★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

PRODUCT
产品
INNOVATION
创新
SERVICE
服务

企业应用基础架构领跑者
四川中电启明星信息技术有限公司

ISSN 1003-6954
12>
9 771003 695128

Vol.35
2012
No.6

四川省电机工程学会　四川电力科学研究院

四 川 电 力 技 术
SICHUAN DIANLI JISHU

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)》、《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》入选期刊

第 6 期

2012 年 12 月 20 日

《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　邬小端
　　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
2012 年第 35 卷第 6 期（总 222 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
　　四川电力试验研究院
发行范围：公开
主　　编：胡　灿
副 主 编：吴小冬　谢　舫
编辑出版《四川电力技术》编辑部
发　　行：四川电力试验研究院情报室
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：四川明源印务有限责任公司
封面设计：成都宏泰广告有限公司
国内定价：每册 6.00 元
[期刊基本参数] CN51－1315/TM* 1978* b* A4* 94* zh* P* ￥6.00* 4300* 23* 2012－12

目　　次

·电网技术·
水电机组调速特性对联络线极限传输功率影响分析 …… 吴茂乾　白宇辉　任锡林　等(1)
大型风电基地集中并网关键技术 …… 姚天亮　郑　昕　杨德洲(4)
基于多汇集风电场 SVC 无功补偿的研究 …… 张东明　姚秀萍　孙立成(8)
用户低负荷状况下无功补偿问题探讨 …… 黄　斌　吕飞鹏(11)
一种基于扰动能量与功率谱的电容器组投切的定位方法 …… 邓扶摇　赵　静　万　力　等(14)
不同类型电磁环网解环研究的基本原则与方法 …… 王莉丽　韩　伟(20)
基于动态惯性权重粒子群算法的配电网状态估计 …… 尹　专　刘天琪　江东林(23)
风电场接入新疆某地区电网暂态电压稳定性研究 …… 张瑞明(27)
谐波对电网电能计量系统影响的研究 …… 黄冰心　龚国兴　赵莉华(32)
110 kV 庄北变电站保护定值整定中存在的问题及解决方案 …… 刘高会　刘　敏　师耀林　等(36)
水电站 10 kV 备自投设计的相关问题及解决方案 …… 李光耀　龚林平　封孝松　等(40)
发电机定子接地保护动作原因分析及故障处理 …… 白　伟(43)
三种失磁保护判据与低励限制配合研究 …… 季　杰　黄建琼(46)
四川 220 kV 变电站仿真考核系统的设计与实践 …… 赵梓蓉(52)
·高电压技术·
不同憎水性绝缘子串覆冰电场仿真分析 …… 张　湘　聂鸿宇　龚奕宇(54)
基于 K-L 特征提取与支持向量机的油浸式变压器故障诊断模型研究 …… 方　飚(58)
基于气相色谱法测油中乙炔含量的不确定度研究 …… 钟　诚(62)
温度对环氧树脂空间电荷特性影响的研究 …… 王青山　陈少卿(65)
城市变电站噪声分析与治理 …… 苟旭丹(68)
排油注氮装置重锤误动引发的主变压器事故分析 …… 刘元生(73)
·发电技术·
《油浸式变压器测温装置现场校准规范》规程解读 …… 田　宇(76)
大型双馈异步风力发电机组变桨控制算法研究 …… 丁艳军(80)
微油点火在 600 MW 超临界 W 火焰炉的应用研究 …… 刘鹏远　肖宏博　谢明均　等(86)
2012 年《四川电力技术》总目录 …… (91)

本期责任编辑　刘斌蓉　编辑　吴小冬　程文婷　刘坤才

CONTENTS

Analysis on Influence of Speed – regulating Characteristics of Hydroelectric Generating Set on Tie – line Transmission Power Limit ····· Wu Maoqian Bai Yuhui Ren Xilin et al (1)
Important Grid – connection Technology for Large – scale Wind Power Bases ····· Yao Tianliang Zheng Xin Yang Dezhou (4)
Research on Reactive Compensation of Static Var Compensator in Wind Farm Based on Multiple Collection Stations ····· Zhang Dongming Yao Xiuping Sun Liwei (8)
Research of Reactive Compensation under Low Load ····· Huang Bin Lü Feipeng (11)
Location Method for Capacitor Bank Switching Based on Disturbance Energy and Power Spectrum ····· Deng Fuyao Zhao Jing Wan Li et al (14)
Basic Principles and Methods for Open – loop Research of Different Electromagnetic Loop Networks ····· Wang Lil Han Wei (20)
State Estimation of Distribution Network Based on Particle Swarm Algorithm with a Dynamic Inertia Weight ····· Yin Zhuan Liu Tianqi Jiang Donglin (23)
Research on Transient Voltage Stability with Wind Farm Integration into a Regional Power Grid of Xinjiang ····· Zhang Ruiming (27)
Research on Influence of Harmonic on Electric Energy Metering System ····· Huang Bingxin Gong Guoxing Zhao Lihua (32)
Problems Existing in Fixed Value Setting of 110 kV Zhuangbei Substation and Its Solution ····· Liu Gaohui Liu Min Shi Yaolin et al (36)
Relevant Problems in Design of 10 kV Automatic Throw – in Equipment in Hydropower Station and Its Solutions ····· Li Guangyao Gong Linping Feng Xiaosong et al (40)
Cause Analysis and Fault Handling for Stator Ground Protection of Turbine – generator. ····· Bai Wei (43)
Research on Cooperation between Three Criteria for Loss – of – excitation Protection and Low Excitation Limit ····· Ji Jie Huang Jianqiong (46)
Design and Implementation of Simulation and Training Evaluation System for Sichuan 220 kV Substation ····· Zhao Zirong (52)
Simulation and Analysis of Electric Filed for Ice – covered Insulator Strings with Different Hydrophobic Nature ····· Zhang Xiang Nie Hongyu Gong Yiyu (54)
Study of Fault Diagnosis Model for Oil – immersed Transformer Based on K – L Feature Extraction and SVM ····· Fang Biao (58)
Uncertainty Research for the Content of Acetylene in Oil Measured by Gas Chromatographic Method ····· Zhong Cheng (62)
Research on Influence of Temperature on Space Charge Characteristics of Epoxy Resin ····· Wang Qingshan Chen Shaoqing (65)
Analysis and Improvement for Noises of Urban Substation ····· Gou Xudan (68)
Accident Analysis of Main Transformer Caused by Heavy Hammer Misoperation of Oil – drainage Nitrogen – injection Device ····· Liu Yuansheng (73)
Interpretation on "The Local Calibrating Standard of Temperature – measuring Equipment for Oil – immersed Transformer" ····· Tian Yu (76)
Research on Pitch Control Algorithm of Large Double – fed Induction Wind Turbine Generators ····· Ding Yanjun (80)
Research on Tiny – oil Ignition Application to 600 MW Supercritical W Flame Boiler ····· Liu Pengyuan Xiao Hongbo Xie MingJun et al (86)

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY
2012 Vol. 35 No. 6
(Ser. No. 222)
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

水电机组调速特性对联络线极限传输功率影响分析

吴茂乾[1]，白宇辉[1]，任锡林[2]，钱　霞[1]，王胜利[2]，张　锋[2]
（1. 奎屯市电业局，新疆 奎屯　833200；2. 新疆电力调度通信中心，新疆 乌鲁木齐　830008）

摘　要：在某地区电网现有网架基础上分别就考虑和不考虑水电机组调速特性两种工况进行了仿真分析，得出了两种工况下的联络线极限传输功率。考虑水电机组调速特性时联络线的极限传输功率有一定程度的提高；但对于纯水电机组构成的电网，水电机组在故障情况下的动态反调特性对联络线的极限传输功率也有一定的制约作用。

关键词：调速特性；联络线；极限传输功率

Abstract: The simulation and analysis of two operating conditions are carried out with and without the speed – regulating characteristics of hydroelectric generating set in the current power grid, and the tie – line transmission power limits under both conditions are obtained. According to the results, the tie – line transmission power limit with speed – regulating characteristics of hydroelectric generating set is higher than the tie – line transmission power limit without speed – regulating characteristics of hydroelectric generating set. But as the current power grid is consisted merely of hydroelectric generating set, the tie – line transmission power limit will also be restricted by the anti – regulation characteristics of hydroelectric generating set under faulted condition.

Key words: speed – regulating characteristic; tie line; transmission power limit
中图分类号：TM714　　**文献标志码：**A　**文章编号：**1003 – 6954(2012)06 – 0001 – 03

0　引　言

近两年奎屯地区经济增长迅速，负荷增长较快，但电源和网架建设相对滞后。受网内电源结构不合理以及用电负荷季节性、时段性的影响，地区电网呈现季节性电力供需不平衡的现象。在枯水季节，一旦地区电网与主网唯一联络线——220 kV 联络线（A 站至 B 站）事故跳闸，地区电网将成为了一个孤立电网，届时，孤网内水电机组的调速特性对地区电网的安全稳定运行有很大影响。

1　地区电网简介

地区电网目前通过单回 286.3 km 的 220 kV 联络线和单回 167.87 km 的 110 kV 叶皮线（正常方式下断开备用）与主网相连，距离主系统 2 000 km 以上，与主系统联系极其薄弱，网内统调发电机组总装机虽然达到 331 MW，但电源结构不合理，78% 的电源为水电机组，受季节变化影响，存在“以水定电”问题。电网地理接线示意图如图 1 所示。

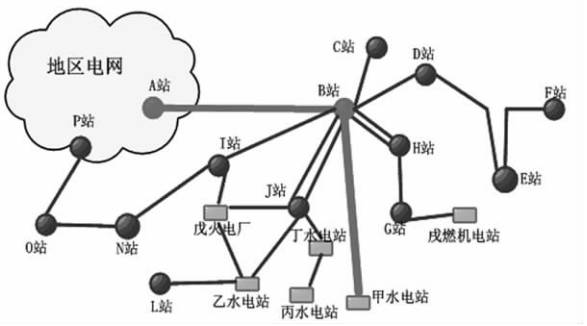


图 1　电网地理接线图

地区电网存在着季节性供需不平衡问题，本地区电源供电能力和从主网受电能力均有不足，主要原因如下。

（1）全地区水能发电站受河床来水不足的制约，发电能力十分有限，存在与负荷增长反时限特性。

（2）网内应急电源燃机电站出力不稳定，因设备缺陷的种种原因（气源不足、气候太冷等）无法投运，造成冬季负荷高峰时段无法提供稳定的电力支

基金项目：国家自然科学基金资助项目（51067009）；新疆教育厅重点资助项目（XJEDU2009I04）

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

撑和电力供应。

(3) 冬季期间,地区最大的A水电站受B水电站大坝蓄水的制约,不能在负荷高峰时段发挥最大效益。

上述3种因素造成冬季地区网内所有电厂的最大发电出力仅为90 MW,缺额部分全部通过220 kV联络线从主网下网功率来弥补。

因此,220 kV联络线的极限传输功率对地区电网的供电能力有着直接影响。

2 水电机组控制特性

水电机组控制特性与火电机组不同,当一次调频投入,网频下降时,水电机组的出力变化特性是先下降后上升,这种特性为水轮机的动态反调特性。如图2所示的即为某水电机组在一次调频试验过程中的负荷与导叶开度的录波曲线,可以清晰地看到水轮机的动态反调特性,水电机组的动态反调特性对全部由水电机组构成的区域电网频率稳定性有很强的影响作用。

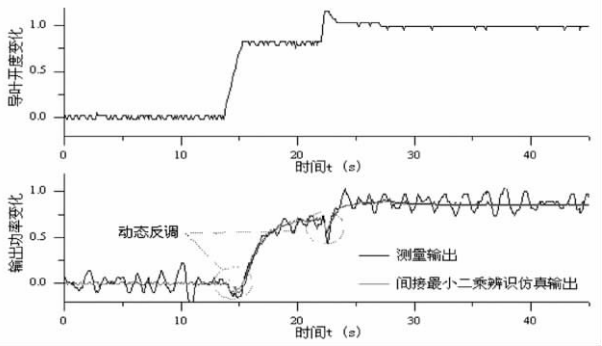


图2 水电机组动态调节特性图

3 仿真分析

为保证220 kV联络线跳闸后,孤网频率稳定,电网安全稳定运行,同时最大限度地提高地区电网受电能力,本着提高联络线下网功率和在电网发生不可预见事故时将造成的危害、损失降低到最小程度的原则,对220 kV联络线跳闸后的孤网进行了仿真分析,求得联络线的极限传输功率。

3.1 计算条件

3.1.1 计算手段

稳定计算采用电科院电力系统计算综合程序PSASP 6.28版。计算中A水电站按照考虑与不考虑调速器特性两种情况分析,地区电网内其余机组不考虑调速器特性,但所有机组均考虑了调压器特性,发电机采用实测的励磁系统模型和PSS模型。负荷模型采用40%~70%的感应电动机负荷模型,厂用电模型采用80%的感应电动机模型。发电机励磁系统,线路快速保护、重合闸,厂、站母线母差保护均可靠投入。

3.1.2 稳定判据

(1) 电网遭受每一次大扰动后,引起系统各机组之间功角相对增大,在经过第1、第2摇摆不失步;相对功角为减幅振荡。

(2) 在电力系统受到扰动后的暂态过程中,220 kV变电站的110 kV母线电压能够恢复到0.80 p.u.以上。

(3) 联络线功率振荡呈衰减趋势。

(4) 系统低频率时,正常情况下应不导致低频率减负荷装置动作,特殊情况下可以考虑低频率减负荷装置动作,但系统不能发生频率崩溃,即系统最低频率不应低至低频率减负荷装置最低频率的频率值;系统高频率时,最高频率不应高于电网中发电机组高频率保护最低频率整定值,一般应不高于50.5~51 Hz。

3.1.3 边界条件

(1) 220 kV联络线潮流方向为B→A。

(2) 220~110 kV电磁环网解环运行。

(3) 地区电网内机组开机方式安排如表1。

表1 机组开机安排

电厂名称	机组台数容量/MW	总容量/MW	开机台数
甲水电站	3×50	150	2×50
乙水电站	4×15	60	2×15
戊火电厂	2×12	24	按关停考虑
戊燃机电站	1×50	50	1×50

(4) 地区电网负荷为185 MW。

3.2 仿真分析

3.2.1 甲水电站水电机组考虑调速特性

220 kV联络线(A→B)的传输功率为100 MW时发生三永故障,0.12 s切除线路两侧断路器,地区电网与主网解列。地区电网孤网频率变化特性如图3所示,甲水电站2号机组的有功变化特性如图4所示,220 kV B站的110 kV侧电压变化特性如图5所示。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

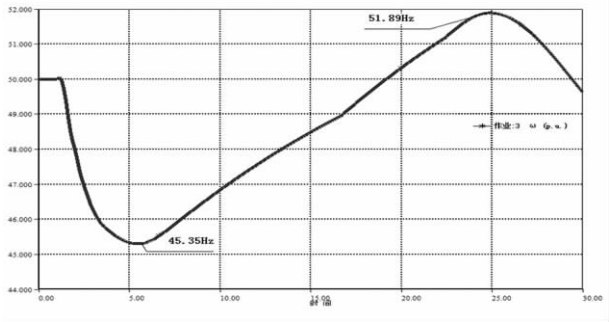


图3　解网后地区电网的频率曲线(Hz)

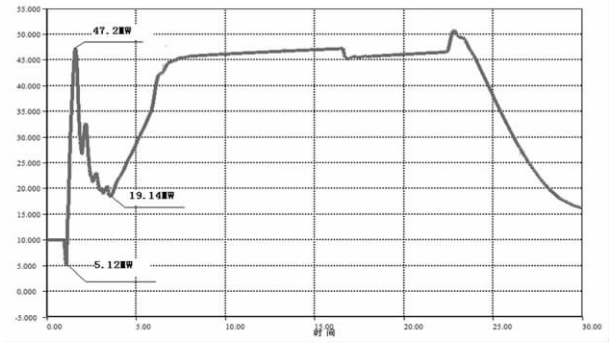


图4　甲水电站2号机有功曲线(MW)

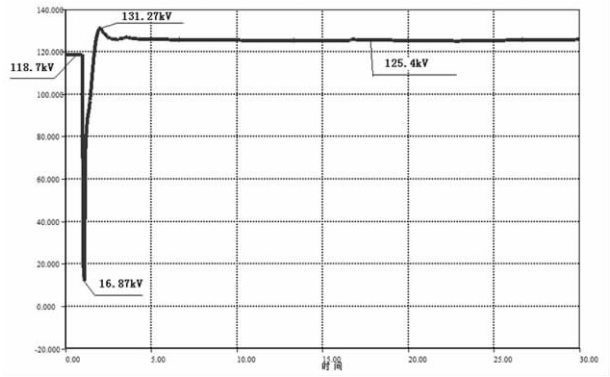


图5　220 kV B站110 kV母线电压曲线

从上述3张图可以看出220 kV联络线(A→B)的传输功率为100 MW时发生三永故障,线路被切除,地区电网与主网解列。依靠甲水电站水电机组的调节特性和低频减载装置动作特性(动作4轮切除了72 MW负荷),最终频率可以恢复到合理范围之内,地区电网110 kV电压上升6~8 kV,需注意电压控制。

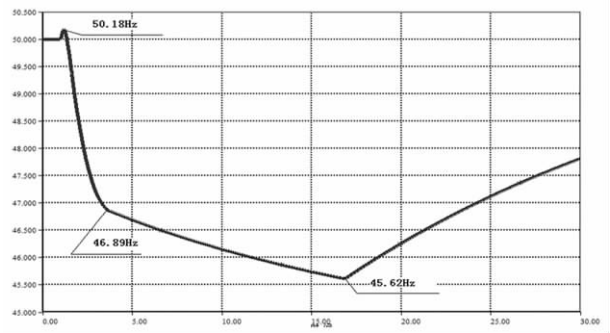


图6　解网后地区电网的频率曲线

3.2.2　不考虑甲水电站水电机组调速特性

220 kV联络线(A→B)的传输功率为80 MW时发生三永故障,0.12 s切除线路两侧断路器,地区电网与主网解列。地区电网孤网频率变化特性如图6所示,甲水电站2号机组的有功变化特性如图7所示,220 kV B站的110 kV侧电压变化特性如图8所示。

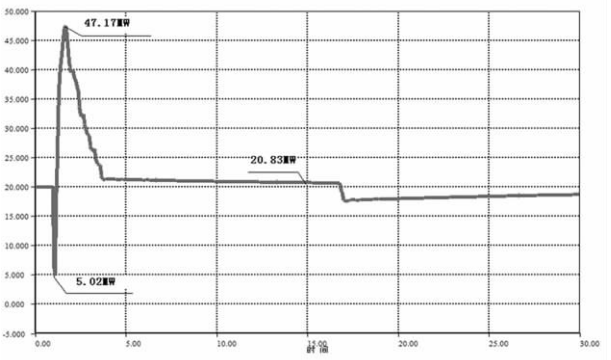


图7　甲水电站2号机有功曲线

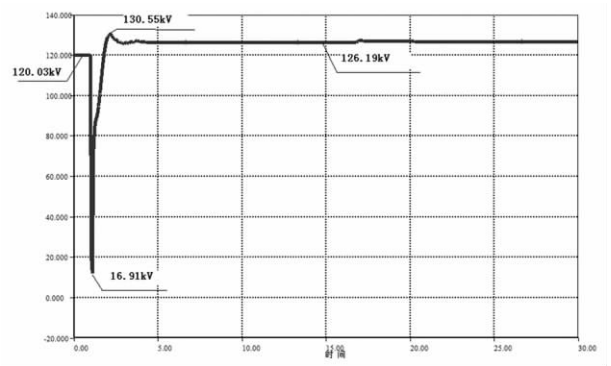


图8　220 kV B站110 kV母线电压曲线

从上述3张图可以看出220 kV联络线(A→B)的传输功率为80 MW时发生三永故障,线路被切除,地区电网与主网解列。依靠低频减载装置动作特性(切除了83 MW负荷),最终频率可以恢复到合理范围之内,地区电网110 kV电压上升6~8 kV。

对比图7和图4可以看出:图7中由于没有考虑甲水电站水电机组的调速特性,联络线跳闸前后,有功功率变化不大。地区电网的频率主要依靠低频减载装置动作和负荷自身的频率特性来寻找功率平衡,最终达到频率稳定。图4中考虑了甲水电站水电机组的调速特性,联络线跳闸后,水电机组调速器动作,增加了水电机组的有功出力,同时低频减载装置动作切除部分负荷,加之负荷自身的频率特性,三者共同作用达到频率稳定。

通过上述分析可知:由于考虑了水电机组调速特性,联络线的极限功率比不考虑水电机组调速特

(下转第72页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表5 各种吸声材料价格对比表

序号	名称	参数	单位	价格
1	玻璃棉	密度: 48 kg/m³, 厚度: 50 mm	元/m²	20
2	聚氨酯泡沫	开孔型	元/m²	160
3	三聚氰胺泡沫	300×200×50(mm)	元/m²	160
4	K-13喷涂材料	植物纤维(50 mm厚) 45 kg/m³	元/m²	300
5	多孔泡沫铝	密度: 1.16 孔隙率: 57.04	元/m²	800
6	铝纤维吸声材料	密度: 38.2 kg/m³, 厚度为10 mm, 臂后空腔深度为40 mm	元/m²	220~500

5 结 语

城区变电站的噪声治理应根据噪声特性、变电站结构及其所处位置、噪声水平、周围敏感点等具体情况,运用不同的治理手段; 同时应通过计算、技术经济比较,科学选材,制定综合治理的具体方案,以达到环境噪声标准的要求。并应进行试点整治,典型分析,跟踪监测,总结提炼,根据治理效果进行总结推广。

(收稿日期: 2012-09-12)

(上接第3页)

性时有所提高。但从图4中也可以明显看出: 联络线跳开的瞬间,水电机组的功率并非直接上升,而是因为水电机组的动态反调特性作用,机组出力先下降后上升。在机组出力下降过程中,地区电网频率加速下降,有可能造成低频减载装置滑差闭锁或者切荷量不足,最终造成频率失稳,电压崩溃。

4 结论与建议

4.1 结 论

(1) 考虑水电机组调速特性时,联络线(220 kV联络线) 极限传输功率为100 MW,略大于不考虑水电机组调速特性时的极限传输功率80 MW。

(2) 地区电网绝大部分电源为水电机组,由于水电机组动态反调特性的影响,考虑水电机组调速特性时联络极限传输功率提高幅度有限。

4.2 建 议

(1) 加快建设与主网联系第二通道,增强地区电网与主网联络。

(2) 尽快在地区电网内建设火电机组,利用火电机组一次调频作用中和水电机组动态反调特性,提高地区电网与主网解列后频率稳定性。

(3) 加强对应急燃机电源的维护及相关工作,确保应急电源在关键时刻可以起到电源作用。

参考文献

[1] 时珊珊,鲁宗相,闵勇,等. 微电网孤网运行时的频率特性分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(9): 36-41.

[2] 赵强,张丽,王琦,等. 系统负荷频率特性对电网频率稳定性的影响[J]. 电网技术,2011,35(3): 69-73.

[3] 陈桥平,蔡泽洋,李爱民,等. 互联电网的地区频率特性差异性及其对低频减载的影响研究[J]. 中国电力,2009,42(8): 1-5.

[4] 熊小伏,周永忠,周家启. 计及负荷频率特性的低频减载方案研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(19): 48-51.

[5] 赵庆波,曾鸣,刘敏,等. 电力市场中的负荷频率控制方案研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(11): 45-50.

[6] 曾启明,陈伟乐,谢志堂,等. 电力系统频率新的跟踪算法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(19): 48-51.

[7] 秦明亮,杨秀朝. 减少低频减载方案过切的措施的研究[J]. 电网技术,2002,26(2): 83-86.

[8] 肖遥,孟·让·柯洛德. 电力系统频率测量误差成因分析[J]. 电网技术,2002,26(1): 29-42.

[9] 新疆电力调度通信中心. 2011年度运行方式[R]. 2011.

[10] QIU Bin, LIU Yi-yu. Lan-based Control for Load Shedding[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2001,14(12): 38-43.

作者简介:

吴茂乾(1988),男,江苏连云港人,硕士研究生,从事电力市场及电力系统安全稳定分析研究。

(收稿日期: 2012-09-13)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大型风电基地集中并网关键技术

姚天亮[1]，郑　昕[1]，杨德洲[2]
(1. 中能建甘肃省电力设计院，甘肃 兰州　730050;
2. 国家电网甘肃省电力公司，甘肃 兰州　730050)

摘　要: 风电是理想的非石化清洁能源，大型风电基地集中并网技术是世界前沿课题。基于甘肃酒泉千万千瓦级风电基地的并网案例，分析了一期3 800 MW风电的实际出力特性，指出了电网接纳风电能力的制约因素，提出了大容量风电集中并网跨区域消纳策略存在的问题，并结合已有大型风电场并网运行经验和酒泉风电基地“2.24”风机脱网事故，研究了风场内部35 kV电网接地方式、动态无功补偿设备配置等关键技术问题，解决了一期风电工程在主要设备选型、电力设计、事故处理等细节问题，有利于酒泉千万千瓦级风电基地的可持续发展，对国内外大型风电基地推广集中并网方案具有示范意义。

关键词: 大规模风电基地; 跨区域消纳; 接地方式; 动态无功补偿

Abstract: Wind power is the ideal non－petrochemical clean energy, and the concentrated grid－connection technologies of large－scale wind power bases are the leading issue in the world. Based on the grid－connection case of Jiuquan 10 GW Wind Power Base in Gansu Province, the actual output characteristics of 3.8 million kilowatts of wind power are analyzed, the constraints of wind power integration capacity in power grid are pointed out, and the problems of large－capacity wind power cross－regional accommodation strategy are proposed. Combined with grid－connection operating experiences for the existing large－scale wind farms and "2.24" wind fans disconnection from the grid in Jiuquan Wind Power Base, some key issues such as grounding method of 35 kV power grid in wind farm, the configuration of dynamic reactive compensation are studied, the details of main equipment selection, electric power design, and accident treatments of the first phase wind power project are solved. It is of benefit to the sustainable development of Jiuquan 10 GW Wind Power Base, and has the important demonstration significance for the promotion of concentrated grid－connected schemes in domestic and foreign large－scale wind power bases.

