例，根据校验装置的部分检测电路图（见图3），阐述校验检测方法的实现。

#### 1) 1条支路下的单极（正极或负极）检测

合上 K01 调节 C01 电容值，在 0 ~ 100 μF 范围

中合理选择多个测试值（如 0、10 μF、30 μF、50 μF、80 μF、100 μF），再合上 K11 并分别在每个 C01 电容值下，调节 R11 电阻值至被测产品发出告警，示波器测量记录各测试点的正、负极对地电压值（直流电压偏移）。告警一般分绝缘预警和接地报警，在被测产品完成接地选线后，分别记录告警显示内容，读取绝缘预警和接地报警时的 R11 电阻值与被测产品显示值，进行绝缘电阻（接地电阻值）监测误差计算和接地选线正确性判断，完成后断开 K01 和 K11，并调节 R11 电阻值至最大值。

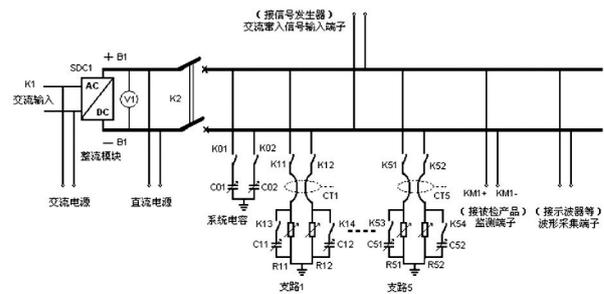


图3 校验装置的部分检测电路图

合上 K11 和 K13，调节 C11 电容值，在 0 ~ 5 μF 范围中合理选择多个测试值（如 0、1 μF、3 μF、5 μF），并分别在每个 C11 电容值下调节 R11 电阻值，至被测产品发出告警，示波器测量记录各测试点的正、负极对地电压值（直流电压偏移）。在被测产品完成接地选线后，分别记录告警显示内容，读取绝缘预警和接地报警时的 R11 电阻值与被测产品显示值，进行支路绝缘电阻（接地电阻值）监测误差计算和接地选线正确性判断，完成后断开 K13 和 K11，并调节 R11 电阻值至最大值。

#### 2) 两条支路下的单极（正极或负极）检测

每一极的检测方法和步骤参照 1) 进行，结合不同的组合方式，清楚地记录告警显示内容和正、负极对地电压最大值（直流电压偏移），读取调节的电阻值与被测产品显示值，进行各极的绝缘电阻（接地电阻值）监测误差计算和接地选线正确性判断，完成后断开相应的支路断路器，并调节电阻值至最大值。

#### 3) 一条支路正极和另一条支路负极的检测

每一极的检测方法和步骤参照 1) 进行，但两极的电阻器和电容器按等值调节，每种组合方式下清楚地记录告警显示内容和正、负极对地电压最大幅值（直流电压波动），读取调节的电阻值与被测产品

（下转第 61 页）

[2] Philip M, Ashmore P. Flexible AC Transmission Systems II Methods of Transmission Line Compensation [J]. Power Engineering Journal, 1996, 10(6): 273-278.

[3] 王仲鸿, 沈斐, 吴铁铮. FACTS 技术研究现状及其在中国的应用与发展 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(23): 1-5.

[4] 张爱国, 韩军锋, 蒋程. 基于神经网络自适应 PI 控制的 SSSC 潮流控制器 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 15-19, 24.

[5] 张爱国, 张建华, 蒋程. 静止同步串联补偿器的恒阻抗模型及其双闭环控制策略 [J]. 电网技术, 2010, 34(3): 106-111.

[6] 钱碧甫, 王奔, 徐万良. SSSC 滑模控制策略研究 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(7): 39-42, 46.

[7] 颜伟, 吴文胜, 华智明, 等. SSSC 非线性控制的直接反馈线性化方法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 65-68.

[8] 李娟, 周兴福, 李淑琴. 基于精确反馈线性化方法的 SSSC 非线性控制器 [J]. 电网技术, 2008, 32(22): 12-15.

[9] 赵洋, 肖湘宁. 基于微分几何方法的静止同步串联补偿器非线性控制 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(4): 132

-136.

[10] 刘永江. UPFC 控制策略研究及其对电力系统的影响 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011: 1-24.

[11] 焦晓红, 关新平. 非线性控制系统分析与设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 18-43, 94-120.

[12] 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: 143-183.

[13] 黄崇鑫. 统一潮流控制器控制策略的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009: 1-78.

[14] Jiang X, Xiao X N, Zhao Y. Study on Main Circuit Selection and Single Phase SVPWM Algorithm of SSSC [C]. 2006 International Conference on Power System Technology, 2006: 1-6.

作者简介:

贺双双(1989), 助理工程师, 硕士研究生, 毕业于西南交通大学电气工程学院;

曹建军(1968), 高级工程师, 本科, 毕业于新疆工学院;

陈智迪(1988), 助理工程师, 硕士研究生, 毕业于西南石油大学电子信息学院。

(收稿日期: 2015-05-04)

(上接第45页)

显示值, 进行各极的绝缘电阻(接地电阻值)监测误差计算和接地选线正确性判断, 完成后断开相应的支路断路器, 并调节电阻值至最大值。

4) 校验检测结果评判

完成全部组合方式的检测后, 按极性(正极或负极)选出最大误差值, 即是被测产品的误差, 根据接地选线的误选和漏选次数给予正确率判断。再依据示波器记录得到直流电压偏移和直流电压波动的最大值并给出是否超值的判断。

3 结论

依据对变电站直流电源系统用绝缘监测装置的校验检测技术与验证方法的研究, 按照 Q/GDW 1969-2013《变电站直流系统绝缘监测装置技术规范》的要求, 对涉及电力系统的发电厂升压站、变电站、换流站等站用直流电源绝缘监测装置, 采用 1 种

校验方法与装置, 实现了对其运行安全性、故障监测可靠性等方面的测评, 也为开展绝缘监测装置的运行维护和状态检修提供了参考, 以期最大限度地避免劣质产品引发或扩大电网事故。

参考文献

[1] 赵梦欣, 陈国峰, 余成伟. 直流电源系统绝缘监测的直流漏电流改进方案 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 83-88.

[2] 李瑞平, 温泉. 直流系统接地故障的分析 [J]. 华电技术, 2008, 30(2): 58-61.

[3] 徐卫, 李晶. 加强直流电源系统运行维护和专业管理 [J]. 电源技术应用, 2007(3): 84-85.

[4] 赵兵, 张曼诗, 徐玉凤. 直流系统微机型绝缘监察装置电阻选择的依据 [J]. 中国新技术产品, 2009(23): 160-161.

(收稿日期: 2015-05-14)

# 关于并网电厂涉网保护定值配合研究

安化龙, 范小涛, 陈默

(四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610016)

**摘要:** 有关整定导则对于涉网保护的定值计算及时限配合提出了要求, 但针对各个电网公司的不同运行方式, 并不是完全适用。以四川电网为例, 结合具体涉网保护配置整定, 论述了涉网保护的绝大部分较为常见的问题, 最终讨论并制定出了涉网保护整定定值和动作时间配合的解决方案。

**关键词:** 涉网保护; 运行方式; 保护整定; 保护时限配合; 网源协调

**Abstract:** The related setting guides provide the requirements for setting calculation and time coordination of grid-related protection, but according to the different operating mode of each power company, these guides are not completely applicable. Taking Sichuan power grid as example and combined with the detailed configuration and setting of grid-related protection, the most common problems of grid-related protection are proposed, and finally the solutions for setting values and actuation time coordination of grid-related protection are discussed and formulated.

**Key words:** grid-related protection; operating mode; protection setting; protection time coordination; power grid coordination

中图分类号: TM74 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0046-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.012

## 0 引言

网源协调是指电网和并网电厂在运行和管理方面的技术协调的总称。并网电厂涉网保护配合是指和并网电厂运行相关需要和电网相关保护配合的总称, 属于网源协调技术协调的重要组成部分, 目前随着电网的日趋增大, 并网电厂对于相关保护的配置、正确选型以及定值的合理整定是非常重要的, 对于并网电厂来说, 在系统发生故障时, 快速切除相关故障使电网和电厂的损失降到最低, 从而确保设备的安全性和系统的稳定性。

## 1 涉网电厂相关保护定值整定及时限配合

从四川电网大型水/火电机组的运行实践出发, 对并网电厂主要的涉网保护配置整定, 进行了详细的分析, 以供电厂的相关工程技术人员借鉴。

对于涉网电厂的保护整定和配置, 目前绝大部分电厂都是参照 GB/T 14285-2006《继电保护和自动装置技术规程》、DL/T 684-2012《大型发电

机变压器继电保护整定计算导则》、【2012】352号《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》以及所在电网的技术反措来配置整定。随着大容量发电机、变压器保护根据不同厂家发展了一些新原理以及每年电网运行方式的变化, 定值计算需要相应的指导原则, 而保护定值设定除依据保护动作判据外, 在很大程度上需要结合设备现场安装、运行的实际情况做相应的调整, 故相关涉网机组保护都应随之进行相应的修改, 以满足继电保护“四性”的基本要求。而依据电网结构和继电保护配置情况, 应按相关规定进行继电保护的整定计算。当灵敏性与选择性难以兼顾时, 应首先考虑以保灵敏度为主, 防止保护拒动, 并备案报主管领导批准<sup>[3]</sup>。

根据多年对于大型发电机变压器保护的整定计算经验, 针对目前四川省电力公司并网电厂的涉网保护提出了一些实际整定经验, 供相关工程技术人员借鉴。

## 2 涉网电厂的主要保护配合

### 2.1 主变压器/启备变压器高压侧接地后备保护整定

主变压器/启备变压器高压侧星型接线的高压侧零序过流保护:设计规范要求一般在电压等级为110 kV 及以上的变压器,在高压侧直接接地运行的变压器需装设接地故障的零序电流保护。对双绕组变压器可由两段式零序过电流保护构成,三绕组普通变压器零序过流可采用外接零序电流或自产零序电流,而对高、中压侧均直接接地的三绕组变压器,高、中压侧侧均应装设带方向的零序过电流保护<sup>[5]</sup>。

一般对于并网电厂而言,主变压器/启备变压器高压侧零序过流保护需要和系统侧接地后备保护进行配合,对大型机组一般配置两段零序过流保护,而大部分并网电厂的主变压器/启备变压器高压侧零序过流保护由调度提供,对需要自己整定的涉网电厂机组,零序 I、II 段根据实际整定经验从保护的灵敏性、可靠性和选择性综合考虑。

零序 I 段考虑到保护的灵敏性和选择性可按照下述两种整定原则。

1) 零序 I 段:

①按最小运行方式下变压器高压侧母线单相接地短路来整定,按灵敏度为 2 来进行计算。

$$I_0 = (1 / Z_{\Sigma}) \frac{S_B}{\sqrt{3} U_{AV} n_T}$$

式中:  $Z_{\Sigma} = Z_1 + Z_2 + Z_0$  (折算到  $S_B = 100$  MVA,  $U_B = U_{AV}$  (平均电压) 下折算到短路点的各序阻抗的标么值之和)。

最终确定动作电流  $I_{0.OP} = K_{obra} 3I_0 / 2$

式中: 最大分支系数  $K_{obra}$  是指在最小运行方式下线路保护区末端发生接地时,流过保护零序电流与流过线路零序电流比。

②按照零序 I 段动作电流应与相邻线路 II 段零序过流保护配合(多条线路可分别计算)。

$$3I_{g.0} = K_{rel} \times K_{obra} \times 3I_{g.0. II} / n_{TA}$$

式中:  $K_{rel}$  为可靠系数,取 1.1;  $n_{TA}$  为主变压器高侧零序 TA 变比;  $K_{obra}$  为分支系数计算方法同上;  $3I_{g.0. II}$  为与之配合的相邻线路零序过流保护 II 段电流动作值(一次值)。

灵敏度校验: 灵敏度  $K_{sen} \geq 1.5$

$$K_{sen} = \frac{3I_{0.min}}{I_{g.0n_a}}$$

式中:  $3I_{g.0.min}$  为最大运行方式下对侧母线发生接地

短路时流过保护的最小短路电流;  $I_{g.0}$  为零序保护动作电流;  $n_a$  为保护用零序 TA 变比。

最终根据两种取值的大小对应不同灵敏度下的动作值,可报批相关主管部门领导,若优先选择灵敏度,则可选择较小的保护定值,若优先考虑选择性,可选用满足灵敏度要求的前提下较大的保护定值。

动作时限可和相邻线路 II 段零序过流保护的配合时间配合,级差取 0.3 ~ 0.5 s。

2) 零序 II 段: 相邻线路末段零序过电流保护配合计算,与相邻线路 III 段零序过流动作值配合。

$$3I_{g.0} = K_{rel} \times K_{obra} \times 3I_{g.0. III} / n_{TA}$$

式中:  $K_{obra}$  为分支系数,计算同上;  $3I_{g.0. III}$  为与之配合的相邻线路零序过流保护 III 段电流动作值(一次值)。

结合四川电网实际情况,由于四川电网线路零序一般配置 3 段,在电流配合满足的前提下,考虑到主变压器、启备变压器的安全,通常建议两种整定原则。

①低灵敏度短时限: 分支系数可取 1<sup>[1]</sup>,校验灵敏度满足  $\geq 1.5$  后,动作时间可低于线路零序 III 段时间可不必线路最末端时限配合,动作时限可在线路零序二、三段时限之间取值。

②高灵敏度长时限,分支系数此时取最大分支系数,计算公式如零序 I 段,动作时限可和线路接地保护最长时限配合。同时校验灵敏度需满足母线故障灵敏度  $\geq 1.5$ 。

2.2 主变压器高压侧间隙零序保护整定

间隙保护的作用是保护中性点不接地变压器中性点绝缘是安全的,于是一般在变压器中性点对地之间安装一个击穿间隙。在变压器不接地运行时,若由于某种原因使变压器中性点对地电压升高超过设定值,间隙被击穿,产生了间隙电流。如系统发生接地故障后,当系统失去中性点直接接地,而又发生单相接地,在高压侧母线的开口 TV 将会产生很大的电压,基于此必须对中性点不接地的主变压器配置间隙零序保护。

整定经验: 对于不接地主变压器的并网电厂,基于四川电网某 500 kV 变电站上网电厂出现过间隙零序过流和过压不正确动作,间隙被瞬间击穿的情况,考虑到运行实际,一般在定值整定过程中,主变

压器高压侧间隙过流和过压的出口应分开,若动作时间不能分别整定的,可联系保护设备厂家,通过更改升级软件配置时限此功能。

主变压器间隙过流根据经验,一次动作电流取100 A,间隙零序电流 $3I_{0\text{avg}}$ 的整定为

$$3I_{0\text{avg}} = 100/n_T$$

式中: $n_T$ 为间隙零序TA的变比。

主变压器间隙零序过流动作时间按躲过暂态过电压的时限偏短,根据实际经验应躲过线路非全相时间并适当延长,可取1.3~2.0 s。

主变压器间隙过压当系统失去接地的中性点,而又发生单相接地时,此时在开口三角形电压应为 $3U_0 = 300\text{ V}$ ;但由于电磁性电压互感器伏安特性, $3U_0 = 200\text{ V}$ ,电压互感器已经趋于饱和,故考虑到饱和的原因一般取150~180 V。时限可按躲过暂态过电压来整定,取0.3 s,若部分保护厂家由于动作时限已固化为0.5 s,可按0.5 s取值。

### 2.3 主变压器/启备变压器高压侧复压过流动作时限整定

主变压器/启备变压器高压侧相间短路故障保护时限需要和系统的相间后备保护配合,主变压器高压侧相间短路故障按照大型发电机整定导则<sup>[5]</sup>建议应与相邻出线后备保护最长动作时间配合。

根据每个电网的实际情况应有所差异,对于四川电网线路相间保护一般配置3段,在电流满足灵敏度的前提下,考虑到主变压器、启备变压器的设备运行安全考虑,可不必严格按照整定导则要求与线路相间故障最长相间保护配合(如此配置主变压器/启备变压器后备保护动作延时皆在5.5 s以上,发电机相间后备时限会在6 s左右),保护动作时限可和线路相间保护II段配合,级差取0.3~0.5 s。

### 2.4 发电机基波定子接地保护整定

按照常规整定原则,分下述两种情况。

如定值有高定值段和低定值段,高定值一般整定为15~25 V,因为高定值已经躲过了主变压器高、低压绕组间的相耦合电容 $C_M$ 传递到发电机侧的零序电压,故动作时限一般取0.3~0.5 s。

低定值整定遵循以下原则:

1) 可靠躲过发电机正常运行时实测的最大基波零序不平衡电压;

2) 躲过发电机变压器组高压侧单相接地时耦合到发电机侧的最大零序电压。关于系统高压侧接地短路时,通过主变压器高、低压绕组间的相耦合电

容 $C_M$ 传递到发电机侧的零序电压 $U_{g0}$ 的计算如下。

分两种情况,主变压器高压侧中性点直接接地时计算方式如下所示:

$$\text{等值阻抗 } Z_{\text{con}(a)} = \frac{Z_n}{j\omega(C_{g\Sigma} + \frac{C_M}{2})Z_n + 1}$$

$$U_{g0} = E_0 \frac{Z_{\text{con}(a)}}{Z_{\text{con}(a)} + \frac{1}{j\omega \frac{C_M}{2}}}$$

主变压器高压侧中性点不接地时,计算方式为

$$Z_{\text{con}(b)} = \frac{Z_n}{j\omega C_{g\Sigma} Z_n + 1}$$

$$U_{g0} = E_0 \frac{Z_{\text{con}(b)}}{Z_{\text{con}(b)} + \frac{1}{j\omega C_M}}$$

式中: $E_0$ 为为系统侧接地短路时产生的基波零序电动势,根据经验,可取 $E_0 = 0.6U_{Hn}/\sqrt{3}$ , $U_{Hn}$ 为主变压器高压侧母线额定线电压; $C_{g\Sigma}$ 为发电机及机端外接元件每相对地总电容; $C_M$ 为主变压器高、低压侧绕组间的相耦合电容(由变压器出厂实验数据提供,如无提供,可按如下公式取经验值)。

$$C_M = K_{M0} \sqrt{S_n} \times 10^{-4}$$

式中: $S_n$ 为变压器三相额定容量; $K_{M0}$ 为系数,具体取值和变压器的 $U_n$ 额定电压有关,具体参见图1<sup>[5]</sup>。

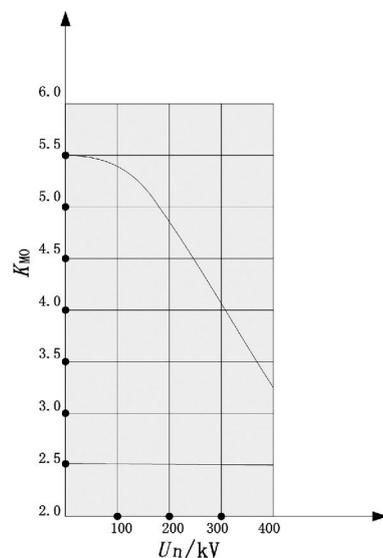


图1 系数 $K_{M0}$ 与变压器额定电压的关系曲线

实际整定过程中,基波定子接地的动作时限可按如下两种方式整定:

1) 若主变压器设备厂家提供参数齐全,可按上

述公式进行计算。若发电机基波定子接地电压低定值大于主变压器高、低压绕组间的相耦合电容  $C_M$  传递到发电机侧的零序电压,则保护动作时限取  $0.3 \sim 0.5$  s。

若发电机基波定子接地电压低定值低于主变压器高压侧耦合到机端的零序电压,则延时应于主变压器高压侧接地保护配合。和上一级保护配合级差取  $0.3 \sim 0.5$  s。

2) 对于一些较老的机组保护,发电机基波定子接地定值项仅有低定值段,并且主变压器厂家并无提供耦合电容值,在此情况下,根据四川涉网电厂整定计算经验,一般主变压器高压侧耦合到机端的零序电压电压值都小于  $10$  V,可按下面两种情况考虑:①定子基波零序电压定值可取  $10$  V,按满足灵敏度的原则考虑,保护发电机设备,时限可取  $0.3 \sim 1$  s;②定子基波零序电压定值可取  $5$  V,按满足选择性的原则考虑,时限和主变压器高压侧接地保护配合,大于主变压器最长接地保护一个级差,级差可取  $0.3 \sim 0.5$  s。

### 2.5 发电机相间短路故障的后备保护时限整定

可和主变压器高压侧相间后备保护的时限配合,时限取  $0.3 \sim 0.5$  s,并尽可能地缩短级差。特别注意对于自并励系统的发电机复压过流保护,考虑到由于励磁变压器接在发电机出口,当外部故障而主保护拒动时,正常后备保护应动作,可由于发电机出口电压降低,会造成转子电流减少,进而使定子电流减少使保护返回。为此设计了记忆过流保护,记忆故障初的电流而忽略以后的电流。记忆过流保护应为微机保护作为发电机内部短路故障和区外短路故障的后备保护,故带有低压记忆功能的发电机复压过流保护记忆时间应长于保护动作时间1个级差。

### 2.6 发电机失磁保护

对于失磁保护低电压判据的整定,优先采用定子阻抗判据与机端低电压判据<sup>[4]</sup>,然而对于部分较老的机组发电机失磁保护仍采用系统低电压判据,即采用主变压器高压侧母线电压做为判据,当发电机发生失磁的情况下,由于系统容量较大,如系统低电压整定不当,失磁保护系统低电压动作判据方式逻辑很难打开,故根据经验,对于主变压器高压侧电压等级  $500$  kV 的系统,系统低电压定值整定应不低于  $490$  V(一次值),对于主变压器高压侧电压

等级  $220$  kV 的系统,系统低电压定值整定应不低于  $209$  V(一次值)。

失磁保护定值整定完成后,应根据国家电网网源协调的要求,发电机的失磁保护应和励磁系统的低励限制进行配合校验。这里主要对很多电厂较为困惑的发电机失磁保护和励磁调节器的低励限制配合进行实例说明,供电厂相关工程技术人员参考。

1) 励磁调节器低励限制和发电机失磁保护配合,整定导则要求,失磁保护的阻抗判据不应先于励磁低励限制动作,由于低励限曲线坐标是整定的功率,而失磁保护一般曲线都为阻抗特性,由于将低励限制的功率特性映射到失磁保护的阻抗特性上是离散的表达式,故方便起见将失磁保护的阻抗圆坐标统一到低励限制现在的功率坐标进行配合。一般低励曲线有3种:①直线型;②圆型;③功角型<sup>[6]</sup>。国内的失磁保护配置的定子阻抗判据一般有静稳极限阻抗圆(及滴状阻抗曲线)和异步边界阻抗圆两种。

由于静稳阻抗圆比异步阻抗圆更加灵敏,配合计算相对复杂,下面以国内某  $100$  MW 水机组的静稳极限阻抗圆为例,对发电机失磁保护和低励限制的配合进行浅显易懂的整定配合计算。

发电机参数:额定电压  $U_n = 13.8$  kV,额定容量  $S_n = 114.3$  MVA,纵轴同步电抗  $X_d = 0.9926$ ,机端 TA 变比  $6000/1 = 6000$ ,机端 TV 变比  $13.8$  kV/ $0.1 = 138$ ,变压器容量  $S_n = 120$  MVA,短路阻抗  $13\%$ 。

根据励磁调节器调度定值参数可得表1。

表1 调度提供的低励限制定值

		低励限制定值(标么值)				
$P$		0	0.25	0.5	0.75	1
$Q$		-0.46	-0.42	-0.38	-0.31	-0.22

由于使用的是静稳圆,对于水机组而言,  $X_d \neq X_q$ ,静稳圆为水滴状的曲线。

2) 因为最终讨论决定失磁保护为静稳极限阻抗圆,水轮发电机组故障阻抗圆为滴状曲线,参数如下:

$$X_c = X_{con} \frac{U_n^2 n_a}{S_n n_v}$$

式中:  $X_{con}$  为系统处于最小运行方式下(1台机组运行)发电机与系统间的联系电抗标么值(以发电机容量为基准)。

$$X_{con} = (0.07883 \frac{114.3}{100} + 0.13 \frac{114.3}{100} + 0.2069) = 0.4208$$

$$X_b = \frac{X_q U_n^2 n_a}{S_n n_v}$$

阻抗圆心:  $X_c = -(X_r + |X_c|)$

阻抗圆半径  $X_r$ : 当阻抗圆为静稳阻抗圆时,  $X_r$  为  $0.5|X_c - X_b|$ 。取  $X_r = 38.77 \Omega$ 。

由于取标么值, 统一折算到发电机容量下得: 圆心为  $[0, -j0.1144]$ , 圆半径  $R = 0.5352$  (皆由有名值转换为标么值), 圆内为动作区域, 其方程为

$$R^2 + (X + 0.1144)^2 < 0.5352^2$$

考虑  $U_{\cos} \Phi_N / I = R$ ,  $U_{\sin} \Phi_N / I = X$ ,  $P = UI_{\cos} \Phi_N$ ;

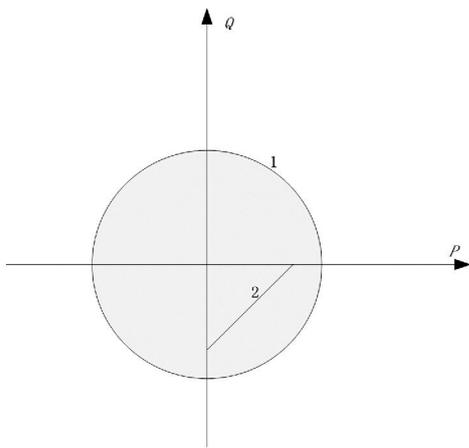
$Q = UI_{\sin} \Phi_N$  代入上述方程得

$$P^2 + (Q + 0.4185U^2)^2 < (1.9579U^2)^2$$

考虑工程实际, 按照较为极端的情况考虑, 静稳圆应留有 10% 的储备系数, 即静稳圆圆心和半径乘以系数 0.9, 机端电压最低允许取  $0.9PU$ , 代入得

$$P^2 + (Q + 0.305)^2 < (1.4273)^2$$

由于  $r^2 > a^2 + b^2$  ( $r$  为圆心;  $a$  为静稳圆圆心横坐标;  $b$  为静稳圆圆心纵坐标), 故阻抗圆映射到  $P-Q$  平面的阻抗圆内为稳定运行区, 圆外为动作区, 见图 2。



注: 1 为失磁保护曲线; 2 为低励限制曲线。

图 2 失磁保护和低励限制配合关系图

低励限制曲线位于圆内, 为失磁保护的稳定运行区, 故低励限制先于失磁保护动作。由上可见发电机低励限制与失磁保护配合的整定计算是正确的。

### 3 结 语

与传统整定导则的整定原则相比, 基于四川电网

的涉网保护整定原则结合四川电网涉网电厂实际, 更符合设备安全运行和继电保护“四性”的要求。

目前, 基于四川电网的整定原则已在四川部分电厂的涉网保护定值整定中得到应用。

#### 参考文献

- [1] 高春如. 大型发电机机组继电保护整定计算与运行技术(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 277 - 279.
- [2] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 136 - 138.
- [3] 国家能源局[2014]161号. 防止电力生产事故的二十五项重点要求[S].
- [4] 国家电网公司十八项电网重大反事故措施(修订版) [S].
- [5] DL/T 684 - 2012 大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S].
- [6] 裘渝涛, 陈水耀, 陈俊, 等. 一种基于阻抗特性的发电机低励限制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 116 - 118.
- [7] 郭春平, 余振, 殷修涛. 发电机低励限制与失磁保护的配合整定计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 130 - 131.
- [8] 刘一丹, 张小易, 崔晓祥. 火电厂发电机失磁保护阻抗判据的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 235 - 240.
- [9] 陈新美, 李亚萍, 赵丽萍. 微机低励失磁保护特性曲线的两种测试方法[J]. 电力系统保护与控制, 2001, 29(6): 43 - 44.
- [10] 严伟, 陈俊, 沈全荣. 大型隐机发电机进相运行的探讨[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 94 - 97.

作者简介:

安化龙(1979), 硕士, 工程师, 从事四川省电力公司电源技术中心继电保护技术管理及并网电厂的电气主设备保护整定工作;

范小涛(1965), 本科, 高级工程师, 从事四川省电力公司电源技术中心继电保护技术管理及并网电厂的技术监督管理工作, 为国家电监会首批电力安全生产标准化达标评级专家;

陈默(1975), 本科, 工程师, 从事四川省电力公司电源技术中心继电保护技术管理工作, 为海外工程及国内调试项目的调试项目经理。

(收稿日期: 2015 - 04 - 07)

# 基于 PMU/SCADA 混合量测状态估计及不良数据检测方法

许 勇

(西南交通大学电气工程学院,四川成都 610031)

**摘要:**充分利用 PMU 量测及 SCADA 量测值,讨论并发展了一种基于 PMU/SCADA 混合量测的电力系统状态估计及不良数据检测方法。首先利用快速分解状态估计得到估计结果,再将状态估计结果和 PMU 量测值进行二次线性状态估计。同时利用二次线性状态估计更新残差协方差矩阵的方式来对 SCADA 量测量中的关键量测量是否存在不良数据进行检测。最后采用 IEEE 30 节点系统验证了该方法的有效性。

**关键词:**电力系统;相量测量单元;混合状态估计;不良数据检测

**Abstract:** A new state estimation method for bad data detection and identification based on PMU/SCADA hybrid measurement is presented by making full use of PMU and SCADA measurements. At first, the rapid decomposition state estimation is done on the condition of taking nodes' status values measured by SCADA, and then the linear state estimation is done with both state estimation results and PMU measurements. Meanwhile, whether there is bad data or not in critical measurements in SCADA is detected and identified by using the second linear state estimation to update the residual covariance matrix. Finally the effectiveness of the model is verified by the numerical calculation results of IEEE-30 bus system.

**Key words:** power system; phasor measurement unit (PMU); hybrid state estimation; bad data detection

中图分类号: TM7 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0051-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.013

## 0 引言

电力系统状态估计(state estimator)是电力调度中心能量管理系统(energy management system, EMS)非常重要的组成部分,更是电网安全评估、预防控制和运行分析等各种高级应用的基础<sup>[1]</sup>。其基本原理是根据量测数据的冗余度,按照最佳估计准则对生数据进行相关处理,使得量测数据更好的接近真实值。

近年来,同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)相对于数据监控及采集系统(SCADA)能对测量节点提供更高精度的相量测量。但是 PMU 量测装置成本较高,不能在短时间内将 SCADA 完全取代,这将会与 SCADA 长期共存<sup>[2]</sup>,因此,将 SCADA 和 PMU 量测相结合进行混合状态估计是一种比较理想的方法。目前相关研究已经取得了一定的成果<sup>[3-6]</sup>,文献[7]提出了二次状态估计的思想,这对提高状态估计的精度有明显提高,但是耗时较长,通过对非线性状态估计进行优化的方法,这样既

可以提高状态估计的精度、缩短估计运行时间,又能很好地满足电力系统实时性的要求。

评价一种状态估计算法是否优良,不仅要保证该算法能够高效快速地估计出电力系统中状态量的值,同时具备一定的不良数据处理能力,以确保状态估计结果的准确性。首先对混合量测电力系统状态估计算法进一步探讨,并提出了一种对 SCADA 量测量中的关键量测量出现不良数据的检测方法,最后,通过实验验证了该方法的有效性。

## 1 混合量测线性状态估计算法

### 1.1 非线性状态估计模型

快速解耦状态估计算法是将加权最小二乘法进行了改进,其量测量是通过 SCADA 获取,其数学模型为

$$Z = \begin{bmatrix} Z_a \\ Z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_a(\theta, \mu) \\ h_r(\theta, \mu) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $Z_a$  和  $Z_r$  分别为电压幅值和电压相角的量测数据;  $v_a$  和  $v_r$  分别为电压幅值和电压相角的量测误差。

由于在电网中电压幅值  $U$  主要受无功功率  $Q$

的影响,节点相角  $\theta$  主要受有功功率  $P$  的影响,因此  $Z_a$  主要是支路有功功率或有功注入量测量,  $Z_r$  主要是支路无功功率或无功注入量测量。

同样地,雅可比矩阵可改写为

$$H(\theta, \mu) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_a}{\partial \theta} & \frac{\partial h_a}{\partial u} \\ \frac{\partial h_r}{\partial \theta} & \frac{\partial h_r}{\partial u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{aa} & H_{ar} \\ H_{ra} & H_{rr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

同时,权值矩阵也可以分解为有功和无功两部分,即

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} R_a^{-1} & 0 \\ 0 & R_r^{-1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于节点电压幅值主要受无功功率影响,节点电压相角主要受有功功率影响,式(2)中  $H_{ar} \approx 0$  及  $H_{ra} \approx 0$ 。于是信息矩阵可以写成

$$H^T R^{-1} H = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_a^T}{\partial \theta} & R_a^{-1} \frac{\partial h_a}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & \frac{\partial h_r^T}{\partial u} & R_r^{-1} \frac{\partial h_r}{\partial u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于信息矩阵一般为稀疏矩阵,由潮流计算可得  $[H^T(\hat{x}^{(l)}) R^{-1} H(\hat{x}^{(l)})] \Delta \hat{x}^{(l)} = H^T(\hat{x}^{(l)}) R^{-1} [z - h(\hat{x}^{(l)})]$

将式(4)带入式(5)右端,可得迭代修正方程为

$$\begin{aligned} A \Delta \theta^{(l)} &= a^{(l)} \\ B \Delta u^{(l)} &= b^{(l)} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:

$$\begin{aligned} a^{(l)} &= \left[ \frac{\partial h_a^T}{\partial \theta} \quad \frac{\partial h_r^T}{\partial \theta} \right] R^{-1} [z - h(\theta, \mu)] \Big|_{\theta=\theta^{(l)} \mu=u^{(l)}} \\ b^{(l)} &= \left[ \frac{\partial h_a^T}{\partial u} \quad \frac{\partial h_r^T}{\partial u} \right] R^{-1} [z - h(\theta, \mu)] \Big|_{\theta=\theta^{(l)} \mu=u^{(l)}} \end{aligned} \quad (7)$$

### 1.2 线性状态估计模型的建立

将电力系统各节点和支路的实部电流和虚部电流及快速解耦状态估计结果用直角坐标的各节点电压向量表示,然后可以得到电力系统线性量测方程组,其数学模型为

$$M = H_h \hat{V} + \varepsilon \quad (8)$$

式中:  $H$  为量测量的雅可比矩阵;  $\hat{V} = [V_R V_I]^T$  为节点电压状态向量的实部和虚部;  $\varepsilon$  为量测误差向量。

线性状态估计模型量测量包括:快速解耦状态估计结果  $[V_R V_I]_{SE}^T$ , PMU 节点电压相量量测

$[V_R V_I]_{PMU}^T$  以及由 PMU 支路电流相量量测  $[I_R I_I]_{PMU}^T$ 。

由于雅可比矩阵高度稀疏,且与系统拓扑及参数无关,从而大大简化了线性状态估计的计算量。对于上面的量测方程,由加权最小二乘原理可以求得线性状态估计计算式为

$$\hat{V} = (H_h^T R_h^{-1} H_h)^{-1} H_h^T R_h^{-1} M \quad (9)$$

$$H_h = \begin{bmatrix} I \\ I' \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \\ I' & 0 \\ 0 & I' \\ C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $I$  为单位矩阵;  $I'$  为量测相量对角矩阵为 1;  $C_1$  到  $C_4$  为电流量测量线路电导和线路导纳;  $R_h = \begin{bmatrix} R_c & 0 \\ 0 & R_p \end{bmatrix}$  为各量测的权重值。

## 2 不良数据检测

当系统量测冗余度较低时,系统中可能存在关键量测量,而关键量测量不是一个冗余量测量。如果将关键量测量从量测系统中删除,将导致系统不可观测,因此,利用 PMU 量测信息来提高整个系统的量测冗余度并对 SCADA 量测中关键量测量出现不良数据时进行检测。检测的基本公式为

$$\hat{r}_N = (\text{diag} D)^{-1/2} \hat{r} \quad (11)$$

式中:

$$\hat{r} = z - h(\hat{x}) \quad (12)$$

$$D = \text{cov}(r) = R - H(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T \quad (13)$$

### 1) 非关键量测量的不良数据检测

$$\hat{r} = z - h(\hat{x}_c) \quad (14)$$

$$D_c = \text{cov}(r) = R_c - H_c(H_c^T R_c^{-1} H_c)^{-1} H_c^T \quad (15)$$

式中:  $R_c$  和  $H_c$  分别是来自传统状态估计的量测误差的协方差矩阵和雅可比矩阵。

### 2) 关键量测量的不良数据检测

$$\hat{r} = z - h(\hat{x}_h) \quad (16)$$

$$D = \text{cov}(r)$$

$$= R_c - H_c [(H_c^T R_c^{-1} H_c)^{-1} + H_p^T R_p^{-1} H_p]^{-1} H_c^T \quad (17)$$

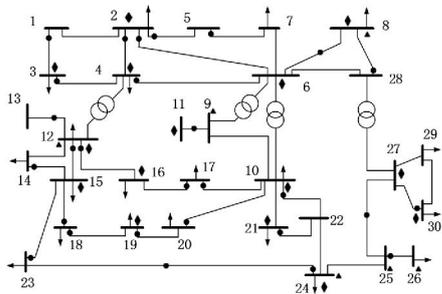
式中:  $R_p$  和  $H_p$  分别是混合量测状态估计的量测误

差的协方差矩阵和雅克比矩阵。

在正常情况下 标准化残差  $\hat{r}_N$  是一个高斯随机变量,服从期望值为 0、方差为 1 的标准正态分布。对于标准化残差最大值  $\hat{r}_N^{\max} > 2.81$  的数据可以被认为是不良数据 因此出现这种可能的概率是 0.27%,属于小概率事件 然后将该不良数据对应的量测量进行处理。

### 3 算例分析

采用 IEEE 30 节点系统对该算法进行算例分析。PMU 装置装设位置为 8、9、12、24、25 节点,如图 1 所示。仿真软件选用 Matlab 7.0。其中,SCADA 量测值和 PMU 量测值都是在潮流计算结果的基础上分别叠加  $10^{-2}$  和  $10^{-4}$  的正态分布随机量测误差,没有加入 PMU 量测量之前,整个 SCADA 量测系统是完全可以观测的,并且冗余度的比例保持在 1.1 到 1.3 之间。所有的检测情况都将检测的阈值设置为 2.81(99.5%的置信度)。



注: SCADA 量测中 ● 为支路潮流有功/无功功率; ◆ 为节点注入有功/无功功率; ■ 为节点电压幅值; PMU 量测中 ○ 为支路电流相量; ▲ 为节点电压相量。

图 1 IEEE 30 节点网络系统接线图

本次实验主要对以下几种情况进行了如下分析。

#### 1) 状态估计结果对比

图 2 和图 3 分别给出了所提方法、加权最小二乘法、潮流真值的电压幅值和相角的对比结果。

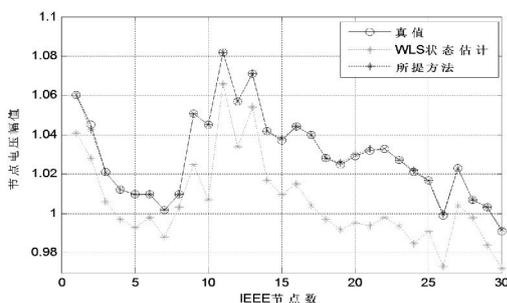


图 2 IEEE 30 节点系统的电压幅值对比结果

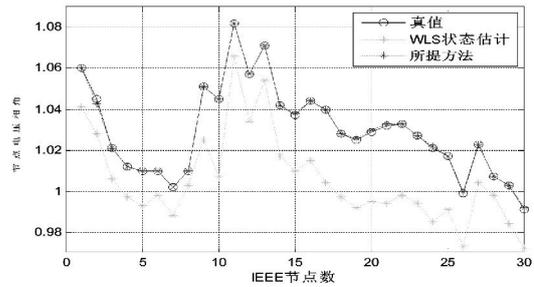


图 3 IEEE 30 节点系统的电压相角对比结果

为了更加清晰地对比所提方法,图 4、图 5 给出了所提方法和加权最小二乘法与真值的绝对误差对比结果。

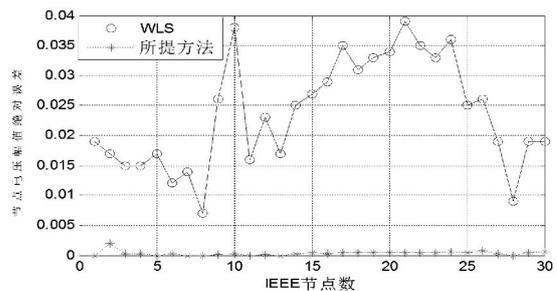


图 4 IEEE 30 节点电压幅值绝对误差对比结果

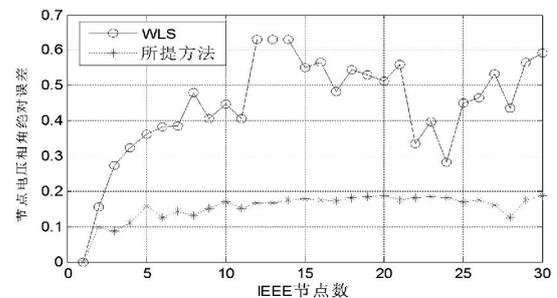


图 5 IEEE 30 节点电压相角绝对误差对比结果

通过图 4、图 5 绝对误差对比结果可以得出,所提出的方法对状态估计结果有明显的提高。

#### 2) 非关键量测量的检测

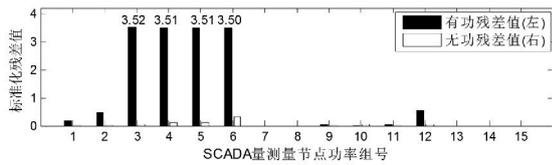
在 SCADA 量测量中,对非关键量测量节点有功功率  $P_4$  设置 30% 的量测误差值。通过表格将较大的几个量测残差值列出来,如表 1 所示。

表 1 IEEE 30 节点系统非关键量测量标准化残差值

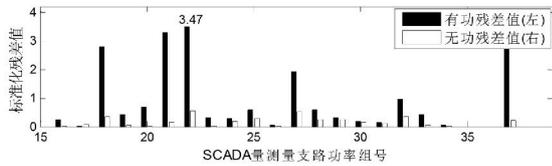
WLS 检测方法		所提检测方法	
量测量	$r_N$	量测量	$r_N$
$P_4$	3.52	$P_4$	7.72
$P_6$	3.51	$P_{4-6}$	6.61
$P_8$	3.51	$P_{3-4}$	3.79
$P_{10}$	3.50	$P_{1-3}$	2.40
$P_{5-7}$	3.47	$P_{2-4}$	1.90

为了进一步对比其他量测残差值的大小,图 6、图 7 将所有的 SCADA 量测量的标准化残差值用直

方图展示出来。

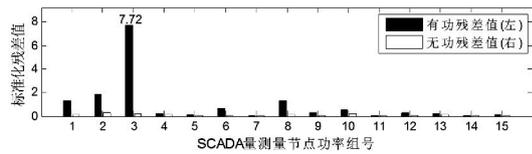


(a) 节点注入功率的标准化残差值

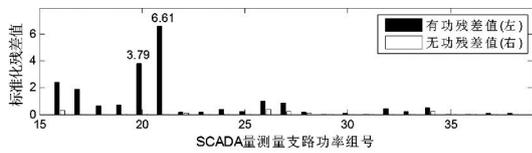


(b) 支路潮流功率的标准化残差值

图 6 WLS 状态估计后的 SCADA 非关键量测量标准化残差值



(a) 节点注入功率的标准化残差值



(b) 支路潮流功率的标准化残差值

图 7 混合量测状态估计后的 SCADA 非关键量测量标准化残差值

对于非关键量测量中的不良数据,采用所提方法和 WLS 状态估计算法都能将其检测出来。

### 3) 关键量测量的检测

在 SCADA 量测量中,对关键量测量支路潮流无功功率  $Q_{24}$  设置 30% 的量测误差值,并将较大的几个残差值对应的量测量用列出来,如表 2 所示。

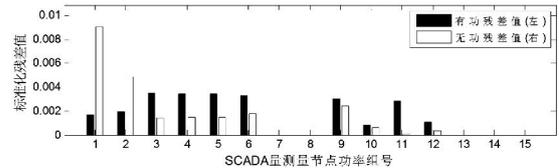
表 2 IEEE 30 节点系统关键量测量标准化残差值

WLS 检测方法		所提检测方法	
量测量	$r_N$	量测量	$r_N$
$Q_2$	0.009	$Q_{24}$	4.203
$Q_{3-4}$	0.007	$V_{24}$	2.260
$Q_{2-4}$	0.006	$Q_{21}$	1.847
$Q_{2-6}$	0.005	$Q_{21-22}$	1.805
$Q_3$	0.005	$V_{25}$	1.772

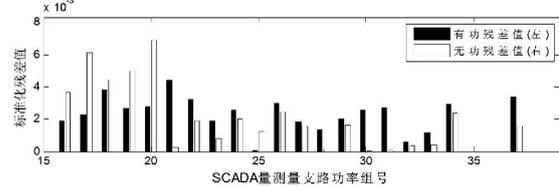
通过表 2 可以看出,通过加权最小二乘状态估计算法计算各个量测量的标准化残差值,所有量的测量残差值都在检测阈值范围之内,无法将不良数据检测出来,而通过混合量测状态估计对残差协方差矩阵更新后,可以看出量测量  $Q_{24}$  的标准化残差

值大于阈值 2.81,能够被检测出来。

为了对比其他残差值的大小,图 8、图 9 将所有的 SCADA 量测量的标准化残差值用直方图展示出来。

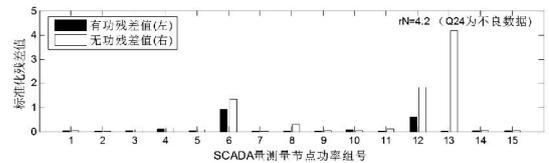


(a) 节点注入功率的标准化残差值

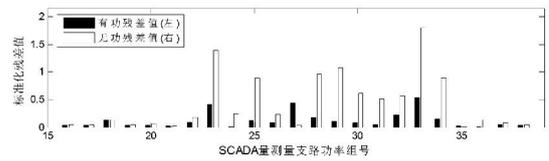


(b) 支路潮流功率的标准化残差值

图 8 WLS 状态估计后的 SCADA 关键量测量标准化残差值



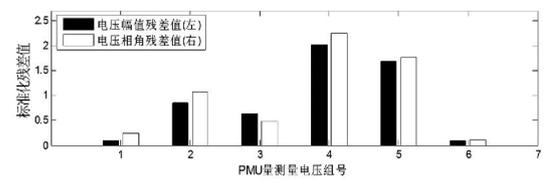
(a) 节点注入功率的标准化残差值



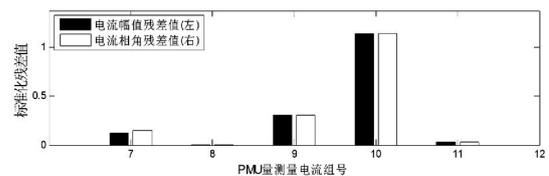
(b) 支路潮流功率的标准化残差值

图 9 混合量测状态估计后的 SCADA 关键量测量标准化残差值

通过 PMU 量测量对残差协方差矩阵更新后,当 SCADA 量测量中的关键量测量出现不良数据时,PMU 量测量的标准化残差值也将改变,如图 10 所示。



(a) 节点电压的标准化残差值



(b) 支路电流的标准化残差值

图 10 混合量测状态估计后的 PMU 量测量标准化残差值

根据实验结果分析可知,所提状态估计方法与

仅有 SCADA 量测量的状态估计的区别主要包括:

1) 量测量的冗余度不同: 传统状态估计的量测量只是通过 SCADA 量测系统获得, 冗余度较低, 系统中存在关键量测量; 而混合量测状态估计的量测量包含 SCADA 量测量和 PMU 量测量, 冗余度高, 不存在关键量测量。2) 估计方式不同: 传统状态估计只通过非线性状态估计获得估计结果, 估计结果精度不高; 而混合量测状态估计方法将利用非线性状态估计结果和 PMU 量测信息进行二次线性状态估计, 状态估计结果的精度大大提高。

混合量测状态估计方法的优点主要包括: 状态估计结果精度高, 能够检测关键量测量中出现的不良数据。不足之处在于需要进行两次状态估计, 需要多耗费一些时间。

#### 4 结 语

充分利用 PMU 量测及 SCADA 量测值, 讨论并发展了一种基于 PMU/SCADA 混合量测的电力系统状态估计及不良数据检测方法。特别是当 SCADA 量测系统的关键量测量出现不良数据时, 通过 PMU 量测量增加系统冗余度, 同时利用二次线性状态估计更新残差协方差矩阵的方式来对 SCADA 量测量中的关键量测量中的不良数据进行检测, 通过 IEEE 30 节点系统对该方法进行了试验, 效果较好。

(上接第 43 页)

1) 不接地或经消弧线圈接地系统改成经小电阻接地这种方式, 不会由于入地电流增大而对低压 (380/220 V) 用户造成种种电气危险。

2) 由于人体直接接触带电线路而发生触电这种方式与中性点的接地方式并没有绝对的关系; 而与触电者接触带电体的方式及触电后脱离的时间有着密切关系, 对于北京的配电线路而言, 由于电缆的大量使用(四环以内主要以电缆为主), 裸架空线换成了绝缘线等因素, 四环以内配电系统采用中性点经小电阻接地与不接地或经消弧线圈接地有一定优势。

#### 参考文献

[1] 朱仲鸣. 6~35 kV 电缆系统采用中性点经电阻接地[J]. 电力安全技术, 1996(5).

#### 参考文献

[1] 李从善, 刘天琪, 李兴源, 等. 用于电力系统状态估计的 WAMS/SCADA 混合量测数据融合方法[J]. 高压技术, 2013, 39(11): 2686-2691.

[2] 刘晓义, 宋佳音, 蒋辉雄, 等. 基于 PMU/SCADA 混合量测的电力系统状态估计[J]. 电测与仪表, 2012, 49(559): 11-15.

[3] 薛辉, 贾清泉, 王宁, 等. 基于 PMU 量测数据和 SCADA 数据融合的电力系统状态方法[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 44-49.

[4] 李强, 周京阳, 于尔铿, 等. 基于混合量测的电力系统状态估计混合算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 31-35.

[5] G. N. Korres, N. M. Manousakis. State Estimation and Bad Data Processing for Systems Including PMU and SCADA Measurements[J]. Electric Power Systems Research 2011(81): 1514-1524.

[6] P S Castro Vide, F P Maciel Barbosa, I M Ferreira. Combined Use of SCADA and PMU Measurements for Power System State Estimator Performance Enhancement[C]. Energetics (IYCE), Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on. IEEE, 2011: 1-6.

[7] R. F. Nuqui, A. G. Phadke. Hybrid Linear State Estimation Utilizing Synchronized Phasor Measurements[J]. Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, 1665-1669.

作者简介:

许勇(1988), 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统状态估计。

(收稿日期: 2015-03-09)

[2] M. Clement, D. Daniel, J. Borgeal. Developments in MV Neutral Control at Electricite De France[J]. Cired 1991 (2): 14.

[3] 中国电机工程学会, 高压专委会, 过电压与绝缘配合分专业委员会. 过电压讨论会论文集[C]. 1997.

[4] 贺景亮. 电力系统电磁兼容[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.

[5] DL 5033-94 送电线路对电信线路危险影响设计规程[S].

[6] DL/T 5063-1996 送电线路对电信线路干扰影响设计规程[S].

作者简介:

崔东君(1984), 工学硕士, 工程师, 主要从事供电方案制定、工程组织方面的工作。

(收稿日期: 2015-03-29)

# 基于反馈线性化的静止同步串联补偿器 变结构潮流控制研究

贺双双<sup>1</sup>, 曹建军<sup>1</sup>, 陈智迪<sup>2</sup>

(1. 武汉金中石化工程有限公司 湖北 武汉 430000; 2. 湖北能源集团 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 静止同步串联补偿器 (static synchronous series compensator, SSSC) 是一种调节线路潮流和接入点电压的 FACTS 装置, 采用输入-输出反馈线性化处理 SSSC 含滤波电容方程的 5 阶非线性等效数学模型, 得到一个带约束条件的线性方程, 运用变结构控制理论设计了 SSSC 的变结构控制器。最后利用 Matlab/Simulink 仿真验证了所设计的控制器达到了 SSSC 的控制潮流的效果, 与 PI 控制相比, 其性能有一定的优越性。

**关键词:** 静止同步串联补偿器; 输入-输出线性化; 变结构控制; 抗干扰能力

**Abstract:** Static synchronous series compensator (SSSC) is a kind of FACTS devices to regulate line power flow and the voltage at access point. The fifth-order nonlinear mathematical model of SSSC containing filter capacitor equation is processed by input/output feedback linearization to acquire linear equations with the constraints, and then the variable structure controller of SSSC is designed using variable structure control theory. Finally, the simulation in Matlab/Simulink dynamic simulation platform verifies the designed controller can achieve the control effect for SSSC and has some advantages compared with PI control.