Key words: large－scale wind power bases; cross－regional accommodation; grounding method; dynamic reactive compensation

中图分类号: TM715　　**文献标志码:** A　**文章编号:** 1003－6954(2012)06－0004－04

0　引　言

按照国家风电发展规划，分别在甘肃酒泉、新疆哈密、河北、吉林、蒙东、蒙西、江苏、山东等7个风能资源丰富地区，开展8个千万千瓦级风电基地的规划和建设工作，并提出了“建设大基地、融入大电网”以及由近及远、分期建设的总体消纳思路。其中，甘肃酒泉千万千瓦风电基地一期3 800 MW风电在2011年全部并网发电，二期3 000 MW风电工程即将核准。酒泉一期风电工程建设周期2年时间，成就了世界之最，由于国内外没有案例可以借鉴，因此也承载着摸索大型风电基地[1-2]建设经验、大型风电场典型设计、大型风电场并网技术规范等关键技术的历史使命。

酒泉一期风电至今已并网运行1年多，积累了大量的实际运行特性数据和有益的并网运行经验，但是在2011年曾多次发生风电机群脱网事故，最多时约700台风机同时脱网，损失风电出力率达54.4%，暴露出大型风电基地在设备选型、施工管理、电力设计、外送消纳等方面存在的诸多问题。

基于酒泉千万千瓦级风电基地一期工程规划设计经验、并网运行特性的研究，对大型风电基地集中并网策略进行深入剖析和思考，在关键问题和技术

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

细节方面获得了一些新的见解。

1 大型风电基地出力特性

酒泉风电基地不同区域风力资源特性与风电出力特性的研究结论[3]：酒泉地区风电场出力波动性大，最大出力可达到装机容量，最小出力可达到0，全年多数出力一般集中在装机容量的20%以内，绝大部分出力在装机容量的70%以下，整个酒泉区域出力系数平均约为0.63。

酒泉风电基地风电近两年出力统计分析：理论研究结论与实际运行数据吻合，装机容量越大最大出力同时率越低，不同区域风电群之间的相关性和互补性不明显，随着同一区域风电装机规模的增大同时最大出力系数反而降低。

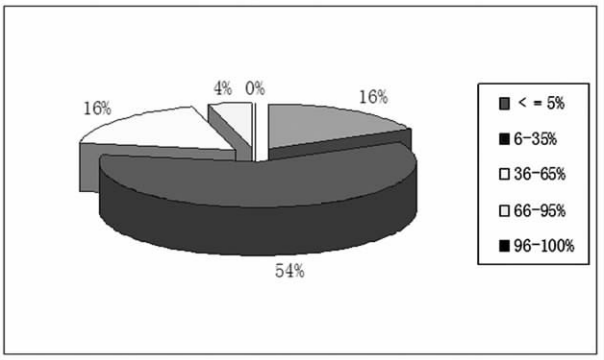


图1 2010—2011年酒泉风电基地不同出力出线的时间频率图

表1 不同时段风电发电电量所占比例

时段	2010年	2011年
	所占比例/%	所占比例/%
00:00—06:00	44	41
06:00—12:00	20	19
12:00—18:00	21	20
18:00—24:00	15	20

2010年10月23日至11月9日河西风电送出未受限制，河西风电出现同时率为0.72，瓜州和玉门分别为0.69、0.92。00:00—06:00、06:00—12:00、12:00—18:00、18:00—24:00发电量占总发电量比例河西为25%、25%、28%、22%。

2011年甘肃风电最大出力为4月22日的2 667 MW，占当时风电装机总容量的65%，占全网发电出力的22%。全网风电1 min、5 min、15 min最大负荷变化速率月最大年平均值分别为：275、361、566 MW。酒泉风电基地瓜州地区风电发电同时率为0.63，玉门地区风电发电同时率为0.78。

风电不同出力出现时间频率统计：全网风电出力主要集中在5%～35%装机容量区间，出现时间频率为54%；36%～65%装机容量区间出现时间频率为26%；0～5%和65%以上装机容量出现的时间频率分别为16%和4%。

2 跨区域消纳能力研究

中国西部地区大型风电基地风电能源丰富，但区域内用电负荷小、消纳能力差，迫切需要大规模跨区输电，送往中东部负荷密集地区进行消纳。国家电网因风电并网问题承受着多方面压力，并网技术规范[4]要求大型风电基地并网设计应开展电网接纳风电能力专题研究，应考虑能源资源情况、风电出力特性、电网负荷特性、电源结构、调频调峰能力等因素，分析风电有效容量，研究风电消纳方向，提出电网接纳风电能力和输电方案等，并对风电开发规模和进度提出建议。

由于风电出力具有随机性和间歇性，风电的市场消纳研究需要考虑电力平衡、电量平衡以及调峰能力，电网接纳风电的能力受多重因素制约，以酒泉风电基地为例分析如下。

(1) 大容量风电群最大出力需要考虑同时率。酒泉风电基地最大出力同时率为装机容量的64%左右，出力主要集中在5%～35%之间。因此，电力平衡需要分别考虑风电大发、风电平发和风电为零的情况，风电场升压主变压器容量和送出线路导线截面积的选择，可按乘以最大同时率以后的数值考虑。

(2) 风电电量的消纳新构想，大力发展适应性负荷，如电解铝、城市供热等负荷。大型风电基地周边矿产资源丰富，适宜发展高耗能产业，将大规模风电直接用于高耗能产业是国家重点科研攻关项目，也称为“非并网风电应用”，彻底打破风电并网后远距离输电后使用的瓶颈，有效减轻了高电压等级网架的输电压力，节省电网投资并降低网损。

(3) 跨区消纳需要强大的特高压输电网作为支撑。酒泉风电基地外送通道主要依托750 kV第1、第2输电通道，受不同运行方式下电网安全稳定极限的限制以及两条输电通道潮流分配不均的影响，不能充分发挥特高压网架的输电能力。风电跨区消纳还存在一个需要平衡的问题，就是为了接纳区外

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

清洁能源，中东部负荷中心地区需要统筹本地和外来电源的比例，控制火电建设规模和利用小时数。

(4) 与消纳能力对应的是调峰能力[5-6]。网内水电调峰能力受水量影响，火电调峰深度受技术因素和经济指标影响，调峰能力的计算存在不确定性，即使跨区具备调峰调剂能力，受省网间网架交换能力的限制，难以发挥跨区调峰作用。由于风电的不稳定性，远距离输电需要与火电或水电捆绑联合外送，可通过建设抽水蓄能电站来解决调峰问题。

(5) 建议将风电基地输电规划纳入国家能源发展战略和“十二五”电力规划，以实现风电并网消纳规划的实施。对于需要跨省(区)消纳的风电，要整体规划、剔除无序开发。风电工程与电网建设工期不匹配，也是造成并网难的问题之一。风电场建设周期为6个月～1年，而配套电网建设需要1～2年，建议由国家主管部门统一核准，提前安排电网建设项目，以确保风电基地与电网工程配套建设、同步投产。

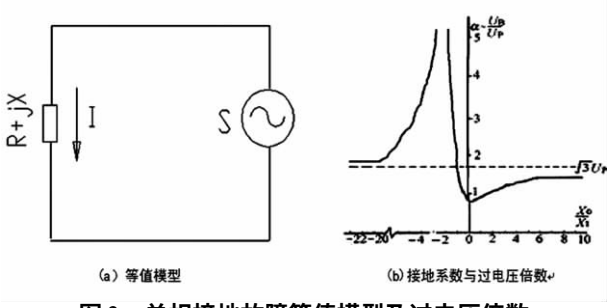
3 风电场内部35 kV电网接地措施

2011年2月24日酒泉风电基地一期工程风机脱网事故的原因是风电场内部35 kV线路电缆头绝缘击穿发生单相瞬时接地故障，升压站35 kV母线上直挂的消弧柜不能快速地降低电容电流，造成弧光接地持续发生，系统内产生接地过电压，导致箱式变压器、35 kV母线TV等设备烧毁，诱发系统复杂故障。

酒泉一期风电消弧方式为升压站直挂消弧柜，35 kV系统为不接地，事故发生后专家一致推荐大型风电场内部采用接地系统，35 kV系统接地方式选择成为并网技术热点，目前，设计主要推荐方案有接地变压器加消弧线圈[7-8]和经小电阻接地[9]方式，两种消弧接地方式消弧原理不同且各有优缺点。

①经消弧线圈接地的优点是非故障相对地电压基本不变并立即稳定，三线电压完全对称，单相接地故障不会恶化，可带故障运行2个小时。缺点是完全补偿会产生谐振过电压，容易造成间歇性弧光反复接地，并且接地电流很小，查找故障发生地点比较困难。

②经小电阻接地的优点是系统发生单相接地时健全相电压升幅很小，可以降低设备绝缘等级，节省设备造价。小电阻接地计算过程针对性强，零序过流保护的灵敏度高，有利于故障排除。电阻成套接地装置结构紧凑，占地面积小，便于安装。缺点是35 kV系统构成大电流接地系统，发生任何形式故障都作用于跳闸，使内部汇集线路的跳闸次数大大增加，降低了供电可靠性。若零序保护拒动将危害接地点附近的设备绝缘，进而发展成复杂短路故障。



(a) 等值模型 (b) 接地系数与过电压倍数

图2 单相接地故障等值模型及过电压倍数

但是从图2(b)可以看出，非故障相过电压倍数与接地系数有很大关系，接地系数大于0时单调递增，接地电阻对过电压影响不大；接地系数小于0时，考虑零序接地电阻对过电压影响复杂，在特定范围内可能出现谐振过电压。

因此，风电场内部35 kV汇集线路很长，“架空线+电缆”接线形式较为复杂，电网事故反措提出风电场消弧接地方式的选择，要以快速消除单相接地故障，或配备可靠灵活的小电流接地选线跳闸装置，有效切除永久故障。

4 无功补偿配置

在建设坚强智能电网背景下，动态无功补偿设备与风电市场发展存在双向的相互促进作用关系。风电市场的发展，保证了动态无功补偿市场的空间，动态无功补偿市场能够提高电网的风电接纳能力。随着风电市场接入问题显现，动态补偿设备迎来发展机遇，市场高速发展区域也实现由东部回归西部的态势，SVC价格体系呈现下降走势；无功补偿产品体现出升级换代趋势，技术性能更好的SVG将取代SVC成为风电补偿的主力军，SVC将在更深入电网侧的汇集站发挥其大容量的优势。

对于大型风电基地，受风电功率间歇性和随机性影响，推荐采用动态无功补偿设备，建议优先采用SVG动态无功补偿装置，在工程阶段具体设备选型由业主经技术经济综合比较后确定，规程要求响应

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

时间小于30 ms，同时并网前要进行背景特征谐波测试，确定安装响应的滤波支路治理谐波。

并网风电出力波动频繁，加大了电网运行压力，随着入网风电装机容量的迅速增长，风电场发生故障概率大大增加，威胁电网安全稳定运行。图3为大型风电场配置SVG动态无功补偿装置后，当电网线路发生单相瞬时接地故障和风电场35 kV发生相间或两相接地故障时，电网主要节点电压和风电场母线电压波动曲线。

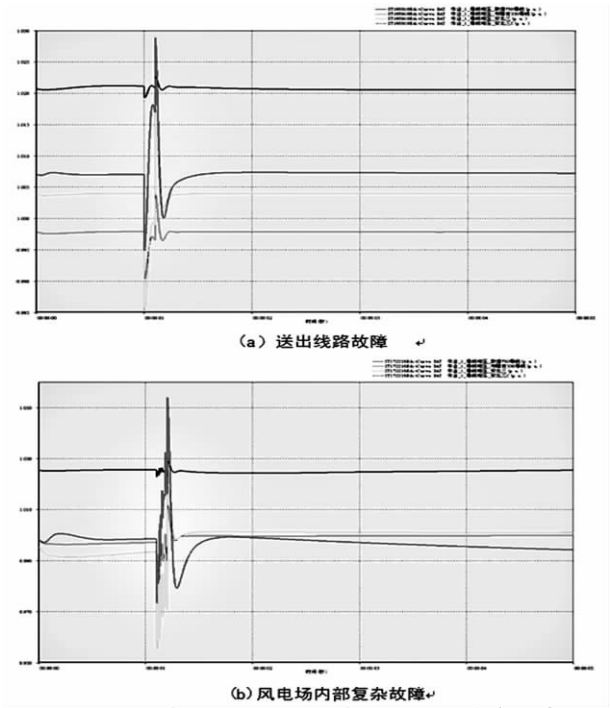


图3 电网故障风电场SVG投运时电压响应曲线

可以看出，故障发生时主要节点电压瞬间跌落，SVG能够快速抬高主要节点电压，有利于电网电压恢复和重建，有利于风电机组低电压穿越过程，因此SVG响应时间快速，可以达到5 ms，非常有益于大型风电场与电网保持同步稳定运行。

此外，甘肃酒泉千万千瓦级风电基地大容量风电通过750 kV输电系统集中外送时，电源集中上网造成送端电压飙高，为满足电网电压控制要求需要在电网主要节点和输电线路上采取加装线路高压电抗器、母线高压电抗器和低压电抗器等技术措施，有效解决主网的电压波动问题。

目前无功补偿技术存在的问题：应该加快特高压750 kV可控高压电抗器的研制投运，加快35 kV及以上电压等级直挂大容量SVG的研制、评估以及运行经验积累，加快酒泉地区电网AVC策略确定并尽快投运，确保酒泉风电基地内多台SVG统一受控，按照同一控制策略运行。

5 结 语

中国千万千瓦级风电基地目前还处于建设初期，大型风电场并网关键技术的研究是一项系统而复杂的课题，需要在实践中不断的研究其出力规律、输送通道与消纳市场、设备制造及设计运行经验，不断出台和完善相关技术标准和行业规范，指导和引领中国的风电产业健康可持续发展。

参考文献

[1] 汪宁渤，马彦宏，夏懿. 甘肃酒泉10 GW级风电基地面临的巨大挑战[J]. 电力建设，2010，31(1)：101－104.
[2] 郝正航. 风电基地电力外送面临的技术挑战[J]. 电气制造，2011(2)：29－31.
[3] 西北电力设计院，甘肃省电力设计院. 新疆及甘肃河西走廊地区风电场输电规划[R].
[4] 国家能源局. NB/T31003－2011 大型风电场并网设计技术规范[S].
[5] 韩自奋，陈启卷. 考虑约束的风电调度模式[J]. 电力系统自动化，2010，34(2)：89－91.
[6] 衣立东，朱敏奕，魏磊，等. 风电并网后西北电网调峰能力的计算方法[J]. 电网技术，2010，34(2)：129－132.
[7] 盛晔，朱玛. 配电网中性点经消弧线圈加并联选线电阻接地方式的运行安全可靠性探讨[J]. 能源工程，2011(5)：18－22.
[8] 陈锐. 基于快速消弧线圈的扰动法选线分析及应用[J]. 电力系统保护与控制，2008(20)：41－44.
[9] 于盛楠，冯蓓艳，张嘉晏，等. 中性点经小电阻接地配网系统的故障定位[J]. 电力与能源，2011，32(3)：206－209.

作者简介：

姚天亮(1979)，男，汉族，工程师，硕士，研究方向为电力系统一次规划、新能源并网研究等。

(收稿日期：2012－06－15)

欢迎订阅 欢迎投稿

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基于多汇集风电场SVC无功补偿的研究

张东明[1]，姚秀萍[2]，孙立成[2]
（1. 新疆大学电气工程学院，新疆 乌鲁木齐 830047；
2. 新疆电力调度通信中心，新疆 乌鲁木齐 830001）

摘 要： 随着风电场大量接入电网，常见的接入电网方式有两种：各个风电场直接接入电网、各个风电场汇集在风电场群汇集站再并入电网。由于多数风电场均位于电网末端，远离负荷中心，周围缺少火电和水电等其他电源的支撑和调节，可能会对地区电网线路传输功率及电压稳定性产生较大的影响。目前，常见的解决方法有3种：在风电场群汇集站处加装静止无功补偿器进行无功补偿、在各个风电场加装静止无功补偿器进行无功补偿、在各个风电场和风电场群汇集站均加装静止无功补偿器进行无功补偿。为了使无功补偿装置安装合理化以及无功补偿最优化，并基于这3种补偿方法，研究了在风电场接入容量不同以及地理距离不同的情况下，静止无功补偿器（SVC）的安装位置以及补偿容量的问题，并通过PSASP仿真程序验证了最优补偿的合理性，提高了系统电压的稳定性以及风电送出能力，为风电场建设提出借鉴和理论参考依据。

关键词： 风电场；静止无功补偿器；电压稳定性；风电场汇集站

Abstract: With the large number of wind farms connecting into power grid, there are two common ways that are used to switch in the power grid: each wind farm is directly connected to the power grid, and each wind farm comes together in the collection station of wind farm group, then integrates into the grid. Since many wind farms are located at the end of power grid, away from the load center, and lack of other power sources such as thermal power and hydropower for support and regulation around them, it may have great influences on the transmission power of regional power grid and voltage stability. At present, there are three common ways to solve the problems: one is to install static var compensator for reactive compensation in the collection station of wind farm group, another is to install static var compensator for reactive compensation in various wind farm, and the last one is to install static var compensator for reactive compensation both in various wind farm and in collection stations of wind farm group. In order to make the reasonable installation of reactive compensation device and the optimal reactive compensation, the installation position and compensation capacity of static var compensator (SVC) at the different wind farm capacity and different geographic distance are studied based on the three compensation methods. The rationality of optimal compensation is verified through the PSASP simulation results, and the system voltage stability and wind power transmission ability are improved, which can provide a reference for the construction of wind farms.

Key words: wind farm; static var compensator; voltage stability; wind farm collection station

中图分类号： TM714 **文献标志码：** A **文章编号：** 1003－6954(2012)06－0008－03

0 引 言

中国幅员辽阔，风力资源丰裕，风电场群多数位于电网末端，远离负荷中心，周围缺少火电和水电等其他电源的支撑和调节，当风电装机容量较大且风电场输出功率较高时，风电场无功需求和输电线路无功损耗增大，电网无功不足会引起电压水平和稳定裕度降低，加之风电场缺乏合理的无功动态补偿，容易产生高峰负荷电压偏低和低谷负荷电压偏高的现象。目前，常见的解决方法有3种：在风电场群汇集站处加装静止无功补偿器进行无功补偿、在各个风电场加装静止无功补偿器进行无功补偿、在各个风电场和风电场群汇集站均加装静止无功补偿器进行无功补偿。为了使无功补偿装置安装合理化，无功补偿最优化，以及提高系统电压的稳定性和风电送出能力，基于这3种常见的补偿方法，分析研究在风电场接入容量不同以及地理距离不同的情况下，静止无功补偿器（static var compensator，SVC）的安装位置以及补偿容量的问题，并通过PSASP仿真程序验证了

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

最优补偿的合理性，使得电网更加安全稳定运行，为风电场建设提供理论借鉴和技术参考依据。

1 静止无功补偿器简介

静止无功补偿器是一种由电容器和各种类型的电抗器组成的无功补偿装置，用电子开关来实现无功功率的快速平滑控制。由于其价格较低、维护简单、工作可靠，在国内仍是主流补偿装置。静止无功补偿器先后出现过不少类型，主要有晶闸管控制电抗器组型(TCR型)、晶闸管投切电容器组型(TSC型)、晶闸管投切电抗器组型(TSR型)、晶闸管控制电抗器组和晶闸管投切电容器组并用型(TCR/TSC型)、晶闸管控制高阻抗变压器型(TCT型)5种。风电机组一般用的是由一固定电容器和由双向晶闸管控制的可控电抗器组成的SVC。

当风电场大发出力大时，静止无功补偿器作为系统补偿，可以维持输电线路上节点的电压，减小线路上因为功率流动变化造成的电压波动，并提高输电线路有功功率的传输容量和电网的静态稳定性；在网络故障情况下，快速稳定电压，维持线路输电能力，提高电网的暂态稳定性；增加系统的阻尼，抑制电网的功率振荡；在输电线路末端进行无功功率补偿和电压支持，提高电压稳定性等等。当风电场出力较小，作为受端负荷时，静止无功补偿器作为负荷补偿，抑制负荷变化造成的电压波动和闪变；补偿负荷所需要的无功电流，改善功率因数，优化电网的能量流动；补偿有功和无功负荷的不平衡。

2 无功补偿方案比较分析

2.1 方 案

方案1研究的是4个风电场通过风电场汇集母线集中接入风电场群汇集站，然后并入电网，此方案线路距离长，距电网枢纽点较远，没有强大的电源支撑。此方案是在风电场群汇集站处安装静止无功补偿器，来确保并入电网的稳定性。

方案2研究的是4个风电场直接接入风电场群汇集站然后并入电网。各个风电场距离风电场群汇集站的地理距离比方案1大几倍。此方案是在各个风电场安装静止无功补偿器，来确保并入电网的稳定性。

方案3研究的是4个风电场通过风电场汇集母线集中接入风电场群汇集站，然后并入电网。此方案与方案1的条件相同，只是此方案在各个风电场以及风电场群汇集站处均安装静止无功补偿装置，来确保并入电网的稳定性。

2.2 方案比较分析

3种方案比较分析见表1。

3 算例分析

在研究风电场并网对电力系统的影响时，主要研究各个风电场与电网之间的相互作用，而风电场内部的潮流分布以及风电场中各个风电机组之间的相互影响不在这里的研究范围。且接入主干网络的风电场，其配置的容性无功容量除能够补偿并网点以下风电场汇集系统及主变压器的感性无功损耗外，还要能够补偿风电场满发时送出线路一半的感性无功损耗；其配置的感性无功容量能够补偿风电场送出线路一半的充电无功功率。

由于方案1和其他两种方案的线路走向不同，故没有可比性。现通过工程实例来分析方案2和方案3的合理性。

通过PSASP仿真分析比较并且根据风电场电

表1 3种方案比较分析表

	优 点	缺 点	适用范围
方案1	所用设备少，控制策略简单易行，投资少，能保证风电场主变电站到并网点的电压稳定性。	故障时影响的范围大，可靠性能低；各风电场之间功率流动，使内部电压不稳定。	接入较强电网时，场内无功容量对电网电压作用很小，风电场参与电网电压的实际操作的经济性很差。
方案2	分散式补偿使各风电场之间不存在功率平衡问题，影响变小。	所用设备多，无功补偿控制策略较复杂，投资较大。	接入相对弱电网的风电场的无功容量对电网电压调节作用有限时。
方案3	可靠性高，能确保风电场到并网点的电压稳定性。	所用设备多，无功补偿控制策略复杂，投资大。	接入比较弱电网的风电场，其无功容量对电网电压的调节比较重要。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

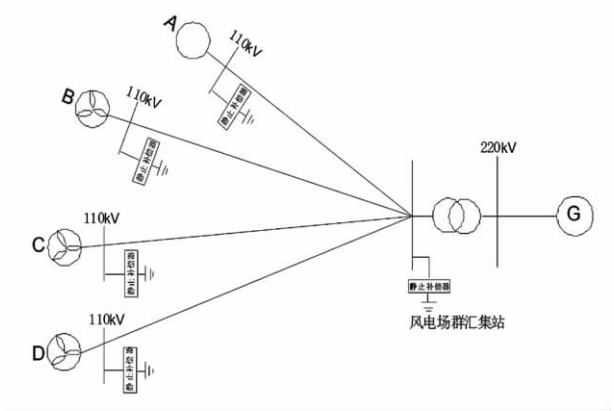


图1 算例接线方式

网接入技术规定，且在各风电场满发、功率因数在0.9时得出方案2和方案3均不合理。

通过仿真实例分析，离枢纽变电站近的风电场（如A风电场），即接入较强电网的风电场，其场内无功容量对电网电压作用很小，风电场参与电网电压的实际操作的经济性很差，同时对风电场的要求也会过于苛刻。因此，在电网电压较低或较高时，不能依靠离枢纽变电站较近的风电场的无功容量来调整电网的电压，只能靠电网中其他无功电源来调节电网电压。此时，风电场内应适当具备可供调节无功容量的静止无功补偿装置。

离枢纽变电站较近的风电场（B、C风电场）的无功容量对电网电压调节作用有限，安排其场内无功容量时也不应该过多考虑其参与电网电压调整的要求，风电场内应该适当具备可供调节无功容量的静止无功补偿装置。

离枢纽变电站较远的风电场（如D风电场），即接入较弱电网的风电场，其无功容量对地区电网电压的调节比较重要。此时，要求风电场参与地区电网电压调节的需求也显得非常合理，风电场内的无功容量需要满足调节所接入电网电压调节要求。

4 结 语

通过PSASP仿真程序仿真了两种无功补偿方案，通过对比分析得出结论：风电场无功容量配置需要与电网结构、送出线路长度及风电场总装机容量密切配合，风电场需配置的无功容量范围应该根据每个风电场实际接入情况来确定。它的无功调节容量的调节范围不能简单地给出一个风电场功率因数确定的范围，需要根据具体情况具体确定。但是一般而言，需要风电场具有在系统故障情况下能够调节电压恢复至正常水平的足够无功容量，以满足电压控制要求。这是目前实际风电场接入中最为科学的方法，也具有很好的经济性。

参考文献

[1] 迟永宁，戴慧珠，王伟胜. 大型风电场接入电网的稳定性问题研究[D]. 中国电力科学研究院，2006.

[2] 陈宁，朱凌志，王伟. 改善接入地区电压稳定性的风电场无功控制侧罗[J]. 中国电机工程学报，2009，29(10)：102－108.

[3] Q/GDW 392－2009，风电场接入电网技术规定[S]. 北京：国家电网公司，2009.

[4] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统及其自动化，2003，27(8)：84－86.

[5] 宋伟，李昌禧. 大型风力发电机组并网的探讨[J]. 河北电力技术，2003，21(4)：50－52.

[6] 王承煦，张源. 风力发电[M]. 北京：中国电力出版社，2003.

作者简介：

张东明(1987)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统稳定与控制；

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

(收稿日期：2012－05－30)

四川电科院圆满完成裕隆换流站换流变调试任务

随着极Ⅰ高端Y－YA相换流变局部放电诊断性试验的完成，截至2012年11月11日，四川电力科学研究院圆满完成了±800 kV裕隆换流站换流变的调试任务，为确保锦苏特高压直流工程在2012年11月15日极Ⅱ高端送电调试目标的实现、双极高端顺利投运打下基础。

裕隆换流站调试工程是四川电科院历史上承担的数量最多、难度最大的换流变调试任务，标志着电科院的换流变调试水平上升到一个新的台阶。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

用户低负荷状况下无功补偿问题探讨

黄 斌[1],吕飞鹏[2]
(1. 德阳电业局,四川 德阳 615000; 2. 四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘 要: 针对用户的功率因数会在用户低负荷生产情况大幅度下降的情况,分析了现有无功补偿计算方式及其在低负荷情况下的工况,提出了以阶梯型设计补偿电容及配置合理投切装置为基础,并探讨了此时智能投切控制器所需的控制逻辑和功能需求,使得用户功率因数在用户低负荷情况下仍然能够保持在较高水平。

关键词: 无功补偿; 低负荷; 功率因数

Abstract: Aiming at the situation that the power factor of users will decrease greatly when the users are in a low load condition, the existing calculation methods of reactive compensation and its working condition of low load are analyzed. A new method based on the design of stepped compensating capacities and the reasonable on - off instrument is proposed, the control logic and the functions required by the intelligent on - off control equipment are discussed, which can keep the power factor in a higher level when the users are in a low load condition.

Key words: reactive compensation; low load; power factor

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 - 6954(2012)06 - 0011 - 03

0 引 言

在工厂配电设计时,用电设备的无功补偿问题已经得到了设计人员的高度重视[1],在工厂正常生产情况下,功率因数达到0.9及以上的标准是完全没有问题的。但是,当工厂开工率不足,平均负荷很低的时候,此时的功率因数通常很低,用户为此将被处罚不少的力率调整电费。

下面将分析这种情况产生的原因,并介绍一种新的无功补偿电容选择方式,并通过合理的运算来进行电容投切以避免工厂低负荷情况下受到力率考核。

1 补偿容量的选择

若用户最大负荷月的平均有功功率为 P_j,补偿前的功率因数为 $\cos\phi_1$,补偿后要求达到的功率因数为 $\cos\phi_2$,则补偿容量 Q_c 可以用下述公式计算[2]。

$$Q_c = P_j(\tan\phi_1 - \tan\phi_2) \quad (1)$$

也即

$$Q_c = P_j\left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2\phi_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2\phi_2} - 1}\right) \quad (2)$$

式中,Q_c 为所需补偿容量,kvar; P_j 为最大负荷月平均有功功率,kW。

但在实际设计中,准确计算无功补偿容量比较复杂,且负载经常变化,计算出来也无太大意义,只要功率因数达到0.9以上就可以了。一般来说,工厂无功补偿均选择在低压配电室进行集中补偿,补偿容量选择为变压器容量的30% ~40%。对于普通小型工业用户,特别是箱式变压器用户,受场地限制,一般仅有一面补偿柜,并在电容器补偿柜内装10个补偿电容器,即每个电容为变压器容量的3% ~4%,每个电容的容量一致,采用循环投切的方式进行无功补偿[3-4]。

当用户处于正常生产的过程中,利用该无功补偿方式,采用自动投切电容控制器,用户的月平均功率因数通常可以达到0.92及以上,满足电网企业对工厂力率考核的要求。

2 低负荷情况下的工况

当用户出现开工不足或平均有功功率较低的情况下,将可能出现最不利的情况: 当投入一组电容器后,过补偿,则补偿系统自动切开该电容组; 但此时系统实际无功补偿不足,功率因数较低。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

设变压器容量为 S，则按照前述方式，每块补偿电容的容量为 $0.04S$ kvar，则在投入电容之前，用户低压侧的无功最大量也为 $0.04S$ kvar。在这种工况下，可能的有功功率为，按照电动机负载平均功率因数为 $\cos\phi=0.8$ 计算，则有功为 0.04S kW。按变压器为 500 kVA 计算，则有功功率为 20 kW，视在功率为 25 kVA。按用户两班生产，则月用电量为 9 600 kWh 左右，低压侧功率因数也将保持在 0.8。

由于目前供电部门无功考核点一般设置在高压侧，即实际考核用户的功率因数为用户高压侧的功率因数，即在低压侧功率因数计算的基础上需加上变压器的损耗。

变压器的损耗可分为两部分，即空载损耗和负载损耗，可用下述公式进行计算。

$$\triangle P = P_0 + P_k\left(\frac{S_{js}}{S_e}\right)^2 \quad (3)$$

$$\triangle Q = Q_0 + Q_k\left(\frac{S_{js}}{S_e}\right)^2 \quad (4)$$

式中，$\triangle P$ 为变压器有功损耗，kW；P_0 为变压器空载有功损耗，kW；P_k 为变压器短路有功损耗，kW；S_{js} 为变压器计算负荷，kVA；S_e 为变压器额定容量，kVA；$\triangle Q$ 为变压器空载无功损耗，kvar；Q_0 为变压器空载无功损耗，kvar；Q_k 为变压器短路无功损耗，kvar。

以上参数均可根据变压器出厂铭牌或出厂实验报告上注明的参数进行计算得出。

根据以上公式，考虑用户变压器为 S_q-500，则该变压器参数为：$P_0=0.96$ kW；$P_k=5.15$ kW；$Q_0=5$ kvar；$Q_k=20$ kvar，通过以上参数，即可计算出变压器每月的损耗为

$$\triangle W_p = \triangle P \cdot T = \left[P_0 + P_k\left(\frac{S_{js}}{S_e}\right)^2\right] \cdot T$$

$$= \left[0.96 + 5.15\left(\frac{25}{500}\right)^2\right] \cdot 720 = 700 \text{ kWh} \quad (5)$$

$$\triangle W_Q = \triangle Q \cdot T = \left[Q_0 + Q_k\left(\frac{S_{js}}{S_e}\right)^2\right] \cdot T$$

$$= \left[5 + 20\left(\frac{25}{500}\right)^2\right] \cdot 720 = 3\,600 \text{ kvar} \quad (6)$$

由变压器损耗及前述月用电量和低压侧的功率因数，则可以得到该例用户在高压侧的功率因数 $\cos\phi_1=0.69$。

由以上分析可见，当用户处在低负荷情况下时，高压侧功率因数由于变压器自身损耗的问题，会进一步恶化。此时根据目前的功率因数调整电费管理办法相关规定，其罚款因子为 10.5%。按四川电网目前的电价标准，考虑用户全部在平水期平段用电，则用户当月电度电费和基本电费之和约 18 600 元，则功率因数调整电费约 1 950 元，即用户至少需缴纳 1 950 元的力率罚款。当用户低负荷情况为大容量电机低负荷运行，负荷侧的功率因数会更低，用户整个功率因数也将更低，用户遭受到的力率调整电费也将会更多。

由以上分析可见，由于补偿装置每步投切容量过大，当用户处于低负荷情况下，自动补偿装置不能投入，负荷功率因数较低，同时加上变压器自身损耗，用户的功率因数将会进一步恶化，使得用户被迫受到功率因数考核，直接影响用户的经济效益。