**Key words:** static synchronous series compensator (SSSC); input/output linearization; variable structure control; anti-jamming capability

中图分类号: TM74 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0056-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.014

## 0 引言

静止同步串联补偿器 (static synchronous series compensator, SSSC) 是常见的第二代柔性交流输电装置, 它是通过串入一个可变电压来调节线路潮流和接入点电压<sup>[1-3]</sup>。SSSC 常见的控制方式主要包括 PI (proportional integral) 控制、智能控制和非线性控制, 非线性控制方法是近年应用在 SSSC 中比较普遍的一种方法<sup>[4-5]</sup>。文献 [6] 分别从定阻抗和定电压两种控制角度, 运用逆系统滑模控制分别对 SSSC 进行了控制设计, 这种设计方法本质上是 PI 和滑模混合控制, 增加了协调控制的难度。文献 [7] 利用直接反馈线性化方法处理 SSSC 的 3 阶动态模型, 未考虑 SSSC 中滤波电容的动态变化过程。文献 [8] 运用微分几何方法处理含 SSSC 的单机无穷大系统, 结合线性最优控制理论, 得到了 SSSC 的非线性最优控制策略。文献 [9] 建立了 SSSC 的多变量仿射非线性模型, 用精确反馈线性化方法设计了 SSSC 的非线性多输入多输出控制器。考虑了

SSSC 中的滤波电容影响和常规  $d-q$  轴分解的耦合问题, 给出了 SSSC 在  $\alpha\beta$  坐标系下的 5 阶非线性等效数学模型, 该数学模型更加贴近 SSSC 运行特点, 采用输入-输出反馈线性化处理得到 1 个含 2 个约束条件的线性方程, 运用变结构控制 (也称为滑模控制) 理论设计了 SSSC 的变结构控制器, 并分析了所设计的控制器抗干扰性能。最后利用 Matlab/Simulink 仿真验证了所设计的控制器与 PI 控制相比响应更快, 具有较好的鲁棒性。

## 1 SSSC 控制系统的反馈线性化

### 1.1 SSSC 反馈线性化判别

SSSC 的等效电路图如图 1 所示, 图中  $R_2$ 、 $L_2$ 、 $C_e$  分别为串联侧的滤波电感、等值电阻和滤波电容;  $C$  为直流侧电容;  $U_{dc}$  为电容电压;  $P$ 、 $Q$  分别是串联侧注入系统的有功功率和无功功率;  $u_{2a}$ 、 $u_{2b}$ 、 $u_{2c}$ 、 $i_{2-abc}$  为逆变器的输出三相电压和输出三相电流;  $u_{ac}$ 、 $u_{cb}$ 、 $u_{cc}$ 、 $i_{ca}$ 、 $i_{cb}$ 、 $i_{cc}$  为滤波电容侧的输出三相电压和输出三相电流;  $u_s$  为始端电压;  $u_j$  为末端电压<sup>[10]</sup>。

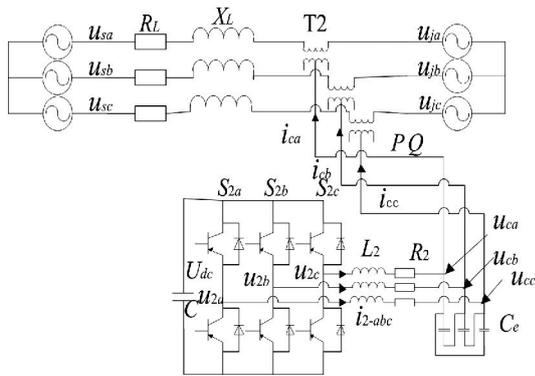


图 1 SSSC 的等效电路图

则 SSSC 在坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} L_2 \frac{di_{2\alpha}}{dt} = u_{2\alpha} - R_2 i_{2\alpha} - u_{ca} \\ L_2 \frac{di_{2\beta}}{dt} = u_{2\beta} - R_2 i_{2\beta} - u_{cb} \\ C_e \frac{du_{c\alpha}}{dt} = i_{2\alpha} - i_{c\alpha} \\ C_e \frac{du_{c\beta}}{dt} = i_{2\beta} - i_{c\beta} \\ CU_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = -\frac{3}{2}(u_{2\alpha} i_{2\alpha} + u_{2\beta} i_{2\beta}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_{2j} = s_{2j} U_{dc}$ ;  $j = \alpha, \beta$ ;  $s_{2j}$  为对应线路的开关信号函数。

将式 (1) 整理为式 (2) 所示的非线性系统标准形式<sup>[11-12]</sup> 则有

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g_1(x) \mu \\ y = h(x) \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$\begin{aligned} x &= [x_1 \quad x_{2,\alpha} \quad x_4 \quad x_5]^T \\ &= [i_{2\alpha} \quad i_{2\beta} \quad u_{c\alpha} \quad u_{c\beta} \quad U_{dc}]^T \\ \mu &= [s_{2\alpha} \quad s_{2\beta}]^T \\ y &= [y_1 \quad y_2]^T \end{aligned}$$

$$f(x, t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_2}(-R_2 x_1 - x_3) \\ \frac{1}{L_2}(-R_2 x_2 - x_4) \\ \frac{1}{C_e}(x_1 - i_{2c\alpha}) \\ \frac{1}{C_e}(x_2 - i_{2c\beta}) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$g(x, t) = \begin{bmatrix} x_5/L_2 & 0 \\ 0 & x_5/L_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -3x_1/2C & -3x_1/2C \end{bmatrix}$$

设输出  $y_1 = \frac{L_2}{2}(x_1^2 + x_2^2) + \frac{C}{3}x_5^2$  则输出函数为

$$\begin{aligned} y &= [y_1 \quad y_2]^T = [h_1(x) \quad h_2(x)]^T \\ &= \left[ \frac{L_2}{2}(x_1^2 + x_2^2) + \frac{C}{3}x_5^2 \quad x_2 \right]^T \end{aligned} \quad (3)$$

根据文献 [12] 系统关系度的定义 先求得:

$$\begin{cases} L_{g1} h_1(x) = \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_1} (x_5/L_2) - \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_5} (3x_1/2C) = 0 \\ L_{g2} h_1(x) = \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_2} (x_5/L_2) - \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_5} (3x_2/2C) = 0 \\ L_{g1} L_f^1 h_1(x) = \frac{x_5}{L_2} (2R_2 x_1 + x_3) \neq 0 \\ L_{g2} L_f^1 h_1(x) = \frac{x_5}{L_2} (2R_2 x_2 + x_4) \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} L_{g1} h_2(x) = 0 \\ L_{g2} h_2(x) = \frac{\partial h_2(x)}{\partial x_2} (x_5/L_1) = \frac{x_5}{L_2} \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

得到系统 2 个输出函数对应的关系度分别为  $r = [r_1 \quad r_2] = [2 \quad 1] < n = 5$  因此系统不满足状态反馈精确线性化条件, 使得  $y^{(n)} = v$ , 但可以实现输入-输出线性化  $y^{(r)} = v$ 。

### 1.2 SSSC 输入-输出线性化

SSSC 是一个 5 输入-2 输出系统, 前面已经判断出系统只能进行输入-输出线性化处理, 因此选择坐标变换:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ L_f h_1(x) \\ h_2(x) \\ \varphi_1(x) \\ \varphi_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_2}{2}x_1^2 + x_2^2 + \frac{C}{3}x_5^2 \\ -R_2(x_1^2 + x_2^2) - x_1 x_3 - x_2 x_4 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中  $\varphi_1(x)$ 、 $\varphi_2(x)$  满足:

$$1) \begin{cases} L_{g1} \varphi_1(x) = \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial x} g_1(x, t) = 0 \\ L_{g2} \varphi_1(x) = \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial x} g_2(x, t) = 0 \\ L_{g1} \varphi_2(x) = \frac{\partial \varphi_2(x)}{\partial x} g_1(x, t) = 0 \\ L_{g2} \varphi_2(x) = \frac{\partial \varphi_2(x)}{\partial x} g_2(x, t) = 0 \end{cases}$$

$$2) \begin{bmatrix} \frac{L_2}{2}(x_1^2 + x_2^2) + \frac{C}{3}x_5^2 \\ -R_2(x_1^2 + x_2^2) - x_1x_3 - x_2x_4 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \text{的 Jacobi 矩阵}$$

$$\begin{bmatrix} L_2x_1 & L_2x_2 & 0 & 0 & \frac{2C}{3}x_5 \\ -R_2x_1 - x_3 & -R_2x_2 - x_4 & -x_1 & -x_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \neq 0$$

是满秩的,即 \$z\$ 微分同胚。

系统的约束条件为

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = L_f\varphi_1(x) \\ \dot{\xi}_2 = L_f\varphi_2(x) \end{cases} \quad (7)$$

原非线性系统可以转化为含式(8)所示约束条件的 Brunovsky 标准型。

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + Bv \\ y = Dz \end{cases} \quad (8)$$

式中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

矩阵 \$[B \ AB]\$ 的秩为 3,所以该线性系统可控。

新的控制变量为

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_2} \left[ 2R_2^2(x_1^2 + x_2^2) + 3R_2(x_1x_3 + x_2x_4) + \right. \\ \left. \frac{C}{3}x_5^2 \right] \\ -\frac{1}{C_e}(x_1^2 + x_2^2 - I_{2ca}x_1 - I_{2c\beta}x_2) \\ -\frac{x_5}{L_2} [(2R_2x_1 + x_3)\mu_1 + (2R_2x_2 + x_4)\mu_2] \\ -\frac{1}{L_2} [(R_2x_2 + x_4) - x_3\mu_2] \\ \frac{1}{C_e}(x_1 - i_{2ca}) \\ \frac{1}{C_e}(x_2 - i_{2c\beta}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 1.3 SSSC 控制器设计

对于 SSSC 的系统的变结构控制策略,在满足式(7)所示的约束条件下,对于式(8)所示的线性系

统,设 \$y\$ 的期望输出信号为 \$y^\*\$ (下面带\* 的变量表示为其输出指令值),跟踪误差为

$$e = [e_1 \ e_2]^T = [y_1^* - y_1 \ y_2^* - y_2]^T \quad (10)$$

选取滑模面方程为

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ce_1 + \frac{de_1}{dx} \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

选取指数趋近律

$$\dot{s}_i = -k_i s_i - \varepsilon_i \text{sgn}(s_i) \quad i=1, 2 \quad (12)$$

结合式(8)和式(12)式可得滑模控制律为

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{c}y_1 + k_1s_1 + \varepsilon_1 \text{sgn}(s_1) \\ k_2s_2 + \varepsilon_2 \text{sgn}(s_2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

代入式(9)中得到原非线性系统的控制律为

$$\begin{cases} \mu_1 = \frac{L_2}{x_5(2R_2x_1 + x_3)} [-cy_1 + k_1s_1 + \varepsilon_1 \text{sgn}(s_1) \\ -\frac{1}{L_2}(2R_2x_1^2 - 3R_2x_1x_3 + x_3^2) + \frac{1}{C_e}(x_1^2 + x_2^2 - I_{2ca}x_1 - \\ I_{2c\beta}x_2) + (2R_2x_2 + x_4)(k_2s_2 + \varepsilon_2 \text{sgn}(s_2))] \\ \mu_2 = \frac{1}{x_5} [-R_2x_2 - x_4 + L_2k_2s_2 + L_2\varepsilon_2 \text{sgn}(s_2) \end{cases} \quad (14)$$

式中 \$k\_i, \varepsilon\_i (i=1, 2)\$ 为控制器设计参数,它们决定了控制系统的稳态和动态性能。

### 1.4 SSSC 抗干扰性能分析

上节设计了 SSSC 的变结构控制器,下面对所设计的控制器抗干扰性能进行分析,当系统存在扰动时,系统线性化处理后的 Brunovsky 标准型可以表示为式(15)所示。

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + Bv + \alpha(z) + \beta(v) \\ y = Dz + \gamma(z) \end{cases} \quad (15)$$

式中 \$\alpha(z), \beta(v), \gamma(z)\$ 为原来非线性系统 \$\Delta f(x, t), \Delta g(x, t)\$ 的相对应不确定项 \$\alpha(z), \beta(v), \gamma(z)\$ 有界,均小于某一常数。

将式(11)、式(13)代入式(15)得

$$\dot{s}_i = -k_i s_i - \varepsilon_i \text{sgn}(s_i) + \delta_i, \quad i=1, 2 \quad (16)$$

式中 \$\delta\_i\$ 的取值为

$$\begin{cases} \delta_1 = -\alpha_2(z) - \beta_2(v) - \dot{\alpha}_1(z) - \dot{\beta}_1(v) - \ddot{\gamma}_1(z) \\ \delta_2 = -\alpha_3(z) - \beta_3(v) - \dot{\gamma}_2(z) \end{cases} \quad (17)$$

定义 Lyapunov 函数 \$V = \frac{1}{2}s^2\$, 则

$$\dot{V} = s^T \dot{s} = -\varepsilon s - ks^2 + \delta s \quad (18)$$

选取控制器参数

$$\begin{cases} k_i > 0 \\ \varepsilon_i > \max(\delta_i) \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (19)$$

则  $s^T \dot{s} < 0$  滑模可达性条件成立,  $k_i$  值越大, 系统到达滑模面的时间越短, 但抗干扰能力越差; 相反,  $\varepsilon_i$  越大, 抗干扰能力越强, 但是需要的控制力越大, 引起的抖动也越大, 因此, 系统在设计要选择大的  $k$  值、较小的  $\varepsilon$  值。

1.5 SSSC 控制系统平衡点分析

SSSC 采用潮流控制方式, 通过控制直流电压来维持电容电压稳定。已知系统潮流指令值  $p^*$ 、 $Q^*$  和直流电压指令值  $U_{dc}^*$ , 为了得到跟踪信号值  $y_1^*$ 、 $y_2^*$ , 由选择的系统输出量  $y_1$ 、 $y_2$  的表达式可知, 滤波电容侧电流  $I_{cd}^*$ 、 $I_{cq}^*$  可通过式(20)和潮流指令值  $p^*$ 、 $Q^*$  确定, 然后通过  $dq/\alpha\beta$  转换得到  $I_{ca}^*$ 、 $I_{cb}^*$ 。  $x_1^*$  和  $x_2^*$  通过系统在无扰动情况下的平衡状态方程式(21)确定, 即

$$\begin{cases} I_{cd}^* = \frac{2(U_{cd}P_2^* + U_{cq}Q_2^*)}{3(U_{cd}^2 + U_{cq}^2)} \\ I_{cq}^* = \frac{2(U_{cq}P_2^* - U_{cd}Q_2^*)}{3(U_{cd}^2 + U_{cq}^2)} \end{cases} \quad (20)$$

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t)\mu = 0 \quad (21)$$

2 仿真分析

所提出的 SSSC 输入-输出反馈线性化变结构控制框图表示如图 2 所示。为了验证该控制策略在电力系统中的有效性, 在 Matlab/Simulink 仿真平台上对其进行了仿真验证, 并和 PI 控制(控制策略见参考文献 [13])进行了对比, 系统采用空间矢量脉宽调制(SVPWM), 开关频率为 5 kHz, 潮流控制, 仿真参数为: 电网频率  $f = 50$  Hz; 电源电压有效值  $U_s = 220$  V, 初相角为  $105^\circ$ ; 输电线路等效电阻  $R_L = 2 \Omega$ ,  $L_L = 25$  mH; 串联变压器变比 2:1; 串联侧滤波电感  $L_2 = 2$  mH; 串联变流器等效电阻  $R_2 = 0.01 \Omega$ ; 滤波电容  $C_s = 66 \mu\text{F}$ ; 直流电容  $C = 4700 \mu\text{F}$ ; 直流电压初始值  $U_{dc0} = 600$  V。

系统控制参数:  $c = 1750$ ,  $k_1 = k_2 = 3000$ ;  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 15$ ; PI 控制参数: 电流环  $k_p = 16.5$ ,  $k_i = 825$ ; 电压环  $k_p = 3$ ,  $k_i = 4.5$ ; 功率环  $k_p = 0.0013$ ,  $k_3 = 10$ ; 直流电容控制器  $k_p = 1.5$ ,  $k_i = 0.5$ ; 仿真结果如图 3~图 7 所示。

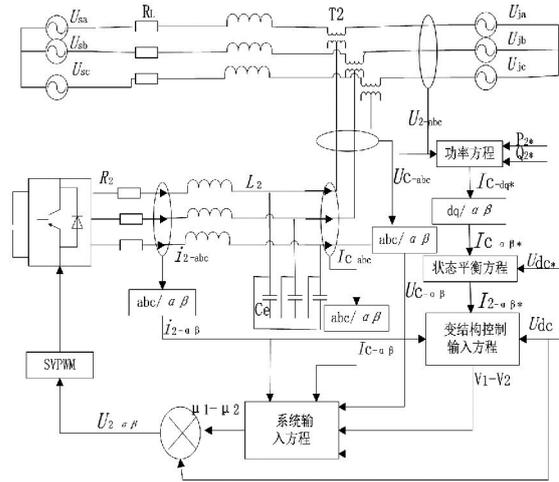


图 2 SSSC 控制框图

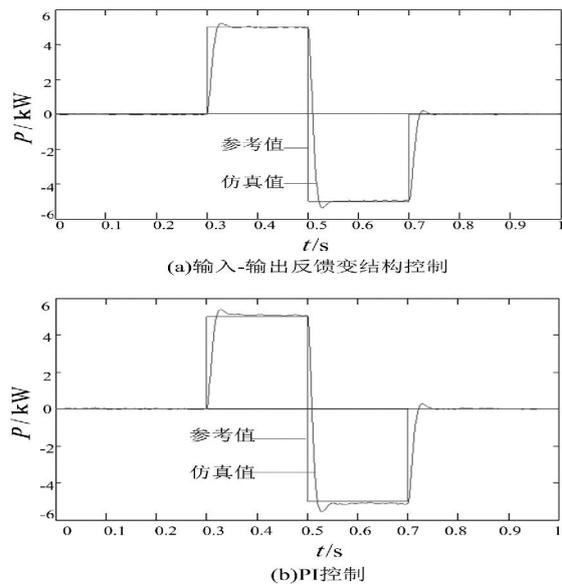


图 3 SSSC 注入系统有功功率

图 3 和图 4 为 SSSC 仿真模型中注入输电线路有功功率和无功功率, 初始值都为 0, 在 0.3 s 时有功功率阶跃到 5 kW, 无功功率阶跃至 2 kvar, 在 0.5 s 时有功功率阶跃至 -5 kW, 无功功率阶跃至 -2 kvar, 在 0.7 s 时有功功率和无功功率恢复至 0。由图中(a)、(b)对比可知, 输入-输出反馈线性化变结构控制和 PI 控制都能较好地跟踪输电线路的有功和无功, 但输入-输出反馈线性化变结构控制能在更小的超调量下进行跟踪。图 5 为输出电压响应曲线, 当注入的有功功率为正值时, 电容释放能量, 直流电容电压略微下降, 输出电压减小, 当注入有功功率为负值时, 电容充电, 输出电压升高。图 6 为输出电流响应曲线, 输出电流快速地跟踪潮流发生变化。图 7 为直流电容电压的仿真图, 从图中可以看出, 尽管两种控制方式都能很好地跟踪潮流, 但输入

—输出线性化变结构控制明显能够更好地维持直流电容电压保持在 600 V。

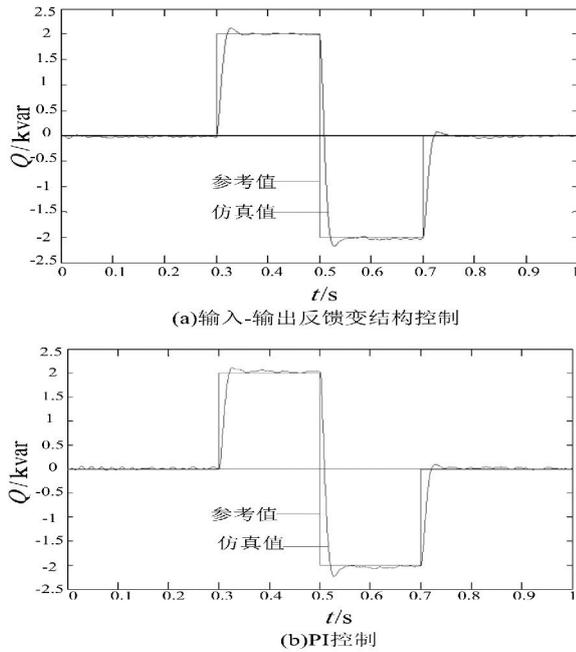


图4 SSSC注入系统无功功率

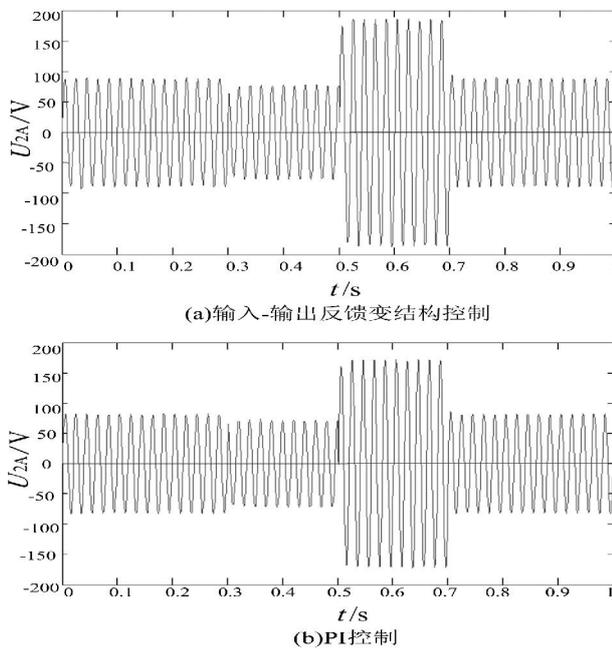


图5 SSSC输出交流电压

### 3 结论

提出了一种新的 SSSC 变结构控制策略。基于输入-输出反馈线性化理论,通过选择合适的输出函数、坐标变换将 SSSC 的非线性模型转化为 1 个含约束方程的 Brunovsky 标准型,再通过变结构控制

完成控制器的设计。仿真结果表明,与 PI 控制相比,该控制策略可以使系统获得更好的补偿效果,而且该方法响应快,对参数及扰动变化不敏感,具有一定的实际价值。

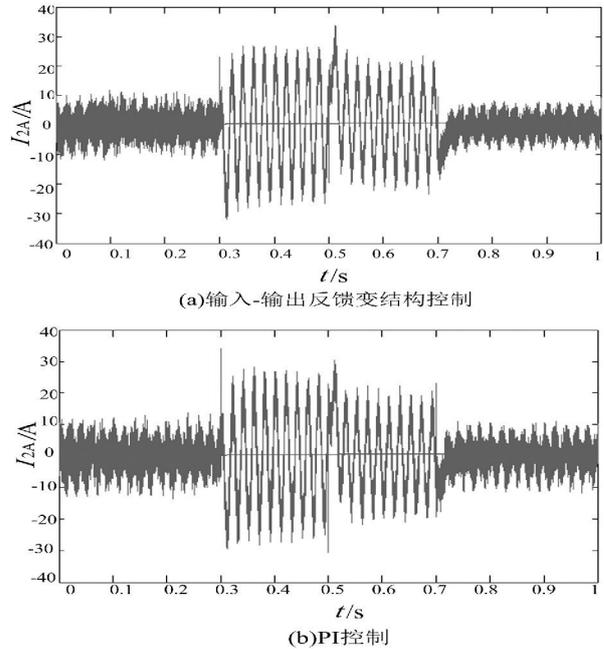


图6 SSSC直流电容电流

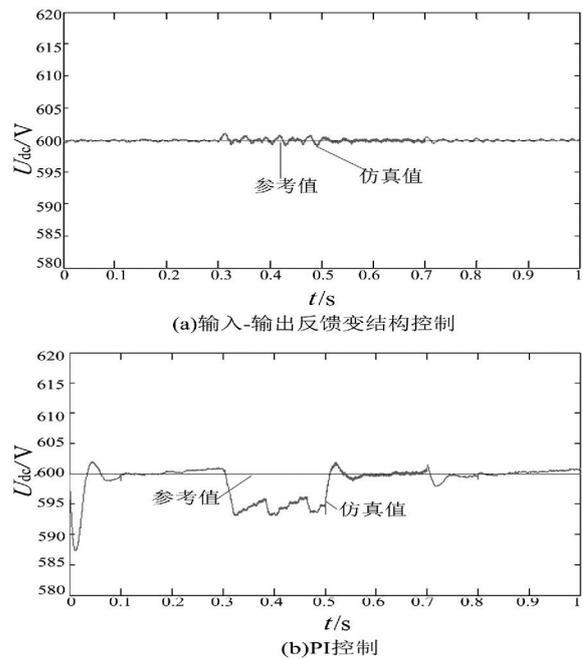


图7 SSSC直流电容电压

### 参考文献

- [1] Hingorani N G, Laszlon Gyugyi. Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems in New York [J]. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999, 22(3): 104-106.

[2] Philip M, Ashmole P. Flexible AC Transmission Systems II Methods of Transmission Line Compensation [J]. Power Engineering Journal, 1996, 10(6): 273-278.

[3] 王仲鸿, 沈斐, 吴铁铮. FACTS 技术研究现状及其在中国的应用与发展 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(23): 1-5.

[4] 张爱国, 韩军锋, 蒋程. 基于神经网络自适应 PI 控制的 SSSC 潮流控制器 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 15-19, 24.

[5] 张爱国, 张建华, 蒋程. 静止同步串联补偿器的恒阻抗模型及其双闭环控制策略 [J]. 电网技术, 2010, 34(3): 106-111.

[6] 钱碧甫, 王奔, 徐万良. SSSC 滑模控制策略研究 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(7): 39-42, 46.

[7] 颜伟, 吴文胜, 华智明, 等. SSSC 非线性控制的直接反馈线性化方法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 65-68.

[8] 李娟, 周兴福, 李淑琴. 基于精确反馈线性化方法的 SSSC 非线性控制器 [J]. 电网技术, 2008, 32(Z2): 12-15.

[9] 赵洋, 肖湘宁. 基于微分几何方法的静止同步串联补偿器非线性控制 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(4): 132-136.

[10] 刘永江. UPFC 控制策略研究及其对电力系统的影响 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011: 1-24.

[11] 焦晓红, 关新平. 非线性控制系统分析与设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 18-43, 94-120.

[12] 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: 143-183.

[13] 黄崇鑫. 统一潮流控制器控制策略的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009: 1-78.

[14] Jiang X, Xiao X N, Zhao Y. Study on Main Circuit Selection and Single Phase SVPWM Algorithm of SSSC [C]. 2006 International Conference on Power System Technology, 2006: 1-6.

作者简介:

贺双双(1989), 助理工程师, 硕士研究生, 毕业于西南交通大学电气工程学院;  
曹建军(1968), 高级工程师, 本科, 毕业于新疆工学院;  
陈智迪(1988), 助理工程师, 硕士研究生, 毕业于西南石油大学电子信息学院。

(收稿日期: 2015-05-04)

(上接第45页)

显示值, 进行各极的绝缘电阻(接地电阻值)监测误差计算和接地选线正确性判断, 完成后断开相应的支路断路器, 并调节电阻值至最大值。

4) 校验检测结果评判

完成全部组合方式的检测后, 按极性(正极或负极)选出最大误差值, 即是被测产品的误差, 根据接地选线的误选和漏选次数给予正确率判断。再依据示波器记录得到直流电压偏移和直流电压波动的最大值并给出是否超值的判断。

3 结论

依据对变电站直流电源系统用绝缘监测装置的校验检测技术与验证方法的研究, 按照 Q/GDW 1969-2013《变电站直流系统绝缘监测装置技术规范》的要求, 对涉及电力系统的发电厂升压站、变电站、换流站等站用直流电源绝缘监测装置, 采用 1 种

校验方法与装置, 实现了对其运行安全性、故障监测可靠性等方面的测评, 也为开展绝缘监测装置的运行维护和状态检修提供了参考, 以期最大限度地避免劣质产品引发或扩大电网事故。

参考文献

[1] 赵梦欣, 陈国峰, 余成伟. 直流电源系统绝缘监测的直流漏电流改进方案 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 83-88.

[2] 李瑞平, 温泉. 直流系统接地故障的分析 [J]. 华电技术, 2008, 30(2): 58-61.

[3] 徐卫, 李晶. 加强直流电源系统运行维护和专业管理 [J]. 电源技术应用, 2007(3): 84-85.

[4] 赵兵, 张曼诗, 徐玉凤. 直流系统微机型绝缘监察装置电阻选择的依据 [J]. 中国新技术产品, 2009(23): 160-161.

(收稿日期: 2015-05-14)

# 改造录波系统提高故障定位精度的实用方法研究

刘明, 巩俊强

(深圳供电局有限公司, 广东深圳 518000)

**摘要:** 提出了一种基于电压行波测距理论改造故障录波系统, 提高故障测距精度的实用方法。该方法在原有的故障录波屏柜中加入二次零序电压行波采集单元, 接收行波传感器的行波信号, 利用保信网络将行波信息上调度端; 测距主站接收调度端保信主站转发的行波信息及故障简报, 并对故障信息进行计算、显示及存储, 可以达到精确故障定位。工程应用表明该方法实施简单, 提高了故障录波系统的实用性能, 在节约测距设备方面有明显优势。

**关键词:** 行波测距; 录波系统; 电压行波; 保信主站

**Abstract:** In order to solve the low fault location precision of transmission lines in high-resistance grounding faults, a method of improving fault location precision by transforming fault recorder system is proposed. The sampling unit of second zero-sequence voltage traveling wave is added into the existing fault recorder cabinet to receive travelling wave signal, and the travelling wave information is sent to dispatching end by relay protection and fault information network. The main station of fault location receives traveling wave information and fault presentation which is retransmitted by the main station of relay protection and fault information in dispatching end, and then the fault information is calculated, displayed and stored by the main station of fault location, which can achieve the precise fault location. The engineering application shows that the proposed method is simple to implement and has obvious advantages in reducing fault location devices.

**Key words:** traveling wave fault location; fault recorder system; voltage traveling wave; main station of relay protection and fault information

中图分类号: TM74 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0062-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.015

## 0 引言

输电线路是电力系统的重要组成部分, 承担着传送电能的重要任务。输电线路工作环境比较恶劣, 是电力系统中较容易发生故障的环节, 快速、准确的故障定位对于提高供电质量、减少停电损失、寻找故障薄弱点、提高系统运行可靠性具有重要意义。

## 1 故障测距技术

### 1.1 故障测距方法

根据采用的线路模型、测量设备不同, 故障测距的原理和方法主要可以分为阻抗法、故障分析法、行波法3类<sup>[1-10]</sup>。

阻抗法利用线路长度与阻抗成正比的关系, 用线路故障时测量到的电压和电流量计算故障回路的阻抗, 根据故障时线路阻抗与正常运行时线路阻抗

的比值, 求取故障位置。阻抗法原理简单, 在故障测距技术发展初期得到广泛应用。

故障分析法利用故障时记录的电压电流量, 对故障线路进行分析计算, 求得故障点到设备安装处的距离。

行波法是利用波传播理论进行输电线路的故障测距, 使用输电线路分布参数模型, 对线路故障后测量到的暂态行波信号进行分析计算, 确定故障发生位置。

### 1.2 国内故障测距应用简介

国内输电线路故障测距设备包括线路保护、故障录波装置、行波测距装置等。

线路保护及故障录波装置主要采用单端故障分析法, 成本低、测距可靠性较高, 但在高阻接地情况下存在较大误差。

行波测距装置在500 kV以上线路及部分重要220 kV线路得到应用, 测距精度较高, 但成本高、测距可靠性一般。某电网公司对2013年年末至2014

年年初的行波故障测距情况进行调查,安装了行波测距装置的 500 kV 线路总计 86 跳,其中有测距结果的仅有 42 次。

### 1.3 二次电压行波测距技术

相对于电流行波法,电压行波法在构建基于整个电网的故障测距有明显优势,但是电压行波在国内的应用并不多,理由是部分学者认为电压互感器不能很好地传变行波信号。国内对互感器的分析大多是沿用互感器在工频状况下的分析方法,没有考虑互感器内部的杂散电容,在此基础上得出电压互感器不能传变暂态高频信号,互感器二次信号难以直接用于行波保护与行波定位。研究及实验表明,电压互感器的线圈波过程包含静电感应、电磁感应和自由振动过程,能准确地传输行波波头信号和极性<sup>[1]</sup>。利用电压互感器的二次信号实现电压行波测距在技术上是可行的。

## 2 改造录波系统提高故障定位精度的技术方案

### 2.1 整体方案设计

故障分析法与行波测距法各有优劣,两者能很好地形成互补,若能将两者结合起来,则对整个电网的故障定位水平的提升是十分有利的。

故障录波系统由微型故障录波装置、调度数据网、保护及故障录波信息主站构成。随着电网技术的发展,110 kV 及以上电压等级变电站对故障记录的要求也越来越高,故障录波系统的运行维护技术已十分成熟。

充分考虑了电力系统运行及管理现状,提出了 1 套改造录波系统提高故障定位精度的解决方案。改造录波系统提高故障定位精度整体设计方案示意图参见图 1。

整个方案由电压行波采集装置、故障录波装置、保信主站、测距主站组成。通过在原有故障录波屏柜内加入一套电压行波采集单元,行波采集单元与故障录波装置共用母线二次零序电压,借用保信系统多余的 IP 地址上调度数据网,通过调度端保信主站硬件设备,将信息传至调度端测距主站。

### 2.2 电压行波采集单元

电压行波采集单元主要完成行波波头的辨识以及对外通信。为了使该方案在工程应用中得到推

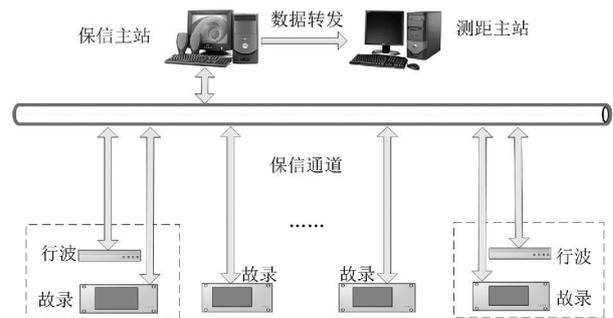


图 1 改造录波系统提高故障定位精度整体设计方案,设计了一款低成本的行波采集单元。

110 kV 及以上电压等级输电线路普遍采用中性点直接接地的运行方式,在线路发生单相接地及两相接地短路时,会产生明显的零序电压行波;由于系统参数不完全对称、各相故障发生时刻不完全一致,线路发生两相短路及在三相短路时,也会产生瞬时的零序行波信号。

为了精简结构,方便改造,电压行波测距单元仅接入母线的二次零序电压信号,可实现对母线上所有线路行波信号的监测。

行波测距的核心在于行波波头的获取,国内电流行波法采用高速采样、记录并通过小波变换等算法识别波头,硬件成本比较高,不适合行波测距的大规模应用推广。

考虑到行波波头信号为一个瞬时性的上升沿或下降沿,设计研发了图 2 所示的零序电压行波识别电路。该电路由通过微分电路、电平比较及保持电路以及逻辑门实现暂态故障信息的初步识别,FPGA 对初步辨识信号进行深入处理,区分出正常信息及故障信息,接受 GPS 模块对时信息,对每个故障信息打上时间戳,将暂态信息辨识结果传送至数据处理模块进行进一步分析。为防止由于电磁干扰等因素造成故障测距装置频繁起动,电路内部进行相应的滤波及抗干扰处理。该硬件设计实现简单,避免了大量的 AD 转换、存储、计算工作。

### 2.3 故障录波装置

故障录波装置具备标准的 103 规约或 IEC61850 接入功能,通过调度数据网将故障简报及录波数据上传至保护和故障信息管理主站。因各站录波装置厂家及型号不一,考虑项目改造的可行性,将行波测距采集单元安装在站内的其中一台录波装置屏柜内,共用母线零序电压信号,不对录波装置内部的软硬件细节进行改造。

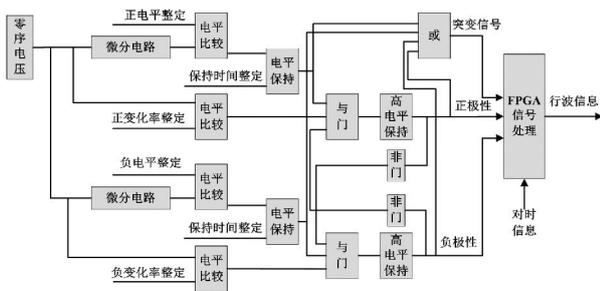


图 2 零序电压行波识别原理图

## 2.4 保信主站

保信主站的主要功能包括: 存储及查询站端保护装置和故障录波器的动作事件、告警信息、定值和录波文件。采用借保信通道方式, 通过在保信主站运行行波通讯模块, 将各电压行波单元上传的数据转发到行波测距主站, 由行波测距主站对行波数据进行统一处理。

## 2.5 测距主站

### 1) 功能

测距主站包含定值设置、数据处理及存储、信息查询、变电站拓扑图编辑、电压行波采集单元状态监控等功能。

测距主站接受保信主站转发故障录波器测距结果, 将故障简报中判为区内故障的测距结果给予显示; 接受保信主站转发的行波信息, 通过网络化故障测距算法计算行波测距结果, 对结果进行存储、筛选及显示。

### 2) 测距算法

输电线路发生故障后, 行波将沿着线路向整个电网传播, 其中, 行波第一个波头在电网中传播最为强烈。由于故障行波第一波头到达各节点的时间对应故障行波第一波头由故障点向各节点传输的最短路径, 因此在复杂网络中, 根据最短路径的唯一性, 总能通过寻找故障行波第一波头传输的最短路径, 将复杂网络转化为简单网络(不含环路和多回路)。

最短路径是图论研究中的经典算法问题, 所设计的测距主站选取 Dijkstra 算法作为最短路径算法, 同时, 采用加权系数法对故障定位结果进行处理, 减少随机干扰造成的误差。

## 3 实例分析

### 3.1 试验分析

• 64 •

由于行波测距方法原理上依赖对行波信号的识别和捕捉, 仿真实验难以模拟行波信号的传输, 所以, 对行波传感器的实验分析采用 1 000 m 电缆模拟输电线路, 由行波信号发生器模拟故障点, 由行波传感器将行波信号传送给行波信号采集装置, 计算模拟故障点测距结果。试验方案如图 3 所示。



图 3 试验方案

行波传感器分别安装在线路末端、行波信号发生器侧。将故障点电缆线剥开, 行波信号发生器一极接芯线、一极接屏蔽线。

部分试验结果统计分析如表 1 所示。

表 1 试验结果

故障 /m	平均误差值/m			
258	12	15	20	24
413	27	30	34	37
453	43	44	49	49
563	31	33	37	39
603	37	38	42	43
768	36	37	42	43
1 000(2 号)	-	-	-8	-

试验结果证明: 该套行波测距装置具有良好的行波波头捕捉识别能力, 测距精度较高。

### 3.2 应用实例概况

某 220 kV 以上电压等级局部电网地理位置示意图参见图 4, 该电网包含一个 500 kV 变电站(鲲鹏)及 8 个 220 kV 变电站(鼎盛、盘古石、坪山、白杨、骏康、宏图、交椅、灵芝), 各站的故障录波装置通过调度数据网与保信主站通信。

### 3.3 最优配置

电网中故障行波定位装置的配置与电网结构和故障行波的传输路径直接相关<sup>[12-13]</sup>。通过寻找出所有输电线路在任意故障点处行波第一波头传输的最短路径, 保证最短路径中故障点两侧的变电站至少各安装一台行波采集装置, 即可完成对整个网络输电线路行波测距的监控。具体实现时, 依次网络中的输电线路支路设置为故障线路, 得到输电线路两侧安装的站点数组  $I_1, I_2, \dots, I_n$  和  $J_1, J_2, \dots, J_n$ , 其中  $n$  为线路数  $I$  和  $J$  的最小公共集的并集即

为整个电网需要配置行波采集装置的最少站点。

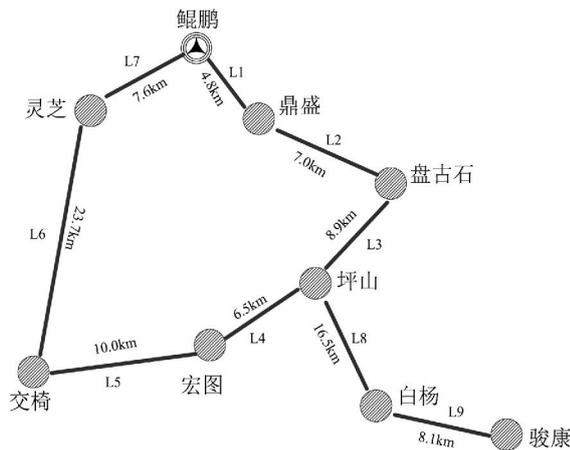


图4 220 kV 电网子系统

所选取的220 kV子网各故障线路两端的站点数组如表2所示。

表2 故障线路两端的变电站数组

故障线路	站点数组 I	站点数组 J
L1	鲲鹏、灵芝、交椅	鼎盛、盘古石、坪山、白杨、骏康
L2	鼎盛、鲲鹏、灵芝	盘古石、坪山、白杨、骏康
L3	盘古石、鼎盛、鲲鹏、灵芝	坪山、白杨、骏康、宏图、交椅
L4	交椅、宏图	坪山、盘古石、鼎盛、白杨、骏康
L5	交椅、灵芝	坪山、盘古石、鼎盛、白杨、骏康
L6	灵芝、鲲鹏	交椅、宏图
L7	鲲鹏、鼎盛、盘古石	灵芝、交椅
L8	白杨、骏康	坪山、盘古石、鼎盛、宏图、交椅
L9	骏康	白杨、坪山、盘古石、鼎盛、宏图、交椅

表2中的I和J最小公共集的并集为骏康、坪山、鲲鹏、交椅,因此,要实现该电网所有线路的行波监控,仅需对4个站进行升级改造。相对于电流行波测距,电压行波法节约了5台装置,且站点越多,基于网络的电压行波优势越明显。

## 4 结语

电力系统技术的发展对故障测距提出了更高的要求。故障分析法及行波法作为当前输电网主流的故障测距方法,其技术特点存在互补性。对故障分析法及行波法的实际应用情况进行分析,针对电网现状,提出了改造录波系统提高故障测距精度的解

决方案。该方案在原有故障录波屏柜上加入一套低成本的零序电压行波采集装置,并借用保信通道及保信主站将行波数据及故障分析法结果上传至行波主站,由行波主站完成故障数据处理、分析及显示。该方案兼有故障分析法稳定性好、行波法测距精度高等优点,同时,在节约设备数目及设备成本、减少安装维护工作量方面也有明显优势。

## 参考文献

- [1] 尹晓光,宋琳琳,尤志.与波速无关的输电线路双端行波故障测距研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(1):35-39.
- [2] 吴刚,林湘宁.通用行波测距修正方法[J].中国电机工程学报,2011,31(34):142-147.
- [3] 郑州,绿艳萍,王杰,等.基于小波变换的双端行波测距新方法[J].电网技术,2010,34(1):203-207.
- [4] 覃剑,陈祥训,郑健超,等.利用小波变换的双端行波测距新方法[J].中国电机工程学报,2000,20(8):6-10.
- [5] 陈平,葛耀中,徐丙垠,等.现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用-D型原理[J].继电器,2004,32(3):14-17,28.
- [6] 李扬,黄映,成乐祥.考虑故障时刻与波速选取相配合的行波测距[J].电力自动化设备,2010,30(11):44-47.
- [7] 董新洲,葛耀中,徐丙垠.利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J].中国电机工程学报,1999,19(4):76-80.
- [8] 王志华,尹项根,张小波,等.利用CVT捕捉电压行波实现故障测距的分析与实践.电力系统自动化,2004,28(22):63-68.
- [9] 黄雄,王志华,尹项根,等.高压输电线路行波测距的行波波速确定方法[J].电网技术,2004,28(19):34-37.
- [10] 覃剑,陈祥训,郑健超.行波在输电线路上传播的色散研究[J].中国电机工程学报,1999,19(9):27-30.
- [11] 曾祥君,刘正谊,屈明志,等.互感器暂态行波传输特性仿真分析和实验测试[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2004,1(1):71-75.
- [12] 邓丰,陈楠,曾祥君,等.基于图论的电网故障行波定位装置最优配置算法[J].电力系统自动化,2010,34(11):87-91.
- [13] 曾祥君,陈楠,李泽文,等.基于网络的故障行波定位算法[J].中国电机工程学报,2009,28(31):48-53.

作者简介:

刘明(1984),硕士,工程师,主要从事继电保护运行维护工作;

巩俊强(1980),硕士,高级工程师,主要从事电力系统继电保护运行管理工作。

(收稿日期:2015-05-19)

# 基于矩阵束算法的电压闪变检测新方法

罗志宏

(国网成都供电公司, 四川 成都 610021)

**摘要:** 随着电力系统冲击性负荷的增加, 电网中存在的电压波动与电压闪变越趋严重。基于矩阵束算法提出了一种电压闪变参数检测新方法。该方法利用电压闪变信号模型的特殊性质, 把它转换为矩阵间的特定关系, 从而将难于处理的非线性求解问题简单化, 不仅可以准确地提取闪变电压调幅波的频率和幅值, 还可以获取相位信息。算法中引入矩阵低秩近似方法使得在求解广义特征值的时候, 能更好地抑制噪声干扰, 同时减少了计算量。分别对噪声背景下简单闪变和复杂闪变进行仿真分析, 结果表明, 该方法具有精度高、运算率高、抗噪性强等特点。

**关键词:** 电压闪变; 矩阵束算法; 低秩近似; 谐波

**Abstract:** Voltage fluctuation and voltage flicker have become a serious problem with the rapid increase of impulse load in power system. Based on matrix pencil algorithm, a new method to identify voltage flicker parameters is proposed. This method uses the special property of voltage flicker signal model and converts it to the special relationship between matrixes. As a result, the nonlinear question which is difficult to be processed will be simplified. This method not only can accurately extract the frequency and amplitude of flicker voltage wave, but also can get accurate information of phase. And the noise effect is restrained because of the low-rank approximation method when the generalized eigenvalue is to be solved. At the same time, the calculated amount is reduced. The simple flicker and complex flicker which are under the back ground of noise are analyzed respectively and the simulation results show that the proposed method has high precision, fast operation efficiency and strong anti-noise capacity.

**Key words:** voltage flicker; matrix pencil algorithm; low-rank approximation; harmonics

中图分类号: TM866 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2015)04-0066-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.016

电压闪变的检测是通过准确提取电压波动信号, 对波动信号进行频谱分析得到所含的各种低频谐波分量的频率和幅值<sup>[1-6]</sup>。目前常用的电压闪变测试方法有半波有效值法、平方检测法、全波整流法<sup>[7-8]</sup>。半波有效值法需将均方根值的计算时间准确地整定在半个工频周期之内, 实现起来比较困难<sup>[9]</sup>; 而平方检测法和整流检测法都需要设计频带很严格的滤波器来滤除工频和高次谐波分量。随着数学工具的发展, 各种数学方法被广泛用于闪变检测。文献[10]提出基于快速傅里叶变换(fast fourier transformation, FFT)的波动电压检测方法, 由于电压波动频率通常与基频不成整数倍关系, 在考虑基频采样同步时难以做到对电压波动同步, 所以利用FFT变换直接对波动电压进行分析, 容易因采样不同步导致频谱混叠, 从而影响测量结果的准确性。文献[11]提出在FFT采样过程中使用跳跃式采样法, 减少频谱泄漏引起的误差, 但包络线提取时间较长。文献[12]、[13]提出了基于小波变换的电压闪

变信号检测方法, 但是这种检测方法略显复杂, 且在实际应用中存在着小波基选择困难的问题。文献[14]将Hilbert变换用于电压闪变检测, 但所分析信号必须为窄带信号, 而实际闪变信号由于受到高次谐波等噪声的影响, 并不满足这一特性。

除上述方法外, 在电压闪变检测领域还可以采用矩阵束(matrix pencil, MP)方法提取闪变参数。

MP算法是1980年Y. B Hua和T. K Sarkar等人在前人经验的基础上针对极点提取问题而提出的一种方法。由于MP算法采用内积形式提高抗噪能力, 在数字信号处理方面获得了较好的效果<sup>[15]</sup>。此算法是非迭代算法的一种, 它避免了迭代法的一些弊端, 不存在累积误差的问题, 而且运算量不高, 是一种非常高效的数值计算方法<sup>[16]</sup>。将MP方法用于电压闪变检测, 其基本思想是: 将采集到的电压闪变信号构造为Hankel矩阵, 在求解广义特征值时引入SVD分解和矩阵的低秩近似方法抑制噪声干扰, 从而达到信号参数的准确求取的目的。通过

仿真分析发现该方法不仅可以较准确地提取闪变电压调幅波的频率和幅值,还可以得到相位信息,从而为电压闪变检测提供了一种新的思路。

### 1 电压闪变信号数学模型

电压的波动和闪变特征通过调幅波<sup>[17]</sup>反映出来,故对调幅波参数的求取等同于对电压闪变参数的提取。一般电压波动幅值范围为工频载波电压幅值的0%~10%。电压闪变有周期性和非周期性之分,其中周期性电压闪变对人们生产生活影响较大,故这里主要研究周期性闪变参数的提取。通常电压闪变信号中包含谐波,为使分析简化一开始先不考虑谐波,在后面的部分再考虑谐波。如果忽略谐波成分,电压闪变信号 $u(t)$ 可表示为条幅信号 $A_i$ 对已工频正弦信号的线性振幅调制。

$$u(t) = [A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cos(2\pi f_i t + \theta_i)] \cos(2\pi f_0 t + \theta_0) \quad (1)$$

式中: $A_0$ 、 $f_0$ 、 $\theta_0$ 分别为基波电压的幅值、频率和初始相位; $A_i$ 是频率为 $f_i$ 、相位为 $\theta_i$ 的调幅波分量的幅值。通过三角函数分解将式(1)展开得

$$u(t) = A_0 \cos(2\pi f_0 t + \theta_0) + \sum_{i=1}^n 0.5 A_i \cos [2\pi(f_0 - f_i)t + (\theta_0 - \theta_i)] + \sum_{i=1}^n 0.5 A_i \cos [2\pi(f_0 + f_i)t + (\theta_0 + \theta_i)] \quad (2)$$

可以看出:展展开后的电压闪变信号在频域内总是以工频为中心,在工频两侧呈对称分布。 $(f_0 - f_i)$ 和 $(f_0 + f_i)$ 对应的分量称为边频分量。通过对 $u(t)$ 的直接检测可得到边频分量的参数,从而再间接求得电压闪变模型中调幅波电压的幅值、频率和相位信息。

### 2 矩阵束算法基本原理

MP算法的计算步骤简介如下<sup>[16,18]</sup>:由实测数据或仿真数据 $y(k\Delta t)$  ( $k=1, 2, \dots, N-1$ )构造Hankel矩阵 $Y$ 为

$$Y = \begin{bmatrix} y(0) & y(1) & \dots & y(L) \\ y(1) & y(2) & \dots & y(L+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(N-L-1) & y(N-L) & \dots & y(N-1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $D_k = [y(k) \ y(k+1) \ \dots \ y(N-L+k-1)]^T$ 。

式中: $L$ 为矩阵束参数,合理地选取 $L$ 可以减小数据

中的噪声干扰,通常取值范围在 $N/4 \sim N/3$ 之间。

对 $Y$ 作奇异分解, $Y = U \Sigma V^T$ 得到 $(N-L) \times (L+1)$ 阶对角阵 $\Sigma$ ,其元素 $\sigma_i$ 为 $Y$ 矩阵的第 $i$ 个奇异值。

如果测量数据不含噪声, $Y$ 有 $M$ 个非零奇异值,且 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_M$ ,此时 $Y$ 的秩等于 $M$ 。但在实际测量中,由于存在噪声和模型误差,使真实的极点产生误差,并产生多余的虚假极点。此时对奇异值进行截取,只保留其中 $M$ 个最大的奇异值,可以有效减小噪声对参数估计精度的不良影响。若同时满足下面2个条件:1)从第 $M+1$ 个奇异值 $\sigma_{i+1}$ 开始不再发生跳跃;2) $\sigma_i/\sigma_{i+1} \geq \mu$  ( $\mu$ 为阈值),则可以把最大下标 $i$ 记为最大模态数 $M$ 。

由矩阵 $V$ 的 $M$ 个主奇异向量构成的滤波矩阵: $V' = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_M]$ 。构造2个 $(N-L) \times L$ 阶矩阵 $Y_1$ 和 $Y_2$ 为

$$Y_1 = U \Sigma' V_1^H, Y_2 = U \Sigma' V_2^H \quad (4)$$

$V_1'$ 和 $V_2'$ 是由 $V'$ 分别删除最后一行元素和第一行元素得到, $D'$ 是由 $D$ 的 $M$ 个主奇异值对应的 $M$ 个奇异向量组成。

由 $Y_1$ 和 $Y_2$ 构造矩阵束 $Y_2 - \lambda Y_1$ ,通过整理、计算可求解矩阵 $G = Y + 1 Y_2$ 的特征值(其中 $Y + 1$ 为 $Y_1$ 的伪逆矩阵)。在估计出最大模态 $M$ 和所有极点 $z_i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ )后,留数 $R_i$ 可利用最小二乘法计算得到,具体式如下:

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_M^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_M \end{bmatrix} \quad (5)$$

计算出反映各分量特征的量,计算式为

$$\begin{aligned} A_i &= |R_i| \\ \theta_i &= \arctan [\text{Im}(R_i) / \text{Re}(R_i)] \\ \omega_i &= \arctan [\text{Im}(z_i) / \text{Re}(z_i)] / \Delta t \\ \alpha_i &= \ln |z_i| / \Delta t \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $A_i$ 、 $\theta_i$ 、 $\alpha_i$ 、 $\omega_i$ 为对第 $i$ 个模态的幅值、初相位、衰减因子和角频率。

MP算法通过抽样构造Hankel矩阵、降秩、极点提取、极点个数提取,最后利用最小二乘法得到留数,实现了非线性问题的线性求解。

### 3 仿真实验

#### 3.1 理想信号算例

在实际运行中,电压闪变参数的准确参数值是无法预知的,参数的理论计算值和测量值都是对它的近似描述,所以参数测量值的误差大小很难定量描述。为了验证所提出的方法在电压闪变参数估计方面的有效性,以下面含有单个频率闪变的理想信号为例进行分析。

$$u(t) = [1 + 0.06\cos(50\pi t + \pi/4)] \times [\cos(100\pi t + \pi/6)] \quad (7)$$

由于在实际测量信号中含有高频率的噪声,故对上述理想信号中加入信噪比为30 dB 高斯白噪声,该电压闪变信号时域波形如图1所示。在Matlab下进行仿真,信号采样频率为1 kHz,采样时间为0.4 s。采用MP方法对上述信号进行分析时,首先对由采样信号形成得Hankel矩阵进行奇异值分解,其奇异值柱状图如图2所示。从图2中可看出从6阶到7阶处奇异值有跳跃,比值很大;并且从第7阶开始奇异值不在发生跳跃,因此确定系统的阶数是6。利用MP方法提取的参数如表1所示。

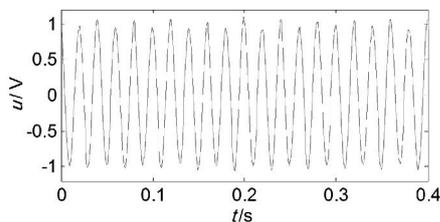


图1 简单闪变信号波形

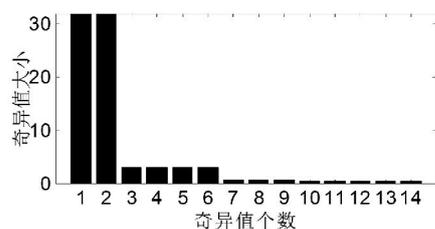


图2 理想信号算例奇异值柱状图

表1 对于简单闪变 MP 提取的参数

参数分量	幅值/V	频率/Hz	相位/(°)
基频	0.996 0	49.999 8	30.061 1
边频分量1	0.029 3	75.096 3	72.706 9
边频分量2	0.031 5	24.988 7	-15.345 2

根据表1提取的参数和式(1)、(2)可计算出调幅波参数,与理想参数的比较如表2所示。可以看出在噪声为30 dB 情况下,辨识非常准确,调幅波的幅值和频率的误差分别为1.333%、0.215%,误差较小。为验证该算法的抗噪性,表2还给出了噪声

为40 dB 和25 dB 时调幅波的检测值。由表2分析可知,噪声为40 dB 时调幅波参数的最大误差不超0.5%,随着噪声的增大,辨识结果的误差也逐渐增大,但都在合理的范围之内。仿真结果证明在简单闪变情况下MP方法具有较高的抗噪能力和检测精度。

表2 理想信号算例参数及检测值

参数	理想参数	计算参数		
		40 dB 白噪	30 dB 白噪	25dB 白噪
$u/V$	0.06	0.060 2	0.060 8	0.630
$f/Hz$	25	24.98	25.053 8	24.851
$\theta/(^\circ)$	45	44.95	44.026 0	42.13

### 3.2 含谐波信号算例

闪变信号中往往包含多频闪变,并存在谐波污染,在检测信号中加入幅值为0.08、频率为10 Hz 的调幅波和幅值为0.1、频率为100 Hz 的谐波信号,该复杂闪变信号为

$$u(t) = [1 + 0.06\cos(50\pi t + \pi/4) + 0.08\cos(20\pi t)] \times [\cos(100\pi t + \pi/6) + 0.1\cos(200\pi t + \pi/3)] + e(t) \quad (8)$$