3 电容及其投切装置的重新设计

通过以上分析可见，在低负荷情况下，电容器不能投入的主要原因是因为每步投切容量过大导致。因此，通过合理设计，解决每步投切容量过大问题，是解决上述问题的根本。

在设计电容时，将每个电容设计为容量不一致，即将电容设计成线性容量增长的情况，如前例，10 个电容，原来每个 $0.04S$ kvar，总计补偿容量为 $0.4S$ kvar。则重新设计为以 $0.005S$ kvar 为起点，下一个为 $0.01S$ kvar，并以 $0.01S$ kvar 为步长，直到 $0.08S$ kvar，其中 $0.04S$ kvar 为两个，总计 10 个电容，$0.405S$ kvar。

这样进行电容设计并按照上述实例，在有功功率为 20 kW，负荷功率因数为 0.8 的情况下，负荷无功功率为 15 kvar，电容补偿装置通过合理运算，可将容量为 15 kvar 的电容器投入或将 5 kvar 和 10 kvar 的电容器同时投入，达到补偿的目的。即在任何情况下，该装置最小可投入 $0.005S$ kvar 的电容进行补偿，确保低压侧功率因数大于 0.9 及以上。

在进行完电容设计后，选用合理的低压无功补偿电容投切装置则相当重要。目前，中国投入使用的低压无功补偿电容投切装置主要有 3 种：①接触器投切电容装置；②晶闸管投切电容装置；③复合开关投切电容装置。

以上 3 种装置，各有优劣，通过综合比较，选用复合开关投切电容装置，该装置具有以下特点[5-6]。

①该装置投切电容时，不仅无涌流，无操作过电

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

压，而且功耗小，谐波小，使用寿命长。

②响应速度相对较快，由于存在接触器转换的过程，该装置响应时间大约为1 s，适用于无功变化相对较快的场合。此时，由于系统的频繁投切，并联电容器其质量的好坏、运行的可靠性，就将直接影响整套装置的使用效果和寿命[7]。

③价格适中，可以为一般工厂所接受。

④可以方便地实现三相共补与三相分补。

⑤该装置可以具有过电压、欠电压、电源缺相、负载缺相等保护功能。

选用以上自动投切装置，即可在硬件上满足一般工厂对于无功变化而改变电容投切数量和容量的需求。

4 智能投切控制器的重新设计

由于在绝大部分的设计中，低压无功自动补偿装置的取样点在低压主母线上，补偿点也在低压主母线上。因此，补偿未计及变压器的损耗。

另一方面，变压器的损耗并非任何情况下都需要进行补偿，在负荷超过一定值后，负荷消耗的有功和无功大大超过变压器的损耗，此时变压器的损耗占整个功率的比例较小，则变压器的损耗几乎不影响功率因数的大小，这也正是用户正常生产的情况。

但在低负荷情况下，就需要对变压器损耗的无功进行补偿，而要补偿变压器的无功损耗，在经济合理的情况下，可以采用以下两种方法进行。

①补偿装置从低压侧进行补偿，但取样点设置在变压器的一次侧，因此自动补偿装置检测到变压器高压侧的参数，由此可以控制补偿装置对所有无功进行自动补偿。

该方法需采集变压器一次侧的参数，在实际工程中，小型工厂通常没有可供采样的一次侧采样点，同时对一次侧的参数进行采样，需要专用的电压电流互感器，无形中增加了设备的造价，在实际工程中采用该方式花费的代价较大。

②自动补偿装置仍然在二次侧进行自动补偿。此时对自动补偿装置补偿控制程序进行优化设计，达到补偿变压器损耗的目的。

下面，就第2种方式进行详细阐述。

由于电容的设计为阶梯，每个电容的大小是不一样的，因此，普通的自动控制器是不能对这样的电容设计进行控制的。此时，自动控制器需具有寻址功能，即自动控制器需要通过采样数据计算目前所需无功量的大小，在经过逻辑判断最合理的电容组合方式，然后控制相应的电容投入；在电容投入后，继续采样判断，如果目前功率因数达到要求，则不再动作；如功率因数未达到要求，则继续进行计算，并控制相应电容器的投切，确保功率因数大于设定的阀值并小于或等于1。

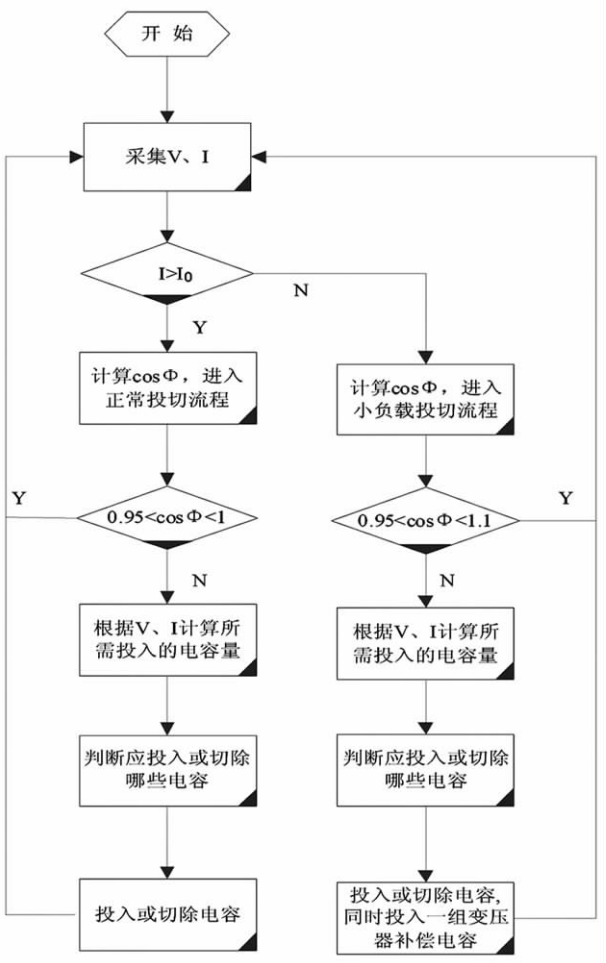


图1 智能投切控制器的控制流程图

在自动控制器的程序设计中，另一个需要的功能是对电流的大小进行判断，即考虑负荷的大小。当负荷大于某个值时，正常进行功率因数计算并投切电容；当电流小于某个值时，在正常进行电容投切计算中，需要增加投入一个合适的电容器对变压器无功损耗进行补偿，此时在低压侧的功率因数可允许适当大于1。实际设计中，可将电流值进行分段设计并采用不同逻辑控制，以确保在低负荷情况下，仍然能够通过低压侧的计算来补偿变压器的无功损耗。

（下转第79页）

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

9 关于校准周期

《规范》要求结合Q/GDW 168－2008《输变电设备状态检修试验规程》开展温控器现场校准工作，168号规程中要求对测温装置3年检查一次，每6年校验一次。即《规范》中校准周期一般不超过6年时限。在实际执行中，可参照3年进行一次接点、整体传动、本体、远方数值核对(并记录)，6年进行一次现场再校准试验。这样，既可减少不必要的频繁折腾，又保证准确、可靠性。

10 结 语

变压器投运后安装的监控测温系统在工作原理、使用环境、元件受环境温度影响下，往往附加误差超标。现场校准方法的正确运用不仅能使测温装置准确反映变压器运行状态的真实温度，而且更能安全可靠地保障变压器正常运行，校准规范既为现场检验(校准)工作的开展提供了更为科学的依据和更人性化的准绳，同时亦兼顾了测温装置现场实际运行中的诸多实际问题，适用性强。在当前电网不断扩容的背景下，变压器温度监测更是提到了前所未有的高度，测温装置的重要性更是不言而喻。前面就油浸式变压器测温装置现场校准规范以及方式进行了讨论，对降低变压器测温装置误差以及如何提高仪表测试精确度有一定指导意义。

参考文献

[1] JJG 310－2002，压力式温度计[S].
[2] Q/GDW 168－2008，输变电设备状态检修试验规程[S].
[3] DL/T 572－2010，电力变压器运行规程[S].
[4] 变压器用温控器说明书(R).
[5] 国网公司，(2004)生产营(104号)变压器温度保护指导意见(R).

作者简介：

田 宇(1982)，男，技师，从事变电站电测、热工及电能质量技术监督，监控系统及变电站自动化装置的维护工作。

(收稿日期：2012－05－22)

(上接第13页)

其相应的具体控制流程图如图1所示。

5 结 语

普通电力用户在低负荷情况下，通常受到力率电费考核，在极端情况下甚至达到总电费的40%以上，不仅用户的利益受到了极大的损失，也增加了电网的线损。

通过合理配置电容器的大小，改进电容器的配置方式，同时对智能投切控制器程序进行优化设计，使之具备电容器的寻址功能和不同负荷电流大小的判断功能，既可不仅满足低负荷时负荷的无功补偿，也可满足低负荷时对变压器无功的补偿，使得用户在低负荷情况下功率因数显著提高，避免了用户不必要的经济损失，对降低电网线损也起着积极的作用。

参考文献

[1] 闻桂陈，李湘君. 变压器无功补偿问题探讨[J]. 电气技术，2009(10)：87－87.
[2] 薛明琪，纪勇兵. 电网无功补偿容量的选择[J]. 低压电器，2009(1)：47－49.
[3] 张元军，刘绍东等. 智能无功补偿装置的研究[J]. 煤矿安全，2007(11)：9－12.
[4] 王娟，杨淑英. 低压无功功率补偿系统的实用化设计一例[J]. 华东电力，2007(1)：79－81.
[5] 薛明琪，徐洪. 低压无功补偿投切电容装置选用探讨[J]. 电气应用，2007(4)：44－46.
[6] 李克芹，刘冬英. 切换电容器交流接触器在无功补偿中的应用[J]. 低压电器，2009(5)：63－66.
[7] 王志洁，季美红. 低压并联电容器无功补偿方案的确定与实现[J]. 电工电气，2009(6)：29－31.

作者简介：

黄 斌(1977)，男，研究生，四川德阳电业局，工程师，主要从事营销管理工作；

吕飞鹏(1968)，男，博士，教授，研究方向为电力系统继电保护和综合信息处理智能系统。

(收稿日期：2012－05－22)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

一种基于扰动能量与功率谱的电容器组投切的定位方法

邓扶摇[1],赵 静[1],万 力[2],郭 亮[1]
(1. 四川省电力公司,四川 成都 610041; 2. 成都电业局,四川 成都 610061)

摘 要: 由于部分无功补偿装置本身的不成熟,容易产生误动现象,因此定位多条母线处的投切电容器组具有重要意义。以2条母线处电容器同时投切为研究对象,提出了一种利用扰动能量与功率谱作为特征,支持向量机作为智能分类器的定位方法。该方法首先使用扰动能量第一峰值的极性及其大小,判断电容器投切的主要区域;接着对区域内部分监测点的监测电压进行功率谱估计,计算所提出的2个特征指标;最后将这些特征量输入支持向量机,得到电容器投切的位置。在PSCAD/EMTDC中建立了简单配电网模型,仿真不同位置的电容器投切,测量母线电压暂态数据,所得数据导入Matlab进行处理,仿真结果表明,该方法对判定两两同时投切电容器组的位置具有较好的适应性,平均识别精度达到98.6%。

关键词: 电容器投切;暂态电能质量;定位;扰动能量;功率谱

Abstract: Due to the imperfect of some reactive compensation installations, the misoperation is prone to occur, thus, locating the switching capacitor bank on multiple buses has the great significance. An efficient location method on two different buses in distribution system is presented using disturbance energy (DE) and power spectrum (PS) as the features and support vector machine (SVM) as intelligent classifier. In this method, firstly, the numerical value and polarity of DE are utilized to determine main area of capacitor switching; then, the PS of voltages from the partial measurement points are estimated and two self-proposed feature indices are calculated; finally, the location of capacitor switching can be obtained by inputting the feature indices into SVM. A simple distribution network model is established in PSCAD/EMTDC, then, the transient bus voltage are measured by simulating the capacitor switching at different locations, and the output signals are put into Matlab for processing. The results show that the proposed method has a good adaptability for locating switching capacitor bank on two different buses, whose average accuracy reaches 98.6%.

Key words: capacitor switching; transient power quality; location; disturbance energy; power spectrum
中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2012)06-0014-06

0 引 言

众所周知,电力系统中电容器的投切会造成一些线路电压或电流的高频暂态或过电压[1],影响电能质量的品质,损害敏感器件,因此人们对电容器投切所造成的电能质量问题日益关注。但由于目前智能无功补偿装置没有可参照的国家或行业标准,且各厂家的产品也存在质量上的参差不齐,这就使得产品上线运行时会出现误动、拒动等现象。一般来说,电网中补偿装置的投切时间基本是固定的,正常情况下很难出现多条母线处的电容器组同时投切[2],但考虑到电容器组的误动,研究多条母线处的电容器组同时投切的定位方法,有助于操作人员及时掌握补偿装置的情况,尽快排查有问题的装置,保证电网的安全运行,具有重要的现实意义。

目前研究集中在单一电容器组投切的分析定位上,如文献[3]分析总结了电容器投切时产生暂态的各种规律,文献[4]总结了定位电容器投切的4条较为经典且应用广泛的指标:扰动能量变化、扰动能量的最大负偏移率、扰动功率的初始峰值与最大峰值。后续多篇文献在其基础上进行了改进完善,如文献[5]采用扰动电压的能量和节点电压及支路电流的相角变化来定位投切电容器;文献[6]利用扰动能量、功率流向以及扰动功率的初始峰值来定位电容器组位于监测的哪一侧。文献[7]利用卡尔曼滤波器求取监测点的初始暂态电压峰值以及第一个正负极值的差值作为特征进行定位,此方法对某

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

些不确定的负荷状况及电容器状态也有一定的适应性。文献[8]利用电容器投切造成的电压和电流的暂态能量以及持续时间作为定位电容器投切扰动源位置的特征量，再使用神经网络作为分类器对3个位置的投切电容进行了定位研究，效果较好。文献[9]和[10]都采用了小波变换和扰动功率方向结合的方法来定位投切电容器，如果保证在电网中有足够多的信息来源，此法可以有效地检测电容器投切的位置。

以上所取得的研究成果较好地推动了电容器投切源定位的研究，但上述文献有一个共同的特点，即均针对的是单一电容器组的投切研究，出现多条母线上的电容器组同时投切时，上述方法能否适用还有待研究，因此下面以两处电容器组同时投切为主要研究对象，进行电容器组投切的定位研究。所采用的算法分为3步，首先根据扰动能量的第一峰值极性以及大小确定电容器投切的大致范围，再提取范围内的监测信息，计算基于功率谱的2个指标，最后将指标值输入分类器进行分类，得出最终结果。

1 基本理论

1.1 扰动能量[4]

定义三相瞬时无功功率 $ip_{3\phi}$ 如式(1)所示，其中 $v_a(t)$、$v_b(t)$、$v_c(t)$、$i_a(t)$、$i_b(t)$、$i_c(t)$ 分别为三相电压、电流的瞬时值。

$$ip_{3\phi}(t) = v_a(t)\,i_a(t) + v_b(t)\,i_b(t) + v_c(t)\,i_c(t) \tag{1}$$

则扰动功率 DP 为

$$DP(t) = ip_{3\phi}(t) - ip_{ss}(t) \tag{2}$$

其中，$ip_{ss}(t)$ 表示扰动前的正常稳定状态。

由扰动功率可以得到扰动能量 DE 的表达式为

$$DE(t) = \int DP(t)\,dt \tag{3}$$

实际计算中，积分范围可取一个信号周期。

1.2 现代谱估计

现代谱估计[11]的提出是为了解决经典谱估计方差大、分辨率低的缺点，它可以减小周期图法带来的偏差，改善功率谱曲线的光滑性。现代谱估计又包括模型参量法(AR模型、MA模型、ARMA模型等)、非参量谱估计法(最小方差法、特征矢量法等)、熵谱估计法、多谱多维谱估计法等。其中AR模型属于全极模型，是目前研究较多、应用较好的方法。因此，下面将采用AR模型进行功率谱估计，并利用Burg法求解。

假定所研究的平稳过程 $x(n)$ 是由一白噪声序列 $u(n)$ 激励一线性系统所产生的输出，有

$$\begin{aligned} x(n) &= -\sum_{k=1}^{p} a_k x(n-k) + \sum_{k=0}^{p} b_k u(n-k) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} h(k)\,u(n-k) \end{aligned} \tag{4}$$

其中，p 为信号阶数；AR模型是假设 $b_1, b_2, \cdots, b_q = 0$，且 $b_0 = 1$。

则式(4)可写为式(5)。

$$x(n) = -\sum_{k=1}^{p} a_k x(n-k) + u(n) \tag{5}$$

$x(n)$ 的自相关函数 $r_x(m)$ 为式(6)所示，其中 σ^2 为方差。

$$r_x(m) = \begin{cases} -\sum_{k=1}^{p} a_k r_x(m-k), & m \geqslant 1 \\ -\sum_{k=1}^{p} a_k r_x(k) + \sigma^2, & m = 0 \end{cases} \tag{6}$$

Burg算法是通过迭代使得前、后向预测误差的平均功率 p_m 最小，进而估计出功率谱。定义 m 阶前、后向预测误差为

$$\begin{aligned} f_m(n) &= \sum_{k=0}^{m} a_m(k)\,x(n-k) \\ g_m(n) &= \sum_{k=0}^{m} a_m^*(m-k)\,x(n-k) \end{aligned} \tag{7}$$

前、后向预测误差的阶数递推公式有

$$\begin{aligned} f_m(n) &= f_{m-1}(n) + K_m g_{m-1}(n-1) \\ g_m(n) &= K_m^* f_{m-1}(n) + g_{m-1}(n-1) \end{aligned} \tag{8}$$

定义前、后向预测误差的平均功率为

$$P_m = \frac{1}{2}\sum_{n=m}^{N} [\,|f_m(n)|^2 + |g_m(n)|^2\,] \tag{9}$$

其中，K_m 如式(10)所示，N 为分析信号长度。

$$K_m = \frac{-2\sum_{n=m+1}^{N} f_{m-1}(n)\,g_{m-1}^*(n-1)}{\sum_{n=m+1}^{N} [\,|f_{m-1}(n)|^2 + |g_{m-1}(n-1)|^2\,]} \tag{10}$$

1.3 支持向量机

SVM是建立在VC维理论和结构风险最小原理基础上的模式识别方法，其基本思想[12]如下。

(1)线性情况

考虑线性可分二分类问题，设训练集为

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$T = \{(x_1, y_1), \cdots, (x_n, y_n)\} \in (X \times Y)^n \quad (11)$$

其中，$x_i \in X = R^n$，$y_i \in Y = \{+1, -1\}$，$i = 1, 2, \cdots n$，问题线性可分表明存在分类超平面

$$(W \cdot X) + b = 0 \quad (12)$$

使训练集中的正类输入与负类输入分别位于该平面的两侧。

则最优超平面的判别函数为

$$y(x) = \mathrm{sgn}(W \cdot X + b) \quad (13)$$

其中，sgn(·) 为符号函数。最优超平面的求解需要最大化 $2/||W||$，即最小化 $\frac{1}{2}||W||^2$。

当样本为线性不可分时，只需引入非负松弛因子 ξ_i，$i = 1, 2, \cdots, n$，并求解式(14)即可。

$$\min_{w,b,\xi} \frac{1}{2}||W||^2 + C\sum_{i=1}^{n}\xi_i, s.t.\ y_i(W \cdot x_i + b) \geqslant 1 - \xi_i \quad (14)$$

其中，$\xi_i \geqslant 0$，$i = 1, 2 \cdots, n$；C 为惩罚参数，C 越大表示对错误分类样本的惩罚越大。

(2) 非线性情况

当训练样本为非线性时，可通过非线性函数 $\phi(X)$ 将训练样本映射到高维线性特征空间，并在此空间中构造最优分类超平面，得到分类器的判别函数。此时分类超平面为

$$W \cdot \phi(X) + b = 0 \quad (15)$$

判别函数为

$$y(X) = \mathrm{sgn}(W \cdot \phi(X) + b) \quad (16)$$

则最优分类超平面问题可描述为

$$\min_{W,b,\xi} \frac{1}{2}||W||^2 + C\sum_{i=1}^{n}\xi_i, s.t.\ y_i(W \cdot \phi(x_i) + b) \geqslant 1 - \xi_i \quad (17)$$

其中，$\xi_i \geqslant 0$，$i = 1, 2 \cdots, n$。求解式(17)时，一般会化为其对偶最优化问题。

2 简单配电网模型

图 1 为所采用的简单配网模型，线路长度见表 1。假设线路上安装有 8 个监测装置，采样频率 10 kHz。安装的补偿装置 3 个，分别为 M1 与 M3 之间(C1)、M3 与 M4、M5 之间(C2)、M4 与 M7 之间(C3)。共有 6 种投切情况：C1、C2 或 C3 单独投切，C1/C2、C2/C3 或 C1/C3 两两同时投切。

3 算法描述

所提出的算法分为 3 个步骤，首先考察各监测点的扰动能量第一峰值及大小，判断电容器投切的大致范围；接着估计此范围内监测点信息的功率谱，计算自定义的 2 个指标，获得用于分类的特征向量；最后将特征量输入 SVM，得到分类结果。

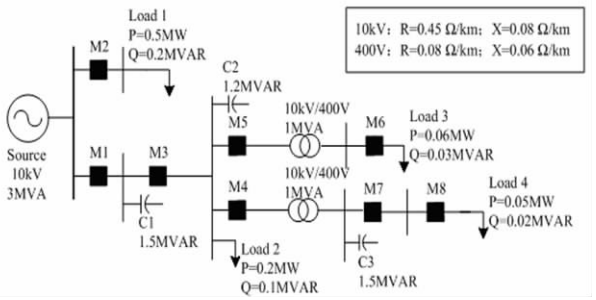
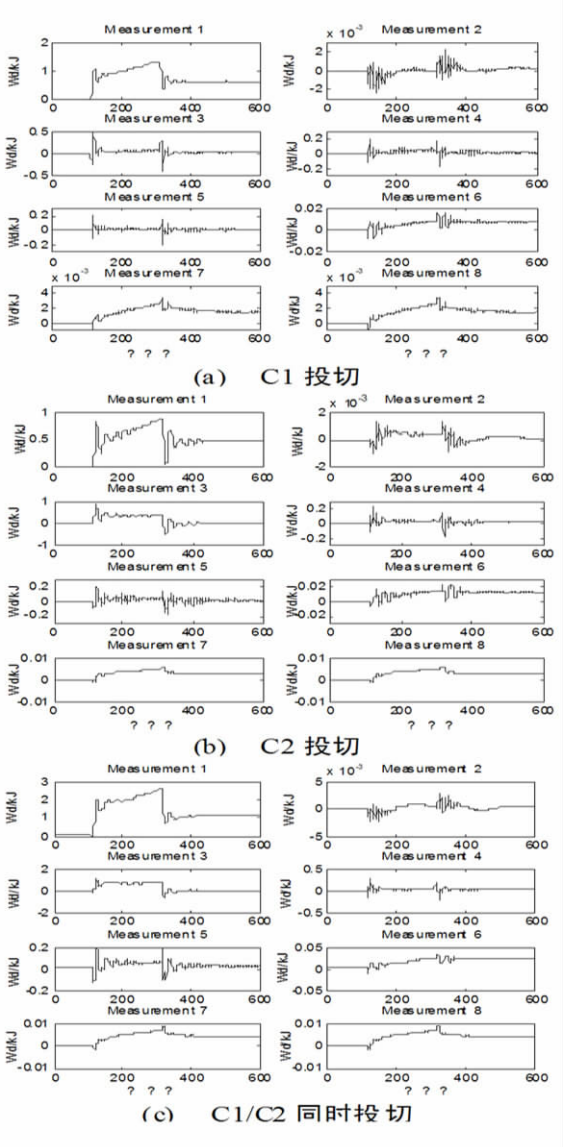


图 1 简易配电网模型

(1) 利用扰动能量的第一峰值极性(DEP)及扰动能量大小(DE)判断电容器所在线路以及覆盖区域。



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

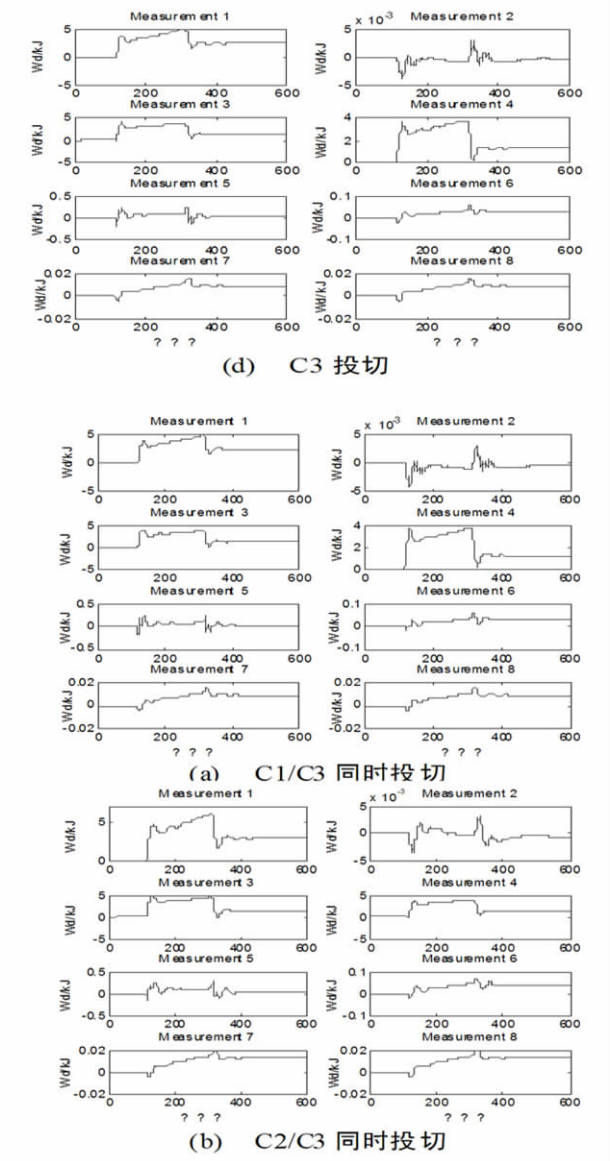


图 2 各种投切情况下的扰动能量

对各监测信息进行扰动能量的计算，得到电容器组不同投切情况下的扰动能量如图 2 所示。如图 3 所示定义扰动能量第一峰值极性，则扰动能量的峰值极性统计如表 2 所示。

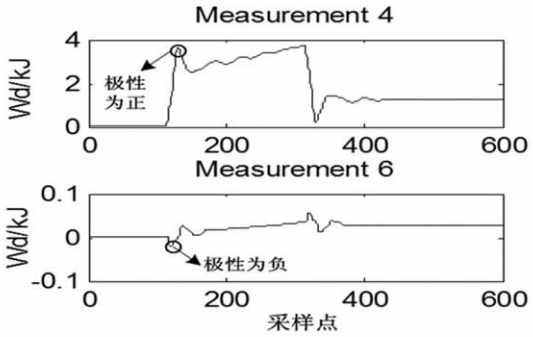


图 3 扰动能量第一峰值极性

表 1 线路长度

项目	长度/km	项目	长度/km
Source – M1	2.5	M3 – M5	2
Source – M2	4	M4 – M7	1.5
M1 – M3	2	M7 – M8	1.5
M3 – M4	2	M5 – M6	1.5

表 2 扰动能量第一峰值极性统计

投切电容	测量点							
	1	2	3	4	5	6	7	8
C1	+	–	–	–	–	–	–	–
C2	+	–	+	–	–	–	–	–
C3	+	–	+	+	–	–	–	–
C1/C2	+	–	+	–	–	–	–	–
C1/C3	+	–	+	+	–	–	–	–
C2/C3	+	–	+	+	–	–	–	–

注：+ 表示极性为正，– 表示极性为负

由图 2 与表 2，可以看出以下规律。

1) 根据线路的拓扑结构以及各监测点 DE 的大小对比可以知道，虽然 M1 与 M2 监测点的 DE_P 相反，但 M2 处监测到的信息非常微弱，完全可以认为 M2 是位于非电容器投切支路，因为扰动发生线路最末段的监测点监测到的 DE 都比 M2 强。因此，根据拓扑结构及 DE 可以初步判断扰动发生在那条支路。

2) C1 投切时，DE_P 与其他情况均不一致（如图 2(a)）；C2 或 C1/C2 同时投切时，DE_P 完全一致（如图 2(b) ~ 图 2(c)）；C3、C1/C3 或 C2/C3 3 种情况投切时，DE_P 完全一致（如图 2(d) ~ 图 2(f)）；因此，可以认为如果监测到某两监测点处的 DE_P 反向，则可推断出扰动是跟该点投切电容器及其前向电容器组有关。

3) 仅由 DE 与 DE_P 只能初步判断出电容器大致投切的区域，不能完全确定到底是哪一些位置的电容器进行投切。因此还需要在确定初步范围后，对扰动暂态信息进行进一步的特征提取，以便最终位置的确定。

综上所述，通过第一步可以判断为：C1 投切；投切范围包括 C2；投切范围包括 C3。如果是情况 2，即投切范围包括 C2，则进一步对 M1、M3、M4 监测到的信息进行特征提取；如果是情况 3，即投切范围包括 C3，则进一步对 M1、M3、M4、M7 监测到的信息进行特征提取。

通过第一步的主要投切区域判断，可大大减小监测信号的处理量。此步骤对小系统的影响或许不

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大，但对于拓扑结构更为复杂的大系统来说，仅对部分监测点的信息进行特征提取，不但可以减小算法计算量，更可节省存储空间。