该复杂闪变信号波形如图3所示。图4为Hankel矩阵分解后的奇异值变化曲线。根据奇异值变化曲线图,将Hankel矩阵有效秩M定为12是合理的。MP方法提取的参数如表3所示。由表3可知,MP方法提取了基波、谐波以及与50 Hz 对应的4个边频分量,但没有提取谐波的边频分量。这是因为谐波的边频分量幅值很小,对应的奇异值也很小,进行低秩近似时,MP算法已将其视作噪声滤除了。

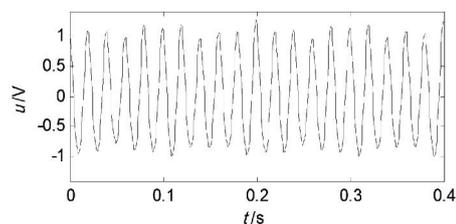


图3 复杂闪变信号波形

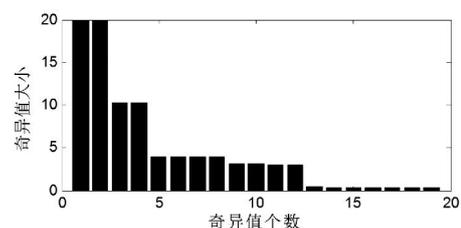


图4 含谐波信号算例奇异值柱状图

表 3 对于复杂闪变 MP 提取的参数

参数分量	$u/V$	$f/Hz$	$\theta/(^\circ)$
基频	1.000 5	50.000 5	29.951 4
边频分量 1	0.040 3	60.019 3	28.748 9
边频分量 2	0.040 1	39.982 1	29.429 6
边频分量 3	0.030 8	74.979 4	69.431 6
边频分量 4	0.030 4	25.033 4	-17.031 9
谐波	0.100 8	99.963 1	60.861 7

表 4 给出了计算参数与理想参数的比较。从表 4 的最终计算参数来看,谐波对计算结果准确性不会产生较大影响,辨识参数的最大误差仅为 2%,可见在复杂闪变情况下 MP 方法也同样具有较高的抗噪能力和检测精度。

表 4 含谐波信号算例参数及检测值

参数类型	理想参数	计算参数		
		参数大小	误差/%	
调幅参数 1	$u/V$	0.06	0.061 2	2.000
	$f/Hz$	25	24.973	0.108
	$\theta/(^\circ)$	45	43.231 8	—
调幅参数 2	$u/V$	0.08	0.080 4	0.375
	$f/Hz$	10	10.018 6	0.186
	$\theta/(^\circ)$	0	0.340 0	—
谐波参数	$u/V$	0.1	0.100 8	0.800
	$f/Hz$	100	99.983 1	0.017
	$\theta/(^\circ)$	60	60.861 7	—

## 4 结 论

1) 将 MP 算法用于电压闪变参数的提取,利用电压闪变信号模型的特殊性质,把它转换为矩阵间的特定关系;从而将难于处理的非线性求解问题简单化,不仅可以较准确地提取闪变电压调幅波的频率和幅值,还可以获取相位信息。

2) 该方法将在求解广义特征值的时候通过低秩近似方法减小了噪声干扰,并提高了计算效率。

3) 噪声背景下的简单电压闪变和包含谐波及多调幅的复杂电压闪变的仿真结果,验证了所提方法的可行性和有效性,为电压闪变参数提取提供了一种新的思路。

### 参考文献

[1] 孙树勤. 电压波动与闪变[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.  
 [2] Toivonen L, Morsky J. Digital Multirate Algorithms for Measurement of Voltage, Power and Flicker[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1995, 10(1): 116 - 126.  
 [3] 郭上华, 黄纯, 王磊, 等. 电压波动和闪变的检测与控

制方法[J]. 湖南电力 2003 23(3): 8 - 11.  
 [4] 魏晓璇, 徐永海, 郭春林, 等. 基于 Hilbert 变换与 Pizarenko 谐波分解的电压闪变参数估计[J]. 电力系统保护与控制 2010 38(6): 26 - 29.  
 [5] 王志群, 朱守真, 周双喜. Hilbert 变换求取电压闪变有关参数[J]. 电力系统自动化 2004 28(5): 34 - 37.  
 [6] Soliman S A, El-Hawary M E. Measurement of Power Systems Voltage and Flicker Levels for Power Quality Analysis: A Static LAV State Estimation Based Algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems 2000 22(6): 447 - 450.  
 [7] 郭上华, 黄纯, 王磊, 等. 电压波动和闪变的检测与控制方法[J]. 湖南电力 2003 23(5): 8 - 11.  
 [8] 肖冰, 梁军, 路平, 等. Hilbert 变换在电压闪变检测中的应用[J]. 继电器 2005 33(15): 62 - 65.  
 [9] 李天云, 祝磊, 党国营, 等. 总体最小二乘-旋转矢量不变技术在电压闪变参数提取中的应用[J]. 电网技术 2009 33(13): 58 - 63.  
 [10] Srinivasan K. Digital Measurement of the Voltage Flicker[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1991 6(4): 1593 - 1598.  
 [11] Wu Chi-Jui, Chen Yu-Jen. A Novel Algorithm for Precise Voltage Flicker Calculation by Using Instantaneous Voltage Vector[J]. IEEE Trans. on Power Delivery 2006 21(3): 1541 - 1548.  
 [12] 杨坤, 杨洪耕. 基于小波测位的闪变检测算法及其实现[J]. 继电器 2004 32(21): 48 - 52.  
 [13] 刘会金, 吴玉蓉, 熊玲玲. 基于 Daubechies 小波的多分辨分解在电压闪变信号分析中的应用[J]. 继电器 2004 32(13): 6 - 11.  
 [14] 舒泓, 王毅. 基于数学形态滤波和 Hilbert 变换的电压闪变测量[J]. 中国电机工程学报 2008 28(1): 111 - 114.  
 [15] 朱瑞可, 李兴源, 赵睿, 等. 矩阵束算法在同步电机参数辨识中的应用[J]. 电力系统自动化 2012 36(6): 52 - 85.  
 [16] 朱瑞可, 王渝红, 李兴源, 等. 基于矩阵束算法的谐波和间谐波参数估计[J]. 华东电力 2012 40(3): 388 - 391.  
 [17] 张君俊, 杨洪耕. TLS-ESPRIT 法在电压闪变参数估计中的应用[J]. 电力系统保护与控制 2009 37(9): 44 - 48.  
 [18] 李宽, 李兴源, 赵睿. 基于改进矩阵束的高压直流次同步振荡检测[J]. 电网技术 2012 36(4): 128 - 132.

作者简介:

罗志宏(1984) 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2015-03-30)

# 跨辖区一体化电能量计量系统故障排查方法研究

王小波 张长春 刘 钢 谢 韵 雷 婷 罗 欢 刘 璋  
( 国网重庆万州供电公司 重庆 万州 404000 )

摘 要: 跨辖区一体化电能量计量系统( 一体化电量系统) 为负荷分析、预测和线损计算提供大量数据, 电量数据异常将会给对其造成巨大麻烦, 影响公司同业对标。为提高系统的消缺进度, 保证负荷分析、预测和线损计算的正确性, 从组织管理措施和技术措施两个方面对此问题进行深入研究, 消缺工作取得巨大进展, 同时也保证中压网损的正确性。

关键词: 一体化电量系统; 组织管理; 技术措施

**Abstract:** Inter - district integrated electric energy metering system ( integrated electricity system) provides large amounts of data for load analysis , forecasting and line loss calculation. The abnormal data will cause big troubles and impact the company index. In order to improve the progress of defect elimination for the system and to assure the accuracy of load analysis , forecasting and line loss calculation , it is studied from two aspects of management measures and technical measures , which make the defect elimination a great progress. And it also ensures the correctness of medium - voltage grid losses.

**Key words:** integrated electricity system; organization and management; technical measures

中图分类号: TM933 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954( 2015) 04 - 0070 - 04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.017

## 0 引 言

跨辖区一体化电能量计量系统( 一体化电量系统) 为负荷分析、预测和线损计算提供大量数据, 电能量数据异常将会给对其造成巨大麻烦, 影响公司同业对标。一体化电量系统问题包括主站系统、抄表终端、电能表、通道 4 个方面, 涉及到调控中心自动化班和通信班、变电工区二次班、营销检验检测班和装表接电班等 5 个班组以及施工单位和调试厂家等, 处理和协调起来比较困难。当主站得不到正确数据时, 无法用简单的手段判断是电能表的问题还是电量采集器的问题, 对电量采集的实时性和准确性造成了很大影响, 因此对电量系统故障排查方法研究是非常必要的, 也是保证电网安全、优质、经济运行的重要措施。

## 1 存在问题及解决思路

### 1.1 电量系统本身的复杂性

一体化电量系统包括主站和站端两部分内容, 主要工作原理是变电站电量采集终端通过 RS485 通信接口或是光纤接口以各种抄表通讯协议对多功

能电能表逐个查询、读取电量数据并保存, 主站电量系统通过数据网和电话线拨号方式周期性的对各变电站电量采集终端进行数据采集<sup>[1-3]</sup>, 如图 1 所示。电量系统集成数据采集、传送、存储、数据处理于一体, 既能定点自动上传数据, 也可在主控中心随时调取采集各种数据<sup>[4-6]</sup>。灵活多样的数据统计分析, 方便快捷的网上查询系统, 可使各部门轻松访问系统, 共享信息资源, 但是其中任一环节出现问题, 都会影响上传电量的准确性。电量主站系统表现出来的问题是无表码或是表码不正确。

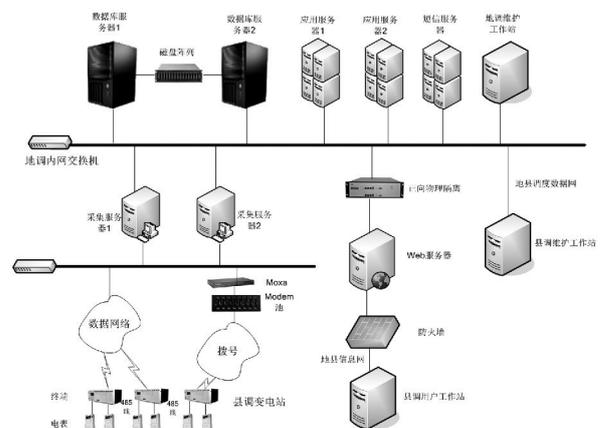


图 1 渝东北跨辖区一体化电能量计量系统网络图

### 1.2 电量系统涉及部门和相关专业较多

部门主要涉及到调控中心、变电工区、营销部、基建部(新投)、运检部(技改)等部门。

调控中心自动化班负责电能量计量系统主站部分的运行维护,通信班负责电能量计量系统变电站到主站通信通道运行维护,变电运检室二次班负责电能量计量系统站端部分的运行维护。营销专业负责变电站计量表计及计量回路的运行维护。

### 1.3 管理制度不完善

无明确的电量系统运行管理规定,无法有效督促各专业处理电量问题的及时性,无相应缺陷处理流程以及考核办法。

针对以上 3 个问题,下面主要通过组织管理措施和技术分析措施两方面进行研究。

## 2 改进措施

### 2.1 组织措施

2013 年 8 月,万州供电公司要求,影响电量系统抄表、计量缺陷不能按照常规变电缺陷消缺要求处理的,原则上在一周内处理好,保证时效性。从 2013 年 8 月开始,自动化主站人员每天查询并上报一次电量系统问题,并及时督促和关注消缺进展。

2014 年 10 月,由调控中心牵头制定《国网重庆万州供电公司电能量计量系统运行管理实施细则》,该细则规定了国网重庆万州供电公司电能量计量系统的组成及其设备的运行管理、检验管理、技术管理,明确了国网重庆万州供电公司相关专业运行管理和维护部门的职责分工以及数据传输通道的管理等,在该细则中,明确了缺陷处理流程以及相关考核指标。

2015 年 3 月,配合万州供电公司发展规划部编写《深化母线电量平衡管理工作方案》,明确了母线

电量管理流程图,如图 2 所示。

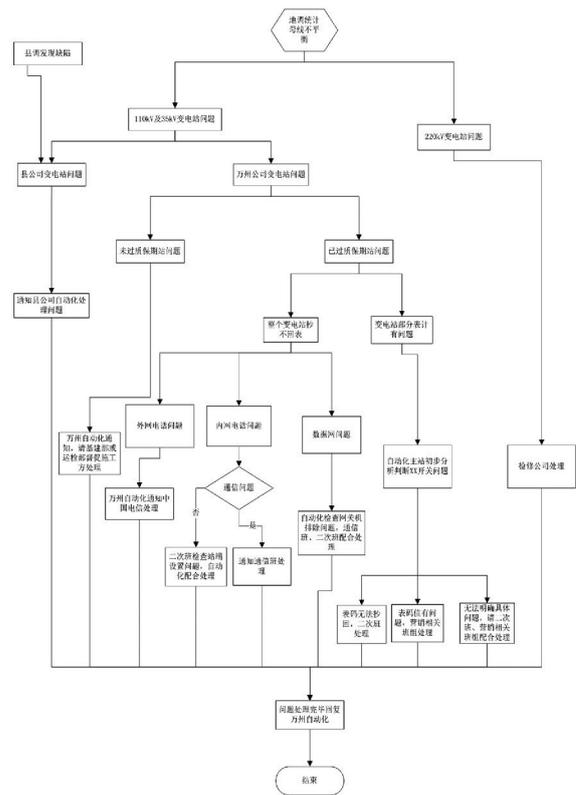


图 2 母线电量管理流程图

### 2.2 技术措施

技术措施主要包括通过本系统线损模块和积分电量模块以及借助远程维护电量终端软件进行分析。

#### 1) 线损分析模块

主要通过主变压器平衡、母线平衡、线损判断计量对象电量是否正确。

以 2014 年 10 月 12 日 110 kV 南滨站 3 号主变压器低压侧 903 开关为例进行分析。

①由图 3 110 kV 南滨站 3 号主变压器变损可知:变损 -208%,不平衡,供入分量(103 开关反向 + 903 开关反向) < 供出分量(103 开关正向 + 903 开关正向);

【110kV南滨站】#3主变变损 电量明细				
时间: 2014-10-12 方案: 自然日 单位: 千瓦时 前一周期 后一周期				
输入电量明细		输出电量明细		
分量名称	汇总关系	运算量	本期	上期
▼ [110kV南滨站]#3主变变损_供入	供入分量		20000.00	19200.00
□ 110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	+	反向	20000.00	19200.00
□ 110kV南滨站#3主变高压侧#103开关	+	反向	0.00	0.00
□ 供入分量累加			20000	19200
□ 损失			-41600	-42400
□ 线损率(%)			-208.00	-220.83
▼ [110kV南滨站]#3主变变损_供出	供出分量		61600.00	61600.00
□ 110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	+	正向	0.00	0.00
□ 110kV南滨站#3主变高压侧#103开关	+	正向	61600.00	61600.00
□ 供出分量累加			61600	61600

图 3 10 月 12 日 110 kV 南滨站 3 号主变压器平衡



图 4 10 月 12 日 110 kV 南滨站 3 号主变压器平衡

序号	测量点名称	数据时间	抄表电量		积分电量		对比	
			正向有功	反向有功	正向有功	反向有功	差量	差率 (%)
2	110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	2014-10-02	0	20800	0	64000	-43200	-207.69
3	110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	2014-10-03	0	20000	0	61720	-41720	-208.60
4	110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	2014-10-04	0	16800	0	53884	-36084	-214.67
5	110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	2014-10-05	0	21600	0	64096	-42496	-196.74
6	110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	2014-10-06	0	20800	0	62978	-42178	-202.78
7	110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	2014-10-07	0	21600	0	66301	-44701	-206.95
8	110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	2014-10-08	0	21600	0	64614	-43014	-199.14
9	110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	2014-10-09	0	20000	0	62177	-42177	-210.88
10	110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	2014-10-10	0	20000	0	60719	-40719	-203.99
11	110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	2014-10-11	0	19200	0	61437	-42237	-219.96
12	110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	2014-10-12	0	20000	0	61035	-41035	-205.17
13	110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	2014-10-13	0	21600	0	66646	-45046	-208.55
14	110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	2014-10-14	0	20800	0	63898	-43098	-207.20
15	110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	2014-10-15	0	18400	0	58658	-40258	-218.79
16	110kV南滨站#3主变低压侧#903开关	2014-10-16	0	39200	0	58406	-19206	-48.99

图 5 10 月 12 日 110 kV 南滨站 3 号主变压器低压侧 903 开关抄表与积分电量比较

②由图 4 110 kV 南滨站 110 kV 母线平衡可知: 母线平衡, 103 开关正、反向电量均正确, 由此可以判断 3 号主变压器低压侧 903 开关电量存在问题。

### 2) 积分电量模块

积分电量主要原理是电量系统从 SCADA 系统取各计量对象的实时负荷, 通过电量系统积分电量模块将负荷数据转化成电量数据, 本功能作为核算

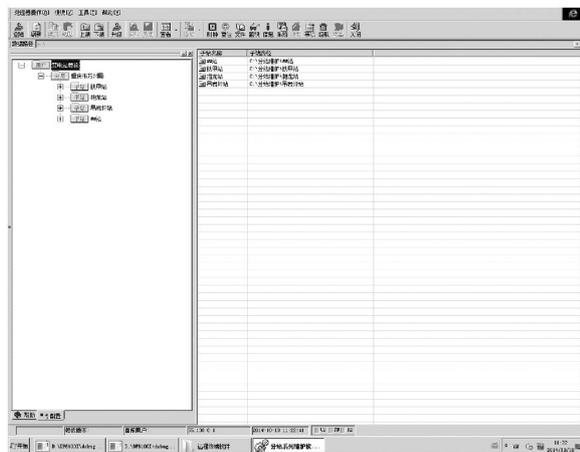


图 6 东方远程电量终端软件界面

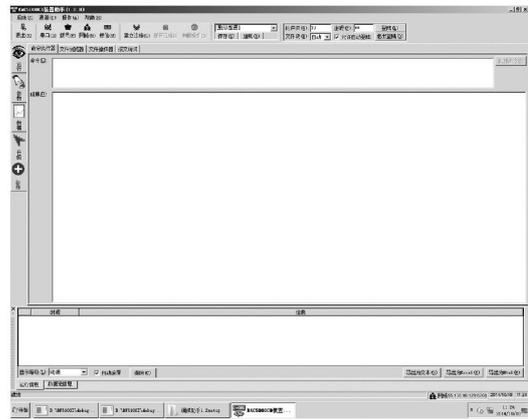


图 8 科立远程电量终端软件界面

计量对象的辅助功能, 前提条件是 SCADA 系统遥测数据合格率达到 99% 以上。

还是以 10 月 12 日 110 kV 南滨站 3 号主变压器低压侧 903 开关为例进行分析。

图 5 为 110 kV 南滨站 3 号主变压器低压侧 903 开关抄表与积分电量比较, 由图可以看出: 903 开关



图 7 威胜远程电量终端软件界面

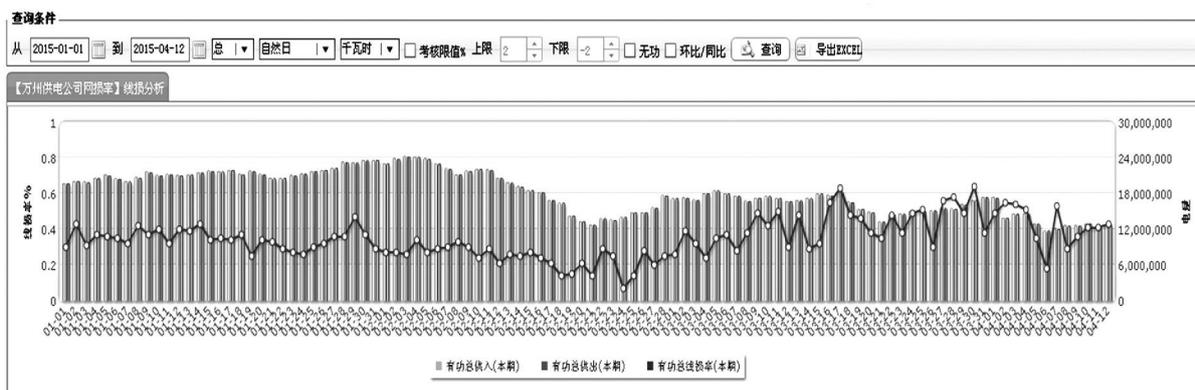


图 9 万州供电公司中压网损率基本情况

抄表电量为 20 000 积分为 61 035。

110 kV 南滨站 110 kV 母线平衡:

供入分量( 103 开关反向 + 903 开关反向) = 61 035;

供出分量( 103 开关正向 + 903 开关正向) = 61 600。

61 035 与 61 600 几乎相等,由此可以判 903 开关正确电量为 61 035 左右。

2014 年 9 月 26 日营销检验检测现场检查是互感器极性接反,由于该站是新投站,应由基建部督促调试厂家处理。

### 3) 远程维护电量终端软件

图 6 ~ 图 8 是东方、威胜、科立远程电量终端软件界面,主要功能是通过各远程维护电量终端软件,通过网络或是拨号方式远程登录到电量采集终端进行访问,查看电量终端档案、表码是否与主站一致,现场能不能抄表,这样可以排除主站问题,电量终端是电量系统的枢纽,也是主站系统正常抄表的基础。

## 3 成效分析

经过一年半的努力,一体化电量系统消缺工作取得重大成效。累计至 2015 年 4 月 13 日,共消除缺陷 150 条,为今年线损同业对标提供了强有力的技术支撑,图 9 为 2015 年 1 月 1 日至 4 月 13 日万州供电公司中压网损率基本情况。

## 4 下一步打算

1) 自动化班应继续每天上报电量系统问题,掌

握各缺陷处理过程;应提高业务水平,尽可能准确判断出缺陷的源头。

2) 要严格按照《国网重庆万州供电公司电能量计量系统运行管理实施细则》和《深化母线电量平衡管理工作方案》执行,加强各部门协调、沟通,提高缺陷的处理效率,将缺陷消灭在萌芽状态。

### 参考文献

- [1] 余仲明,吴玉林. 江苏电网下网侧电能量计量系统设计介绍[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 106 - 107.
- [2] 董昕,王林,杨继勋. 电能量采集及计费自动化系统设计[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(7): 55 - 57.
- [3] 张晶. 面向电力市场的电能量计量系统[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 52 - 56.
- [4] 田柱,李斌,崔恒志. 江苏电网电能量计费信息发布系统[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(16): 62 - 63.
- [5] 钱毓敏,曾大琼. 华东电网电能量计费系统及其应用. 电网技术, 2002, 26(5): 72 - 75.
- [6] 阎涛,金午桥,余仲明. 电能量计量系统接入方案及功能实施. 电网技术, 2003, 27(8): 59 - 63.

作者简介:

王小波(1986),硕士研究生,工程师,研究方向为电力系统调度自动化;

张长春(1982),硕士研究生,工程师,研究方向为电力系统调度自动化;

刘钢(1986),硕士研究生,工程师,研究方向为电力系统调度自动化。

(收稿日期: 2015 - 04 - 29)

# 变电站扩建工程电磁环境影响预测方法探讨

曾媛,何清怀,南方

(四川电力设计咨询有限责任公司,四川成都 610016)

**摘要:** 变电站扩建工程电磁环境影响预测中难于找到完全满足类比条件的变电站。通过对变电站电磁环境影响因素分析,提出了变电站扩建后的站界电磁环境影响预测方法,即可将变电站扩建前站界电磁环境现状监测值按主变压器台数和出线回路数进行修正后作为扩建后站界预测值。通过与实际监测值比较,该预测方法具有较好的准确性和实用性。

**关键词:** 扩建变电站; 电磁环境; 影响预测

**Abstract:** It is hard to find a substation which can meet all analogy conditions in substation expansion project. By analyzing the impact factors of electromagnetic environment in substation, the impact forecasting methods of electromagnetic environment on the extension of substation is proposed, that is, the electromagnetic value of substation before the extension can be used for the predictive value of substation after the extension after it is corrected by the number of main transformers and inlet-outlet lines. Comparing with the actual monitoring value, the proposed forecasting method has better accuracy and practicality.