(2) 计算基于功率谱的特征指标 R_{pow} 与 D_{pow}

在进行功率谱估计之前，先对三相信号进行模变换[8]，将三相电压信息综合到一个信号上，模变换公式为

$$\dot{u} = u_a + 2u_b - 3u_c \tag{18}$$

其中，u_a、u_b、u_c 为三相瞬时电压，下面的谱估计对象均为 $\dot{u}$。

1) AR 阶数的确定

采用 AR 模型辨识的现代谱估计方法对信号进行特征提取，此法最重要的是确定 AR 阶数。图 4 所示为 AR 阶数为 5、50、500 时估计的功率谱，从图中可以看出，阶数过低(order = 5)，谱线显得不明显，阶数过高(order = 500)，会出现虚假谱峰，因此，AR 模型的阶数需妥善选择。

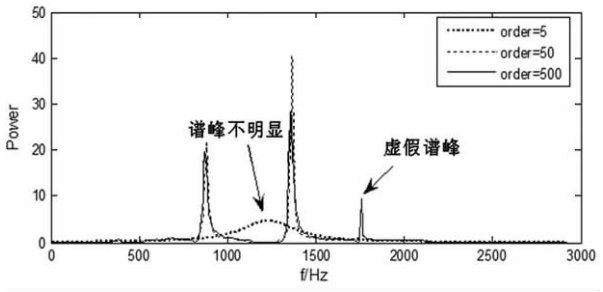


图4 不同 AR 阶数的功率谱估计

目前 AR 阶数的确定[11]有如下几种方法：信息量准则法(FPE 最终预测误差法、AIC 准则法及其改进算法等)与线性代数准则法(行列式检验算法、Gram－Schmidt 正交法、SVD 奇异值分解法等)。采用 SVD 法确定 AR 模型的阶数，具体计算步骤请见文献[11]。

2) 指标计算

确定好 AR 阶数后，对监测点采样到的信号进行功率谱估计。下面以 M1 监测点为例，说明基于功率谱的特征指标应该如何计算。图 5 所示为各种扰动投切情况下，M1 监测点信号的功率谱，图 6 为功率谱的谱峰示意图。

查找功率谱的谱峰，选择值最大的 2 个谱峰，按照其所处位置的前后，定义为峰值 1 与峰值 2，计算式(15)、式(16)所示指标。

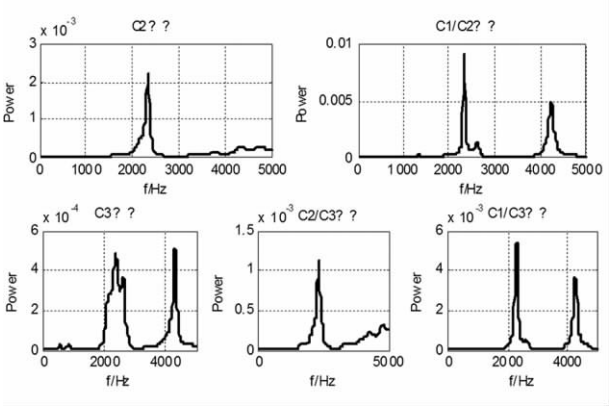


图5 各种投切情况的功率谱估计

注：这里的功率谱估计均滤去了 50 Hz 工频信号，只留下高频暂态扰动。

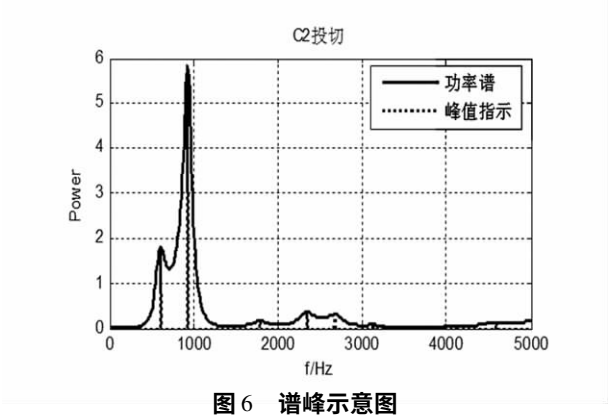


图6 谱峰示意图

指标 1：峰值 1 与峰值 2 的比值。

$$R_{pow} = \frac{V_{pow}(\text{峰值 1})}{V_{pow}(\text{峰值 2})} \tag{19}$$

指标 2：峰值 1 与峰值 2 之间的归一化距离

$$D_{pow} = \frac{P_{pow}(\text{峰值 2}) - P_{pow}(\text{峰值 1})}{f_s/2} \tag{20}$$

其中，$V_{pow}(\cdot)$ 表示功率谱峰值的大小；$P_{pow}(\cdot)$ 表示功率谱峰值所在的位置；f_s 是采样频率。指标 1 中涵盖了信号幅值的信息，指标 2 则涵盖了信号频率的信息。

由于这一步得出的指标值并不具有严格的规律，无法利用规则推理或设定阈值等简单方法实现分类，只能借助支持向量机这种智能分类算法来实现电容器的定位。

(3) 算法流程

以图 1 所示系统为例，对上述算法做一个总结，得到图 7 所示的算法流程。

4 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 中，建立如图 8 所示的线路

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

模型，利用 Multiple run 元件进行多次仿真。在一个信号周期内不改变投切电容的大小，只改变电容器投切的时间，每种投切情况生成 300 组样本，随机选择 100 组作为训练样本，剩下 200 组作为测试样本。下面给出效果较好的几组识别情况，如图 8、图 9 所示。

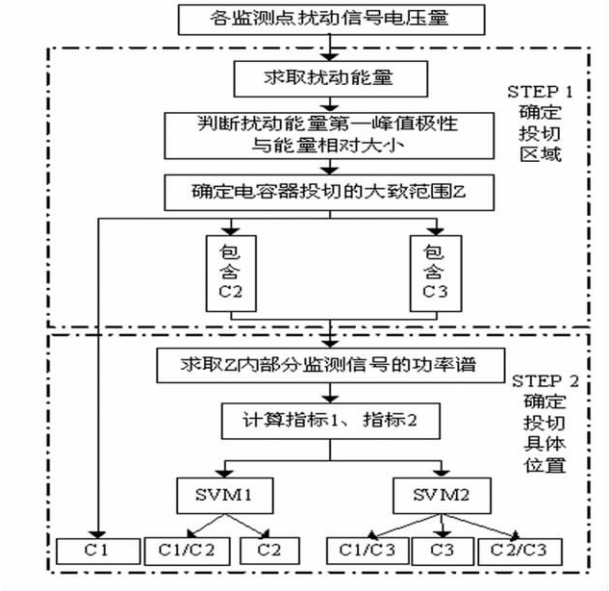


图 7　算法流程图

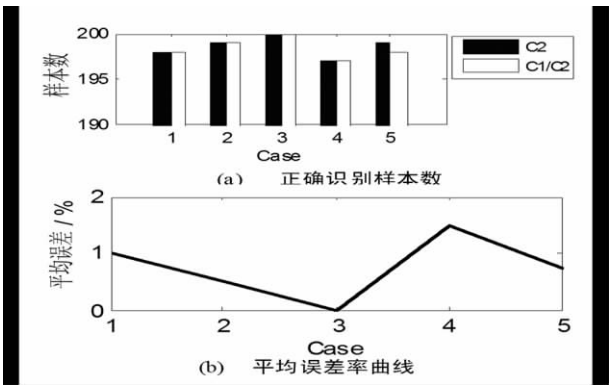


图 8　SVM1 识别结果

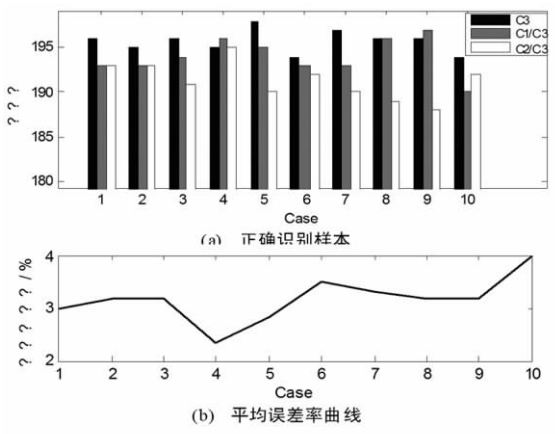


图 9　SVM2 识别结果

表 3 中给出识别效果最好的一组结果。如表 3 所示，所提出的方法效果较为理想，平均识别率最高可以达到 98.6%。

表 3　测试结果

类别	C2	C1/C2	C3	C1/C3	C2/C3
C2	200	0	/	/	/
C1/C2	0	200	/	/	/
C3	/	/	195	3	3
C1/C3	/	/	0	196	2
C2/C3	/	/	5	1	195
正确率	100%	100%	97.5%	98%	97.5%
平均正确率			98.6%		

5　结　语

通过对两两投切的电容器组的定位研究，提出了基于扰动能量及功率谱指标的定位方法，通过仿真分析，得出了以下结论。

(1) 单靠扰动能量的极性与大小不能判断多个电容器组同时投切的位置，需结合其他手段。

(2) 通过第一步大致投切区域的判断，可以有效减小算法计算量与信息存储空间。

(3) 所提出的方法具有较好的适应性，平均识别率最高可达到 98.6%。

(4) 但所提出的方法局限于某一固定拓扑线路，如需用于新的线路，则需要根据新线路拓扑重新训练分类器。

参考文献

[1] Aaron Kalyuzhny, Silviu Zissu, Member and Dan Shein. Analytical Study of Voltage Magnification Transients Due to Capacitor Switching [J]. IEEE Trans. Power Del., 2009, 24(2): 797 – 805.

[2] Ying – Yi Hong, BO – Yuan chen. Locating Switched Capacitor Using Wavelet Transform and Hybrid Principal Component Analysis Network [J]. IEEE Trans. Power Del., 2007, 22(2): 1145 – 1152.

[3] Saied, M. M. On the analysis of Capacitor Switching Transients [C]. International Conference on Power System Technology, Proc. PowerCon 2002, 1(1): 134 – 138.

[4] Parson, Y. A. C., W. M. Grady, E. J. Powers, et al. Rules for Locating the Sources of Capacitor Switching

(下转第 31 页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

应用时域仿真的方法，主要分析了普通异步风力发电机和双馈风力发电机风电场接入新疆某地区电网的暂态电压稳定性，得到了以下结论。

1) 在相同扰动情况下，短路容量大的系统其抗扰动的能力更强，即其暂态电压更稳定。特别是在风电场的选址时要注意，尽量使得PCC处的系统短路容量大。

2) 双馈风力发电机组能够通过转子变频器进行无功电压调节控制，在相同故障切除时间下，其暂态电压稳定极限功率 P_{CR} 比普通异步风力发电机组更大，所以其暂态电压更稳定，对扰动时的电压调节能力更强，有利于地区电网的电压稳定。

参考文献

[1] Erlich, U. Bachman. Grid Code Requirement Concerning Connection and Operation of Wind Turbines in Germany [J]. IEEE Engineering Society General Meeting (USA), 2005: 784 – 789.

[2] Friedrich W. Koch. Simulation and Analysis the Interaction of Wind Turbine and Power System [D]. Duisburg – Essen University of Germany, 2005: 27 – 52.

[3] P. Sorensen, A. D. Hansen. Reduced Models of Doubly Fed Induction Generator System for Wind Turbine Simulations [J]. Wind Energy, 2006(9): 299 – 311.

[4] 李晶，王伟胜，宋家骅. 变速恒频风力发电机组建模与仿真 [J]. 电网技术，2003，27(9)：14 – 17.

[5] 张瑞明，张新燕，陈莉. 风电场接入系统后的暂态特性研究 [J]. 电气自动化，2011，33(2)：45 – 49.

[6] 邢文琦，晁勤. 含不同风电机组的风电电网仿真研究 [J]. 电网技术，2009，33(7)：99 – 102.

[7] 张瑞明，张新燕. 基于普通异步风力发电机和双馈风力发电机静态数学模型的系统静态电压稳定性研究 [J]. 电网技术，2011，35(1)：175 – 180.

[8] J. B. Ekanayake, L. Holdsworth, N. Jenkins. Comparison of 5th Order and 3rd Order Machine Models for Doubly Fed Induction Generator (DFIG) Wind Turbines. Electric Power Systems Research 67(2003): 207 – 215.

[9] 潘文霞. 大型风电场电压稳定性分析与控制研究 [D]. 南京：河海大学，2004.

[10] 吴捷. 风力发电系统的建模、控制及仿真研究 [D]. 广州：华南理工大学，2004.

[11] 李建丽. 大型风电场并网对电力系统电压稳定性的影响 [D]. 青岛：青岛大学，2007.

作者简介：

张瑞明(1985)，男，硕士研究生，研究方向为风力发电及并网技术，主要从事电气设备实验研究。

(收稿日期：2012 – 03 – 20)

(上接第19页)

Disturbances [C]. Proc. Power Engineering Society Summer Meeting, Jul. 1999: 794 – 799.

[5] G. W. Chang, M. H. Shih, S. Y. Chu, et al. An Efficient Approach for Tracking Transients Generated by Utility Shunt Capacitor Switching [J]. IEEE Trans. Power Del., 2006, 21(1): 510 – 512.

[6] A. C. Parsons, W. M. Grady, E. J. Powers, et al. A DirectionFinder for Power Quality Disturbance Based upon Disturbance Power and Energy [J]. IEEE Trans. Power Del., 2000, 15(3): 1081 – 1086.

[7] J. Kim, W. M. Grady, A. Arapostathis, et al. A Time Domain Procedure for locating Switched Capacitors in Power Distribution Systems [J]. IEEE Trans. Power Del., 2002, 17(4): 1044 – 1049.

[8] Ahmed E. B. Abu – Elanien and M. M. A. Salama. Wavelet – ANN Technique for locating Switched Capacitors in Distribution Systems [J]. IEEE Trans. Power Del., 2009, 24(1): 400 – 409.

[9] 王继东，王成山. 基于小波变换的电容器投切扰动源定位 [J]. 电力自动化设备，2004，24(5)：20 – 23.

[10] 张凯，关根志，张海龙. 用小波变换和瞬时功率定位电能质量扰动源 [J]. 高电压技术，2008，34(3)：573 – 577.

[11] 张贤达. 现代信号处理(第2版) [M]. 北京：清华大学出版社，2002: 90 – 93, 111.

[12] 邓乃扬，田英杰. 数据挖掘中的新方法——支持向量机 [M]. 北京：科学出版社，2004: 166 – 190.

作者简介：

邓扶摇(1983)，女，从事电网调度自动化工作；

赵　静(1982)，女，博士，研究方向为电网调度自动化；

万　力(1981)，男，硕士，从事电力营销工作；

郭　亮(1982)，男，硕士研究生，从事电网调度自动化工作。

(收稿日期：2012 – 08 – 20)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

不同类型电磁环网解环研究的基本原则与方法

王莉丽[1],韩 伟[2]
(1. 四川省电力公司调控中心,四川 成都 610031; 2. 四川电力经济技术研究院,四川 成都 610031)

摘 要: 针对电磁环网运行弊端进行了深入分析,提出解环研究的基本原则,并将电磁环网分为3种不同类型,针对不同类型电磁环网提出具体研究方法。以四川电网解环为例对解环方法进行研究探讨,对实际工作中的电磁环网解环具有重要的借鉴意义。

关键词: 电磁环网; 分层分区; 短路电流

Abstract: The drawbacks of electromagnetic loop network operation are analyzed, and the basic principles of open – loop research are proposed. Three different types of electromagnetic loop networks and their corresponding specific research methods are put forward. Taking open – loop of Sichuan power grid for example, the open – loop methods are discussed and studied, which can be a reference for the open – loop research of electromagnetic loop network.

Key words: electromagnetic loop network; hierarchical and partitioned; short – circuit current

中图分类号: TM733 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 – 6954(2012)06 – 0020 – 03

0 引 言

近年来四川电网已经从全国互联电网的末端发展成为沟通华东、华中、西北电网的枢纽,成为承担汇集西南水电、保证水电送出、同时满足省内需求的电力交换互济的大平台。从某种意义上讲,电网的发展也就是不断提升电压等级、对低电压等级进行合理分区的过程。随着高一级网架逐步加强,打开电磁环网势在必行。《电力系统安全稳定导则》明确规定:随着高一级电压电网的建设,下级电压电网应逐步实现分区运行,相邻分区之间互为备用。从2007年开始四川电网逐步打开了川渝电网、川西川南、成都及成德电磁环网,电网结构逐渐清晰。由于电网发展的复杂性和多样性,在电网发展的不同阶段,电磁环网运行方式有不同的适应性,应根据电磁环网不同的构成形式进行具体的分析研究,确定最佳的解环方案与解环时机。

1 电磁环网运行弊端

1.1 电力系统稳定水平降低

当系统的送端与受端电网间通过高低压电磁环网进行联系时,高压线路故障断开将导致送受端的联络阻抗突增,潮流向低电压等级的线路转移易造成功率超过稳定极限,引起两侧系统间的振荡。有时为了避免超稳定极限的故障发生,通常限制由高低压电磁环网构成的输电断面的稳定限额,通过削弱电网运行的经济性以换取运行的稳定性。

1.2 电网调度运行风险增加

电磁环网的存在,网架结构不清晰,开机方式、负荷水平及本网通过联络线交换的电力对系统潮流走向影响较大,增加了运行中的不可控因素。正常停电操作前需做潮流计算,评估风险点,以免停电造成潮流大范围转移。同时在事故处理过程中,当电网发生 $N-2$ 及以上事故情况下,网架结构及潮流转移的复杂性增加了调度员处理的难度,若发生振荡,不容易判断振荡中心,也无法迅速进行解列操作,有扩大事故的风险。电磁环网运行方式是导致系统发生连锁反应从而扩大事故的重要诱因,给系统安全稳定运行带来威胁。

1.3 系统短路电流水平增高

电力系统的短路电流水平主要取决于装机规模和电网的密集程度。电磁环网运行使得电网规模的密集度增加,当短路电流水平上升超过了系统中开关的遮断容量时则必须想办法解决,若不解开电磁

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

环网则必须更换更高遮断容量的开关，使得电网的投资成本大大增加。

1.4 继电保护及安稳装置设置的困难增大

由于电磁环网的存在，继电保护必须配置双重的纵联保护，以满足可靠性和选择性的要求，通讯信道建设必须及时跟上，才能保证保护动作可靠性。同时有时为了满足电力送出及断面受电的要求等还需配置控制策略复杂的安控装置，满足远距离切负荷、切机的要求，而装置的勿动及拒动将给系统带来巨大的运行风险。

2 电磁环网解环研究的基本原则

随着电网建设的发展，电网内的500 kV站陆续投入运行，当每个区域都已形成一至两个500 kV站点的时候，解环也将逐步推行，解环研究一般应遵循以下基本原则。

2.1 满足分区后功率的基本平衡

分区后的220 kV电网应能满足有功和无功功率的基本平衡，以最大可能性满足供电的要求，对于重要的受端系统还应注意分区后动态无功功率的平衡，分区时需对接入分区电网的电源进行合理布局，以满足500 kV/220 kV电网分层分区要求。

2.2 满足电网安全稳定运行的要求

电磁环网打开后，220 kV网架结构有所削弱，因此分层分区后500 kV电网和220 kV电网应至少能满足$N-1$的要求，即任一线路、主变压器或发电机故障或无故障断开，应能满足电力系统安全稳定运行的要求，这是500 kV/220 kV电网分层分区必须满足的基本条件。

2.3 解环时机的考虑

电磁环网的运行虽然存在多种弊端，但在高一级电网网架不够坚强，维持电磁环网运行只要不影响电网安全、稳定运行及不受短路容量限制，可以维持电磁环网运行。电网发展的不同阶段，选择是否保持电磁环网运行应根据当前电网发展的程度，综合考虑输电断面的稳定限额、供电可靠性等多方面的因素，以确定最佳的解环时机。

3 电磁环网分类及解环方法研究

电磁环网细分为重要输电断面的电磁环网、输电通道上的电磁环网、受端电网内部的电磁环网等3种不同形式，解环研究应充分进行潮流、稳定性、短路电流及网损等多方面的具体分析计算，针对不同解环方案进行比较分析，找出最佳的解环点及解环时机，同时对于解环后电网产生的新问题需做好充分的预防措施，以保证系统的稳定运行与用户的可靠供电。

3.1 重要输电断面的电磁环网

对于系统中重要输电断面上的电磁环网，如省间联络线、网间联络线、本省内重要的送受电断面，在满足电力系统安全稳定导则中规定的有关各项安全稳定标准的情况下应首先考虑解环运行，此类电磁环网运行不仅降低了电网运行的经济性，而且是威胁电网稳定运行的重大隐患，此类电磁环网解环条件一旦成熟，应及时安排解环。

对于解环后会带来供电可靠性降低或由环网上的变电站变为终端站后电压水平降低等问题，可采用增加备自投装置、增加电容补偿、重要负荷倒置至其他变电站等措施予以解决，积极创造条件及时解环，消除电网安全运行的隐患。

四川与重庆间的川渝断面与川内的川西川南断面即属于重要输电断面的电磁环网。在川渝间500 kV联络线增至3回，220 kV网架薄弱的问题已基本解决后，随着电网规模扩大以及川电外送容量的增加，电磁环网运行的弊端凸显。2007年年底川渝间电磁环网打开，500 kV洪板一线、洪板二线、黄万一线3回线路运行；220 kV林苏线、金苏南、北线、长代东线、长铜线5回线路单侧断开备用。解环后广安铜堡成为单线单变压器终端站，金鹅站为双线单变压器终端站，供电可靠性有所降低。这些问题通过在铜堡站装设备自投装置，金鹅站下重要负荷倒走及做好保电方案加以解决。

四川网内的川西—川南断面是网内重要的输受电断面，冬季川西水电出力减少，该断面成为受电断面，夏季川西水电大发则成为水电外送的通道。2008年川西—川南500～220 kV电磁环网解环运行，500 kV坡山线、洪山线、洪龙二线、南谭双回线运行，形成川西—川南断面，断开220 kV龙棉东线、棉柏线、锋渡线、尖平线。由于解环而成为终端站的220 kV先锋、棉丰、柏合装设的备自投装置以解决供电可靠性问题。解环后的资阳电网分别由川西及川南电网供电，倒供负荷时必须要采取停电换电方

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式。同时解环后内江220 kV网架削弱，受220 kV站末端电压稳定性的限制，白凉双回(同塔双回)、寿凉线的供电能力依赖于白马、云潭电厂开机方式。解环后产生的新问题要配合制定详细的方案，提高供电能力及供电可靠性。

3.2 受端电网上的电磁环网

此类电磁环网在系统中众多，且随着电网的发展已经到了不得不解决的地步。其主要问题是处于负荷中心的受端电网密集度高，220 kV系统联系紧密，随着500 kV网络的不断加强，220 kV电网由原来担任输电网的角色逐步退化为配电网的角色，但其短路容量增长较快，甚至已超过开关的额定开断电流，严重影响电网安全运行。

对此类电磁环网应主要从限制短路电流、分区电网的供电能力综合进行计算分析。解环方案首先考核解环后的短路电流，一般应满足500 kV母线短路水平在63 kA以下、220 kV母线短路水平在50 kA以下的要求[1]，在方案进行比较中，变电站短路容量下降是否明显是衡量的主要标准之一。其次考核电磁环网打开后，电网结构是否适应负荷要求，适应各种方式下的潮流，无功及有功是否平衡，满足供电能力的要求，在几种解环方案的比较中，选择能够满足较大供电能力的方案。

解环后对于负荷中心的220 kV变电站供电可靠性降低，在110 kV系统间进行负荷倒供的灵活性降低，必要时可通过220 kV系统短时合环来配合110 kV系统间倒供负荷。解环后产生的备用线路与相邻区域电网之间应具有20%～30%重要负荷的支援能力[2]，解环前应做好潮流计算，编制防止大面积停电事故发生的预案。

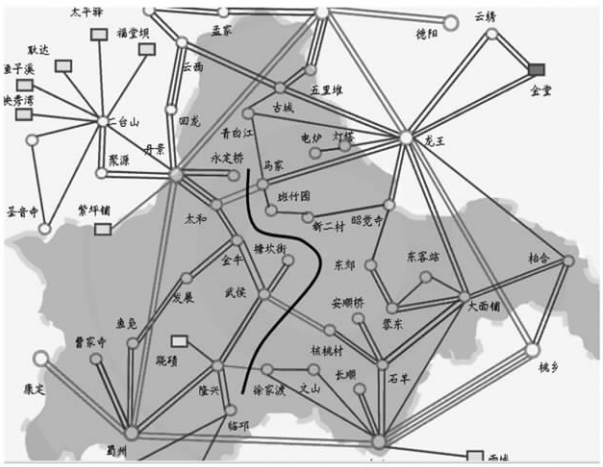


图1 成都电网按方案1解环

四川成德500 kV环网是在负荷中心的第一个环网，环网形成后，成都220 kV环网逐渐退化为配电网角色，在金堂电厂两机投产后，系统短路容量超过了龙王220 kV开关遮断容量，由于当时网架条件的限制，解环将不满足成都电网的供电能力，从而采取了龙王220 kV母线分列运行的措施降低短路容量。在500 kV蜀州变电站第二台主变压器和220 kV柏合—大面铺双回线路投运后，成都电网具备分区运行的条件，图1为实际运行中采用的成都220 kV电网的解环点即方案1，其解环点选在220 kV兴渡线、侯核一线、侯核二线、马太南线、马太北线，即尖山、桃乡、龙王作为一个供电区域，蜀州、丹景作为一个供电区域解环。同时在确定方案时和方案2进行了比较，方案2的解环点选在220 kV尖大线、大石南线、大石北线、马太南线、马太北线，即尖山、蜀州、丹景作为一个供电区域，桃乡、龙王作为一个供电区域。从降低短路电流来看，方案1对丹景、蜀州近区短路电流降低更为明显，方案2对尖山近区短路电流降低更为明显。从对成都电网的供电能力看，按现阶段负荷分布情况校核，方案1的供电能力可达到6 500 MW，明显高于方案2，约高50～700 MW。主要原因是方案2断开尖大线后，尖石双回线潮流更重，任一线故障后向另一回线潮流转移的比例更高，尖石双回线的热稳定水平严重制约尖山近区及与蜀州之间的各220 kV变电站供电能力。同时，由于桃乡变电站仅两回出线，同塔双回故障将导致东片区仅龙王500 kV变电站支撑，难以充分发挥桃乡变电站的作用，综合考虑选择方案1为最终解环方案。

2012年上半年500 kV什邡变电站的建成投运，成德地区的谭家湾、什邡龙王、桃乡、尖山、蜀州、丹景7座500 kV变电站构成了500 kV双环网结构，成为保障成德地区供电能力的重要支撑，断开220 kV回云一、二、三线、青古线、同古一、二线、云丰西线、云华线以降低什邡、龙王、古城、云西变电站220 kV母线短路电流，实现成都—德阳电网开环运行。实施开环运行后，电网短路电流水平可控制在合理范围内，龙王220 kV母线也可恢复合母运行方式。500 kV彭祖变电站220 kV配套工程全部投运后，东坡变电站220 kV母线短路电流将超过其开关的最大遮断能力，将要实施乐山—眉山电磁环网解环。

(下转第39页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

调，密切配合；同时，对特定的负荷性质，电网建设部门应有针对性地进行保护装置的选型，确保保护装置适应于特定的负荷性质，使保护能够起到保电网、保设备的重要作用。

参考文献

[1] DL/T 584－2007，3kV～110 kV电网继电保护装置运行整定规程[S].

[2] 刘高会，刘敏，王朝霞，等. 110 kV变压器的热稳定分析与事故防范措施[J]. 陕西电力，2011(1)：69－73.

[3] Q/GDW 175－2008，变压器、高压并联电抗器和母线保护及辅助装置标准化设计规范[S].

[4] 赵海鸣，刘佩芬. 基于新标准化设计规范的330 kV变压器后备保护整定计算方法探讨[J]. 陕西电力，2009(11)：52－54.

作者简介：

刘高会(1973)，男，大学本科，高级工程师，从事继电保护及自动装置的定值整定计算工作。

(收稿日期：2012－05－25)

(上接第22页)

3.3 输电通道上的电磁环网

对于输电通道电磁环网，正常方式下500 kV线路传输的功率一般较大，当高电压等级线路跳闸将引起潮流向低电压等级线路转移，有引发连锁故障的风险。若维持此类高低压电磁环网运行，为了避免此类$N-1$故障后的连锁反应，其所构成的输电断面稳定限额将大幅度下降。

针对此类输电通道上的电磁环网应进行充分的潮流计算，若解环后可以增大输电能力，减少窝电应及时解环；若经过潮流计算，500 kV系统向220 kV的转移比不高，且在电磁环网运行下该断面的输送要求可以满足电源的送出，并且解环后可能带来更大的问题，需要有相应的配套工程措施才能解环，对此可以考虑暂缓解环，待配套工程建成后再实施解环。

四川电网的西通道(500 kV天嘉、嘉沐、沐叙双回)投运后，复奉直流具备4 000 MW外送能力。但由于向家坝电站建设滞后，2012年仍需从四川主网组织电力转供复奉直流。而由西通道与500 kV洪泸双回与220 kV龚山线与孜平线构成的电磁环网丰水期将限制复奉直流的送出，复奉直流潮流超过3 000 MW时，西通道中断将导致220 kV龚山线及孜平线超热稳定，因此为满足外送要求减少弃水应将220 kV龚山线及孜平线解环运行，由此带来的龚嘴电厂送出受限问题可通过调整龚嘴电厂运行方式加以解决。

四川500 kV资洪双回是川西水电外送的重要通道，夏季潮流可达到2 000 MW，其与220 kV资凉双回构成了电磁环网，若解开220 kV资凉双回线，将导致220 kV桥乐线过载。经潮流计算500 kV资洪双回跳闸后，仅有16%的潮流转移至资凉双回，在220 kV资凉双回不超300 MW情况下，资洪双回可按2 200 MW控制，当资洪双回跳闸后，资凉双回不会超热稳定限额。因此在满足川西水电外送要求的情况下可保持此电磁环网运行。

4 结 语

随着500 kV电网的建设投运，适时打开高低压电磁环网，下一级电压电网逐步实现分区运行是电网发展的必然选择。解环方案的制定应针对不同类型的电磁环网进行具体分析，从解环后电网潮流分布是否合理、主要变电站短路容量下降是否明显及供电能力与供电可靠性等多方面来进行综合评价。同时应能最大限度地避免电磁环网解环后带来的新问题，针对电网发展的不同阶段，适时适机地解开电磁环网。解环研究以能构建解环分区运行的坚强电网为最终目标。

参考文献

[1] 袁志强，黄薇，江峰青. 220 kV电网短路电流控制措施研究[J]. 现代电力，2009，26(4)：41－46.

[2] 李旭霞，山西中部电磁环网解环研究[J]. 山西电力，2009(Z1)：40－43，97.

作者简介：

王莉丽(1977)，女，汉族，硕士，工程师，2004毕业于重庆大学电气工程学院，长期从事电网调度工作。

(收稿日期：2012－10－22)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基于动态惯性权重粒子群算法的配电网状态估计

尹 专,刘天琪,江东林
(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘 要: 配电网单条馈线节点少、支路少,常采用加权最小二乘法对配电网各条馈线分别进行状态估计。但由于牛顿法对初值要求高,易发散,为此采用动态惯性权重粒子群算法对配电网进行状态估计。该算法能自动调节搜索步长,加快收敛速度,弥补了基本PSO算法易陷入局部最优、算法不稳等不足。4节点算例证明该算法可稳定快速收敛,即使初值偏离真值较远也能有效、快速收敛;IEEE 33节点算例证明了该算法运用于配电网状态估计时收敛速度快、精度高。

关键词: 惯性权重; 粒子群优化; 状态估计; 配电网

Abstract: The feeder of distribution network has less node and branch, so the state estimation of each feeder in distribution network often adopts the weighted least squares method respectively. But Newton's law requires high initial values and it is prone to divergence, so the particle swarm algorithm with a dynamic inertia weight is adopted for state estimation of distribution network. This algorithm can automatically adjust the search step length, speed up the convergence rate, and make up the defects of the basic particle swarm optimization (PSO) algorithm which is unstable and easily plunge into the local optimum. 4-node examples show that the algorithm can be stable and fast convergence, even if the initial value deviates from the true value. IEEE 33-bus examples show that the algorithm has a fast convergence rate and high accuracy when applying to the state estimate of distribution network.

Key words: inertia weight; particle swarm optimization; state estimation; distribution network
中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2012)06-0023-04

0 引 言

随着电力工业的迅速发展,电力系统的结构和运行方式日趋复杂,电力系统调度中心的自动化水平也由低级向高级发展。调度中心要实现对电网的监测、跟踪以及分析和实时处理需要全面、准确的电网运行数据,高质量的状态估计是实现调度中心高级功能的保障。

配电网与输电网不同,R/X较大,这就让很多适用于输电网的状态估计算法无法直接运用于配电网,如PQ分解法。而且配电网没有配置PMU、无功角量测量,且量测点配置不足。常有的量测量有节点电压幅值、节点注入功率、支路电流幅值、支路功率,在量测量不满足计算需要时还会补充预测负荷数据等伪数据。

目前已有些针对配电网特点的算法[1-9],常用的有加权最小二乘法、量测量变换法、支路功率法等方法。文献[1]是经典的加权最小二乘法(weighted least square,WLS),该方法能最大限度地利用量测量,而且计算小网络的速度快,估计质量高。文献[2]将支路电流作为状态量,其他非电流量测量都转换为电流量测量,且可三相解耦,计算效率很高,但是节点电压幅值量测不能利用,要求P和Q成对出现,在目前,中国配电自动化配置中不易满足。文献[3]根据配电网辐射状层次结构的特点将配电网辐树状结构分解为多条树枝,然后进行单条支路WLS估计,但根节点电压的正确性将严重影响计算结果。文献[4]提出了基于基本粒子群算法(particle swarm optimization,PSO)的状态估计,该算法使用最小残差模型进行计算,克服了牛顿迭代对初值要求较高的弱点,能有效迭代收敛。文献[5]对PSO算法进行改进,引入了自适应免疫算法,加强PSO的全局搜索能力,但由于复杂的操作过程增加不少计算时间。

这里采用动态改变惯性权重粒子群算法[10]求

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

解带约束的最小残差模型，仍以节点电压幅值和电压相角为状态量，对每条馈线分别进行估计，以克服对迭代初值要求高的弱点，大大改善了粒子群算法的收敛性。4节点算例说明改进后的PSO能在初值偏差真值很远的条件下快速有效收敛，并且性能稳定；IEEE 33节点算例说明改进后的PSO用于配电网计算中，收敛迅速，精度高。

1 配电网状态估计

1.1 状态估计模型

在给定网络结构、支路参数和量测系统的条件下，反应其相互关系的量测方程为

$$z = h(X) + v \tag{1}$$

其中，z 为量测量，包括电压量测、节点注入功率量测、支路功率量测等；x 为状态变量，这里采用节点电压幅值和相位角；v 为量测误差。由于测量装置的误差，量测量往往精度不够，数据不能相容，不能直接运用于计算分析，需要进行状态估计。

1.2 基于加权最小二乘法的状态估计

配电网有多条馈线，每条馈线可以单独作为一个小网络分别进行状态估计。工程上考虑小型机速度快、内存大且计算网络小，采用加权最小二乘法进行配电网状态估计，算法编程简单，收敛可靠，充分使用量测量，计算速度快、估计质量高[11]。该算法的目标函数如下。

$$\min: J(x) = w\,[z(x) - h(x)]^2 \tag{2}$$

由于 $h(x)$ 为 x 的非线性矢量函数，无法直接算出 x，采用牛顿法迭代求解。得到迭代公式如下。

$$x^{(l+1)} = x^{(l)} + [H^T(x^{(l)})\,R^{-1}H(x^{(l)})]^{-1} H^T(x^{(l)})\,R^{-1}[z - h(x^{(l)})] \tag{3}$$

其中，$H(x)$ 为量测雅克比矩阵；R 为权重矩阵；z 为量测量矩阵；$h(x)$ 为状态量测量矩阵。

但牛顿法求解对迭代初值要求较高，如果初值离正确值相差太远则不能准确收敛，甚至发散[4]。

2 粒子群算法

2.1 基本粒子群算法

粒子群算法(PSO)[12]是一种进化计算技术，1995年由Eberhart博士和Kennedy博士提出，源于对鸟群捕食的行为研究。粒子通过自身寻找和相互间传递信息，在适应度的引导下寻找到最优解。粒子群优化算法通过迭代找到最优解，在每一次迭代中，粒子通过跟踪个体最优值和全局最优值来更新自己。

粒子更新速度 v 和位置 x 分别为

$$v_i^{t+1} = \omega \times v_i^t + c_1 \times r_1 \times (pbest_i^t - x_i^t) + c_2 \times r_2 \times (gbest_i^t - x_i^t) \tag{4}$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \tag{5}$$

式中，ω 是加速项的惯性权重；c_1、c_2 叫做学习因子，为非负常数；r_1、r_2 是介于 [0,1] 之间的随机数；$pbest$ 为个体最优极值；$gbest$ 为全局最优极值。

2.2 动态改变惯性权重的粒子群算法

采用粒子群算法进行计算虽然对计算初值要求不高，但基本粒子群算法在计算早期收敛速度很快，算法后期收敛速度缓慢，局部搜索能力差，求解精度不高。经改进后的粒子群算法可以稳定可靠收敛，使估计质量得到提高。

粒子群算法中的 ω 使微粒保持运动惯性，具有扩展搜索空间的趋势，并且有探索新的区域的能力；较大的惯性权值有利于全局开发，而较小的惯性权值有利于局部探测。

有研究提出在运算中采用惯性权值递减策略，使得搜索步长逐渐减小，迭代慢慢收敛到极值点，这种方法的优点是能在搜索初期保持粒子的全局搜索能力，而在搜索过程中加强粒子的局部搜索能力，能在一定程度上加快收敛速度并改善收敛精度，但是对于多峰函数，这种算法一旦进入到局部极值点邻域就很难跳出来，极易收敛到局部极值点。

采用文献[10]的动态改变惯性权重的策略改进PSO算法，使 w 随着搜索位置动态改变而不是简单地随着搜索过程线性递减，充分利用目标函数信息，增强搜索方向的引导作用。通过动态改变权重实现粒子速度的调节，控制粒子的搜索范围，既不影响粒子的全局搜索能力又能提高粒子的局部搜索能力。

迭代公式中增加权重的迭代公式为

$$\omega^t = e^{-a^t/a^{t-1}} \tag{5}$$

$$a^t = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |f(X_i^t) - f(X_{\min}^t)| \tag{6}$$

式中，a^t 是判断目标函数的平整度，每次迭代都根据目标函数值进行变化，跟粒子所处位置有关。a^t/a^{t-1} 反应粒子群整体的收敛性，比值大于1时说明

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

处于发散状态，而此时的 ω^t 会比较小，搜索步长较小，促使算法快速收敛；如果比值小于1说明处于收敛状态，比值越小 ω^t 越接近1，而搜索步长越长，a^t 减小得越快，说明收敛速度越快，而此时保持较长的步长可以使算法不易陷入局部极值。

改进后的粒子群算法应用于状态估计，可以在计算开始时加速搜索全局最优值，在靠近极值时通过调整惯性权重可以缩小搜索步长实现精细搜索，这样计算得到的状态估计结果质量高、速度快。

3 基于改进粒子群算法的配电网状态估计

这里以节点电压幅值 V 和相角 θ 为状态量，求解目标函数 $J(x)$。粒子群算法中粒子 x_i 代表状态量 V 和 θ，速度 v_i 代表迭代过程中状态量的修正量，全局极值 $gbest$ 代表目标函数 $J(x)$。求解过程的流程图如图1所示。

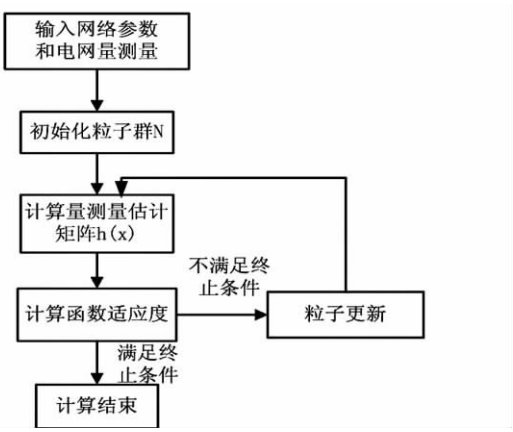


图1 基于改进粒子群算法的流程图

具体求解步骤如下。

(1) 输入网络参数，进行电网拓扑分析；输入电网量测量；

(2) 初始化粒子群 N，粒子位置 x_i 的每一维分别代表节点电压幅值 V 和相角 θ(参考节点只有电压幅值参与迭代)，代表电压幅值的取网络的节点电压量测量，如果某个没有节点电压测量数据则以电网额定电压代替，电压相角的初始值为0，粒子速度 v_i 随即初始化；

(3) 根据粒子的位置 x_i 计算估计量测量矩阵 $h(x)$；

(4) 计算函数适应度，求出当前全局最优值 $gbest$，如果满足阈值或者迭代次数超过设定值则结束迭代，不满足要求则更新粒子的惯性权重 ω^t 和粒子的速度 v_i、位置 x_i，进入迭代循环。

4 算例分析

首先采用文献[11]中4节点算例比较PSO算法和改进后的PSO算法进行状态估计的性能，以牛顿法迭代初始化的电压幅值112.15 kV、电压相角0初始化基本PSO和改进PSO的粒子群，计算结果见表1。

表1 两种算法收敛时间比较

算法	第1次	第2次	第3次	百次平均计算时间
基本PSO	0.216	0.217	0.407	0.253
改进PSO	0.188	0.191	0.159	0.185

可见基于动态惯性常数的PSO算法在收敛速度上比基本PSO算法优越很多。文献[4]已分析牛顿法对迭代初值的要求很高，此处分析在初值不合理的情况下基本PSO和改进PSO算法性能的比较，设置最大迭代次数调为5 000次，初始化时将粒子群的所有粒子代表的电压值由112.15 kV降至80 kV，代表的电压相角依然为0。估计结果如表2(表中采用初值为112.15 kV的牛顿法作为参考)。

表2 两种算法结果及计算时间比较

	牛顿法	基本PSO	改进PSO
节点1电压幅值	111.47	111.71	111.59
节点2电压幅值	110.34	110.58	110.46
节点2电压相角	−0.006 9	−0.007 0	−0.007 0
节点3电压幅值	111.70	111.97	111.85
节点3电压相角	0.0141	0.0143	0.0143
节点4电压幅值	112.32	112.75	112.68
节点4电压相角	0.1379	0.1405	0.1399
迭代时间/s	—	0.289	0.223

节点1为参考节点，其相角不参加迭代。由表1可见，改进后的PSO算法状态估计结果比基本PSO的结果更接近牛顿法结果，精度高；收敛速度也比基本PSO快。

采用IEEE 33节点算例进行配电网状态估计，评估计算配电网的精度和收敛速度。

前推回代法计算得到的数据只有电压幅值，没有电压相角。基于动态改变惯性权重的粒子群算法可以更为精确地得到配电网数据，计算结果包括节点电压幅值和电压相角。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图2是改进粒子群算法状态估计后和前推回代法计算得到的各节点电压偏差比较。图3是关于改进粒子群算法状态估计结果中的节点电压幅值。图4是改进粒子群算法每次迭代函数适应度的曲线。

由图2可得改进粒子群算法得到的状态估计后结果与前推回代法得到的各节点电压偏差并不大，说明该算法状态估计质量高。之所以会出现偏差是因为状态估计时结果会计算出各节点电压相角，而传统的前推回代法是忽略相角变化，所以本算法结果更加精确。

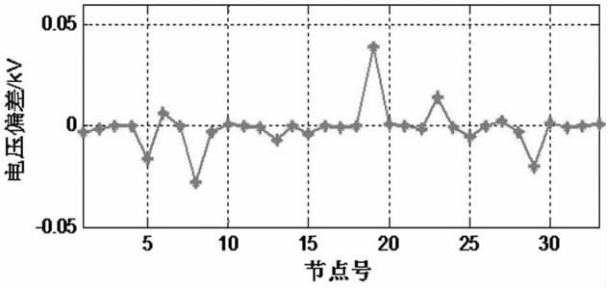


图2 各节点电压偏差比较

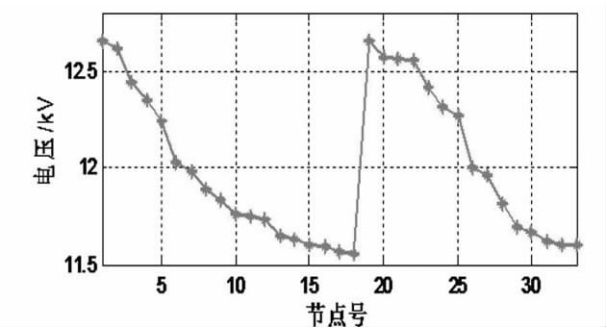


图3 各节点电压幅值

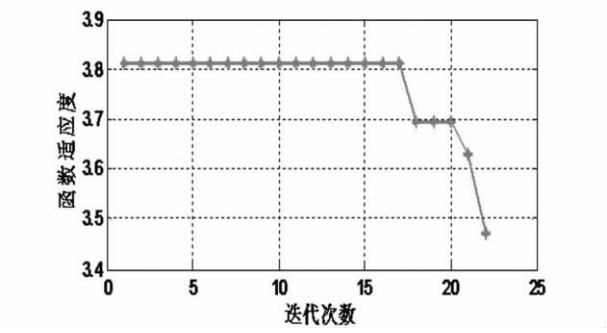


图4 函数适应度曲线

图3中各个点代表各节点的电压，是基于动态惯性权重粒子群算法进行状态估计后的结果。

由图4可得在迭代初期粒子群处于发散状态，当搜索到极值的正确方向后，粒子群迅速收敛，迭代次数不到25次。抽样100次实验中，改进后的粒子群算法能在迭代40次内收敛，而基本粒子群算法迭代1 000次都不能完成收敛，可见改进后的粒子群算法在收敛速度和计算精度方面表现都非常好，完全优于基本粒子群算法。

5 结 语

(1) 基于动态惯性权重的粒子群算法能根据粒子的位置和目标函数的性质而动态改变粒子的搜索步长，能加快收敛速度，使迭代次数大幅减小；同时有利于函数摆脱局部极值，搜索全局最优点；

(2) 改进后的粒子群算法对初值并不敏感，能有效搜索到全局最优点；

(3) 对于配电网，改进PSO可以在极短时间内完成搜索过程，相对于基本粒子群算法，在收敛速度和精度方面都非常优越，提高了粒子群算法的状态估计质量；

(4) 改进后的粒子群算法仍需要进一步完善。有不良数据的存在时，计算结果依然不能满足要求。这是因为状态估计模型以最小残差为目标，如果存在坏数据，为了降低残差只能以牺牲其他数据的准确度换取整体残差降低。粒子群算法无法智能识别坏数据。

参考文献

[1] Li K. State Estimation for Power Distribution System and Measurement Impacts [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 911 - 916.

[2] Baran M E, Keley A W. A Branch - current - based State Estimation Method for Distribution Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 483 - 491.

[3] Deng Y M, He Y, Zhang B M. Branch - estimation - based State estimation for radial Distribution Systems [C]. In: Power Engineering Society Winter Meeting IEEE [C]. 2000: 2351 - 2356.

[4] 闫丽梅，张士元，任伟建，等. 基于粒子群进化算法的电力系统状态估计研究 [J]. 电力系统保护与控制，2010, 38(22): 86 - 90.

[5] 黄若霖，王宽，詹开翅. 基于自适应免疫粒子群优化算法的配电网状态估计 [J]. 电力系统保护与控制，2009, 37(11): 54 - 58.

[6] 孙宏斌，张伯明，相年德. 基于支路功率的配电状态估计方法 [J]. 电力系统自动化，1998, 22(8): 12 - 16.

[7] 孙宏斌，张伯明，相年德. 配电匹配潮流技术及其在配

(下转第35页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

被迫从电网吸收了谐波功率，虽然谐波功率对于线性负载而言是不希望并且有害的，但是计量时线性负载从电网吸收的总功率是其吸收的基波功率和吸收的谐波功率之和，计量功率增大。所以，这种计量方式下，使非线性负载的谐波源用户由于向电网注入了谐波功率而少交电费，线性负载用户由于被迫从电网吸收了谐波功率而多交了电费，显然是不合理的，变相地鼓励了谐波源用户，使计量不公平。

3 电网谐波下电能计量模式的探讨

从前面的分析知道，在电网电压和电流发生畸变存在谐波成分时，不仅存在基波功率，还有谐波功率，而谐波功率流向可能与基波功率流向相同，也可能相反。为了能准确真实地反应各种负载消耗的电能，在电网存在谐波情况下，应该对基波电能和谐波电能都要进行计量。这要求电能表不仅要能计量基波电能，还要能计量谐波电能，同时还要能显示谐波电能的流向，这样电力系统可以区分谐波源用户和非谐波源用户，按照相关政策法规要求谐波源用户采取相应的谐波抑制措施，保证供电质量。

但是目前的大多数电能表技术水平，无法区分基波电能和谐波电能，也无法判定谐波电能的流向。在这种情况下，可以采取基波电能表和全波电能表结合的方式进行电能计量。由于全波电能表能计量基波电能和全部谐波电能，基波电能表能计量基波电能，全波电能表和基波电能表的计量差值，即为谐波电能值。如果二者差值为正，表明该用户为非谐波源用户，它从电网吸收了有害的谐波；如果差值为负，表明该用户为谐波源用户，它向电网注入了有害的谐波。

当然，这种办法无法消除谐波对电能表本身造成的计量误差，所以最根本的办法是根据计量情况，要求谐波源用户进行谐波治理，消除电网中的谐波。

4 结 语

非线性负载接入电路，将引起电路电压和电流波形畸变，产生谐波。对谐波在线路和负载上产生的附加谐波功率进行了分析，讨论了谐波对感应式和电子式电能表的计量精度影响，以及由谐波引起的不公平计量问题，并提出了目前谐波情况下提高电能计量精度的措施。

参考文献

[1] 李军浩，胡泉伟，吴磊，等. 电网谐波对电能计量影响的仿真分析[J]. 陕西电力，2011(6)：1－5.
[2] 张鹏，向铁元，余志华. 谐波对感应式电能表计量影响的分析及控制对策的研究[J]. 仪器仪表用户，2004(2)：4－6.
[3] 沈华. 基于LabVIEW的谐波电能计量与分析系统的研究[J]. 电测与仪表，2010，47(1)：47－50.
[4] 张卓，骆盛军. 对谐波影响下的电能计量方式的探讨[J]. 广东电力，2002，15(4)：55－57.
[5] 卿柏元，李俊健，吴晓明，等. 非线性负荷下电能计量的实用化技术探讨[J]. 广西电力，2010，33(5)：6－9.

作者简介：

黄冰心(1979)，女，工程师，主要从事电力系统生产、运行与管理工作。

(收稿日期：2012－06－15)

(上接第26页)

电状态估计中的应用[J]. 电力系统自动化，1988，22(7)：18－22.
[8] 高赐威，孔峰，陈昆薇. 一种配电网状态估计实用算法的探讨[J]. 电网技术，2003，27(2)：80－83.
[9] 徐得超，李亚楼，吴中习. 稀疏技术在电力系统状态估计中的应用[J]. 电网技术，2007，31(8)：32－36.
[10] 王启付，王战江，王书亭. 一种动态改变惯性权重的粒子群优化算法[J]. 中国机械工程，2005，16(11)：945－948.
[11] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京：水利电力出版社，1995.
[12] Kennedy J，Eberhart R. Particle Swarm Optimizatiom[C]. In：Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks，Perth(Australia)：1995：1942－1948.

(收稿日期：2012－06－15)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

风电场接入新疆某地区电网暂态电压稳定性研究

张瑞明
(新疆电力公司昌吉电业局,新疆 昌吉 831100)

摘 要: 基于电网网络特性和三相短路故障等因素,通过对普通异步风力发电机和双馈风力发电机风电场接入新疆某地区电网的仿真计算,得出了风电场暂态电压极限功率,分析了系统的暂态电压稳定性。根据仿真结果可以得出,短路容量大的系统暂态电压稳定性越强;双馈风力发电机组能够通过转子变频器进行无功电压调节控制,所以在三相短路故障时其暂态电压稳定性比普通异步风力发电机组更稳定。

关键词: 风电场; 网络特性; 电压稳定; 双馈风力发电机组

Abstract: Based on the network characteristics of power grid and three - phase short - circuit fault, through the simulation calculation of a certain regional power grid connected with wind farms adopting the common asynchronous wind turbine generators and doubly - fed wind turbine generators, the transient voltage limit power of wind farm is obtained, the transient voltage stability is analyzed. It can be seen from the simulation results that the transient voltage stability is stronger as the short - circuit capacity of the system is larger. Doubly - fed wind turbine generators can regulate the reactive voltage through the rotor frequency converter, so its transient voltage stability is more stable than that of the common asynchronous wind turbine generators when there is a three - phase short - circuit fault.

Key words: wind farm; network characteristic; voltage stability; doubly - fed wind turbine generator
中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 - 6954(2012)06 - 0027 - 05

0 引 言

新疆是一个地大物博的地方,矿产资源丰富,因此造就了新疆电网的特点:可用能源多,输电线路长,用电量相对“较小”,功率相对“过剩”。特别是这几年新能源技术的发展,使得在几大风资源丰富的地区建立了一定规模的风电场来利用洁净能源发电。新疆电力经过长时间的努力,其网架结构也逐步增强,发电机组容量也在增大,电网稳定性也在逐步增强。

对于风电接入系统后暂态稳定性研究,特别是电压稳定,已有一些文献做过分析。文献[1]对普通异步风力发电机组进行了动态建模和仿真,从不同的考虑因素分析了由该机组组成的风电场接入系统后对系统的暂态稳定性影响。文献[2-4]建立了双馈风力发电机组的暂态模型,并对它的控制策略和暂态电压稳定性进行了仿真分析。文献[5]分析了普通异步风力发电机组的风电场接入系统后的暂态特性。文献[6]在Matlab 7.0仿真平台上建立了含双馈异步风力发电机组和恒速异步风力发电机组的风电场动态模型,并分析了风电场接入系统后对电网的暂态电压影响及不同风电机组的低压穿越能力LVRT(low voltage ride through)。文献[7]分析了普通异步风力发电机组和双馈风力发电机组风电场接入系统后的静态电压稳定性,没有对暂态电压稳定性进行分析。这些文献都进行了算例仿真分析,但对实际电网进行仿真分析的还比较少,特别是新疆地区电网。

1 地区电网的主要网架结构

下面所采用的算例系统为新疆某地区电网,该电网的主要网架结构如图1所示。风电场1装机容量为49.5 MW,风电场由66台750 kW的普通异步风力发电机组组成。风电场2由33台1.5 MW的双馈风力发电机组组成。风力发电机组出口电压为0.69 kV,经过箱式变压器升压至10 kV,再由风电场升压变电站升压至110 kV,最后由110 kV输电线路送至1变电站。该地区220kV主电网主要由1线、

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

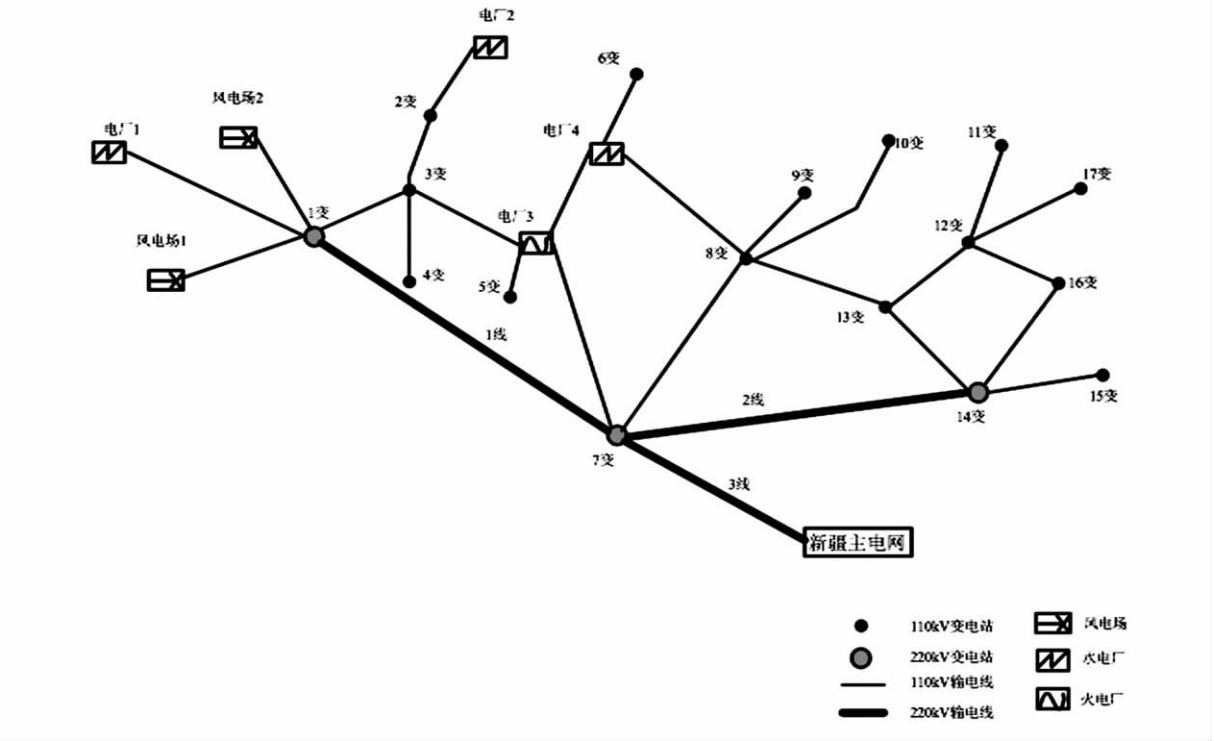


图1 新疆某地区网架结构示意图

2线、3线构成，再由220 kV的线与新疆主电网进行功率交换。

这里主要应用时域仿真的分析方法分析风电场接入新疆某地区电网的暂态电压稳定性，而分析了电网本身的网络特性和最严重的扰动三相短路故障对系统暂态电压稳定性的影响。

2 仿真分析

2.1 电网网络特性对暂态电压稳定性的影响

在风电场接入的电网中可以用风电场接入点PCC处的短路容量来表示该电网的强弱，其短路容量为PCC处的三相短路电流与系统的额定电压(该节点的平均电压)的乘积。短路容量大标志着电网强，负荷、电容器组等的投切不会引起较大的电压幅值变化；反之，短路容量小标志着电网弱，系统电压的幅值容易受负荷、机组投切等扰动的影响。文献[10-11]指出PCC处的短路容量和所接入风电场容量的比值可用来判断风电场所接入电网的强弱。

下面分别在该地区2010年和2009年的夏大运行方式下计算其系统短路容量。

(1) 2010年运行夏大方式下，1变电站、14变电站的220 kV输变电工程完工开始投运，在风电场1接入点PCC处发生三相短路故障，故障在2 s时刻发生，得到短路电流 $I_{F\max1}=4.8$(p.u.)，则系统的短路容量为: $S_{sc1}=I_{F\max2}\times S_B=4.8\times100=480$ MVA