**Key words:** extension of substation; electromagnetic environment; impact prediction

中图分类号: TM154 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0074-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.018

## 0 引言

变电站扩建工程是电力设计中常见的工程。根据输变电工程环境影响评价导则<sup>[1]</sup>,变电站电磁环境影响需采用类比方法分析,即选用已运行变电站电磁环境监测值进行定量预测,但在实际工作中,难于找到完全满足类比条件的变电站,因此,下面以已运行变电站扩建工程为研究对象,通过分析变电站电磁环境影响因素,提出了变电站扩建后站界电磁环境影响评价方法,并通过3种典型变电站扩建后预测结果和监测值进行对比分析,认为所提出的变电站扩建后电磁环境影响评价方法能反映变电站电磁环境影响状况。

## 1 变电站电磁环境影响因素

变电站内的电气设备包括主变压器、电抗器、电容器、母线桥等。相关资料表明<sup>[2]</sup>,变电站内电气设备在带电负荷运行时均都会产生工频电场和工频磁场。变电站扩建建设内容主要是增加主变压器台

数、间隔扩建设备等,站内的既有电气设备不变,既有电气设备在带电负荷情况下产生的工频电场和工频磁场基本无变化。因此,变电站扩建后导致工频电场和工频磁场变化的因素为新增主变压器和出线间隔设备。

从国内变电站电磁环境监测结果标明<sup>[3-4]</sup>,当变电站其他参数相同时,变电站主变压器台数越多,站界电磁环境影响越大,主变压器台数与站界电磁环境影响程度具有正相关性,但并不成倍数关系;单台主变压器容量大小对站界工频电场强度无明显关系;出线间隔位于变电站出线侧,对出线侧站界电磁环境会产生一定影响,出线间隔数量增加,变电站出线侧站界电磁环境影响也有增大,但不成倍数关系。

## 2 变电站扩建后站界电磁环境影响预测

变电站电磁环境影响预测通常采用类比分析,选择类比变电站需考虑电压等级、主变压器台数及容量、出线回路(间隔)数、出线架线形式、配电装置型式及布置方式、总平面布置方式、区域电磁环境背景状况等<sup>[5]</sup>。运行变电站扩建后,变电站电压等

表1 110 kV 变电站扩建前后主要技术参数

变电站名称	河堰		萝卜岗		沙坪	
	扩建前	扩建后	扩建前	扩建后	扩建前	扩建后
电压等级/kV	110					
总平面布置	户外					
主变压器规模/MVA	1×40	2×40	1×31.5	1×31.5+1×50	2×40	2×40+1×50
出线回路数	3	3	4	4	3	4

级、出线架线形式、配电装置型式及布置方式、总平面布置方式等均不会发生变化,仅在主变压器台数、容量大小和出线回路数等方面发生改变。根据前述对主变压器台数、主变压器容量、出线回路数等对站界的电磁环境影响分析,提出变电站扩建后站界电磁环境影响采用现状监测值按主变压器台数、容量大小和出线回路数成倍增加进行预测。具体方法如下。

### 2.1 主变压器台数、容量大小

由前述分析可知,站界电磁环境影响与主变压器台数有一定相关性,但不成倍数关系,主要与配电装置设置有关;主变压器单台容量大小与站界电磁环境影响无明显关系。因此,在对扩建变电站主变压器台数和容量修正时,仅考虑主变压器台数的影响而忽略容量的影响。为保守预测变电站主变压器扩建的电磁环境影响,可按主变压器电磁环境影响与主变压器台数成正比例关系进行修正,即在变电站所有站界,将变电站主变压器扩建前电磁环境现状监测值乘以扩建后主变压器台数与原主变压器台数的比值进行修正。

### 2.2 出线回路数修正

根据前述分析,出线回路数与出线侧站界电磁环境产生影响具有正相关性,但并不为倍数关系;因此,在对扩建变电站出线回路数修正时,为保守预测变电站出线间隔扩建的电磁环境影响,可按出线间隔电磁环境影响与出线回路数成正比例关系进行修正,即在变电站出线侧,将出线间隔扩建前电磁环境现状监测值乘以扩建后出线回路数与原出线回路的比值进行修正。

特别指出的是,由于变电站主变压器台数修正时,是对所有站界电磁环境影响监测值进行修正,包

括出线侧站界;而实际上出线侧站界电磁环境更多的是与出线回路数相关<sup>[6-7]</sup>,因此,主变压器台数修正已相当于将出线回路数按比例增加了,所以只有当按主变压器台数修正后,出线回路数仍少于变电站扩建后出线回路数时才进行出线回路数修正。

## 3 扩建变电站站界电磁环境影响评价

选取了3座扩建规模不同的变电站,按照第2节中扩建变电站站界电磁环境影响评价方法对变电站扩建后的电磁环境影响进行预测,然后再与变电站扩建后的实际监测值进行比较分析。

### 3.1 变电站扩建前后主要技术参数

选取的变电站扩建前后主要技术参数见表1。

### 3.2 监测仪器及监测方法

在现场监测过程中,监测仪器、测量条件均符合交流输变电工程电磁环境监测方法的要求。电磁场测量仪,主机型号PMM8053B/EHP50C;工频电场强度检出下限为 $10^{-3}$  kV/m,工频磁感应强度检出下限为 $10^{-6}$  mT。测点选择在变电站四周围墙外5 m处,避开变电站进出线,各布设4个监测点(每侧各1个点)。

### 3.3 扩建变电站预测值与监测值比较分析

根据所提出的扩建变电站站界电磁环境影响评价方法,表1中的3座变电站扩建后电磁环境影响预测值为变电站扩建前电磁环境现状监测值扩大到2倍的值。3座变电站扩建后的预测值和监测值见表2~表4。

3座变电站扩建后站界工频电场强度预测平均值和监测平均值对比见图1。

表2 河堰变电站扩建后的预测值与监测值

站界名称	工频电场强度/(kV·m <sup>-1</sup> )		工频磁感应强度/mT	
	预测值	监测值	预测值	监测值
东侧	6.8 × 10 <sup>-2</sup>	2 × 10 <sup>-3</sup>	1.7 × 10 <sup>-4</sup>	6.0 × 10 <sup>-5</sup>
南侧	4.56 × 10 <sup>-1</sup>	4.61 × 10 <sup>-4</sup>	1.9 × 10 <sup>-4</sup>	3.82 × 10 <sup>-4</sup>
西侧	4.6 × 10 <sup>-2</sup>	1.5 × 10 <sup>-2</sup>	1.3 × 10 <sup>-4</sup>	9.5 × 10 <sup>-5</sup>
北侧	1.44 × 10 <sup>-1</sup>	2.7 × 10 <sup>-2</sup>	7.0 × 10 <sup>-4</sup>	4.38 × 10 <sup>-4</sup>

表3 萝卜岗变电站扩建后的预测值与监测值

站界名称	工频电场强度/(kV·m <sup>-1</sup> )		工频磁感应强度/mT	
	预测值	监测值	预测值	监测值
西南侧	2.6 × 10 <sup>-2</sup>	2.8 × 10 <sup>-2</sup>	3.64 × 10 <sup>-4</sup>	2.88 × 10 <sup>-4</sup>
西北侧	2.2 × 10 <sup>-2</sup>	1.3 × 10 <sup>-2</sup>	2.38 × 10 <sup>-4</sup>	1.27 × 10 <sup>-4</sup>
东北侧	8.4 × 10 <sup>-2</sup>	8.2 × 10 <sup>-2</sup>	2.90 × 10 <sup>-4</sup>	4.55 × 10 <sup>-4</sup>
东南侧	3.6 × 10 <sup>-2</sup>	1.4 × 10 <sup>-2</sup>	4.60 × 10 <sup>-4</sup>	3.08 × 10 <sup>-4</sup>

表4 沙坪变电站扩建后的预测值与监测值

站界名称	工频电场强度/(kV·m <sup>-1</sup> )		工频磁感应强度/mT	
	预测值	监测值	预测值	监测值
西北侧	3.6 × 10 <sup>-2</sup>	3.4 × 10 <sup>-2</sup>	9.2 × 10 <sup>-5</sup>	6.2 × 10 <sup>-5</sup>
西南侧	9.2 × 10 <sup>-2</sup>	1.06 × 10 <sup>-1</sup>	3.56 × 10 <sup>-4</sup>	3.53 × 10 <sup>-4</sup>
东南侧	8.8 × 10 <sup>-2</sup>	9.9 × 10 <sup>-2</sup>	2.04 × 10 <sup>-4</sup>	1.26 × 10 <sup>-4</sup>
东北侧	1.12 × 10 <sup>-1</sup>	7.9 × 10 <sup>-2</sup>	2.06 × 10 <sup>-4</sup>	1.35 × 10 <sup>-4</sup>

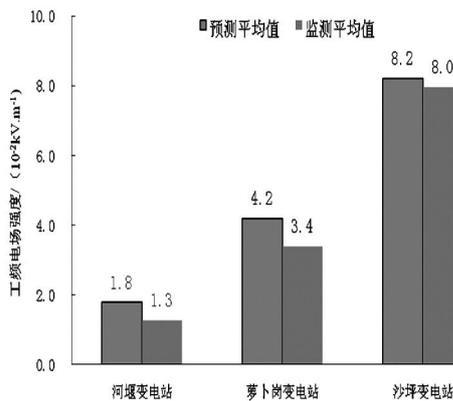


图1 变电站工频电场强度预测平均值和监测平均值

从图1中可以看出,3座变电站的工频电场强度预测平均值均较监测平均值大,偏大约23.5%~41.3%,但其绝对值均属同一数量级水平,预测值能保守反映变电站扩建后的工频电场影响状况,工频电场强度预测方法是合理的。

3座变电站扩建后站界工频磁感应强度预测平

均值和监测平均值对比见图2。

从图2中可以看出,3座变电站的工频磁感应强度预测平均值均较监测平均值大,偏大约14.6%~22.1%,但其绝对值均属同一数量级水平,预测值能保守反映变电站扩建后的工频磁场影响状况,工频磁感应强度预测方法是合理的。

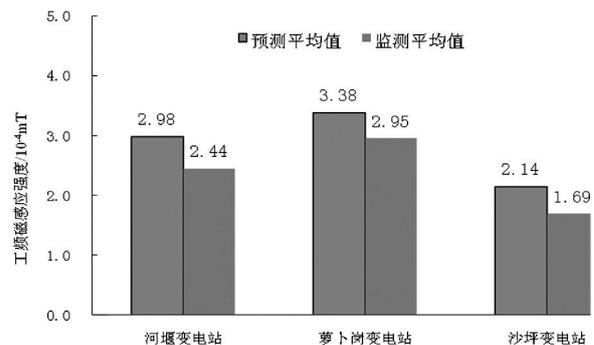


图2 变电站工频磁感应强度预测平均值和监测平均值

## 4 结 论

通过对扩建变电站的电磁环境影响初步探讨,得出以下结论:

1) 变电站扩建后引起站外工频电场和工频磁场增加的因素为扩建的主变压器和出线间隔;

2) 在无法找到完全满足规范要求的类比变电站时,可通常对变电站扩建前电磁环境现状监测值按主变压器台数和出线回路数进行修正,修正值能保守反映变电站扩建后电磁环境影响的预测值;

3) 变电站主变压器扩建修正时可采用变电站扩建前电磁环境现状监测值乘以扩建后主变压器台数与原主变压器台数的比值进行修正;

4) 变电站出线回路数修正时可采用变电站扩建前电磁环境现状监测值乘以扩建后出线回路数与原出线回路数的比值进行修正。

### 参考文献

[1] HJ24-2014 环境影响评价技术导则输变电工程[S].

(上接第4页)

### 参考文献

[1] 王珍珍. 调速系统引发低频振荡的机理及抑制措施研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.

[2] 王铁强, 贺仁睦, 王卫国, 等. 电力系统低频振荡机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 21-25.

[3] 刘辉, 杨寅平, 田云峰, 等. 电力系统强迫功率振荡实例及机理分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 113-117.

[4] 徐衍会, 贺仁睦, 韩志勇. 电力系统共振机理低频振荡扰动源分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 83-87.

[5] 杨慧敏. 区域电网低频振荡特性分析与抑制方法的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.

[6] 魏云冰, 和萍, 李山德, 等. 电力系统低频振荡机理及控制策略研究[J]. 山东科技大学学报, 2008, 2(3): 23-26.

[2] 巩延果. 500 kV 变电站站内工频电磁场检测分析[J]. 广西电力, 2012, 35(4): 67-69.

[3] 刘岳定, 王里奥, 江玲燕. 重庆市典型变电站站场外工频电磁场实测分析[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(3): 138-140.

[4] 赵志勇, 宋晓东, 朱艳秋. 110~220 kV 高压变电站电磁环境影响因素分析[J]. 中国辐射卫生, 2010, 19(4): 452-453.

[5] 钱承萍, 杨琼分, 黄川友, 等. 关于新建110 kV 变电站电磁环境影响评价的几点建议[J]. 能源环境保护, 2012, 26(5): 53-55.

[6] 阮黎东, 宋福祥, 孙全红. 高压变电站对周围环境的影响与评价[J]. 电力环境保护, 2005, 21(3): 1-3.

[7] 赵素丽, 史玉柱. 设置变电站电磁环境影响防护控制区的必要性探讨[J]. 电力环境保护, 2008, 24(3): 50-53.

作者简介:

曾 媛(1981), 硕士, 工程师, 主要从事输变电工程环境影响评价

(收稿日期: 2015-02-20)

[7] 宋墩文, 杨学涛, 丁巧林, 等. 大规模互联电网低频振荡分析与控制方法综述[J]. 电网技术, 2011(10): 22-28.

[8] 耿天翔, 张竹竞, 项丽, 等. 基于起振特性的强迫振荡扰动源定位及解列方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015(6): 98-103.

[9] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[10] 王茂海, 孙昊. 强迫功率振荡源的在线定位分析技术[J]. 中国电机工程学报, 2014(34): 6209-6215.

作者简介:

周 专(1987), 硕士, 研究方向为电力系统规划、稳定与控制;

常喜强(1976), 硕士, 研究方向为电力系统分析与控制;

张增强(1984), 硕士, 研究方向为电力系统规划与分析。

(收稿日期: 2015-04-29)

# 大截面电缆金具涡流损耗计算与分析

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

**摘要:** 电缆的输送容量随着大截面电缆的广泛应用而越来越大。在大电流作用下,电缆金具涡流损耗不能忽略。分析电缆金具涡流原理,建立大截面电缆固定金具的三维涡流场数学模型,在考虑边界条件和初始条件下,利用有限元法,计算单根电缆的金具涡流损耗模型。计算结果得出金具涡流损耗,分析磁感应强度和涡流损耗分布,探讨了金具间隙大小和金具厚度对金具涡流损耗的影响,结合仿真实验和工程实际提出了最佳的金具间隙大小和金具厚度。

**关键词:** 大截面电缆; 电缆金具; 有限元法; 金具间隙

**Abstract:** With the wide application of large cross-section power cables in China, the transmission capacity of the cable is also growing. Under the high current, the eddy current losses of fixed cleat cannot be ignored. The principle of eddy current of fixed cleat for power cable is analyzed, and a 3D eddy current mathematical model of fixed cleat for large cross-section power cable is established. Under the consideration of boundary and initial conditions, the eddy current losses of fixed cleat for single cable are calculated with finite element method (FEM). The eddy current losses of fixed cleat are obtained after the calculation, and the distributions of magnetic induction intensity and eddy current losses are analyzed. And then the impacts of the clearance in cable fittings and their thickness on eddy current losses of fixed cleat are discussed. Finally, the best clearance in fittings and the best thickness are proposed combining with the simulation and the actual projects.

**Key words:** large cross-section power cable; cable fitting; finite element method (FEM); clearance of fittings

中图分类号: TM247 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0078-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.019

## 0 引言

电网的输送容量随着电网的快速发展越来越大,220 kV大截面电缆的应用也越来越广泛<sup>[1]</sup>。在电缆运行过程中,大截面电缆的固定金具和支撑金具发挥很大作用,其将电缆重量和热机械力以及短路时的电动力分散到各个金具释放,使电缆免受机械损伤。长期的大电流作用使得金具损耗成为了电力电缆线路损耗中不可忽略的一部分,且金具长期发热对电缆外护套的寿命也有一定的影响<sup>[2-3]</sup>。目前,国内损耗计算的文献,较多集中在电磁炉、变压器铁心等领域的电涡流发热课题的研究,但是对于高压电缆引起的涡流场导致电缆金具发热的问题关注较少<sup>[4-6]</sup>,国内对大截面电缆金具的研究没有跟上电网的发展。因此,对于大截面电力电缆金具损耗的研究,有助于电力电缆工程中对金具的选型、减少线路损耗、提高电力电缆运行稳定性及降低线路运行成本。

通过分析涡流原理,结合有限元方法,采用COMSOL软件对隧道敷设大截面(2 000 mm<sup>2</sup>)超高压单芯交联聚乙烯电力电缆及电缆金具进行建模,仿真计算在正常运行工况下所配套金具的损耗,分析仿真结果,并探讨金具间隙和金具厚度对金具损耗的影响。

## 1 涡流损耗产生的原理

电缆电流引起的金具涡流问题属于时变涡流场问题<sup>[7]</sup>。电缆通过交变电流后,由于金具本身是采用铝合金等材料,在交变电流的作用下,金具周围会产生交变磁场,此磁场强度 $B$ 的表达式为

$$B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (1)$$

式中: $H$ 为磁场强度; $\mu_0$ 为电导率; $r$ 为距离无限长导线的距离; $I$ 为电流。根据电磁感应定律,此交变磁场在金具内部也会产生感应电动势,感应电动势 $e$ 为

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

式中,  $\Phi$  为磁通。金具在感应电动势的作用下产生感应电流, 由于它是围绕金具中心呈涡状流动, 所以称为涡流。由于金具存在一定的电阻, 涡流会产生功率损耗, 即为涡流损耗。

由于金属护套本身存在环流与涡流, 必然会使电缆本体产生热量, 这些热量通过热传导的形式, 向与它接触的金具传递热, 且金具本身的涡流也会使金具产生大量的热量。当散热与生热两者平衡时, 电缆金具会保持为一个恒定值。如果这个温度长期地作用在电缆上, 会引起电缆表面绝缘的破坏, 加快电缆老化的速度, 减短电缆的寿命。因此研究隧道敷设大截面超高压单芯交联聚乙烯电缆和金具损耗具有重要的意义。

## 2 建立模型与仿真分析

### 2.1 建立金具涡流场数学模型

由于金具的物理和几何参数在沿电缆电流方向均发生变化, 因此金具涡流场问题是一个三维涡流场求解问题。大截面电力电缆在工频条件下稳定运行, 作似稳电磁场, 可忽略其位移电流与传导电流。图1所示为电缆缆芯导体与电缆金具简化模型正视图, 其中  $V_1$  为含电力电缆的非涡流区;  $V_2$  为电缆金具, 即涡流区;  $S_{12}$  为  $V_1$  和  $V_2$  的内部分界面;  $V_2$  的外边界分别为  $S_B$  和  $S_H$  [8-9]。

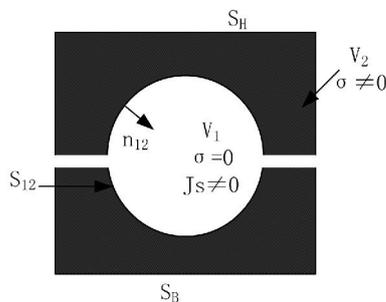


图1 电缆金具与缆芯简化模型正视图

在  $V_1$  和  $V_2$  内, 根据麦克斯韦方程组, 用场矢量  $B$ 、 $E$ 、 $H$  表示的涡流场控制方程与边界条件如式(3)至式(7)。

$$\begin{cases} \nabla \times H = J_s \\ \nabla \times B = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \nabla \times H = \sigma E \\ \nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \\ \nabla \times B = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} B_1 \times n_{12} = B_2 \times n_{12} \\ H_1 \times n_{12} = H_2 \times n_{12} \end{cases} \quad (5)$$

$$B \times n = 0 \quad (6)$$

$$H \times n = 0 \quad (7)$$

式(3)、式(4)分别属于区域  $V_1$ 、 $V_2$ , 式(5)~式(7)分别属于边界  $S_{12}$ 、 $S_B$ 、 $S_H$ 。式中  $J_s$  为电力电缆电流密度;  $n$  为  $S$  的单位法矢量;  $n_{12}$  为  $S_{12}$  的单位法矢量, 方向从  $V_2$  指向  $V_1$ 。

三维开域涡流场一般采用  $A$ 、 $\Phi$ - $A$  法, 在非涡流区采用矢量磁位  $A$  作为未知函数, 在涡流区采用  $A$  和标量  $\Phi$  电位作为未知函数, 引入式(8)和式(9)得

$$B = \nabla \times A \quad (8)$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \Phi \quad (9)$$

将式(8)和式(9)带入式(3)~式(7)所得控制方程和边界条件并不能保证矢量磁位  $A$  的唯一性, 这里引入库仑规范, 并规定  $\nabla \times A = 0$

考虑电流连续性方程式, 式(3)和式(4)分别改写为

$$\nabla \times (v \nabla \times A) - \nabla (v \nabla \times A) = J_s \quad (10)$$

$$\begin{cases} \nabla \times (v \nabla \times A) - \nabla (v \nabla \times A) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \nabla \Phi = 0 \\ \nabla \times (-\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla \Phi) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

对式(10)和式(11)的第一个方程取散度, 并考虑源电流密度的散度为零, 可得出在整个区域  $V$  内标量函数  $v \nabla \times A$  满足拉普拉斯方程结论, 即

$$\nabla^2 (v \nabla \times A) = 0 \quad (12)$$

式中  $v \nabla \times A$  是整个区域  $V$  内的调和函数, 在边界  $S$  上给定第一类边界或齐次混合边界都可以保证矢量磁位  $A$  满足库仑规范。

综上所述, 引入矢量磁位  $A$ 、标量电位  $\Phi$  在给定初始条件和边界条件下, 涡流场完整数学模型如下, 式(13)、式(14)分别属于区域  $V_1$ 、 $V_2$ , 式(15)~式(17)分别属于边界  $S_B$ 、 $S_H$ 、 $S_{12}$ 。

$$\nabla \times (v \nabla \times A) - \nabla (v \nabla \times A) = J_s \quad (13)$$

$$\begin{cases} \nabla \times (v \nabla \times A) - \nabla (v \nabla \times A) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \nabla \Phi = 0 \\ \nabla \times (-\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla \Phi) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} n \times A = 0 \\ v \nabla \times A = 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} n \times A = 0 \\ (v \nabla \times A) \times n = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} A_1 = A_2 \\ v_1 \nabla \times A_1 = v_2 \nabla \times A_2 \\ v_1 \nabla \times A_1 \times n_{12} = v_1 \nabla \times A_1 \times n_{12} \\ n \times (-\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla \Phi) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

### 2.2 建立有限元模型

根据实际隧道敷设电力电缆固定金具的实体模型建立相应的金具三维模型,金具为常用的电工铝合金材料3003,它的电导率为40% IACS。金具结构参数如表1所示。为了简化电缆模型,将电缆缆芯假设为一根加载源电流的通电导线;忽略谐波的影响;不考虑空间电荷和位移电流的影响;认为媒质的磁导率都是线性的<sup>[10-12]</sup>。由于涡流场是开域场,在无限大的区域内进行计算是不实际的,因此取电缆长度500 mm进行计算,忽略其他位置电缆所产生的磁场对金具的影响。采用的电缆型号为YJLW02-Z型,电压等级为220 kV,电缆缆芯施加电流载荷额定有效值为2 000 A。电缆结构参数如表2所示。最终建立的电力电缆和电缆金具三维模型如图2所示。采用四面体单元对电缆模型和金具模型各个部件进行自适应的网格划分,共226 071个单元。

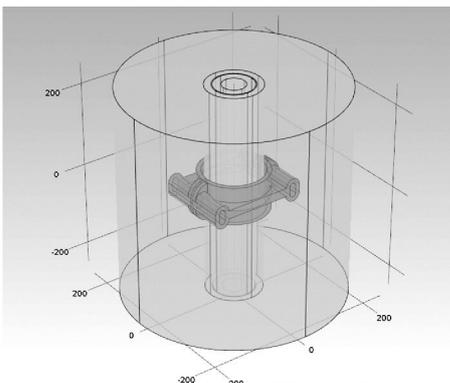


图2 电缆和金具的计算模型

### 2.3 仿真结果分析

根据仿真实验结果,得出电缆金具磁感应强度图如图3,金具涡流损耗分布图如图4。

表1 金具结构参数

参数	长度 /mm	厚度 /mm	内径 /mm	纵向宽 /mm	中间间隙 /mm
数值	54	18.5	2.3	7	127

表2 电缆结构参数

参数	导体直径 /mm	绝缘层厚 /mm	金属护套 /mm	外护层厚 /mm	电缆直径 /mm
数值	54	18.5	2.3	7	127

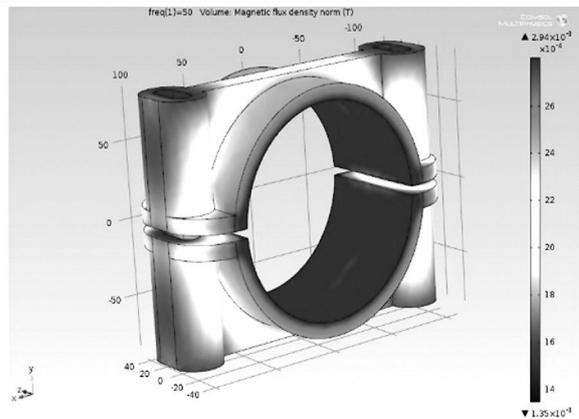


图3 磁感应强度图

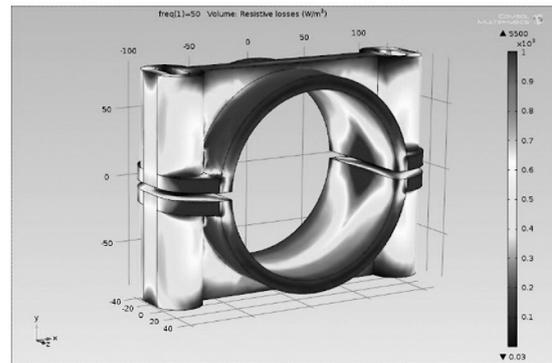


图4 涡流损耗分布图

从图3可以看出,电缆金具的磁感应强度主要集中在金具与电缆的接触面上,平均磁感应强度达到了 $3 \times 10^{-3} T$ ,而金具离电缆较远端磁感应强度略低于近端,平均磁感应强度为 $2 \times 10^{-3} T$ 。由理想公式 $B = \mu I / 2\pi r$ 可以看出,磁通量密度与离电缆距离 $r$ 呈反比关系,离电缆越近磁通量密度越大。图4为涡流损耗分布图,仿真计算得出电缆金具的涡流损耗为0.213 5 W。可以看出两片金具对接处的涡流损耗远远大于金具其他地方。这是因为该部分不仅有涡流损耗,还有漏磁产生的附加损耗。

### 3 影响因素分析

#### 3.1 金具间隙对损耗的影响

部分磁通通过金具和空气间隙而闭合,这部分磁通称为漏磁,漏磁也能使电缆金具产生涡流。气隙磁导的变化会引起气隙磁场变化,而这个气隙磁场的变化会产生附加损耗,两片金具对接处不仅有涡流损耗,还存在因漏磁而产生的附加损耗<sup>[13]</sup>。考虑中间间隙大小对涡流损耗的影响,以图2的有限元模型为例,仅改变电缆金具模型中金具间隙的大小,不改变电缆模型和金具模型中的其他结构参数,其他条件都不变。中间间隙从0 mm变化至8 mm。金具涡流损耗随中间间隙大小变化的情况如图5所示。从图5可以看出,中间间隙为0 mm时,涡流损耗最大,为0.215 71 W,随着中间间隙增大,金具涡流损耗逐渐减小。因为随着气隙增大,夹具上下部分之间空气磁阻增大,使得产生涡流损耗减小。

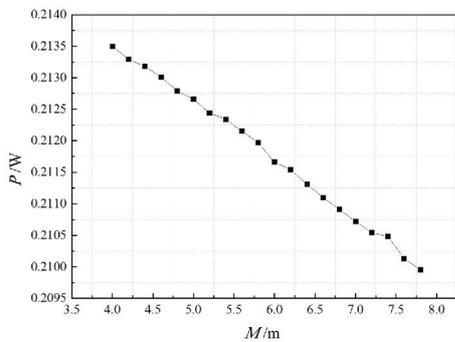


图5 金具涡流损耗随中间间隙大小变化图

#### 3.2 金具厚度对损耗的影响

金具厚度一方面决定着其强度,另一方面对涡流损耗有影响。以图2的有限元模型为例,改变电缆金具模型中金具厚度,不改变电缆模型和金具模

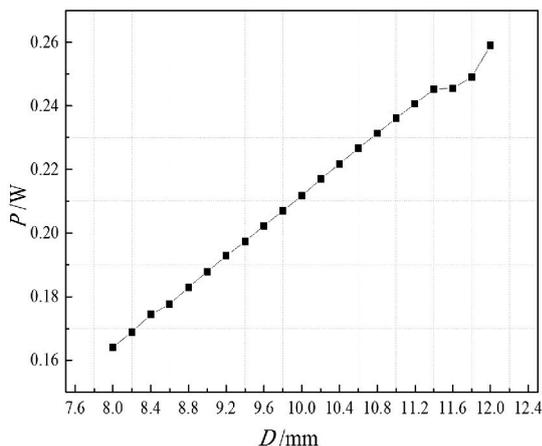


图6 金具涡流损耗随厚度变化图

型中的其他结构参数,其他条件都不变。金具厚度  $D$  从8 mm变化至12 mm。图6为金具涡流损耗随金具厚度的变化情况。可以看出金具涡流损耗与金具厚度近似呈线性关系,由截距法可以推知当金具厚度增加1 mm时,涡流损耗将近似增加0.024 W。

### 4 结论

根据对大截面电力电缆金具三维涡流场的分析,分析涡流损耗产生的原理,基于有限元基本原理,运用COMSOL软件建立大截面电力电缆固定金具三维涡流损耗的计算模型,仿真计算磁感应强度及其分布,金具涡流损耗及其分布,分析金具间隙大小和金具厚度对涡流损耗的影响,得出以下结论:

1) 电缆金具的磁感应强度主要集中在金具与电缆的接触面,涡流损耗在两片夹具对接处远远大于金具其他地方。

2) 求得单个金具的涡流损耗一般在0.22 W左右。虽然该金具涡流损耗较小,但长期发热会引起电缆本体局部过高的温升,加上现在电力电缆多采用隧道敷设,隧道内温度高,特别是夏季,电缆局部温度过高导致电缆绝缘老化。在实际工程中电力电缆隧道一般为多回路敷设且线路较长,隧道内金具数量很多。虽然单个金具涡流损耗较小,但是计及金具数量和大截面电缆运行时间由此而产生的涡流损耗是不可忽略的。

3) 改变金具间隙大小对金具涡流损耗的影响较大,随着中间间隙增大,金具损耗逐渐减小,但中间间隙过大时,固定金具不能支撑电缆重量,机械力电动力得不到释放,得出金具间隙大小的最好选在5~6 mm之间。

4) 改变厚度对金具涡流损耗的影响较大,金具损耗随厚度近似呈线性变化。金具厚度增大,金具涡流损耗随之增加;但是金具厚度太薄,无法满足暂态电流下电动力对金具机械强度的要求,综合实验结果和工程实际,金具厚度为10 mm较合适。

#### 参考文献

[1] 梁永春. 高压电力电缆载流量数值计算 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.  
[2] H. J. Li, K. C. Tan, Qi Su. Assessment of Underground Cable Ratings Based on Distributed Temperature Sensing

[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (4): 1763 - 1769.

[3] S. Liu, J. K. Peng. An Improved Optimal Design Scheme for High Voltage Cable Accessories [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21 (1): 5 - 11.

[4] 聂永峰, 王建辉, 孟毓. 输电电缆支架涡流损耗的计算与分析 [J]. 电网技术, 2008, 32(S1): 142 - 145.

[5] 徐莎, 金先龙, 庞峰, 等. 大电流母线桥三维涡流场的有限元分析 [J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(12): 2097 - 2100.

[6] 陈平, 薛毓强, 郭建钊, 等. 大电流母排三维涡流场 - 温度场耦合分析 [J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(3): 68 - 71.

[7] 颜威利, 杨庆新, 汪友华. 电气工程电磁场数值分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[8] 刘志珍, 朱常青, 励庆浮. 计算导体涡流分布的 FEM - IEM 混合数学模型 [J]. 电工技术学报, 2001, 16(6):

46 - 49.

[9] 王泽中, 王炳阁, 卢斌先, 等. 三维开域涡流场 A - V 位有限元与边界耦合分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 1 - 4.

[10] D Labridis, P Dokopoulos. Finite Element Computation of Eddy Current Losses in Nonlinear Ferromagnetic Sheaths of Three - phase Power Cables [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(4): 1407 - 1415.

[11] 谢德鑫, 白保东, 等. 三维涡流场的有限元分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

[12] Pyungwoo Jang, Bonghan Lee. Effects of Insulator Resistivity on Eddy Current Loss of Compressed Powder Cores Studied by FEM [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(6): 2781 - 2783.

[13] 李晓松, 陈乔夫, 胡贵. 超导变压器绕组环流损耗 [J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 1 - 4.

(收稿日期: 2015 - 05 - 13)



(上接第23页)

## 5 结 论

通过对凤凰片区现状短路电流水平分析, 得出 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧短路电流已接近额定遮断电流, 制约电网运行方式安排, 影响系统安全稳定运行。根据电网规划, 凤凰片区各项电网工程对 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧短路电流均有一定的贡献, 短路电流超标严重影响凤凰片区安全稳定运行。针对凤凰片区短路电流水平超标问题, 结合该地区网架结构特点, 提出了 3 种抑制短路电流的措施, 3 种措施均能降低 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧短路电流水平。但随着各项电网项目的相继投运, 仅靠单一的措施无法满足电网发展需要, 需要多种措施并举才能降低 750 kV 凤凰变电站 220 kV 侧短路电流, 保证电网安全稳定运行, 同时在后续电网规划中应重点关注凤凰片区短路电流问题, 合理规划、合理分配 750 kV 凤凰变电站接带电源容量, 形成 750/220 kV 分片区运行。

### 参考文献

[1] 周坚, 胡宏, 庄侃沁, 等. 华东 500kV 电网短路电流分析及其限制措施探讨 [J]. 华东电力, 2006, 34(7): 55

- 59.

[2] 国网新疆电力公司. 新疆电网 2015 年度运行方式 [R]. 2015.

[3] 韩戈, 韩柳, 吴琳. 各种限制电网短路电流措施的应用与发展 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 141 - 151.

[4] 江道灼, 敖志香, 卢旭日, 等. 短路限流技术的研究与发展 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(3): 8 - 19.

[5] 袁娟, 刘文颖, 董明齐, 等. 西北电网短路电流的限制措施 [J]. 电网技术, 2007, 31(10): 42 - 45.

[6] 孙奇珍, 蔡泽祥, 李爱民, 等. 500kV 电网短路电流超标机理及限制措施适应性 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 92 - 96.

[7] 杨雄平, 李力, 李扬絮, 等. 限制广东 500kV 电网短路电流运行方案 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 104 - 107.

[8] 叶幼君, 鲍爱霞, 程云志. 浙江 500kV 电网短路电流的控制 [J]. 华东电力, 2006, 34(3): 11 - 15.

### 作者简介:

张增强 (1982), 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统规划与分析;

吕盼 (1984), 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统规划与分析;

周专 (1987), 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统规划、稳定与控制。

(收稿日期: 2015 - 05 - 11)

# 四川省投资与电量关系实证研究

贺星棋, 周桦, 严平, 鲜其军  
(国网四川省电力公司, 四川成都 610041)

**摘要:** 投资增长与电量增长的相关检验表明, 投资增长与电量增长之间呈现出显著相关关系。应用协整理论、格兰杰因果检验等计量方法, 对四川省 2006 年以来的固定资产投资、电量进行了实证分析, 并建立 VAR 计量模型。分析结果表明: 四川省固定资产投资对电量增长有拉动作用, 但电量的增长不一定能够导致固定资产投资的增长。

**关键词:** 投资; 电量; 实证研究

**Abstract:** The related inspection on investment growth and electric quantity growth shows that there is a significant correlation between investment growth and electric quantity growth. The empirical research on the relationship between Sichuan investment and electric quantity since 2006 is carried on by using co-integration theory and Granger causality test, and the VAR econometric model is established. The analysis results shows that Sichuan investment can pull the growth of electric quantity, but the growth of electric quantity may not be able to cause the investment growth.

**Key words:** investment; electric quantity; empirical research

中图分类号: F283 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0083-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.020

## 0 引言

投资作为推动经济增长的重要原因, 是经济总量指标 GDP 的三大组成部分之一, 对经济增长具有显著影响。投资既是资源配置的一种重要形式, 也是全社会生产力发展所必需的基础性资源配置活动, 直接关系着国民经济增长的规模、速度、结构和效益, 从而从直接、间接两方面对电量产生影响。

近年来, 众多学者从不同方面研究了投资与经济增长间的关系<sup>[1-3]</sup>, 主要使用固定资产投资与 GDP 分别作为投资与经济增长的指标进行研究, 并没有引入作为经济晴雨表的电量指标, 因此, 研究结果对于电力行业并不具备太大的参考性。

2006 年以来, 四川省 GDP 平稳增长, 全社会固定资产投资额逐年加大; 全社会用电量持续攀升, 全社会用电量增长率与 GDP 增长率的变化呈现总体趋势的一致性; 全社会固定资产投资增长率则围绕 GDP 增长率上下波动。

四川省投资是否是电量增长的推动力, 两者间是否存在逻辑上双向的因果关系? 下面通过 2006 年以来的统计数据, 进行了定量分析, 建立了预测方

程, 并对预测结果进行了分析。

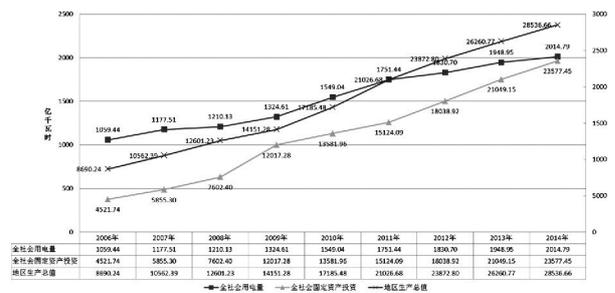


图 1 四川省 GDP、全社会用电量、全社会固定资产投资情况

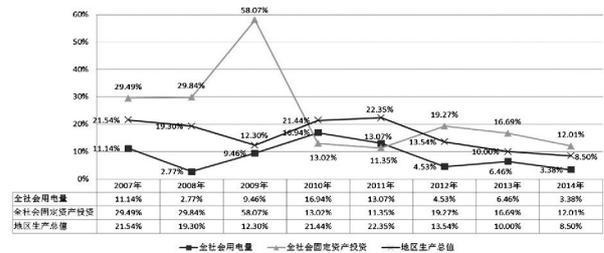


图 2 四川省 GDP、全社会固定资产投资、全社会用电量增长率对比

以下表中 GDP、全社会固定资产投资数据来源于《四川省统计年鉴》及省统计局网站发布数据; 电量、公司投资数据分别来源于国网四川省电力公司(以下简称公司)生产统计和投资统计系统。

表1 各变量相关性结果计算表

		全社会用电量	全社会固定资产投资	公司固定资产投资	公司电网投资	公司售电量
全社会用电量	Pearson 相关性	1	0.979**	0.952**	0.951**	0.989**
	显著性(双侧)		0.000	0.000	0.000	0.000
全社会固定资产投资	Pearson 相关性	0.979**	1	0.892**	0.890**	0.946**
	显著性(双侧)	0.000		0.001	0.001	0.000
公司固定资产投资	Pearson 相关性	0.952**	0.892**	1	1.000**	0.981**
	显著性(双侧)	0.000	0.001		0.000	0.000
公司电网投资	Pearson 相关性	0.951**	0.890**	1.000**	1	0.980**
	显著性(双侧)	0.000	0.001	0.000		0.000
公司售电量	Pearson 相关性	0.989**	0.946**	0.981**	0.980**	1
	显著性(双侧)	0.000	0.000	0.000	0.000	

注: 1. \*\*在0.01水平(双侧)上显著相关。

2. 表中数据由2005—2014年四川省全社会用电量、全行业用电量数据计算而得。其中,总量相关系数根据年度绝对量计算,增长率相关系数根据年度累计增长率计算。下同。

表2 各变量增速相关性结果计算表

		全社会用电量增速	全社会固定资产投资增速	公司固定资产投资增速	公司电网投资增速	公司售电量增速
全社会用电量增速	Pearson 相关性	1	-0.075	0.686	0.693	0.931**
	显著性(双侧)		0.860	0.061	0.057	0.001
全社会固定资产投资增速	Pearson 相关性	-0.075	1	0.331	0.314	-0.169
	显著性(双侧)	0.860		0.424	0.449	0.690
公司固定资产投资增速	Pearson 相关性	0.686	0.331	1	1.000**	0.717*
	显著性(双侧)	0.061	0.424		0.000	0.045
公司电网投资增速	Pearson 相关性	0.693	0.314	1.000**	1	0.730*
	显著性(双侧)	0.057	0.449	0.000		0.040
公司售电量增速	Pearson 相关性	0.931**	-0.169	0.717*	0.730*	1
	显著性(双侧)	0.001	0.690	0.045	0.040	

注: 1. \*在0.05水平(双侧)上显著相关; \*\*在0.01水平(双侧)上显著相关。2. 2014年公司售电量增速取3.81%。

其显著的正相关。

## 1 相关性分析

基于2006—2014年年度数据,开展四川省用电量、公司售电量、公司固定资产投资、公司电网投资与全社会固定资产投资五者相关性分析,分析结果见表1、表2。

由表1、表2可见,在总量方面,2006年以来,四川省用电量、公司售电量、公司固定资产投资、公司电网投资与全社会固定资产投资五者之间的相关系数均大于0.89,且相关性的显著性水平为0,呈现极

累计增长率之间的相关系数差异较大,只有GDP增速与公司售电量增速在95%的置信水平下呈现正相关,全社会用电量增速与公司售电量增速间存在99%置信水平下的正相关,公司固定资产投资增速与公司售电量增速间存在95%置信水平下的正相关,公司电网投资增速与公司售电量增速间存在95%置信水平下的正相关,且相应的相关系数不高。

为进一步厘清增长率之间的相关关系,消除时间序列因趋势因素的影响而产生的异方差问题,对

表3 各变量取对数后相关性结果计算表

		全社会固定 资产投资	公司固定 资产投资	公司 售电量	全社会 用电量	公司电网 投资
全社会固定资产投资	Pearson 相关性	1	0.911 **	0.956 **	0.970 **	0.911 **
	显著性(双侧)		0.001	0.000	0.000	0.001
公司固定资产投资	Pearson 相关性	0.911 **	1	0.974 **	0.958 **	1.000 **
	显著性(双侧)	0.001		0.000	0.000	0.000
公司售电量	Pearson 相关性	0.956 **	0.974 **	1	0.993 **	0.974 **
	显著性(双侧)	0.000	0.000		0.000	0.000
全社会用电量	Pearson 相关性	0.970 **	0.958 **	0.993 **	1	0.959 **
	显著性(双侧)	0.000	0.000	0.000		0.000
公司电网投资	Pearson 相关性	0.911 **	1.000 **	0.974 **	0.959 **	1
	显著性(双侧)	0.001	0.000	0.000	0.000	

注: \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表4 各指标因果关系分析结果

因果关系	原假设	滞后期	F 值	P 值	结论
公司固定资产投资、售电量	公司固定资产投资不是售电量的格兰杰因	1	0.08	0.79	接受
	售电量不是公司固定资产投资的格兰杰因	1	1.23	0.32	接受
	公司固定资产投资不是售电量的格兰杰因	2	0.26	0.80	接受
	售电量不是公司固定资产投资的格兰杰因	2	1.00	0.50	接受
公司电网投资、售电量	电网投资不是售电量的格兰杰因	1	1.16	0.33	接受
	售电量不是电网投资的格兰杰因	1	0.08	0.79	接受
	电网投资不是售电量的格兰杰因	2	0.98	0.51	接受
	售电量不是电网投资的格兰杰因	2	0.26	0.79	接受
全社会固定资产投资、售电量	全社会固定资产投资不是售电量的格兰杰因	1	4.13	0.10	拒绝
	售电量不是全社会固定资产投资的格兰杰因	1	0.03	0.88	接受
	全社会固定资产投资不是售电量的格兰杰因	2	3.27	0.23	接受
	售电量不是全社会固定资产投资的格兰杰因	2	0.66	0.60	接受
全社会用电量、全社会固定资产投资	全社会用电量不是全社会固定资产投资的格兰杰因	1	0.00	0.97	接受
	全社会固定资产投资不是全社会用电量的格兰杰因	1	9.53	0.03	拒绝
	全社会用电量不是全社会固定资产投资的格兰杰因	2	5.38	0.16	接受
	全社会固定资产投资不是全社会用电量的格兰杰因	2	18.80	0.05	拒绝

2006—2014年四川省用电量、公司售电量、公司固定资产投资、公司电网投资与全社会固定资产投资数据取自然对数后再进行相关性分析,上述指标取对数后,由于对数具有的运算性质,其对数相关性的分析结果即代表了其增速间的相关性,分析结果见表3。

由表3可见:取对数后,2006年以来,四川省用电量、公司售电量、公司固定资产投资、公司电网投资与全社会固定资产投资五者之间的相关系数均大于0.91,且相关性的显著性水平为0,呈现极其显著的正相关。

## 2 因果性分析

由上节分析可知:在四川省用电量、公司售电量、公司固定资产投资、公司电网投资与全社会固定资产投资之间存在较显著的相关关系,但此种相关关系是否符合现实的逻辑和经济规律;是否为虚假相关关系,还需通过开展因果关系检验进一步确定。

分别对四川省用电量、公司售电量、公司固定资产投资、公司电网投资与全社会固定资产投资进行ADF平稳性检验、协整检验和格兰杰因果关系检验。由ADF平稳性检验可知各指标数据均为同阶

的单整变量,表明指标均为平稳序列,存在长期稳定的关系;协整检验结果表明各指标之间存在长期稳定的比例关系,不存在伪回归现象,即可以在各指标之间建立相应的回归方程进行指标预测;格兰杰因果关系检验结果如表4。

格兰杰因果关系检验揭示变量间相互影响的关系,它能够表明两变量间是双向还是单向影响,以及一个变量能够在多大程度被另一个变量解释,而在加入滞后期后解释程度又将如何发生变化。

由表4可见:全社会固定资产投资和售电量、全社会用电量之间均存在着单向的因果关系,即全社会固定资产投资变化是售电量、全社会用电量变化的充分条件,但非充要条件。其中,在滞后期为1时,在10%的显著性水平下,全社会固定资产投资是售电量的格兰杰因,全社会固定资产投资增加能够对公司售电量的增长起到拉动作用。反之,公司售电量的上升,不一定会导致全社会固定资产投资的增加。在滞后期为1和2时,在5%的显著性水平下,全社会用电量与全社会固定资产投资间存在单向的格兰杰因果关系,全社会固定资产投资的增加,将会引起全社会用电量的增长,同时,全社会固定资产投资对于公司售电量和全社会用电量的拉动作用具有时滞效应。

综上所述,全社会固定资产投资和售电量、全社会用电量之间存在着单向因果关系,全社会固定资产投资对经济、电量增长的影响作用具有一定的时滞性。公司售电量和公司投资之间不存在因果关系。

### 3 指标预测分析

#### 3.1 全社会固定资产投资与售电量关系分析

全社会固定资产投资与售电量协整检验的回归方程如下:

$$\ln(\text{售电量}) = 0.8406 \ln(\text{全社会固定资产投资}) - 1.2092$$

由上式可知:从长期趋势来看,全社会固定资产投资平均每变化1个百分点,公司售电量将变化0.8406个百分点。同时,两者之间在逻辑上存在先后确定发生的因果关系,即全社会固定资产投资的变化将引起公司售电量的变化,平均弹性系数为0.8406。

考虑到全社会固定资产投资对电量具有的滞后效应,因此,建立具有2阶滞后效应的VAR预测模型如下:

$$\ln(SDL) = 0.196 \times FI(-1) + 0.407 \times FI(-2) + 0.225 \times SDL(-1) - 0.401 \times SDL(-2) + 2.776$$

式中:SDL(-1)、SDL(-2)分别为上期、上上期售电量的对数;FI(-1)、FI(-2)分别为上期、上上期全社会固定资产投资的对数。

由模型可见:在时间的影响度方面,随着时间的前推,往期售电量、全社会固定资产投资对现期售电量的影响程度逐年降低。同时,全社会固定资产投资的正系数也说明其对售电量的增长具有拉动作用,但具有较长的时滞性。

运用上述模型,通过代入全社会固定资产投资与售电量数据,得到2006—2014年公司售电量拟合值和预测值如表5所示。

表5 公司售电量预测结果对比表

年份	公司售电量实际值/GWh	公司售电量预测值/GWh	拟合偏差率/%
2006	72 500	72 500	0.00
2007	83 300	83 300	0.00
2008	87 200	87 856	-0.75
2009	97 000	99 997	-3.09
2010	120 600	122 855	-1.87
2011	152 600	142 866	6.38
2012	154 400	150 925	2.25
2013	163 312	156 170	4.37
2014	158 563	169 686	-7.02

由表5可见:利用全社会固定资产投资对公司售电量进行预测的精度水平较公司固定资产投资和电网投资好。这主要是由于两者之间不仅存在统计数据上的相关性和比例关系,还存在现实意义上的因果关系,因此预测精度将相对较好;同时,通过对预测模型的分析可知,全社会固定资产投资对售电量预测的校正后R<sup>2</sup>系数为0.921,说明利用全社会固定资产投资能够解释92.1%的售电量数值,因此,预测精度较好。

同时,由表5可见:2014年、2011年预测值具有较大的误差,这主要是由于国网公司2014年售电量统计口径改变、2011年83家县公司并表,导致售电量统计数据突变,从而导致模型预测误差增加。考虑公司2013年厂网分离电量约为10 500 GWh,假设2014年公司厂网分离电量保持10 500 GWh的规模,还原后实际售电量约为169 000 GWh,预测误差

0.37%。

### 3.2 全社会用电量与全社会固定资产投资关系分析

全社会用电量与全社会固定资产投资协整检验的回归方程如下:

$$\ln(\text{全社会用电量}) = 0.1157 \ln(\text{全社会固定资产投资}) - 6.8281$$

由上式可知:从长期趋势来看,全社会固定资产投资平均每变化1个百分点,全社会用电量将变化0.1157个百分点;同时,两者之间在逻辑上存在先后确定发生的因果关系,即全社会固定资产投资的变化将引起全社会用电量的变化,平均弹性系数为0.1157。

考虑到全社会固定资产投资对电量具有的滞后效应,因此,建立具有2阶滞后效应的VAR预测模型如下:

$$\ln(YDL) = 0.208 \times FI(-1) + 0.18 \times FI(-2) + 0.165 \times YDL(-1) - 0.131 \times YDL(-2) + 3.531$$

式中:YDL(-1)、YDL(-2)分别为上期、上上期全社会用电量的对数;FI(-1)、FI(-2)分别为上期、上上期全社会固定资产投资的对数。

由模型可见:对于全社会用电量来说,近年的固定资产投资影响更大;同时,全社会固定资产投资的正系数也说明其对全社会用电量的增长具有拉动作用,且具有时滞性。

运用上述模型,通过代入全社会固定资产投资与全社会用电量数据,得到2006—2014年全社会用电量拟合值和预测值如表6所示。

表6 全社会用电量预测结果对比表

年份	全社会用电量 实际值/GWh	全社会用电量 预测值/GWh	拟合偏差率 /%
2006	105 943.86	105 944	0.00
2007	117 751	117 751	0.00
2008	121 013.4	121 194	-0.15
2009	132 461.02	133 498	-0.78
2010	154 903.57	155 016	-0.07
2011	175 143.95	173 575	0.90
2012	183 069.52	182 838	0.13
2013	194 894.98	190 824	2.09
2014	201 479	203 846	-1.17

由表6可见:利用全社会固定资产投资对全社会用电量进行预测的精度水平极高。这主要是由于两者之间存在现实意义上的因果关系,因此预测精度将相对较好。同时,通过对预测模型的分析可知,全社会固定资产投资对全社会用电量预测的校正后R<sup>2</sup>系数为0.992,说明利用全社会固定资产投资能

够解释99.2%的全社会用电量数值,因此,预测精度较好。

同时,由表6可见,与表5不同,2014年的预测值仍然具有较好的精度,这主要是由于国网公司2014年售电量统计口径的改变不会影响全社会用电量数据,因此历年统计数据在口径上具有更大的一致性,从而使模型预测精度能够保持较高水平。

## 4 结 论

1) 从数据的相关性来看,四川全社会固定资产投资、用电量、公司售电量、公司固定资产投资、公司电网投资五者间存在极强的正相关;

2) 从各个指标的因果关系来看,全社会固定资产投资和公司售电量、全社会用电量之间存在着单向因果关系,全社会固定资产投资对经济、电量增长的影响作用具有一定的时滞性。公司售电量和公司投资之间不存在因果关系;

3) 公司固定资产投资、电网投资和售电量间不存在因果关系,三者间的数学模型仅仅是历史统计数据间量的一种数学关系;

4) 全社会固定资产投资的增长是公司售电量增长的原因。全社会固定资产投资每增加1个百分点,公司售电量将增长0.8406个百分点,对售电量的增长具有较大的拉动作用。同时,全社会固定资产投资对于公司售电量的影响具有较长的时滞性;

5) 全社会固定资产投资的增长是全社会用电量增长的原因。全社会固定资产投资每增加1个百分点,全社会用电量将增长0.1157个百分点。

### 参考文献

[1] 李庆梅,聂佃忠. 甘肃省固定资产投资与经济增长关系的实证研究[J]. 兰州大学学报: 社会科学版, 2008(5): 138-144.

[2] 梁宗经,旷芸. 区域固定资产投资与经济增长的定量分析——以山西省为例[J]. 北方经济, 2008(5): 42-43.

[3] 白利强,刘山. 河北省经济增长与固定资产投资关系实证分析[J]. 经济研究导刊, 2008(2): 150-151.

作者简介:

贺星棋(1978),高级工程师,长期从事电网管理、分析工作;

周 桦(1963),高级工程师,长期从事电网管理工作;

严 平(1966),高级工程师,长期从事电网管理工作;

鲜其军(1966),高级工程师,长期从事电网管理工作。

(收稿日期:2015-04-21)

# SOFA 配风调整对超临界锅炉末级过热器偏差的影响

薛森贤, 余盛杰, 陈树科

(广东珠海金湾发电有限公司, 广东 珠海 519000)

**摘要:** 针对珠海金湾发电厂 600 MW 超临界机组在运行的过程中, 存在烟气流场分布不均导致局部管壁出现超温的现象, 限制了主汽温、再热汽温的运行参数。不但降低了机组的经济性, 而且因受热面的局部超温使氧化皮快速生成, 导致受热面爆管影响了机组安全性。通过不同 SOFA 配风方式对末级过热器偏差影响的研究, 探索出最佳的 SOFA 配风方式, 实现对热偏差有效控制, 为机组安全、经济运行提供了保障, 同时也为解决其他同类型机组的热偏差问题提供参考。

**关键词:** 超临界锅炉; SOFA; 末级过热器; 配风; 热偏差

**Abstract:** There is uneven distribution of gas flow which leads to the excessive temperature so as to limit the operating parameters of main steam temperature and reheat steam temperature during the operation of 600 MW supercritical units in Zhuhai Jinwan power plant. It not only reduces the economy of the units, but also influences the security of the units because the local overheating of heating surface enables the rapid generation of oxide skin which causes pipe explosion of heating surface. The effects of different SOFA air distribution on the deviation of finishing superheater are studied, and the best SOFA air distribution scheme is found out to achieve the effective control of superheater deviation, which provides a guarantee for the safe and economic operation of the units and a reference for solving heat deviation of other units of the same kind.