(2) 2009年夏大运行方式下，1变电站、14变电站的输变电工程正在施工，还没有投入运行，在风电场1接入点PCC处发生三相短路故障，故障在2 s时刻发生，得到短路电流 $I_{F\max2}=2.97$(p.u.)，该运行方式下系统的短路容量为

$$S_{SC2}=I_{F\max2}\times S_B=2.97\times100=297\ \text{MVA}$$

在这两种运行方式下，接入普通异步风力发电机风电场，风电场出力为15 MW，在风电场接入系统点PCC处发生三相短路故障，故障时间为 $t=1$ s，故障切除时间为 $t=1.434$ s，仿真得到风力发电机组的机端电压波形，如图2所示。

两方式下得出的结果可知: $S_{sc1}>S_{sc2}$，即2010年运行方式下风电场接入点短路容量比2009年运行方式下大，系统的抗扰动能力更强。从图2知，在相同的扰动情况下，15 MW出力的风电场接入该地区2010年夏大运行方式下的网架结构，风电机组的机端电压在经过振荡后能回到稳定状态，稳态电压略有降低；而接入该地区2009年夏大运行方式下的网架结构时，风电机组电压经过振荡后电压跌落到0.17 p.u.，无法恢复到原来的稳定运行状态，系统电压失稳。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

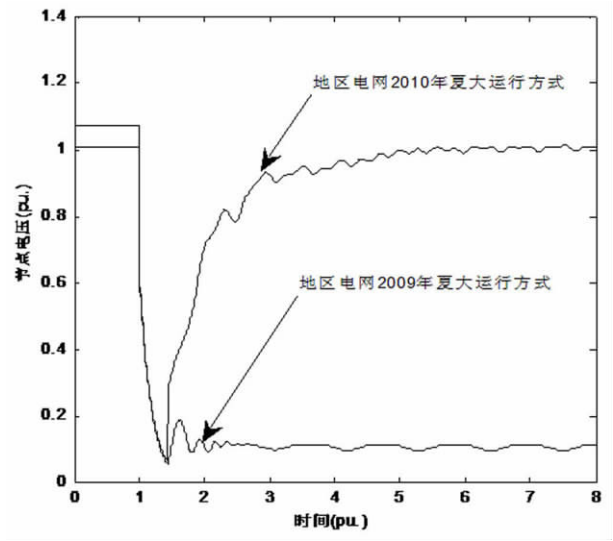


图2 风电机组机端电压波形

2.2 含风电系统发生三相短路故障的暂态电压稳定性

在故障时间一定的情况下，风电场出力不断增加，当超过某个值时，故障清除后系统电压失稳；若风电场出力小于这个值，则故障清除后系统电压能恢复到以前运行状态或者过渡到一种新的稳定状态，那么称这个值为风电场的功率极限 P_{CR}。通过判断风电场极限功率的大小来判断系统暂态电压稳定性的强弱，若 P_{CR} 大，则系统承受扰动的能力强，系统的暂态电压稳定性好。

2.2.1 普通异步风力发电机组风电场接入系统后的暂态电压稳定性

在接入风电的系统中，遭受到比较大的扰动就是三相短路故障。在 $t=1$ s 时风电场与系统的接入点 PCC 处发生三相短路故障，$t=1.434$ s 时切除故障，仿真得到风电机组机端和部分主要母线电压波形如图3、4所示，而风电场电容器组的无功补偿如图5所示。

由图3可知，风电场接入点 PCC 处在 $t=1$ s 发生三相短路故障，故障在 $t=1.434$ s 切除，如果风电场的出力为 15 MW，风力发电机组机端电压在经过一段时间的振荡后会恢复到稳定状态，该地区电网电压稳定；风电场的出力为 15.01 MW，风力发电机组机端电压在故障切除后经过振荡无法恢复到稳定状态，机组电压失去稳定。由图4知与风电场联接较近的3变电站 110 kV 侧的电压一直在振荡，最终能过渡到稳定状态，但时间较长；9变电站的负荷较重，地区离风电场1较远，9变电站 110 kV 侧的电压在故障后经过较长时间的振荡能够回到稳定状态，

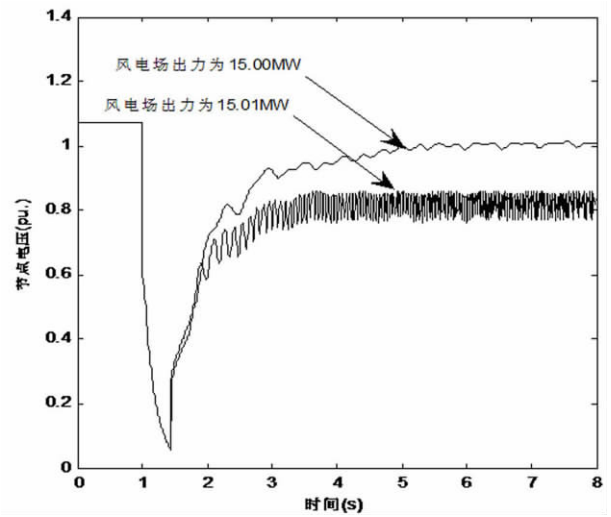


图3 故障清除时间为 0.434 s 时，风力发电机组机端电压波形

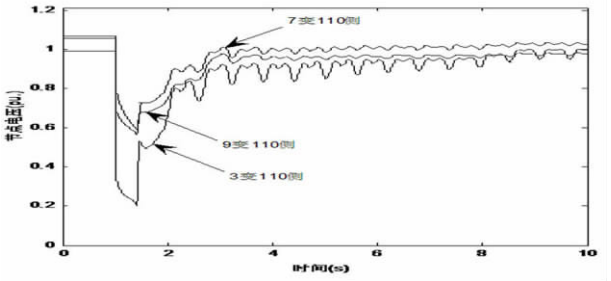


图4 风电场出力为 15 MW 时部分枢纽变电站母线电压波形

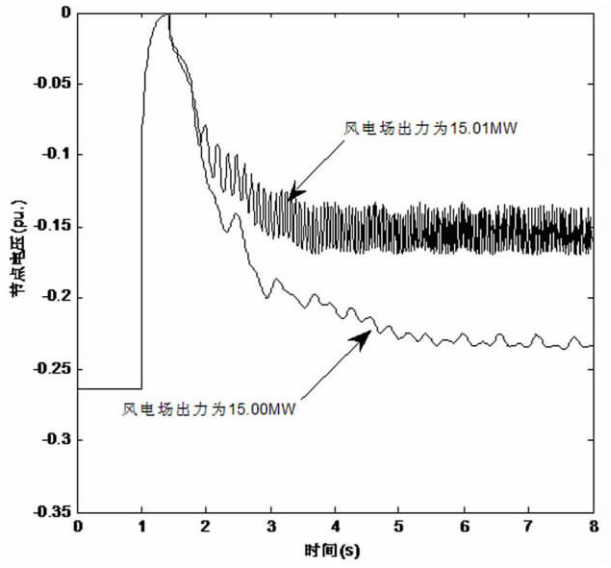


图5 风电场并联电容器组输出的无功功率

其稳态电压值略有降低；与新疆主网相连的7变电站 220 kV 侧电压在经过一定时间的振荡后也能回到稳定状态。由此可知普通异步风力发电机组风电场 PCC 处发生三相短路故障，故障的极限切除时间是 0.434 s，为了使系统的电压不会发生失稳，风电

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

场的出力不能超过15 MW，即风电场功率极限 P_{CR} 为15 MW。同理，仿真计算得到不同故障清除时间下的风电场功率极限。

表1 普通异步风力发电机组风电场不同故障清除时间下的极限功率 P_{CR}

故障清除时间/s	风电场暂态电压极限功率 P_{CR}/MW
0.434	15.00
0.424	24.75
0.364	49.50

从表1得出，由普通异步风力发电机组成的风电场的故障清除时间越小时，风电场功率极限 P_{CR} 越大，其暂态电压稳定性较强，当故障清除时间的增大，风电场功率极限值 P_{CR} 在减小，即风电场接入系统的暂态电压稳定性变差。

图5是风电场普通异步风力发电机组并联电容器组输出的无功功率，在故障前电容器组的无功输出为26.41 MW。风电场出力为15 MW，在风电场PCC处发生三相短路故障，机端电压迅速降低，在故障中输出功率 Q_C 进一步降低，故障在0.434 s后切除其输出功率经振荡恢复到一定的稳定状态，而在风电场出力为15.01 MW时其无功输出发生振荡。这可以根据电容器输出无功功率公式 $Q_C = \omega CU^2$ 来理解，电容器无功功率是随风力发电机组的机端电压变化的，在故障时风电机组需要电容器组提供的无功来提高机组机端电压，但机端电压低使得电容器无功输出小，而为风机提高的无功减少进一步使得风机机端电压降低，形成了一种恶性循环。所以在故障时，电容器组会对系统的电压崩溃起“促进”作用。则称电容器组不具有动态补偿特性，因此可以通过SVC、STATCOM等动态无功补偿装置来给系统，例如短路故障等大扰动时提供异步风力发电机组需要的无功功率，以实现无功电压控制。

2.2.2 双馈异步风力发电机组风电场接入系统后的暂态电压稳定性

接入双馈风力发电机组风电场，在 $t = 1$ s时风电场与系统的接入点PCC处发生三相短路故障，故障清除时间为1.464 s，风电场出力分别为49.50 MW、49.51 MW，仿真得到风电机组机端电压曲线如图6所示。通过该方法来求得不同故障清除时间的风电场暂态电压稳定极限功率，如表2所示。

从图6可知，风电场出力为49.5 MW，风力发电机组机端电压在经过一段时间的振荡后会恢复到稳定状态，该地区电网暂态电压稳定；风电场出力为49.51 MW，风力发电机组机端电压在故障清除后经过振荡无法恢复到稳定状态，机组电压失去稳定，则其功率极限值为49.5 MW。

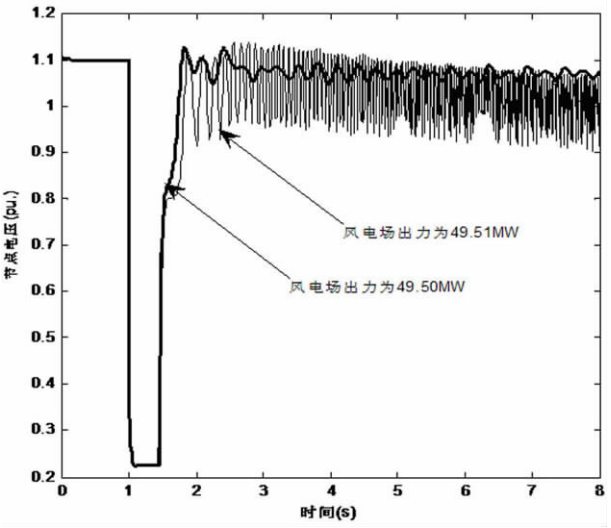


图6 风电场出力为49.5 MW时，风力发电机组机端电压

表2 双馈风力发电机组风电场不同故障清除时间下的极限功率

故障清除时间/s	风电场暂态电压极限功率 P_{CR}/MW
0.504	15.00
0.474	24.75
0.464	49.50
0.434	66.00

表2给出了双馈风力发电机组风电场接入系统后在PCC处发生三相短路故障风电场的功率极限值 P_{CR}，同普通异步风力发电机组风电场一样，故障清除时间较小时，风电场的功率极限值较大 P_{CR}，其暂态电压稳定性较强，随故障清除时间的增加电压稳定性变差。在故障清除时间一致的条件下，双馈机组风电场的功率极限值 P_{CR} 比普通异步机组风电场大，即暂态电压稳定性更好。这是因为在系统发生故障时，双馈风电机组利用转子变频器的控制参与了系统的无功电压控制，以帮助风电机组机端电压的恢复，而普通异步风力发电机组则无无功电压调节能力。

3 结 语

伴随着接入系统的风电容量不断的增大，其对系统的影响也越来越大，特别是系统的电压稳定性。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

应用时域仿真的方法，主要分析了普通异步风力发电机和双馈风力发电机风电场接入新疆某地区电网的暂态电压稳定性，得到了以下结论。

1) 在相同扰动情况下，短路容量大的系统其抗扰动的能力更强，即其暂态电压更稳定。特别是在风电场的选址时要注意，尽量使得PCC处的系统短路容量大。

2) 双馈风力发电机组能够通过转子变频器进行无功电压调节控制，在相同故障切除时间下，其暂态电压稳定极限功率 P_{CR} 比普通异步风力发电机组更大，所以其暂态电压更稳定，对扰动时的电压调节能力更强，有利于地区电网的电压稳定。

参考文献

[1] Erlich, U. Bachman. Grid Code Requirement Concerning Connection and Operation of Wind Turbines in Germany [J]. IEEE Engineering Society General Meeting (USA), 2005: 784 – 789.

[2] Friedrich W. Koch. Simulation and Analysis the Interaction of Wind Turbine and Power System [D]. Duisburg – Essen University of Germany, 2005: 27 – 52.

[3] P. Sorensen, A. D. Hansen. Reduced Models of Doubly Fed Induction Generator System for Wind Turbine Simulations [J]. Wind Energy, 2006(9): 299 – 311.

[4] 李晶，王伟胜，宋家骅. 变速恒频风力发电机组建模与仿真 [J]. 电网技术，2003，27(9)：14 – 17.

[5] 张瑞明，张新燕，陈莉. 风电场接入系统后的暂态特性研究 [J]. 电气自动化，2011，33(2)：45 – 49.

[6] 邢文琦，晁勤. 含不同风电机组的风电电网仿真研究 [J]. 电网技术，2009，33(7)：99 – 102.

[7] 张瑞明，张新燕. 基于普通异步风力发电机和双馈风力发电机静态数学模型的系统静态电压稳定性研究 [J]. 电网技术，2011，35(1)：175 – 180.

[8] J. B. Ekanayake, L. Holdsworth, N. Jenkins. Comparison of 5th Order and 3rd Order Machine Models for Doubly Fed Induction Generator (DFIG) Wind Turbines. Electric Power Systems Research 67(2003): 207 – 215.

[9] 潘文霞. 大型风电场电压稳定性分析与控制研究 [D]. 南京：河海大学，2004.

[10] 吴捷. 风力发电系统的建模、控制及仿真研究 [D]. 广州：华南理工大学，2004.

[11] 李建丽. 大型风电场并网对电力系统电压稳定性的影响 [D]. 青岛：青岛大学，2007.

作者简介：

张瑞明(1985)，男，硕士研究生，研究方向为风力发电及并网技术，主要从事电气设备实验研究。

(收稿日期：2012 – 03 – 20)

(上接第19页)

Disturbances [C]. Proc. Power Engineering Society Summer Meeting, Jul. 1999: 794 – 799.

[5] G. W. Chang, M. H. Shih, S. Y. Chu, et al. An Efficient Approach for Tracking Transients Generated by Utility Shunt Capacitor Switching [J]. IEEE Trans. Power Del., 2006, 21(1): 510 – 512.

[6] A. C. Parsons, W. M. Grady, E. J. Powers, et al. A DirectionFinder for Power Quality Disturbance Based upon Disturbance Power and Energy [J]. IEEE Trans. Power Del., 2000, 15(3): 1081 – 1086.

[7] J. Kim, W. M. Grady, A. Arapostathis, et al. A Time Domain Procedure for locating Switched Capacitors in Power Distribution Systems [J]. IEEE Trans. Power Del., 2002, 17(4): 1044 – 1049.

[8] Ahmed E. B. Abu – Elanien and M. M. A. Salama. Wavelet – ANN Technique for locating Switched Capacitors in Distribution Systems [J]. IEEE Trans. Power Del., 2009, 24(1): 400 – 409.

[9] 王继东，王成山. 基于小波变换的电容器投切扰动源定位 [J]. 电力自动化设备，2004，24(5)：20 – 23.

[10] 张凯，关根志，张海龙. 用小波变换和瞬时功率定位电能质量扰动源 [J]. 高电压技术，2008，34(3)：573 – 577.

[11] 张贤达. 现代信号处理(第2版) [M]. 北京：清华大学出版社，2002: 90 – 93, 111.

[12] 邓乃扬，田英杰. 数据挖掘中的新方法——支持向量机 [M]. 北京：科学出版社，2004: 166 – 190.

作者简介：

邓扶摇(1983)，女，从事电网调度自动化工作；

赵　静(1982)，女，博士，研究方向为电网调度自动化；

万　力(1981)，男，硕士，从事电力营销工作；

郭　亮(1982)，男，硕士研究生，从事电网调度自动化工作。

(收稿日期：2012 – 08 – 20)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

谐波对电网电能计量系统影响的研究

黄冰心[1]，龚国兴[1]，赵莉华[2]
（1. 南安市电力有限责任公司，福建 南安 362300；2. 四川大学电气信息学院，四川 成都 610065）

摘 要： 非线性负载在电网中引起电流和电压波形畸变，产生谐波电压和谐波电流。电网中谐波的存在对传统的电能计量系统产生影响，使计量不准确和不公平。就谐波对电网电能计量系统的影响进行了分析研究，并提出了谐波情况下提高电能计量精度的措施。

关键词： 谐波；电能计量；影响

Abstract: Nonlinear load causes the distortion of current and voltage waveform in power grid, and generates the harmonic voltage and harmonic current. The presence of harmonics in power grid will influence the accuracy of traditional electric energy metering. Its influences on the electric energy metering system are analyzed and studied. The measures for improving the accuracy of electric energy metering are proposed.

Key words: harmonics; electrical energy metering; influence

中图分类号： TM933 **文献标志码：** A **文章编号：** 1003－6954(2012)06－0032－04

0 引 言

随着大量非线性负载在电力系统中的应用，对电网造成了污染，使电网电压和电流波形发生畸变，产生谐波。谐波电压和谐波电流的存在将影响电网及电力负荷的正常运行，同时也对电网的电能计量系统产生影响。谐波会在电网中产生附加的谐波功率，而不同结构形式的电能计量表由于其工作原理不同，对谐波功率的计量不同，从而造成谐波情况下电能计量系统的计量不准确和不公平。

在对电网中谐波存在时产生的附加功率的分析研究基础上，讨论了谐波对电网电能计量系统的影响，并提出了谐波情况下提高电能计量精度的具体措施。

1 非线性负载情况下电网功率的计算

1.1 非正弦电路中有功功率的计算

当电压和电流为非正弦周期函数时，可用傅立叶级数分解，分别表示为

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{km}\sin(k\omega_1 t + \varnothing_{uk}) \quad (1)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km}\sin(k\omega_1 t + \varnothing_{ik}) \quad (2)$$

式(1)和(2)中，U_0、I_0 为电压和电流的直流分量；U_{km}、I_{km} 为基波及各次谐波电压和电流的幅值。

根据有功功率的定义可知，负载消耗的有功功率(平均功率)的计算公式为

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)\, i(t)\, dt \quad (3)$$

将式(1)和式(2)代入式(3)中，可计算非正弦电路的有功功率。当不同频率的正弦电压和电流相乘其乘积的积分为0，当同频率的正弦电压和电流相乘其乘积不为0，表明只有频率相同的电压和电流才能产生有功损耗，所以非正弦电路中有功功率计算公式可表示为

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos\varphi + U_2 I_2 \cos\varphi_2 + \cdots + U_k I_k \cos\varphi_k + \cdots \quad (4)$$

式(4)中，$U_k = \frac{U_{km}}{\sqrt{2}}$ 为各次电压有效值；$I_k = \frac{I_{km}}{\sqrt{2}}$ 为各次电流有效值；$\varphi_k = \phi_{uk} - \phi_{ik}$ 为各次谐波电压和电流相位差。

从上面分析可知，对于非正弦周期性电路，有功功率等于恒定分量产生的功率、基波功率和各次谐波功率之和。

1.2 非线性负载消耗的有功功率计算[1]

一般来说，由电力部门提供的电网电压为正弦，当接入电网的负载为非线性时，将使电流波形畸变，

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为非正弦。这里假定电网电压没有畸变，即电网为没有谐波的正弦基波电源，其对线性及非线性负载供电，下面分析讨论含有非线性负载电路有功功率的计算。图1为具有非线性负载的电路模型，模型中把负载看作为电流源，负载中有线性负载和非线性负载，则负载电流既有基波分量又含有谐波分量，模型中用基波电流源和谐波电流源表示。图1中 $u(t)$ 为标准电压源，R 为电源内阻与线路电阻之和，$u_O(t)$ 为负载电压，$i(t)$ 为负载电流，$i_1(t)$ 为基波电流，$i_h(t)$ 为谐波电流，$i(t)=i_1(t)+i_h(t)$。

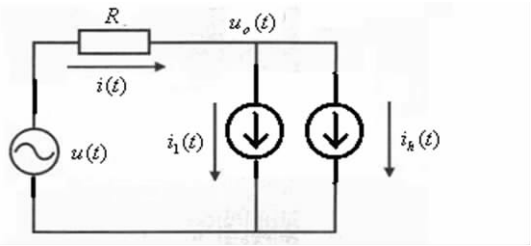


图1 非线性负荷电网模型

由于负载电流含有谐波，所以负载电压 $u_O(t)$ 中除了含有基波分量也含有谐波分量，分别用基波分量 $u_1(t)$ 和谐波分量 $u_h(t)$ 表示，则有

$$u_O(t)=u_1(t)+u_h(t) \tag{5}$$

图1所示电路中电源输出功率 P 为

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T u(t)\,i(t)\,dt$$

$$=\frac{1}{T}\int_0^T u(t)\,i_1(t)\,dt+\frac{1}{T}\int_0^T u(t)\,i_h(t)\,dt \tag{6}$$

式(6)中，第一项为正弦的电源电压与基波电流产生的基波功率，不为0。第二项中，电压为基波，电流为谐波，所以其平均值为0，即电源只输出基波功率。

电源输出功率也可表示为

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T Ri^2(t)\,dt+\frac{1}{T}\int_0^T u_O(t)\,i(t)\,dt$$

$$=\frac{1}{T}\int_0^T R\,[i_1(t)+i_h(t)]^2dt$$

$$+\frac{1}{T}\int_0^T [u_1(t)+u_h(t)]\times[i_1(t)+i_h(t)]dt \tag{7}$$

由于不同频率的电压和电流不产生功率，式(7)可化简为

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T Ri_1^2(t)\,dt+\frac{1}{T}\int_0^T Ri_h^2(t)\,dt$$

$$+\frac{1}{T}\int_0^T u_1(t)\,i_1(t)\,dt+\frac{1}{T}\int_0^T u_h(t)\,i_h(t)\,dt \tag{8}$$

式(8)中，$\frac{1}{T}\int_0^T Ri_1^2(t)\,dt$ 为电源内阻和线路电阻上消耗的基波功率；$\frac{1}{T}\int_0^T u_1(t)\,i_1(t)\,dt$ 为非线性负载消耗的基波功率；$\frac{1}{T}\int_0^T Ri_h^2(t)\,dt$ 为电源内阻和线路电阻上消耗的谐波功率；$\frac{1}{T}\int_0^T u_h(t)\,i_h(t)\,dt$ 为非线性负载消耗的谐波功率。

由于电源没有输出谐波功率，根据功率平衡关系，回路消耗的总谐波功率应为零，则有

$$\frac{1}{T}\int_0^T u_h(t)\,i_h(t)\,dt+\frac{1}{T}\int_0^T Ri_h^2(t)\,dt=0 \tag{9}$$

从式(9)可知，由于谐波的存在，它使电源内阻和线路电阻上不仅消耗基波功率还消耗谐波功率，谐波的存在增加了线路损耗。因为电阻上消耗的一定是正功率，所以负载消耗的谐波功率一定为负功率，表明非线性负载情况下，非线性负载一方面从电网电源吸收基波有功功率，另一方面向电网输出谐波有功功率，是谐波功率源。非线性负载输出的谐波功率是它从电网吸收的基波功率转化而来的，它消耗在电源内阻和线路电阻上，增加线路损耗，同时使电网电压波形发生畸变，形成电网的谐波污染，同时对电能计量系统计量精度产生影响。

2 谐波对电能计量的影响

电网中谐波的存在将影响电能计量的准确性，当电网谐波含量在国家标准规定范围内时，由其产生的影响较小，可以忽略，但当谐波含量超过国家标准规定时，它所引起的误差较大，不能忽略。谐波含量越大，引起的计量误差也越大。

谐波对电能计量的影响和所选用的电能表类型有关。目前工矿企业中常用的电能表主要有两类：感应式电能表和电子式电能表。下面分别进行讨论。

2.1 谐波对感应式电能表计量的影响

感应式电能表一般由测量机构、辅助部件和补偿调整装置组成。其中测量机构包括驱动元件、转动元件、制动元件、轴承和计度器；辅助部件包括基架、铭牌、外壳和端钮盒；补偿调整装置包括满载调整、轻载调整、相位角调整和防潜装置，有的还装有过载补偿和温度补偿装置。测量机构的驱动元件包

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

括电压元件和电流元件。

它的工作原理是: 当电能表接入被测电路时,它的电流线圈和电压线圈中有交变电流流过,这两个交变电流分别在它们的铁芯中产生交变的磁通; 交变磁通穿过铝盘,在铝盘中感应出涡流; 涡流又在磁场中受到力的作用,从而使铝盘得到转矩(主动力矩) 而转动。负载消耗的功率越大,通过电流线圈的电流越大,铝盘中感应出的涡流也越大,使铝盘转动的力矩就越大。即转矩的大小跟负载消耗的功率成正比。功率越大,转矩也越大,铝盘转动也就越快。铝盘转动时,又受到永久磁铁产生的制动力矩的作用,制动力矩与主动力矩方向相反; 制动力矩的大小与铝盘的转速成正比,铝盘转动得越快,制动力矩也越大。当主动力矩与制动力矩达到暂时平衡时,铝盘将匀速转动。负载所消耗的电能与铝盘的转数成正比。铝盘转动时,带动计数器,把所消耗的电能指示出来。

从电能表的工作原理可知,电能表是计量负载所消耗的功率的,电能表产生误差的原因很多,其中谐波的存在是影响其计量精度的一个重要原因。

当电网电压波形为正弦,只有电流含有谐波时,根据前面的分析可以知道,不会产生谐波功率。但是,由于磁路具有饱和性,是非线性的,在磁路饱和情况下正弦波形的电压产生非正弦波形的磁通,其中含有各次谐波分量,磁路中的这些谐波磁通将感应谐波电压,它们与电流中的同次谐波分量作用会有谐波功率,在电能表中产生附加驱动力矩。当电网电压和电流波形均含有谐波分量时,电能表中同样会有谐波功率,从而产生附加驱动力矩。制动力矩的大小与谐波无关,而驱动力矩中附加力矩的产生影响了电能表的计量精度。所以,感应式电能表在计量时,除了计量基波功率外,也能反应部分谐波功率,但是不能反应全部谐波功率,其测量功率为基波功率和部分谐波功率之和。

感应式电能表在计量含有谐波情况下的电能时,随谐波次数和谐波功率的不同,引起的误差大小不同,有可能引起正误差功率,也可能引起负误差功率。

2.2 谐波对电子式电能表计量的影响

电子式电能表的工作原理框图如图2所示,其工作原理为: 被测电路的高电压和大电流经电压和电流变换器转换,后送至乘法器,乘法器完成电压和电流瞬时值的乘法运算,输出值与一段时间内平均功率成正比的直流电压,再利用电压/频率变换器,将该直流电压转换成相应的脉冲频率,将该脉冲分频,并通过一段时间内计数器的计数,显示出相应的电能。

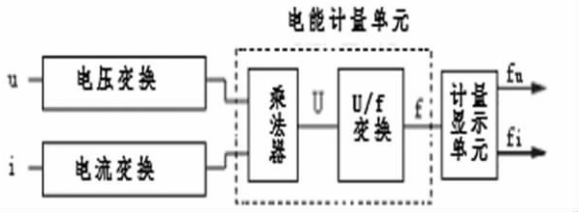


图2 电子式电能表工作原理框图

从电子式电能表的工作原理可知,在电子式电能表计量过程中,不存在磁路的变化过程,但是磁通变化会影响其电压和电流变换器(大多数时候都采用电磁式互感器) 的精度,从而直接影响测量精度。如果测量用互感器存在非线性,当电压和电流波形发生畸变时,互感器对各次谐波成分转换比例不一致,从而使被测信号发生变形,产生测量误差。在波形畸变情况下,互感器变换误差随谐波次数的增加而非线性增大。对于电子式电能表,其计量的功率是基波功率与谐波功率之和。

所以从计量全波功率角度考虑,电子式电能表的计量精度较感应式电能表要高。但是不管是感应式电能表还是电子式电能表,当谐波存在时,都会影响其测量精度。

2.3 非线性负载对电能计量的影响

从前面的分析知道,感应式电能表在计量含有谐波的电能时误差较大,它计量的是全部基波功率与部分谐波功率之和,电子式电能表计量的是全波功率,反映了负载实际消耗的电能。但是,这种能反映实际消耗电能的计量方式对用户仍是不合理的。

从1.1和1.2的分析可以知道,非线性负载在从电网吸收基波功率的同时,将向电网发出谐波功率。而非线性用户向电网发出的谐波功率对电网和用户都将产生不利影响。

目前的计量方式下,非线性用户从电网吸收基波电能,其中一部分转化为谐波电能注入电网,即它从电网吸收的谐波功率为负,当采用全波电能表计量时非线性用户从电网吸收的总功率等于其从电网吸收的基波功率减去其注入电网的谐波功率,所以总的计量功率将减小。而线性负载不仅从电网吸收了基波功率,由于电网电压和电流波形的畸变,它还

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

被迫从电网吸收了谐波功率，虽然谐波功率对于线性负载而言是不希望并且有害的，但是计量时线性负载从电网吸收的总功率是其吸收的基波功率和吸收的谐波功率之和，计量功率增大。所以，这种计量方式下，使非线性负载的谐波源用户由于向电网注入了谐波功率而少交电费，线性负载用户由于被迫从电网吸收了谐波功率而多交了电费，显然是不合理的，变相地鼓励了谐波源用户，使计量不公平。

3 电网谐波下电能计量模式的探讨

从前面的分析知道，在电网电压和电流发生畸变存在谐波成分时，不仅存在基波功率，还有谐波功率，而谐波功率流向可能与基波功率流向相同，也可能相反。为了能准确真实地反应各种负载消耗的电能，在电网存在谐波情况下，应该对基波电能和谐波电能都要进行计量。这要求电能表不仅要能计量基波电能，还要能计量谐波电能，同时还要能显示谐波电能的流向，这样电力系统可以区分谐波源用户和非谐波源用户，按照相关政策法规要求谐波源用户采取相应的谐波抑制措施，保证供电质量。

但是目前的大多数电能表技术水平，无法区分基波电能和谐波电能，也无法判定谐波电能的流向。在这种情况下，可以采取基波电能表和全波电能表结合的方式进行电能计量。由于全波电能表能计量基波电能和全部谐波电能，基波电能表能计量基波电能，全波电能表和基波电能表的计量差值，即为谐波电能值。如果二者差值为正，表明该用户为非谐波源用户，它从电网吸收了有害的谐波；如果差值为负，表明该用户为谐波源用户，它向电网注入了有害的谐波。

当然，这种办法无法消除谐波对电能表本身造成的计量误差，所以最根本的办法是根据计量情况，要求谐波源用户进行谐波治理，消除电网中的谐波。

4 结 语

非线性负载接入电路，将引起电路电压和电流波形畸变，产生谐波。对谐波在线路和负载上产生的附加谐波功率进行了分析，讨论了谐波对感应式和电子式电能表的计量精度影响，以及由谐波引起的不公平计量问题，并提出了目前谐波情况下提高电能计量精度的措施。

参考文献

[1] 李军浩，胡泉伟，吴磊，等. 电网谐波对电能计量影响的仿真分析[J]. 陕西电力，2011(6)：1－5.
[2] 张鹏，向铁元，余志华. 谐波对感应式电能表计量影响的分析及控制对策的研究[J]. 仪器仪表用户，2004(2)：4－6.
[3] 沈华. 基于LabVIEW的谐波电能计量与分析系统的研究[J]. 电测与仪表，2010，47(1)：47－50.
[4] 张卓，骆盛军. 对谐波影响下的电能计量方式的探讨[J]. 广东电力，2002，15(4)：55－57.
[5] 卿柏元，李俊健，吴晓明，等. 非线性负荷下电能计量的实用化技术探讨[J]. 广西电力，2010，33(5)：6－9.