**Key words:** supercritical boiler; SOFA; finishing superheater; air distribution; heat deviation

中图分类号: TK223.3+1 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2015)04-0088-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.021

## 1 设备简介

珠海金湾发电厂现有两台 600 MW 超临界机组, 锅炉设备采用的是上海锅炉厂生产的超临界螺旋管圈、一次中间再热、平衡通风、四角切圆燃煤直流炉。炉膛上部布置有分隔屏过热器和后屏过热器, 水平烟道依次布置高温再热器和高温过热器, 尾部烟道布置有低温再热器和省煤器。燃烧方式采用最新引进的低 NO<sub>x</sub> 同轴燃烧系统(LNCFS), 煤粉燃烧器为四角布置、切向燃烧、摆动式燃烧器。主风箱设有 6 层强化着火煤粉喷嘴, 在煤粉喷嘴四周布置有燃料风(周界风)。在每相邻 2 层煤粉喷嘴之间布置有 1 层辅助风喷嘴, 其中包括上下 2 只偏置的 CFS 喷嘴, 1 只直吹风喷嘴。在主风箱上部设有 2 层 COFA 喷嘴, 在主风箱下部设有 1 层 UFA 喷嘴。在主风箱上部布置有 SOFA 燃烧器, 包括 5 层可水平摆动的分离燃尽风(SOFA)喷嘴。

SOFA 分离燃尽风技术, 由于它与主燃烧器射

流分离, 又在炉膛上部区域布置, 并且为保证有足够的穿透能力, 强化燃烧后期混合, 其出口风速较高, 根据以往空气动力场研究积累, 其射流刚性必然很强, 实际切圆直径较小, 这样有可能使 SOFA 风以上至炉膛出口的实际切圆较小, 同时旋转减弱, 起到明显的消旋作用。

## 2 热偏差原因

一般来说, 引起过热器吸热偏差的原因主要有两方面: 一是蒸汽侧的原因, 由于工质流量分配不均引起的流量偏差。二是烟气侧的原因。在切向燃烧方式的锅炉中, 由于残余旋转的影响, 引起水平烟道左右两侧烟气存在一定的速度和温度偏差, 从而造成两侧管屏的对流传热、辐射传热不一致引起热偏差。这主要由于四角切圆燃烧系统特有的流动模式造成的, 即它在炉膛内组织煤粉和空气形成强烈的切向旋转并螺旋向上的流场模式。这一模式对强化风粉混合燃烧是非常有利的, 但旋转的流场到炉膛

出口会仍然存在,即所谓的残余旋转。残余旋转会导致整个烟气流不均匀的流入水平烟道,往往沿炉宽方向烟速一侧高,另一侧低,而在水平烟道布置的过热器以对流吸热为主,因此,烟速不均对吸热量影响较大,从而形成传热偏差。可见,对于采用四角切圆燃烧系统的锅炉,炉内空气动力场,尤其是炉内切圆的分布特点,不仅直接关系炉内燃烧的好坏,还对水平烟道布置的过热器传热偏差有着重要关联。

### 3 试验结果及分析

针对锅炉末级过热器管屏各管吸热的差异,引入屏间吸热偏差系数,用来衡量该级受热面各管屏沿炉膛宽度吸热的强弱。

根据经验,SOFA喷嘴反切15°的设置对受热面吸热偏差效果较好,以下试验均在SOFA喷嘴反切15°下进行。

根据各个负荷段的SOFA配风调整试验得出普遍结论,随着SOFA风开度的变化,末级过热器沿炉膛宽度吸热偏差发生一定的变化,主要表现为随着SOFA风开度的增大,该偏差系数减少,这为降低末级过热器受热面吸热偏差提供了可调整的方向。

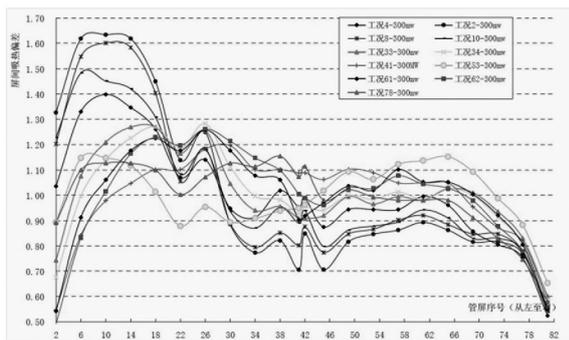


图1 300 MW 负荷下,不同SOFA风门开度末级过热器吸热偏差曲线

图1中,工况2为原DCS原始控制函数,SOFA风采用正宝塔配风方式(SOFA1在最低层,从SOFA1~SOFA3开始依次减小),该工况下,末级过热器屏间吸热偏差系数最大值达1.63,水平烟道沿宽度吸热极不均匀,导致末级过热器个别管屏出口汽温较高。

工况8和工况2(左最顶上两条线)相比,也采用正宝塔配风,只是风门开度较工况2大,热偏差系数略微降低,但最大值仍为1.60,且此时SOFA风门开度依次为50%、40%、32%、0%、0%,在低负荷下

该风门开度已经相对较大,但水平烟道残余旋转仍较强。说明机组在该负荷下采用正宝塔配风不能有效解决高温热偏差较大的问题。

通过优化二次风风门开度,采用倒宝塔的配风方式,可以在该负荷下降低高温受热面吸热峰值,且达到较好的效果。如工况53,最大吸热偏差系数为1.15。而控制系统最终在该负荷下各风门开度控制函数参照工况36。

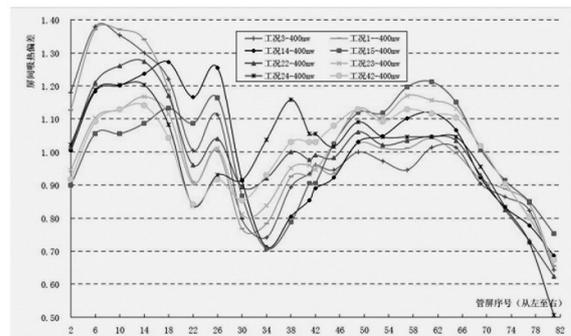


图2 400 MW 负荷下,不同SOFA风门开度末级过热器吸热偏差曲线

图2的曲线表明:在400 MW下,末级过热器吸热偏差较300 MW负荷下要小的多。采用工况1和工况3效果不好,最大热偏差系数在1.38。而采用倒宝塔配风方式则吸热偏差有所改善,最大偏差系数为1.28。采用工况15、23和42的配风,最大热偏差系数均能低于1.2。最终采用工况42的配风作为400 MW负荷下的SOFA风门开度函数。

图3中的曲线表明:在500 MW负荷下,如工况5为运行人员习惯采用的方式,末级过热器偏差系数相对较小为1.23。采用工况12和工况13,效果不好,最大热偏差系数在1.39。采用倒宝塔配风方式,如工况25、65的配风,最大热偏差系数均能低于1.2。最终采用工况65的配风作为500 MW负荷下的SOFA风门开度函数。

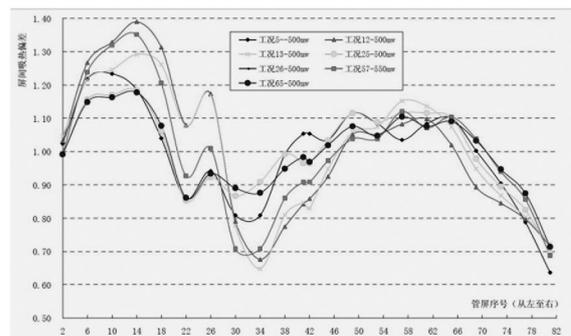


图3 500 MW 负荷下,不同SOFA风门开度末级过热器吸热偏差曲线

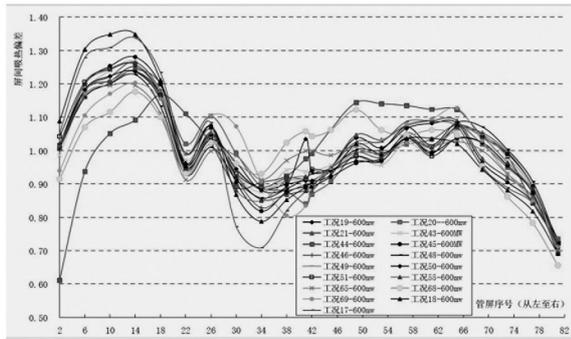


图 4 600 MW 负荷下不同 SOFA 风门开度  
末级过热器吸热偏差曲线

图 4 中的曲线表明: 在 600 MW 高负荷下, 末级过热器沿炉膛宽度吸热偏差工况 18 最大, 而该工况为 CCOFA 开度较大, SOFA 开度较小且采用正宝塔, 该配风方式即为原控制系统设定函数。而工况 17 则把 SOFA2 和 SOFA3 适当开大, 偏差系数略微降低, 最大仍为 1.34, 说明该种正宝塔配风模式是不适用的。而工况 19、20、21 均改变配风模式为倒宝塔配风, 最大偏差系数在 1.25 左右, 其中工况 20 较工况 19, SOFA3 增加 10%, 其他各配风均不变, 偏差系数还略微增大, 说明 SOFA3 并非越大越好, 开到 80% 基本合适。随着各种配风的变化, 通过不断的调整, 工况 68 和 44 偏差系数均较小。

通过以上不同 SOFA 配风方式摸索, 得出最佳的 SOFA 风门开度如表 1 所示。

表 1 各负荷下的最佳 SOFA 风门开度

负荷 /MW	SOFA1 /%	SOFA2 /%	SOFA3 /%	SOFA4 /%	SOFA5 /%
600	70	76	80	9	5
500	61	72	80	6	0
400	55	65	68	0	0
300	43	52	59	0	0

## 4 结 论

1) SOFA 喷嘴反切 15° 且开下 3 层时, 采用倒宝塔配风模式的效果最好, 尤其是在降低左侧峰值壁温方面。SOFA 对锅炉高温受热面管屏间吸热偏差有明显影响, 利用 SOFA 和合理配风能够优化锅炉高温受热面管屏间的吸热偏差分布, 减小受热面的蒸汽氧化腐蚀趋势。

2) 通过优化锅炉燃尽风的配比, 可以降低锅炉出口烟气残余旋转强度, 进而降低高温受热面的屏间偏差, 使得末级过热器偏差屏出口汽温降低 10℃ 左右, 提高受热面的使用寿命。

3) SOFA 风开度在 20% ~ 60% 内, 5 层全开, 末级过热器屏间吸热偏差系数随着 SOFA 风开度增大而减小(在一定范围内), SOFA 风可以减小炉膛出口烟气残余旋转强度, 降低高温受热面吸热偏差。

4) 通过此次针对性的 SOFA 配风方式调整, 机组运行的安全性、可靠性得到了较大提高, 同时也提高了机组整体的运行经济性。

### 参考文献

[1] 陶丽, 丁士发. 超临界锅炉燃尽风配风方式对热偏差影响的研究[C]. 中国动力工程学会锅炉专业委员会 2010 年学术研讨会, 上海, 2010.  
[2] 李树田, 陈莉. 超临界锅炉 SOFA 对高温受热面吸热偏差影响的试验研究[J]. 动力工程学报, 2013, 33(9): 671-676.

### 作者简介:

薛森贤(1981), 工程师、技师, 工程硕士, 主要从事电厂集控运行工作;

余盛杰(1975), 高级技师、工程师, 主要从事电厂集控运行工作;

陈树科(1984), 本科, 主要从事电厂集控运行工作。

(收稿日期: 2015-04-14)

# 促节能减排和低炭发展 改善环境保护生态

# 再热汽轮机性能试验系统修正的处理方法

张志恒 孙 戈

(四川省电力工业调整试验所,四川 成都 610072)

**摘要:**介绍了基于 ASME - PTC6 汽轮机性能试验规程系统修正的处理方法,研究了再热汽轮机系统修正两种方法的特点,并讨论了处理汽轮机内效率不变时的缸效率法和级组效率法的各自特点和优劣。通过 315 MW 和 600 MW 机组汽轮机性能试验计算实例,对系统修正处理方法进行了比较和分析,并指出了影响系统修正的因素及其处理方法。根据性能试验时的实际情况,得出系统修正时采用试验膨胀线法,并在处理热力过程线时使用汽轮机缸效率法的结论。

**关键词:**汽轮机;性能试验;系统修正

**Abstract:** The methods of system correction based on ASME - PTC6 Performance Test Code of Steam Turbines are introduced, and the characteristics of both methods of system correction on reheat steam turbines are studied. The features of cylinder efficiency and unit efficiency methods while the turbine efficiency is unchanged are discussed respectively as well as their advantages and disadvantages. Through the calculation examples of performance test on 315 MW and 600 MW steam turbine units, the methods of system correction are compared and analyzed, and the influencing factors for system correction and its treatments are pointed out. According to the actual situation of performance test, it is concluded that the test expansion line method is adopted for system correction, and the cylinder efficiency method is adopted for the treatment of thermodynamic process line.

**Key words:** steam turbine; performance test; system correction

中图分类号:TK261 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2015)04 - 0091 - 04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.022

## 0 引言

ASME - PTC6 汽轮机性能试验规程因具有体系严密、高精度和可操作性强的特点在国内外汽轮机性能考核试验中被普遍使用,规程规定试验时要求尽量接近规定工况进行,对偏离工况的应对结果进行修正。对于系统修正可由制造厂提供的修正曲线或 ASME - PTC6 规定的方法进行修正,试验前,试验各方应对修正方法达成一致。对于再热机组的系统修正,规程推荐了两种方法进行修正,但对于系统修正时抽汽参数的确定方法,ASME - PTC6 - 2000 第 8 节的算例中采用等温线法,对于处于湿蒸汽区的抽汽,此方法值得商榷。

## 1 系统修正的方法

通常制造厂不能提供能满足性能试验所需的全

部修正曲线,因此汽轮机试验结果的系统修正一般参照 ASME - PTC6 提供的方法进行,即用试验汽轮机内效率、规定的循环参数、试验时的轴封漏汽量和试验时的主蒸汽量来计算规定的热力循环性能<sup>[1]</sup>。对于再热汽轮机,由于减温水 and 高压缸抽汽流量的变化而造成再热蒸汽流量的明显变化,从而在再热截止阀处产生 1 个新的压力值,ASME - PTC6 提供了两种方法来求修正后的再热焓,概括为试验膨胀线法和新膨胀线法。为了保持汽轮机效率不变,首先由于主汽参数保持不变,因此高排参数在修正中保持不变,这样高压部分的计算基本相同,区别在于修正再热蒸汽焓的确定。

### 1.1 试验膨胀线法

试验膨胀线法确定修正再热焓是按照新的再热截止阀处的压力值,由试验膨胀过程线内插或外推获取。

对于低压缸,由于要求膨胀线的终点不变,因此当低压缸进汽压力确定后,根据试验膨胀线就可以

确定低压缸进汽焓。对于中压缸,根据低压缸进汽压力和连通管设计压降来确定中排压力,中压缸排汽焓等于低压缸进汽焓,这样中压缸排汽参数就随之确定,中压缸进汽参数则由新的再热压力和试验膨胀线确定。再热后各级抽汽焓的确定方法也与之类似,由新的抽汽压力和汽轮机内效率不变来确定。

由于汽轮机级的压力随级后的流量变化而变化,抽汽焓也随抽汽压力而改变,因此上述计算是通过迭代计算来实现的。如果各抽汽压力与前一次相比变化全部在1.0%或6.9 kPa以内<sup>[1]</sup>,则系统修正就算结束。

### 1.2 新膨胀线法

新膨胀线法是根据再热截止阀处新的再热压力、试验再热温度、试验排汽压力和试验汽轮机内效率不变而实现的。

对于中压缸,进汽参数由新的再热压力和试验再热温度确定,排汽参数根据新的排汽压力和中压缸内效率不变来求得;对于低压缸,进汽焓等于中压缸排汽焓,进汽压力由中压缸排汽压力和连通管设计压降确定,排汽终点焓根据试验排汽压力和低压缸内效率不变来确定,但排汽膨胀终点焓相对试验排汽终点焓会发生改变。这样,1个新的膨胀线就随之确定,再热后各抽汽焓则由新的抽汽压力和汽轮机内效率不变来确定。

由于新膨胀线法首先确定了中压缸的进汽参数,因此在计算再热后各抽汽焓的过程中仅根据汽轮机内效率不变和新的抽汽压力就可以确定,这样计算简明,提高了效率。

### 1.3 两种修正方法比较

两种方法的区别本质在于修正计算时采用不同的膨胀过程线,进而引起各段抽汽焓计算的差异以及参数修正方法的不同。

试验膨胀线法是依据试验膨胀过程线,膨胀终点焓不变,进行参数修正时必须用修正后的再热温度和再热压降来修正,不能用试验值。新膨胀线法则是根据新膨胀过程线,再热温度为试验再热温度,由于系统修正时汽轮机内效率不变,这样低压缸排汽终点焓将发生改变,参数修正时则用修正后再热压损和试验再热温度。

## 2 汽轮机内效率不变的处理方法

为了保持汽轮机内效率不变,膨胀过程线的确

定是分段进行的。对再热机组,由于系统修正时高压缸进出口参数保持不变,高压缸膨胀过程线就随之确定。因此,膨胀过程线的确定主要为中低压缸的热力过程线。从水蒸汽焓熵图可以看出,由于水蒸汽的特性,水蒸汽的热物性关于温度、压力不是线性函数,因此,在处理汽轮机内效率不变时,是根据中低压缸效率不变或各级组效率不变这一假设来实现的。

### 2.1 缸效率法

汽轮机缸效率为缸内实际焓降与理想焓降之比,对于再热机组,高压缸和中压缸效率由汽缸进出口参数求得。而低压缸由于其排汽工质处于湿蒸汽区,需要压力、温度和干度3个参数才能确定低压缸排汽焓,因此低压缸终点焓是通过热平衡方程、物质平衡方程和功率方程来求得的。汽缸效率计算如式(1):

$$\eta_c = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (1)$$

式中: $h_1$ 为汽缸进汽焓; $h_2$ 为汽缸排汽焓; $h_{2s}$ 为汽缸排汽等熵焓; $\eta_c$ 为汽缸效率,对低压缸而言为膨胀终点焓对应的效率。

根据试验缸效率和新的抽汽压力求取抽汽焓的计算公式如式(2),式中中低压缸进汽参数为修正后的参数。

$$h_c = h_1 - (h_1 - h_{cs}) \cdot \eta_c \quad (2)$$

式中: $h_c$ 为修正汽缸抽汽焓; $h_{cs}$ 为修正汽缸抽汽等熵焓。

缸效率法确定抽汽焓,是把膨胀过程线简化为由汽缸进出口参数决定的直线,然后根据新的抽汽压力与膨胀线的交点求得。缸效率法求得热力过程线比试验膨胀线更为光滑,更接近设计的膨胀过程线。

### 2.2 级组效率法

级组效率定义为两抽汽口之间的效率,即两抽汽口之间的实际焓降与理想焓降之比。由于多级汽轮机的重热现象,各级等熵焓降之和大于整个汽轮机的等熵焓降,使多级汽轮机总的内效率大于各级平均内效率。高压段各级效率变化不大,级效率低;低压段级效率变化大,最后几级由于湿气损失级效率较低;中压段级效率较高<sup>[2]</sup>。

由试验级组效率和修正抽汽压力求取抽汽焓的计算公式如式(3),式中中低压缸各抽汽参数为修

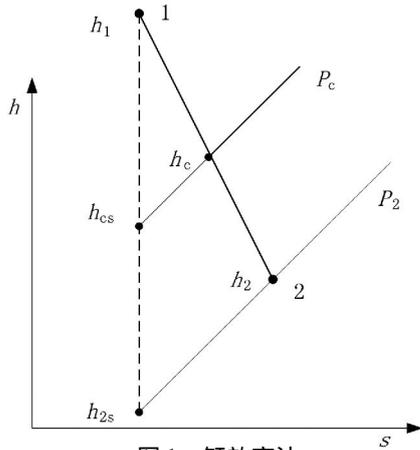


图 1 缸效率法

正后的参数。

$$h_{c2} = h_{c1} - (h_{c1} - h_{c1-2s}) \cdot \eta_{c1-2} \quad (3)$$

式中:  $h_{c1}$  为修正汽缸抽汽 1 焓;  $h_{c2}$  为修正汽缸抽汽 2 焓;  $h_{c1-2s}$  为修正汽缸抽汽 1-2 等熵焓;  $\eta_{c1-2}$  为试验抽汽口 1-2 级组效率。

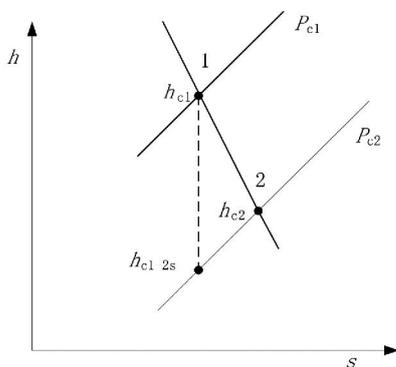


图 2 级组效率法

级组效率法求取抽汽焓,其热力过程线由汽缸进出口参数和试验级组效率决定,膨胀线反应了试验抽汽口各参数的关系,因此其膨胀过程线与试验膨胀线几乎一致。修正结果也易受各抽汽参数的影响,因此,级组效率法对抽汽参数要求比较高。

### 3 计算实例分析

某 315 MW 和 600 MW 机组为中间再热凝汽式汽轮机,回热系统配置为 3 高、4 低和 1 除氧,高压缸 2 段抽汽,中压缸 2 段抽汽和低压缸 4 段抽汽。

分别采用试验膨胀线法和新膨胀线法对算例进行了分析,其中在确定抽汽焓时又分别采用了缸效率法和汽轮机级组效率法。

试验和修正的热力过程膨胀线分别如图 3~图 6 图中热力过程线为中压缸进口至低压缸排汽口。

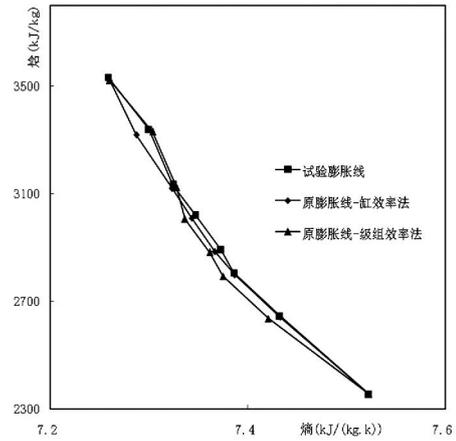


图 3 某 315 MW 机组试验膨胀线法

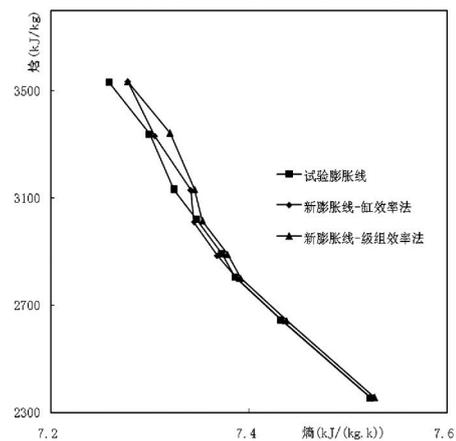


图 4 某 315 MW 机组新膨胀线法

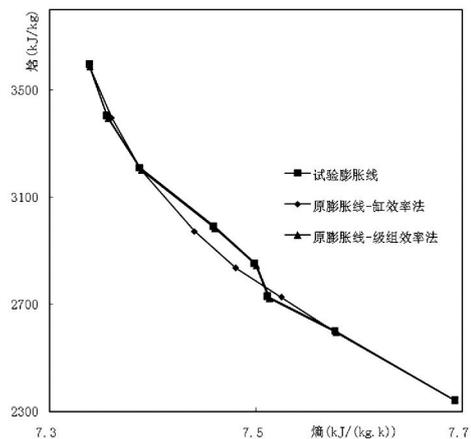


图 5 某 600 MW 机组试验膨胀线法

表 1 列出了不同修正方法的计算结果,其中热耗为系统修正和参数修正后的结果。从表 1 中可以看出:

1) 试验膨胀线法是在试验膨胀线的基础上进行的修正,其热力过程线近似于试验膨胀线,基本与之重合,因此保持了汽轮机实际膨胀过程的特征;

2) 用新膨胀线法进行系统修正时,中低压缸热力过程线起点在试验点的等温线上,其后的膨胀线近

似为试验膨胀线的平行线,给水回热系统偏离设计值较大时,其平行线偏移量就越大,因此抽汽参数偏差对修正后的热耗影响较大;

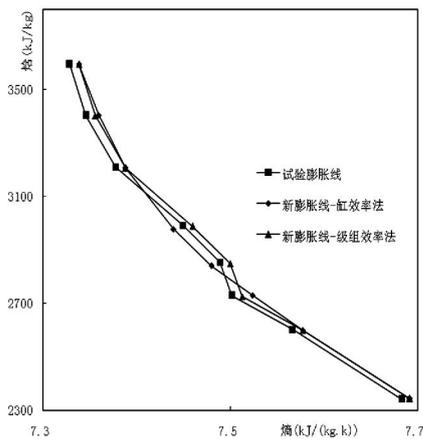


图6 某600 MW 机组新膨胀线法  
表1 不同修正方法计算热耗结果比较

修正方法	某315 MW 机组热耗 $/(kJ \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1})$	某600 MW 机组热耗 $/(kJ \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1})$
原线-缸效率	8 167.8	7 832.9
原线-级组效率	8 169.9	7 837.2
新线-缸效率	8 141.4	7 833.8
新线-级组效率	8 154.7	7 838.3

3) 缸效率法在处理热力过程线时,其膨胀线比较平滑,由于受抽汽参数的影响较小,其更接近设计膨胀线。由于试验时,汽缸进出口参数基本都为双重测点,测点准确性比较高。这样主要受汽缸进出口参数影响的缸效率法在确定抽汽焓值相对比较准确,其得到的膨胀线也相对较为合理。

4) 级组效率得到的热力膨胀线与试验膨胀线极为接近,基本保持了试验膨胀线的特点。由于其受抽汽参数影响较大,如果试验时,抽汽参数不太准确,尤其是低压缸部分,其热力过程线就不是很有规则,由其修正后的热耗偏差就较大。汽轮机级组效率法对汽缸进出口参数和抽汽参数的精确度要求比较高,如果试验级组效率精度高,则由其得到的膨胀

线就更为接近实际膨胀线,其修正后的热耗精度也就更高。

5) 算例中由于600 MW 机组的试验膨胀线比较合理,因此用不同方法修正后的热耗则较为接近。而315 MW 机组有些试验点异常,偏离设计值,使膨胀线不规则,从而使得修正后热耗偏差相对较大。

## 4 结 论

1) 由于试验时要测量的参数比较多,尤其是抽汽参数有时要取用DCS数据,这样很难保证测量精度,因此建议在热力过程线的处理中采用缸效率法,这样能减少抽汽参数对热耗的影响,以降低试验的不确定度。

2) 试验膨胀线法和新膨胀线法在系统修正时理论上是一致的,两种修正方法都是可取的。但新膨胀线法更易受到抽汽参数和给水回热设备的影响,因此建议系统修正时采用试验膨胀线法。

3) 为提高试验精度,避免系统修正和参数修正对试验结果过大的影响,试验时应严格按照规程规定进行,保证给水回热和凝汽器等辅助系统设备正常,试验时运行参数控制在规定的范围内,以减少修正量。

### 参考文献

[1] ASME PTC - 2004. Steam Turbines Performance Test Codes [S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2005.

[2] 沈士一,庄贺庆,康松,等. 汽轮机原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.

作者简介:

张志恒(1977), 硕士, 工程师, 主要从事汽轮机设备调试和性能试验方面的研究。

(收稿日期: 2015-03-30)

欢迎订阅《四川电力技术》



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.gdxgs.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](http://www.HIPOT.cn)  
[www.SF6TEST.cn](http://www.SF6TEST.cn)  
[www.CTTEST.cn](http://www.CTTEST.cn)  
[www.DCTEST.cn](http://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](http://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: whgdxgs@163.com  
地址: 武汉市东西湖区金银潭现代企业城B区7栋

# 眉山多能电力设计咨询有限责任公司

眉山多能电力设计咨询有限责任公司成立于2002年，公司执有建设部颁发的电力行业（送电、变电）“乙”级工程设计资格证书；四川省建设厅颁发工程勘察专业类电力工程“乙”级资格证书；国家发改委颁发“丙”级工程咨询资格证书，并获得ISO9001:2008质量管理体系认证证书，ISO14001:2004环境管理体系认证证书，OHSAS18000;2007职业健康安全管理体系认证证书。是眉山地区唯一具有全国电力勘察设计乙级资格和企业法人资格的专业电力设计公司。从事220kV及以下送、变、配电工程的专业设计。

该公司是一家专门从事220kV及以下电力工程勘察设计、工程咨询（编制220kV及以下电网规划、项目建议书、项目申请、可行性研究、评估咨询、项目管理咨询）及220kV及以下送变电工程项目总承包服务的机构。在四川省电力公司、四川省电力公司眉山公司关怀支持下，在四川电网建设和发展中，发挥了巨大贡献，同时也培养了大量技术人才和管理人才。

该公司机构设置完善，有综合办公室、线路室、电气室、配网室、技经室、市场部、财务室7个专业科室；截至2013年4月，公司拥有专业技术、管理人员38人，其中具有高级职称者6人、中级职称者11人、初级职称者8人。其中一级结构师1名，二级结构师1名，二级建筑师1名，国家注册咨询师3名。

该公司拥有优良的办公环境，配置微机38台及网络激光打印、复印机多台；引进办公自动化软件、图库管理系统、档案MIS系统及大量勘察设计应用软件；大型晒图机；勘察配有全站仪、GPS、测量仪等装备；各种车辆10台；保证联络的通讯设备；具有同时开展多项工程设计的能力。

虽公司成立时间较短，但工程工作较多，主要完成了220kV先锋变电站交流系统大修、220kV先锋变电站场地端子箱、二次电缆和电度表屏大修、220kV枣树变电站综合自动化改造工程、220kV平春变电站断路器改造工程、220kV平春变电站综合自动化改造工程、眉山220kV东平III线线路工程等。通过10年的发展，完成220kV工程项目16项；110kV变电站新建、改扩建工程100余项。

公司自成立以来，没因项目可研和勘察设计，造成重大质量事故和人生伤亡事故。没有违反国家有关招应答法律、法规、规章及本次招标文件规定的其他情形，信誉良好，诚实守信，财务状况良好。

未来几年，眉山多能电力设计咨询有限责任公司将紧紧围绕“十二五”发展规划，抓住电网发展的机遇，内强素质，外树形象，开拓进取，构建和谐，努力服务于国家电网建设；同时，竭诚为广大顾客提供一流的产品和最诚挚的服务。