作者简介：

黄冰心(1979)，女，工程师，主要从事电力系统生产、运行与管理工作。

(收稿日期：2012－06－15)

(上接第26页)

电状态估计中的应用[J]. 电力系统自动化，1988，22(7)：18－22.
[8] 高赐威，孔峰，陈昆薇. 一种配电网状态估计实用算法的探讨[J]. 电网技术，2003，27(2)：80－83.
[9] 徐得超，李亚楼，吴中习. 稀疏技术在电力系统状态估计中的应用[J]. 电网技术，2007，31(8)：32－36.
[10] 王启付，王战江，王书亭. 一种动态改变惯性权重的粒子群优化算法[J]. 中国机械工程，2005，16(11)：945－948.
[11] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京：水利电力出版社，1995.
[12] Kennedy J，Eberhart R. Particle Swarm Optimizatiom[C]. In：Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks，Perth(Australia)：1995：1942－1948.

(收稿日期：2012－06－15)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

110 kV庄北变电站保护定值整定中存在的问题及解决方案

刘高会[1],刘 敏[2],师耀林[1],张 波[1],王朝霞[3]
(1. 铜川供电局,陕西 铜川 727031; 2. 西安供电局,陕西 西安 710032; 3. 安康供电局,陕西 安康 725000)

摘 要: 因庄北变电站的负荷属于钢铁冶炼性质,在正常生产时经常出现很大的工作短路电流,引起保护的频繁启动及误动作,经过对运行方式的调整及保护装置的升级,对变压器保护配置及出口回路的调整,确保了用户供电的可靠性及电网主设备的安全运行。该方案对于相似负荷性质的供电网络有一定的参考作用,针对运行经验提出了继电保护与运行方式的密切联系,同时对电网建设部门的设备选型提出了要求。

关键词: 继电保护; 定值; 整定计算

Abstract: Because the load characteristics of Zhuangbei Substation belong to the style of iron and steel melting, the large service short-circuit current ofter occurs during the normal operation, which will cause the frequent action and miss operation of the protection. Through changing the operating mode and updating the protection device, the regulation for the protection configuration and outlet circuit of transformer will guarantee the reliability of power supply and the stable operation of gird main equipment. The proposed scheme provides some references for power supply system with the same load characteristics, the close relationship between relay protection and operating mode is presented incorporating the operation experiences, and the requirements for the equipment type selection of grid construction departments are proposed too.

Key words: relay protection; fixed value; setting calculation

中图分类号: TM588 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2012)06-0036-04

0 引 言

2009年6月110 kV庄北变电站投运,庄北变电站的主要负荷为一中型钢铁冶炼厂,该变电站从330 kV东塬变电站以双回线东庄1号、2号线路提供电源,线路导线型号为LGJ-400,线路长度为27.7 km。东庄1号、2号线路两侧配置PSL621D型线路保护,未配置全线快速保护。下面对东庄1号、2号线路的距离保护及庄北变电站变压器的后备保护定值整定中存在的问题进行了分析,并对线路保护在运行过程中受负荷性质的影响进行了分析,对钢铁冶炼性质的用电负荷的继电保护定值整定提出了可借鉴的思路。

1 保护定值的整定

庄北变电站一次系统接线示意图如图1所示,拟定的运行方式为东庄1号、2号双回线路并列运行,庄北变电站3台变压器三侧均并列运行,35 kV及10 kV母联断路器均在合闸状态。东庄1号、2号线路的正序阻抗为11.1 Ω,庄北变电站3台变压器的额定容量均为63 MVA,高中低压侧额定电压分别为110 kV/38.5 kV/10.5 kV,接线组别为Y/Y/△-11,变压器的阻抗电压(%)分别为

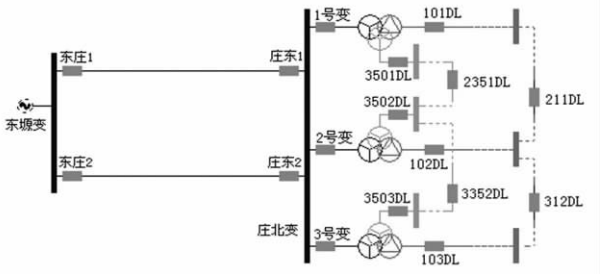


图1 110 kV庄北变电站系统接线示意图

1号变压器: $U_{K1-2}=10.17$, $U_{K1-3}=18.31$, $U_{K2-3}=6.53$;

2号变压器: $U_{K1-2}=10.13$, $U_{K1-3}=18.31$, $U_{K2-3}=6.55$;

3号变压器: $U_{K1-2}=10.11$, $U_{K1-3}=18.28$,

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$U_{K2-3}=6.58$。

1.1 东庄1号、2号线路相间距离保护Ⅱ段定值的整定

110 kV线路相间距离保护Ⅱ段的整定，按照继电保护定值整定计算规程的要求，按保障本线路末段相间故障有不小于规定的灵敏系数整定，并与相邻线路相间距离保护Ⅰ段或Ⅱ段配合，动作时间按配合关系整定[1]。具体的计算过程如下。

1) 东庄1(2)号线路相间距离Ⅱ段，按保证本线路末端故障有规定的灵敏度整定，见式(1)。

$$Z_{dz.2}=K_{LM}\times Z_1=1.4\times 11.1=15.54\ \Omega \quad (1)$$

2) 按躲过庄北变电站35 kV侧母线故障整定，考虑庄北变电站3台变压器并列运行，见式(2)。

$$Z_{dz.2}=K_K\times Z_1+K_{KT}\times K_Z\times Z_T{}'=0.8\times 11.1+0.7\times 0.33\times 21.16=13.76\ \Omega \quad (2)$$

式中，K_{LM}为灵敏系数，按照相间距离保护的整定要求取值为1.4；Z_1为线路正序阻抗，取值为11.1 Ω；K_K与K_{KT}均为可靠系数，K_K取值为0.8，K_{KT}取值为0.7；K_Z为助增系数，应取最小值，在东庄1号或东庄2号线路单供时，庄北变电站3台变压器三侧并列运行时K_Z取值最小，为0.33；$Z_T{}'$为变压器阻抗，此处为庄北变电站单台变压器高中压绕组的正序阻抗(3台变压器的参数基本上相等，不影响计算结果)，按照变压器短路阻抗计算得出21.16 Ω。

由式(1)和式(2)的计算结果进行分析，当相间距离保护Ⅱ段按照灵敏度的要求整定时，在庄北变电站35 kV母线故障时，如果此时东庄1号或东庄2号线路单回运行，为了确保线路保护不会失去选择性，要求相间距离保护Ⅱ段的动作时间应与庄北变电站变压器高压侧过电流保护的动作时间进行配合，因庄北变电站变压器的高压侧过电流保护动作时间整定为2.2 s，因此东庄1号、2号的相间距离保护Ⅱ段的动作时间应最小整定为2.5 s。东庄1、2号线路因未配置全线快速保护，相间距离保护Ⅱ段作为本线路的主保护，动作时间整定为2.5 s，严重影响了线路的热稳定[2]，同时对330 kV东塬变电站其他110 kV线路的安全供电造成了不利影响，因此该方案是不可行的。

当无法从继电保护的角度解决配合关系时，可以对电网的运行方式进行调整。将庄北变电站的运行方式调整为两台变压器并列运行，另外1台变压器单独供电的运行方式，此时式(2)中的K_Z最小值为0.5，按照式(2)重新计算定值，计算得出按照躲过庄北变电站35 kV侧母线故障的动作值为16.286 Ω，因此东庄1、2号线路的相间距离保护Ⅱ段定值可以整定为15.54 Ω，时限只需要和庄北变电站变压器的差动保护配合，整定为0.3 s即可，该方案在东庄1、2号线路故障时能够快速切除故障，起到了保主保重的作用，同时保证了保护的选择性，防止了保护越级事故的发生。

1.2 庄北变电站变压器定值的整定

按照文献[1]的规定，110 kV变压器各侧过电流保护的定值按照式(3)整定，式中的K_K为可靠系数，取为1.2～1.3；K_f为返回系数，微机型保护时取0.95；$I_{FH.\max}$为最大负荷电流。同时按照要求，变压器的高压侧过电流保护应与中低压侧过电流保护定值配合，配合系数一般取1.05～1.1。综上考虑，庄北变电站变压器的高压侧过电流保护定值整定为变压器额定电流的1.37倍，中低压侧过电流保护定值整定为变压器额定电流的1.3倍，整定值及配合关系均满足要求。

$$I_{DZ}=\frac{K_K}{K_f}I_{FH.\max} \quad (3)$$

因庄北变电站用户负荷属于冶炼性质，为了防止冶炼过程中的冲击电流造成庄北变电站变压器过负荷跳闸，庄北变电站变压器三侧过电流保护均采用复合电压元件进行闭锁，高压侧采用三侧复合电压并联进行闭锁，中低压侧采用本侧的复合电压进行闭锁[3]。低电压按照70%的额定电压整定，负序电压整定为6 V[4]，变压器三侧过电流保护具体定值及跳闸出口如下。

高压侧：$I_{DZ}=453$ A；$t=2.2$ s跳变压器三侧开关。中压侧：$I_{DZ}=1\ 228$ A；$t_1=1.6$ s跳中压侧母联开关；$t_2=1.9$ s跳中压侧开关。低压侧：$I_{DZ}=4\ 503$ A；$t_1=1.3$ s跳低压侧母联开关；$t_2=1.6$ s跳低压侧开关。

2 负荷性质引起保护定值的调整

电炉50吨(车间)使用的是庄北变电站的一条35 kV线路，属于短电缆出线，用于冶炼钢铁，考虑到冶炼时容易产生冲击电流，因此电炉50吨的过电流保护定值整定较大，过电流保护定值按照与庄北变电站变压器35 kV侧过电流保护定值配合进行整

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

定，配合系数为1.1，定值整定为1 116 A，动作时间为1.3 s。

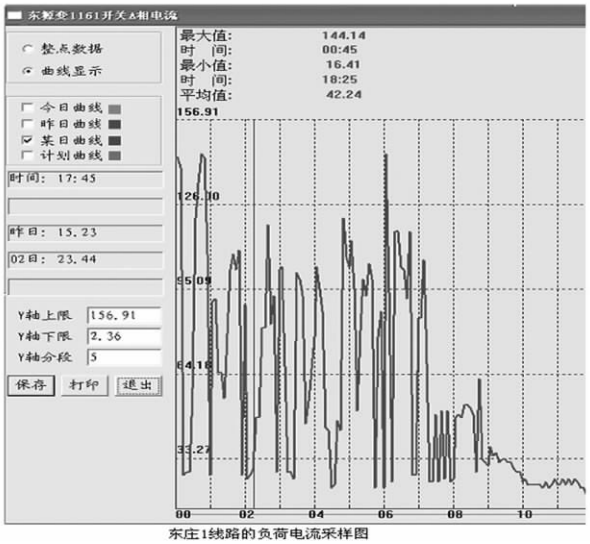
在用户调试电炉50吨的过程中，炼钢炉内电极周围的炉料塌落或电极升降操作不当，导致电极的两相或三相工作短路，出现很大的工作短路电流，按照录波图可以看出电流达到了1 284 A，持续时间超过2 s，引起电炉50吨频繁跳闸，影响了用户的调试工作。在多次组织专业人员进行讨论后，制定了如下解决方案。

(1) 调整电炉50吨线路过电流保护定值，按照躲过故障时的录波电流1 284 A整定，可靠系数取为1.3，整定值为1 670 A，此时用户调试或正常生产时线路保护不会误动作，由此引起的线路过电流保护和庄北变电站变压器35 kV侧过电流保护定值不配合的情况在变压器保护中解决。

(2) 调整庄北变电站3台变压器中压侧过电流保护的定值及跳闸出口逻辑。庄北变电站变压器中压侧后备保护装置为PST1261A，有复合电压闭锁方向过流保护及复合电压闭锁过流保护共两段，每段3个时限，之前该保护投入了复合电压闭锁过流保护，1时限跳分段开关，2时限跳本侧开关。本次改造后将其复合电压闭锁方向过流保护的1时限单独引出且不经复压闭锁和方向闭锁，作为过电流保护使用，动作值整定为庄北变电站变压器额定电流的1.3倍即1 228 A，1时限1 s无选择跳电炉50吨线路开关。并在运行方式中要求正常情况下庄北变电站两台变压器并列运行时带电炉50吨线路负荷，单台变压器运行时不允许电炉50吨生产。在庄北变电站两台变压器并列运行供电炉50吨生产时，虽然电炉50吨的工作短路电流较大，但由于庄北变电站变压器并列运行时的分流原因，电流达不到庄北变电站变压器的过电流保护动作值，因此不会误动；庄北变电站单台变压器运行供电炉50吨生产时，因电炉50吨的工作短路电流大于庄北变电站变压器的复合电压闭锁方向过流保护定值，且由于该保护未经复压元件及方向元件的闭锁，所以保护动作出口跳开电炉50吨开关，确保了电网主设备的安全运行。

3 负荷性质对保护装置的要求

冶炼性质的用电负荷对保护提出了特殊的要求，一是谐波分量较丰富，二是冲击负荷可能导致保护频繁启动。东庄1线路的负荷电流采样图如图2所示，数据来自调度自动化的实时采样数据，从图中可以看出负荷电流的变化量很大。东庄1、2号线路两侧的PSL621D线路保护在运行中一直出现频繁启动。为了防止保护误动，保护装置厂家进行了线路保护软件的升级，提出了有效的解决措施。对于谐波分量，保护装置在硬件上采用有源低通滤波技术有效滤除6次以上谐波，软件采用全周傅氏算法，滤除2次及以上谐波，保证了保护测量元件的精度。对于冲击负荷导致的保护频繁起动，保护采用了突变量电流和低电压相结合的启动元件，即3个相间电压中任意一个相间电压低于低电压启动定值时开放相电流突变量启动元件。而保护原有的零序辅助启动元件和阻抗辅助启动元件则不受低电压启动元件控制，低电压元件的整定按照躲过正常运行时的系统最低电压整定，一般相间电压取值为80 V。



东庄1线路的负荷电流采样图

图2 东庄1号线路的负荷电流采样图

4 结 语

因庄北变电站的负荷属于冶炼性质，在正常生产时经常出现很大的工作短路电流，引起线路保护的频繁启动，并会引起保护的误动作，经过对运行方式的调整及保护装置的升级，对变压器保护的定值及出口回路的调整，确保了用户供电的可靠性及电网主设备的安全运行。从以上分析可知，继电保护定值的整定及电网设备的安全运行与运行方式有着密切相关，继电保护部门与调度运行部门应互相协

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

调，密切配合；同时，对特定的负荷性质，电网建设部门应有针对性地进行保护装置的选型，确保保护装置适应于特定的负荷性质，使保护能够起到保电网、保设备的重要作用。

参考文献

[1] DL/T 584－2007，3kV～110 kV电网继电保护装置运行整定规程[S].

[2] 刘高会，刘敏，王朝霞，等. 110 kV变压器的热稳定分析与事故防范措施[J]. 陕西电力，2011(1)：69－73.

[3] Q/GDW 175－2008，变压器、高压并联电抗器和母线保护及辅助装置标准化设计规范[S].

[4] 赵海鸣，刘佩芬. 基于新标准化设计规范的330 kV变压器后备保护整定计算方法探讨[J]. 陕西电力，2009(11)：52－54.

作者简介：

刘高会(1973)，男，大学本科，高级工程师，从事继电保护及自动装置的定值整定计算工作。

(收稿日期：2012－05－25)

(上接第22页)

3.3 输电通道上的电磁环网

对于输电通道电磁环网，正常方式下500 kV线路传输的功率一般较大，当高电压等级线路跳闸将引起潮流向低电压等级线路转移，有引发连锁故障的风险。若维持此类高低压电磁环网运行，为了避免此类$N-1$故障后的连锁反应，其所构成的输电断面稳定限额将大幅度下降。

针对此类输电通道上的电磁环网应进行充分的潮流计算，若解环后可以增大输电能力，减少窝电应及时解环；若经过潮流计算，500 kV系统向220 kV的转移比不高，且在电磁环网运行下该断面的输送要求可以满足电源的送出，并且解环后可能带来更大的问题，需要有相应的配套工程措施才能解环，对此可以考虑暂缓解环，待配套工程建成后再实施解环。

四川电网的西通道(500 kV天嘉、嘉沐、沐叙双回)投运后，复奉直流具备4 000 MW外送能力。但由于向家坝电站建设滞后，2012年仍需从四川主网组织电力转供复奉直流。而由西通道与500 kV洪泸双回与220 kV龚山线与孜平线构成的电磁环网丰水期将限制复奉直流的送出，复奉直流潮流超过3 000 MW时，西通道中断将导致220 kV龚山线及孜平线超热稳定，因此为满足外送要求减少弃水应将220 kV龚山线及孜平线解环运行，由此带来的龚嘴电厂送出受限问题可通过调整龚嘴电厂运行方式加以解决。

四川500 kV资洪双回是川西水电外送的重要通道，夏季潮流可达到2 000 MW，其与220 kV资凉双回构成了电磁环网，若解开220 kV资凉双回线，将导致220 kV桥乐线过载。经潮流计算500 kV资洪双回跳闸后，仅有16%的潮流转移至资凉双回，在220 kV资凉双回不超300 MW情况下，资洪双回可按2 200 MW控制，当资洪双回跳闸后，资凉双回不会超热稳定限额。因此在满足川西水电外送要求的情况下可保持此电磁环网运行。

4 结 语

随着500 kV电网的建设投运，适时打开高低压电磁环网，下一级电压电网逐步实现分区运行是电网发展的必然选择。解环方案的制定应针对不同类型的电磁环网进行具体分析，从解环后电网潮流分布是否合理、主要变电站短路容量下降是否明显及供电能力与供电可靠性等多方面来进行综合评价。同时应能最大限度地避免电磁环网解环后带来的新问题，针对电网发展的不同阶段，适时适机地解开电磁环网。解环研究以能构建解环分区运行的坚强电网为最终目标。

参考文献

[1] 袁志强，黄薇，江峰青. 220 kV电网短路电流控制措施研究[J]. 现代电力，2009，26(4)：41－46.

[2] 李旭霞，山西中部电磁环网解环研究[J]. 山西电力，2009(Z1)：40－43，97.

作者简介：

王莉丽(1977)，女，汉族，硕士，工程师，2004毕业于重庆大学电气工程学院，长期从事电网调度工作。

(收稿日期：2012－10－22)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

水电站10 kV备自投设计的相关问题及解决方案

李光耀，龚林平，封孝松，闫海峰
（溪洛渡电厂，云南 永善 657300）

摘 要： 对溪洛渡水电站10 kV厂用电系统和厂用电备自投做了简单的介绍，针对备自投设计过程中遇到的问题，结合10 kV厂用电和备自投装置的实际情况，在备自投的开入、工作模式、闭锁和合闸闭锁等方面提出了优化的设计方案。

关键词： 溪洛渡水电站；厂用电；备自投设计

Abstract: The 10 kV auxiliary power system and automatic throw – in equipment of Xiluodu Hydropower Plant are introduced briefly. For the problems encountered in the design process of automatic throw – in equipment, the optimization design scheme in aspects of input, working mode, locking and closing blocking for automatic throw – in equipment is proposed according to the actual situation of 10 kV auxiliary power and automatic throw – in equipment.

Key words: Xiluodu Hydropower Plant; auxiliary power; design of automatic throw – in equipment

中图分类号： TM736 **文献标志码：** B **文章编号：** 1003 – 6954(2012)06 – 0040 – 03

0 引 言

溪洛渡水电站位于四川省雷波县和云南省永善县接壤的金沙江峡谷河段，是一座以发电为主，兼有拦沙、防洪和改善下游航运条件等综合利用效益的巨型水利工程。溪洛渡水电站在左、右两岸各设一座地下厂房，拥有世界上最大的地下洞群室。地下厂房内共安装18台770 MW混流式水轮发电机组，总装机容量为13 860 MW。厂用电10 kV系统分厂内、厂外共8个供电点，18条母线。厂用电系统的设计按照“无人值班”的原则进行，主要电源能通过备用进线自动投入（以下简称备自投）。厂用电保护和备自投装置全部采用厦门ABB开关设备有限公司生产的新一代Relion® 615 V3.0保护和控制继电器，型号为REF615F。

1 10 kV厂用电系统介绍

溪洛渡水电站规模大，机组台数多，单机容量大，厂用电设备数量多、容量大且分布范围广。根据电站的负荷分布及厂房布置情况，左右岸10 kV系统分别有厂内、厂外2个供电系统。电站左右岸厂用电完全对称布置（以下以左岸为例讲解），左岸厂内6条母线形成环网，每2段母线为一个供电点，共3个供电点。左岸厂外共3条母线为一个供电点，其中有2条母线联络运行，厂外备自投逻辑较简单不做讨论。溪洛渡电站左岸厂用电10 kV系统联络简图如图1所示，图中省略厂用电负荷。

2 厂用电备自投介绍

备自投是备用电源自动投入使用装置的简称。即当工作电源因故障断开以后，能自动而迅速地将备用电源投入到工作或将用户切换到备用电源上去，从而使用户不至于被停电的一种自动装置。溪洛渡电站厂内各供电点2段母线间设有联络开关，2段母线正常时分母运行，互为第一备用电源（以下简称一备）；1 G、2 G、3 G供电点之间分别设有联络线，6段母线形成一个环网，使1 G、2 G、3 G供电点之间的相邻母线互为第二备用电源（以下简称二备）。如图2所示，以左岸3 M为例，主供电源为G03C05，一备为G03K04，二备为G02K03，常闭的母联开关不参与备自投。

溪洛渡电站左岸厂内10 kV系统每条母线设置一套备自投装置，共6套，安装在各母线主进线保护盘柜。左岸厂外10 kV系统3段母线设置两套备自投装置，共2套，安装在母联保护盘柜。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

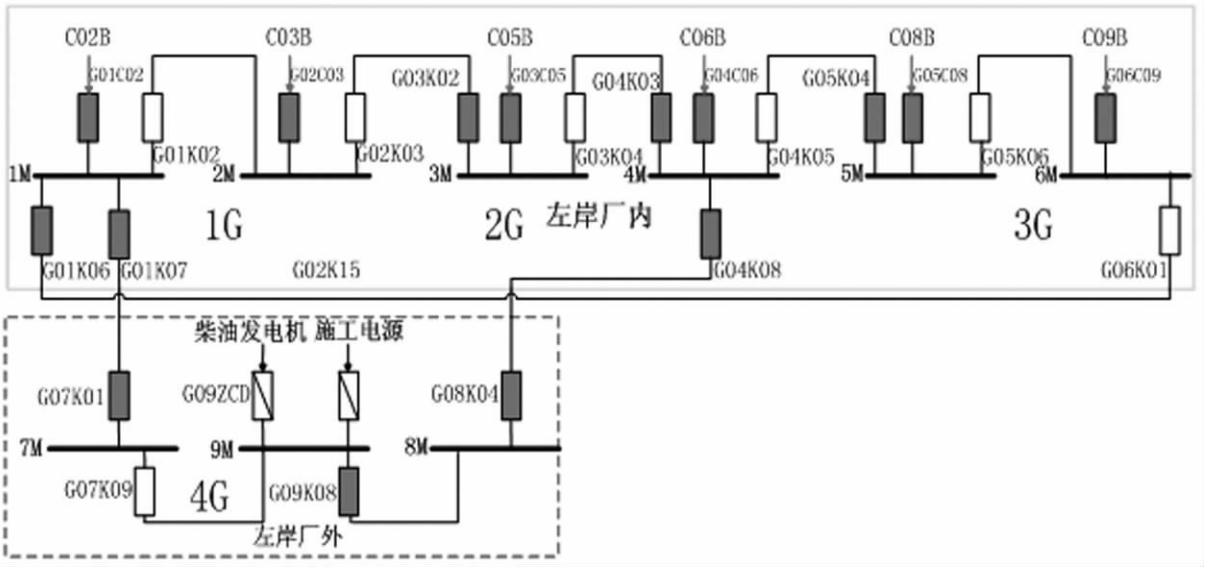


图1　溪洛渡电站左岸厂用电系统联络简图

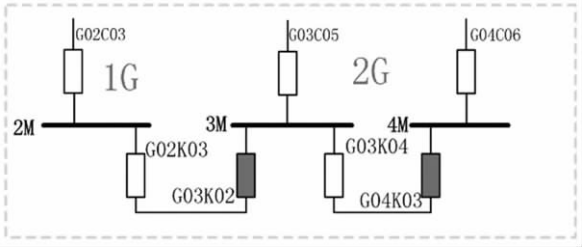


图2　溪洛渡电站左岸3 M、4 M联络示意图

3　备自投相关问题及解决方案

溪洛渡电站10 kV厂用电系统设计复杂，供电要求高，厂用电负荷大，由于一次开关容量的限制，厂内任何进线最多允许带2段母线。ABB装置REF615F功能较强，但每一个备自投装置只有16个开入。在厂用电系统复杂，备自投采集信息量大，而开入有限的情况下，备自投逻辑的设计存在多个难点。以左岸3 M为例，分析设计过程中遇到的问题及解决方案。

3.1　备自投装置开入设计

备自投采集信息量大，备自投装置16个开入有限，对于开入的合理设计尤为重要。对于3 M备自投逻辑，需采集的基本信息如表1所示。

以上需要备自投装置的14个开入，剩2个开入可用。厂内任何进线最多允许带两段母线，一备和二备只有主进线带母线运行才能允许备自投合闸。备自投设计中通过一备和二备的备自投装置发出的允许备投信号实现。一备允许备投信号逻辑如图3所示。

表1　3 M备自投需采集的基本信息

开　入　名	开入数量
3 M主进线G03C05工作位、分位、合位	3
2 M、3 M母联G02K03工作位、分位、合位	3
3 M、4 M母联G03K04工作位、分位、合位	3
备自投全自动、半自动、退出3种模式	3
保护动作信号	1
TV断线	1

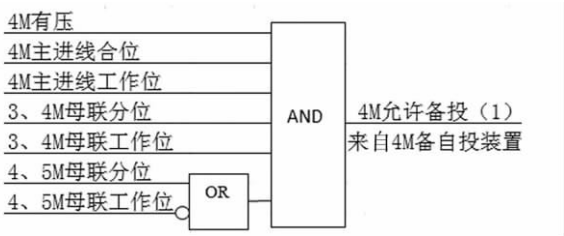


图3　3 M一备允许备投信号逻辑

3.2　备自投3种工作模式设计

备自投装置有全自动、半自动和退出3种工作模式。金沙江溪洛渡水电站10 kV开关柜设备采购合同文件中，明确要求远方监控系统可通过I/O实现3种模式的切换，现地自复式备自投切换开关可实现半自动和退出模式的切换。一般的设计通过备自投现地远方切换把手，远方3种模式和现地两种模式经过5个开入实现切换。根据开入设计，3种工作模式只有3个开入。为实现完善的备自投工作模式功能，采用如图4所示的设计方案。该方案用一个有3个常开接点、4个常闭接点的备自投现地

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

远方切换把手，把手切换至远方时，备自投装置只接收远方全自动/半自动/退出命令；把手切换至现地时，备自投装置只接收现地半自动/退出命令。同时，把手位置接点接至监控系统，可远方监控把手位置。

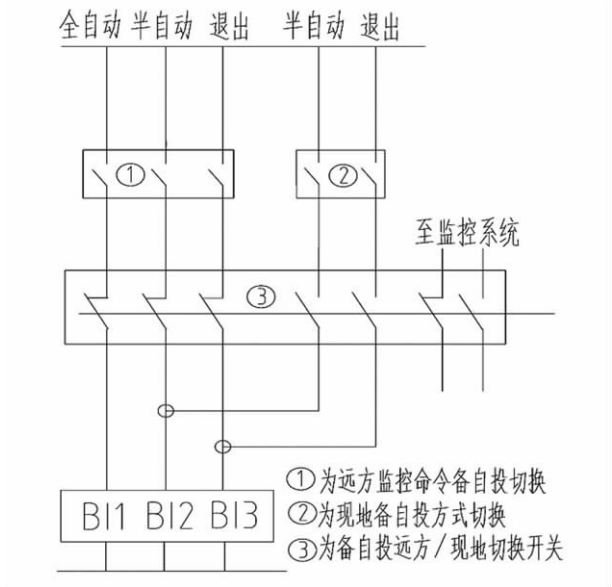


图4 备自投远方现地工作模式的实现

3.3 备自投动作闭锁设计

当发生母线故障时，相应保护动作母线失电后，闭锁备自投动作，防止备自投动作合于故障，系统再次受到冲击。备自投一般有以下闭锁条件：母线故障、TV断线、紧急分闸等。

溪洛渡电站距离较长的母线之间设置有两个母联开关，在正常运行时，一个开关处于常闭状态，一个开关参与备自投。由于长距离电缆和两个母联开关的存在，在多种运行方式和故障条件下，是否闭锁备自投较为复杂。如图2所示，分析3 M和4 M母联动作闭锁备自投情况见表2。

根据开入设计，所有保护动作信号并联，经过一个开入闭锁备自投。对于母联保护信号，要么闭锁备自投，要么不闭锁备自投。如果闭锁备自投，当3 M带3、4 M，母联间发生故障母联保护动作，闭锁3 M备自投，这时如果3 M再失电，3 M备自投不动作，造成3 M失电；如果不闭锁备自投，当4 M带3、4 M，3 M发生故障母联保护动作，不闭锁3 M的备自投，会造成合于故障，使系统再受冲击。母联弧光保护动作也存在以上问题，这个问题可通过增加4个开入（两个母联常规保护和弧光保护动作信号）解决。但这种解决方案势必减少其他的开入，从而带来其他不安全因素。

表2 3 M和4 M母联动作闭锁备自投情况分析

工况	故障状况	开关保护动作情况	闭锁备自投情况
3 M带3、4 M	3 M故障	两母联不动	闭锁3 M，不闭锁4 M
	4 M故障	两母联动	不闭锁3 M，闭锁4 M
	两母联间故障	G03K04动	不闭锁3 M，闭锁4 M
4 M带3、4 M	3 M故障	两母联动	闭锁3 M，不闭锁4 M
	4 M故障	两母联动	不闭锁3 M，闭锁4 M
	两母联间故障	G04K03动	闭锁3 M，不闭锁4 M
3 M带3 M	3 M故障	两母联不动	闭锁3 M，不闭锁4 M
	4 M故障	两母联不动	不闭锁3 M，闭锁4 M
4 M带4 M	两母联间故障	G04K03动	闭锁3 M、4 M的一备

通过以上分析，这个问题似乎很难解决，无论是闭锁还是不闭锁，都会给以后的设备运行留下安全隐患。在设计过程中，设计人员多次思考和讨论，最后通过全新的思路RS触发器，巧妙地解决了以上问题。3 M备自投闭锁逻辑如图5所示。

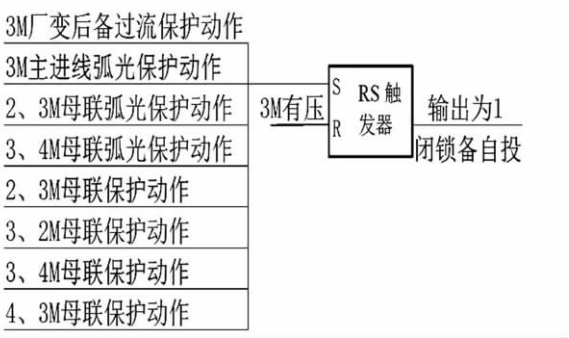


图5 3 M通过RS触发器闭锁备自投逻辑

3 M无压作为RS触发器的复位端，当有保护动作和3 M无压时，为母线故障闭锁备自投；当有保护动作和3 M有压时，母线无故障不闭锁备自投。具体RS触发器的分析结果见表3。

表3 3 M RS触发器闭锁备自投情况分析

S	R	输出	动作结果
0	0	0	无动作信号，无压，不闭锁备自投
0	1	0	无动作信号，有压，不闭锁备自投
1	0	1	有动作信号，无压，闭锁备自投
1	1	0	有动作信号，有压，不闭锁备自投

3.4 常开常闭母联开关合闸闭锁设计

（下转第51页）

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4 结 语

介绍了二滩水电站RCS－985发变组失磁保护配置方案，并对其采用相应判据的原因作了阐述。结合二滩水电站保护定值和实际运行参数将失磁保护不同坐标系内的判据分别映射到$R-X$坐标系和$P-Q$坐标系，验证了失磁保护与低励限制的配合关系符合国网公司《发电厂并网安全性评价》中低励限制优先于失磁保护动作的要求。

参考文献

[1] DL/T 587－2007，微机继电保护装置运行管理规程[S].

[2] 刘伟良，荀吉辉，薛玮. 发电机失磁保护与低励限制的整定配合[J]. 电力系统自动化，2008，32(18)：77－80.

[3] 殷建刚，彭丰，杨平，等. 发电机失磁保护中系统低电压判据的探讨[J]. 电力自动化设备，2003，23(12)：28－31.

[4] 赵华，吴春红. 两种坐标系下发电机低励限制整定与失磁保护配合[J]. 河南电力，2010(3)：12－14.

[5] DL/T 684－1999，大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S].

[6] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京：中国电力出版社，2002：186－262.

作者简介：

季 杰(1987)，男，本科，助理工程师，从事发电厂继电保护工作；

黄建琼(1984)，女，硕士，工程师，从事发电厂监控系统工作。

(收稿日期：2012－05－22)

(上接第42页)

设计初，常闭母联开关运行时默认为闭合，如图3所示，备自投允许信号中，没有考虑常闭母联开关信息。由于常闭开关配置保护具备切除故障的能力，所以在实际运行中，存在常闭开关跳开的情况。如表2所示，在3 M带3 M、4 M带4 M的工况下，如果母联电缆发生故障，跳开常闭开关，3、4 M均不失电，RS触发器不闭锁备自投。这时再发生3 M或4 M失电，备自投合一备G03K04，常闭开关G04K03已断开，一备G03K04在合位不会启动合二备的逻辑流程，造成母线失电。通过分析，在以上工况下，RS触发器不能解决问题。

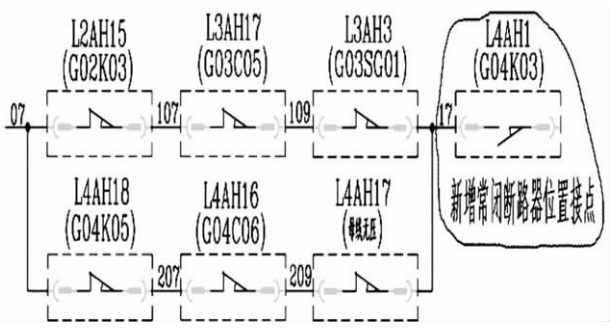


图6 G03K04合闸闭锁回路

无论是保护动作跳开常闭开关，还是其他原因跳开常闭开关，对不同的母线，应单独闭锁与常闭开关相连参与备自投的常开母联开关(一备或二备)，而不是闭锁整个母线的备自投。要解决这个问题，必须引入常闭开关状态信息，在开入有限的情况下，在备自投逻辑里很难实现。经过研究，采用如图6所示的方案，即在常开开关硬接点合闸闭锁逻辑里，引入常闭开关位置接点。常闭开关跳开时，如果母线失电，闭锁常闭母联开关的合闸，常闭母联开关备投合闸失败，延时合其他备投电源使恢复母线供电。

4 结 语

水电站建设日新月异，厂用电接线方式日趋复杂，使备自投逻辑设计难度也相应增加。结合溪洛渡电站的实际情况，通过对备自投设计过程中，备自投的开入、工作模式、闭锁和合闸闭锁等问题的探讨，解决了备自投设计的多个问题，对保障系统安全、稳定、可靠的运行具有重要意义，同时对于其他电站备自投装置的设计有一定的实际借鉴意义。

作者简介：

李光耀(1986)，男，助理工程师，从事继电保护维护管理工作。

(收稿日期：2012－05－22)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

发电机定子接地保护动作原因分析及故障处理

白 伟
(神华陕西国华锦界能源有限责任公司,陕西 榆林 719300)

摘 要: 介绍大型汽轮发电机100%定子接地动作保护基本原理和适用范围,着重分析双频式100%定子接地保护动作区域和保护判据。针对电厂2号机运行中出现的100%定子接地保护信号告警问题,结合发电机100%定子接地保护原理和故障处理原则,详细分析可能引起3次谐波电压比值远远超过整定值的故障原因。根据现场继电保护设备动作特性和测量数据,做出准确判断。经现场检查及故障处理后,2号机中性点接地变压器二次引线锈蚀松动故障得到成功处理。

关键词: 大型汽轮发电机; 定子; 100%接地保护; 3次谐波

Abstract: The basic principle of 100% stator ground protection for large-scale turbine-generator is introduced as well as their application scope, and the focuses are mainly on the operation region and protection criterion of dual-frequency 100% stator ground protection. Combined with the 100% stator ground protection theory and the fault handling principle, the stator ground protection of No. 2 turbine-generator based on the third harmonic is analyzed, and the possibility problems of single-phase grounding fault are discussed. According to the operation characteristics and measuring data of relay protection equipment, an accurate judgment can be obtained and the fault location can be eliminated. After on-site inspection and fault handling, the corrosion and loosening fault of secondary leading-in of neutral-grounded transformer in No. 2 turbine-generator is processed successfully.

Key words: large-scale turbine-generator; stator; 100% stator ground protection; third harmonic
中图分类号: TM77 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2012)06-0043-03

0 序 言

发电机是电厂电网系统中尤为重要的电气设备,其运行安全可靠性是电厂电网系统稳定经济运行的重要保障基础。伴随电厂单机容量的进一步增大,发电机定子绕组对地电容有所增加,相应定子单相接地电流也不断增大,一旦发电机定子发生单相接地故障,如保护动作不及时可靠,将威胁到定子铁心安全,严重时还会从定子单相接地故障演变成相间或匝间短路故障。另外,发电机定子结构和制造工艺变得更加复杂、铁心检修难度增大,电厂继电保护系统对发电机定子单相接地保护动作的实时性、可靠性、准确性等均提出更高的技术要求[1],装设灵敏度高、可靠性强的100%定子接地保护,已成为大型汽轮机发电定子接地保护配置研究的重点。大量实践运行经验可知,发电机在运行过程中可能会由于定子冷却水管发生局部堵塞、法兰漏水、紧固端子松动引起电位悬浮等,造成3次谐波电压比值超过定子接地保护整定值,引起100%定子保护动作[2]。目前,大型汽轮发电机定子单相接地保护,通常设计装设双频式100%保护,即采用由基波零序电压保护和3次谐波电压保护构成的100%接地保护方案。100%保护作为发电机定子接地保护的主保护,在运行过程中针对故障特性如何有效动作,确保发电机定子绕组及铁心的安全是非常重要的保护性能和功能任务。

1 100%定子接地保护原理及配置

目前,大型汽轮发电机和水轮发电机所采用的100%定子接地保护原理判据有所差别,大型汽轮发电机主要采用双频式100%定子接地保护,而大型水轮发电机则主要采用外加电源(20 Hz或其他低频电源)的注入式100%定子接地保护[3-4]。汽轮发电机双频式100%定子接地保护主要由基波零序

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

电压元件和3次谐波电压元件共同组成。其中，基波零序电压元件主要完成保护发电机定子绕组的5%部位到机端100%部位的定子单相接地短路故障，其保护范围为95%，保护动作判据为 $U_{0.0p} \geqslant U_{0.set}$，保护动作整定值设有高整定值、低整定值及每段保护延时值，根据判断结果分别动作于信号或跳闸停机不同保护动作模式；基于3次谐波电压元件的定子接地保护，其主要保护原理是基于发电机正常运行过程中，定子感应生成的电动势中包含有2%～10%的3次谐波电势，当定子发生单相接地故障前后其发电机中性点与机端部位的3次谐波电压变化特性具有明显不相同特性，其保护动作区域为中性点部位到机端部位的25%处，其保护动作区域正好可以消除零序电压保护的盲区（或死区）。3次谐波电压差动保护判据方案的可靠性和灵敏度均较高，可以实现全绕组接地保护，其保护范围达到100%，有效提高定子接地保护动作可靠性。3次谐波电压差动保护主要动作于信号，但也可以根据用户功能需求结合现场运行工况动作于跳闸停机保护。发电机在正常运行时，其中性点部位的3次谐波电压 $|\dot{U}_{N3}|$ 要比机端部位3次谐波电压 $|\dot{U}_{S3}|$ 大，而当靠近中性点部位的定子绕组发生单相接地故障时，$|\dot{U}_{N3}|$ 要比 $|\dot{U}_{S3}|$ 小。为了简化分析，假定将发电机定子每相对地电容均等效集中到发电机机端S和中性点N处，即分别为 $\frac{1}{2}C_{0f}$；将发电机机端断路器引出线、升压变压器、电压互感器TV等外接电气元件的对地电容 C_{0W} 全部等效到发电机机端部位。如果发电机定子接地发生在A点，则发电机中性点和机端3次谐波电动势及对地电容等值简化电路[5]如图1所示。

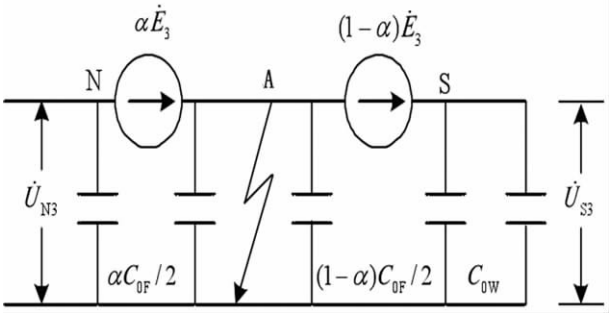


图1 定子单相接地时3相谐波电动势分布等值简化电路

图1中，α 为接地中性点到故障点处的绕组数占全部电压绕组匝数的百分数，相应机端到故障点处的绕组所占百分数为 $(1-\alpha)$。由此，可以获得接地故障发生时中性点和机端3次谐波电压的近似关系，即

$$\begin{cases}\dot{U}_{N3}=\alpha\dot{E}_3\\ \dot{U}_{S3}=(1-\alpha)\dot{E}_3\end{cases} \quad (1)$$

从式(1)可知，当时 $\alpha \leqslant 50\%$ 时，满足 $|\dot{U}_{N3}| \geqslant |\dot{U}_{N3}|$，即接地故障点越接近中性点，其保护动作灵敏度越高。目前，3次谐波电压单相接地保护的判据包含两种[6]，其中常用的保护为 $|\dot{K}_P\dot{U}_{N3}-\dot{U}_{S3}| > K_b|\dot{U}_{N3}|$（$\dot{K}_p$、$K_b$ 为相应调整系数）。此判据条件下，实质上减小接地保护动作量和制动量，具有较高的灵敏性，在汽轮发电机定子接地保护工程中发挥非常重要的作用。

2 定子接地保护动作原因分析

2.1 工程概况

某电厂装有4台汽轮发电机组，容量为300 MW，双水内冷冷却方式；发电机与升压变压器采用单元接线；发电机中性点采用经配电变压器高阻接地方式。各发电机组均配置冗余微机保护装置，其中A、B两屏为电气量保护控制屏，按照双重化模式配置；C屏为非电量保护控制屏，采用双频式100%定子接地保护体系；发电机3次谐波定子接地保护动作于信号，其动作判据按照常用的 $|\dot{K}_p\dot{U}_{N3}-\dot{U}_{S3}| > K_b|\dot{U}_{N3}|$ 保护判据，其中 $\dot{K}_p$ 为变比平衡系数，K_b 为制动系数。

2.2 定子接地故障事件

2010年3月11日08时22分，2号机C屏发出“定子接地”告警信号，突发“发电机定子接地”光子牌，同时检查发变组保护A、B屏，发现发电机“定子接地3次谐波”保护动作出口信号报警灯均处于“亮”状态。运行人员随即对发电机一、二次设备进行相关常规检查，未发现明显异常。为了避免发电机发生的接地故障是瞬时故障，且在一时未查出故障原因的前提下，决定让发电机继续带负荷运行，但要加强对发电机机端、中性点等电气设备运行工况状态的监视，尤其加强对零序电压的监视。

在运行一段时间后，接地告警信号依然存在，故

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

障并未消除，于是可以判断发电机发生的定子接地故障不是瞬时故障。继电保护人员按照相关技术规范要求，分别对4台机组的机端零序电压(含3次谐波)、中性点开口电压等特性值进行测量，获得对应的测量数据结果如表1所示。

表1 4台发电机机端、中性点零序电压测量数据

机组号	机端零序基波电压/V	机端零序3次谐波电压/V	中性点开口3次谐波电压/V
1	0.30	1.76	3.06
2	0.53	1.91	0.12
3	0.34	1.88	3.11
4	0.32	1.84	3.09

从表1可以看出，2号机的机端零序基波电压、中性点开口3次谐波电压与1、3、4号机间有很大差异，而机端零序3次谐波电压则相差不大。继电保护人员随后用高压验电笔测量发电机中性点接地变压器(其变比为20/0.23 kV)引出线部位带电，显示值为699 V，即可以推算出其二次电压大约为3 V。因此，初步认为2号机发电机中性点接地变压器或接地电阻存在故障隐患。

2.3 故障现象分析

从图1可知，不论发电机中性点是否经消弧线圈接地，当距发电机中性点绕组所占百分比为α的A点处发生定子绕组单相接地故障时，按照式(1)发电机中性点N与机端S处的3次谐波电压值为

$$U_{N3} = \alpha E_3, U_{S3} = (1-\alpha) E_3 \quad (2)$$

式(2)的逻辑关系，详见图2所示。

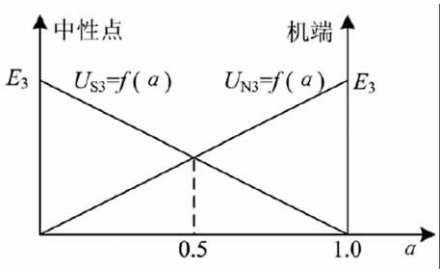


图2 3次谐波电压值U_{N3}、U_{S3}随α的变化关系

图2中，选用U_{S3}作为接地保护动作量；U_{N3}作为接地保护制动量，由基波零序电压元件和3次谐波电压元件共同组成双频式100%定子接地保护，即当发电机中性点附件发生接地故障时，3次谐波保护判据具有较高的灵敏度和可靠性，动作于接地告警信号。该发电厂4台发电机组中性点均经配电变压器接地，并网前进行发电机空载调速试验和并网后测得发电机3次谐波U_{S3}/U_{N3}的比值范围为0.55~0.76，在整定值设定过程中，参考厂家提出的1.2倍可靠系数进行整定调试，保护动作定值整定为0.9。发电机并网投运后，其3次谐波U_{S3}/U_{N3}的比值也基本在0.55~0.76范围内波动。本例中，2号机发生定子接地告警信号时，各机组的3次谐波电压比值：1号机为0.575；2号机为15.92；3号机为0.605；4号机为0.595，可以看出1、3、4号机的3次谐波电压比值均满足整定要求，2号机3次谐波比值远远超过保护动作整定值，发生定子接地保护告警信号，证明2号机继电保护装置动作的可靠性和准确性，排除继电保护装置“误动”问题。

2.4 故障查找

继电保护人员在断开中性点接地变压器隔离刀闸，确认定子接地3次谐波保护压板安全退出，并做好相应的安全隔离措施后，发出《2号机发电机中性点接地变压器及回路检查》操作票。经外观检查未发现接地变压器及并联电阻存在明显异常问题，进一步检查发现2号机接地变压器的二次线与接地电子连接部位的固定接头部位存在严重锈蚀问题，在确认中性点接地变压器及并联电阻不存在其他故障问题后，确定该点为此次故障点。本例中，虽然发电机中性点未发生直接接地故障，但由于中性点接地变压器的二次引出线存在锈蚀松动问题，导致接地保护制动电压U_{N3}发生悬浮，在机端接地保护动作电压U_{S3}没有较大波动的条件下，导致3次谐波电压比值大大超过100%定子接地保护动作整定值，进而引起发电机定子接地3次谐波保护动作告警。

3 定子接地故障处理

检查确认2号机中性点接地变压器及并联电阻不存在其他安全隐患和故障后，决定对接地变压器二次引线到接地电阻的连接部位锈蚀隐患进行处理。将二次引线锈蚀部位进行切断处理，根据锈蚀切断部位的长度重新制作导线接线鼻，并按相关要求严格对导线和线鼻子进行打磨整形处理；由现场继电保护质量监督人员校核装配尺寸合格后，紧固连接螺栓；按照2号机接地变压器二次端子接线连接好二次引线，待测试含全部二次接头在内的所有低压绕组直流电阻均符合规范要求，且三相直流电阻处于平衡状态后，进行二次引线绝缘包扎。引线故障彻底处理完毕，待所有条件满足投运要求后，将

(下转第90页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

②投粉后随着炉膛温度的升高，燃烧逐渐改善，飞灰可燃物逐渐降低，在单台磨投运外加4支大油枪的情况下飞灰可燃物最低可降至26%，部分煤粉已被有效点燃。

③采用大油枪配合微油枪启动方式，2号炉在两次冷态启动过程中油耗明显降低，与1号炉不采用微油点火相比，平均节油率为36.2%。

参考文献

[1] 赵铁军，宋绍伟. W型火焰锅炉节油技术应用[J]. 中国电力，2009，42(9)：61－65.

[2] 束长勇. 微油点火稳燃技术在600 MW机组中的应用[J]. 电力设备，2008，9(10)：74－76.

[3] 车丹，林树彪. 微油点火在燃用贫煤锅炉上的试验研究[J]. 山西电力，2009(3)：39－41.

[4] 付忠广，王志鹏，史亮亮. 燃煤锅炉微油点火燃烧器的数值计算分析[J]. 工程热物理学报，2008，29(4)：609－612.

(收稿日期：2012－05－22)

(上接第45页)

接地变压器并网投运，检修后测量中性点开口3次谐波电压从故障前0.12 V上升到3.08 V，3次谐波电压比值也由故障前15.92降低到0.586，与出厂值没有明显电气特征变化，同时发变组A、B屏“定子接地3次谐波告警信号”解除，C屏“定子接地”告警信号解除，2号机运行参数正常，说明2号机中性点接地变压器二次引线锈蚀松动故障得到成功处理。

4 结 语

发电机定子接地故障发生在中性点附近时，其故障电流的3次谐波分量和3次谐波电压比值将非常大，远远超过接地保护动作整定值，这一点继电保护人员在实际检修维护过程中必须引起足够重视。为了提高继电保护人员故障处理效率和可靠性，除了要熟悉定子接地故障参数特征知识，根据现场故障信号和保护动作情况，灵活采取各种处理方案外，还需注重以下多个方面的内容[7-8]。

①继电保护工作除了需要扎实理论知识外，还需要有较强的责任心和耐心，工作认真仔细，否则将会引起故障进一步扩大成事故；

②认真落实电厂继电保护关于集成型、微机型继电保护装置的调试、整定、抗干扰等技术措施，确保继电保护装置具有较高动作保护性能，避免其出现“拒动”、“误动”等问题；

③定期检修维护工作中，要牢记定期试验、检定的三要素，即：测绝缘、清灰、紧固端子等。本例中就是由于接地变压器紧固端子发生锈蚀松动，引起电位的悬浮而引起100%定子接地保护故障告警。要加强一次、二次设备巡检力度，尤其应注重观察运行记录和运算分析各机组处于不同运行工况条件下特征参数的变化特性，一旦发现异常应及时采取有效方法措施予以消除。

参考文献

[1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京：中国电力出版社，2002.

[2] GB/T 14285－2006，继电保护和安全自动装置技术规程[S].

[3] 张琦雪，陈佳胜，陈俊，等. 大型发电机注入式定子接地保护判据的改进[J]. 电力系统自动化，2008，32(03)：66－69.

[4] 姚晴林，赵斌，郭宝甫，等. 自适应20 Hz电源注入式定子接地保护[J]. 电力系统自动化，2008，32(18)：71－73.

[5] 张长彦，原爱芳，杨兆阳，等. 发电机定子绕组接地保护整定原则[J]. 电力系统保护与控制，2009，37(17)：65－70.

[6] 王翔，张成，沈全荣. 一次典型的定子接地故障分析与优化保护原理[J]. 电力系统自动化，2006，30(11)：52－55.

[7] 毕大强，王祥珩，王维俭，等. 发电机中性点接地装置等效电路的分析[J]. 继电器，2003，31(1)：12－16.

[8] 徐金兵，楼国才. 发电机100%定子接地保护误动作分析[J]. 中国电力，2007，40(5)：67－70.

作者简介：

白 伟，(1985)，男，汉，助理工程师，继电保护检修工。

(收稿日期：2012－07－09)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

三种失磁保护判据与低励限制配合研究

季　杰，黄建琼
（锦屏水力发电厂，四川 西昌　615000）

摘　要： 通过介绍南瑞RCS－985发变组失磁保护判据特性，对二滩水电站失磁保护典型配置方案进行了分析。结合二滩水电站定值，通过将三种不同坐标系下的失磁保护判据映射到阻抗平面和功率平面两种方法，系统研究失磁保护与低励限制的配合关系，验证其定值的合理性。

关键词： 失磁保护；典型配置；低励限制；映射

Abstract: The typical configuration of loss－of－excitation protection in Ertan Hydropower Station is analyzed according to the criteria characteristics of loss－of－excitation of RCS_985 generator－transformer unit manufactured by Nanrui. Combined with the constant value of Ertan Hydropower Station, the cooperation between loss－of－excitation and low excitation limit is studied by mapping the criteria of loss－of－excitation protection under three different coordinate systems to the impedance plane and power plane, and the rationality of the constant value is verified.

Key words: loss－of－excitation protection; typical configuration; low excitation limit; mapping

中图分类号： TM713　　**文献标志码：** A　**文章编号：** 1003－6954(2012)06－0046－06

二滩水电站自1998年投运以来其发变组保护装置最长已运行13年，达到规程[1]规定的运行年限，且在运行中逐渐暴露出一些问题，例如元器件老化、采购周期长且价格昂贵等。鉴于上述原因，二滩水电站已在2012年检修过程中将5号发变组保护装置改造为南瑞RCS－985发变组保护装置。

针对大型水轮发电机组应采用合理的失磁保护配置方案，在保证发生失磁故障时能可靠动作，异常工况时不误动情况下，应能满足低励限制优先于失磁保护动作。文献[2]虽将失磁保护定子阻抗圆判据映射到$R-X$坐标系和$P-Q$坐标系中研究其与低励限制之间的关系，却未对机端低电压判据和转子侧电压判据进行研究。结合二滩水电站实际参数，通过将三种不同坐标系的失磁保护判据统一到阻抗平面和功率平面两种方法，研究其定值的合理性。

1　失磁保护配置方案

二滩水电站失磁保护配置由机端低电压判据、定子侧滴状静稳阻抗圆判据、转子侧判据和灭磁开关联跳功能组成。

1.1　低电压判据

失磁保护必须在发电机失磁后系统电压下降时迅速跳开失磁发电机，以保证系统的稳定。水电站首台机组投入运行和枯水期单机运行时，由于系统容量相对较小，系统联系电抗较大，因此失磁保护后，系统母线的电压下降很快，系统母线低电压判据的重要性尤为突出。水轮发电机失磁后，机端电压严重下降，会引起厂用系统电机过流等。

二滩水电站6台单机容量550 MW混流式水轮发电机组并联运行，文献[3]指出发电机在满负荷运行失磁时，机端电压会下降到0.8倍额定电压以下，而母线电压却难以达到该定值，因此一台机组的失磁难以引起高压母线的电压大幅下降，但会导致故障机组机端电压过低，危及厂用电系统的正常工作，因此若采用系统母线电压则可能导致失磁保护拒动，故采用机端三相同时低电压判据作为失磁保护的低电压判据。

在系统发生不对称故障时，系统不可能出现三相同时低电压，因此失磁保护不会误动。在发电机机端发生三相对称短路时，机端低电压判据会满足，但通过合理的失磁保护动作延时可以使其滞后于主保护动作，因此机端三相电压同时低判据不会在系统短路时误动。

1.2　定子侧判据

为提高定子侧判据的可靠性，保证在最恶劣的

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

运行工况下失磁保护也能可靠动作，一般以系统最小运行方式在阻抗平面上作出等有功圆、静稳圆和异步圆。若在最小运行方式下异步圆能与等有功圆相交，则选择异步圆作为失磁保护定子侧判据，否则选择静稳圆。经计算，二滩水电站实选择滴状静稳阻抗圆作为失磁保护的定子侧判据。

兼顾失磁保护的可靠性，选择滴状静稳阻抗圆作为失磁保护定子侧判据时，应与无功反向判据相结合，以消除阻抗平面一、二象限的动作区，防止静稳圆阻抗判据在非失磁工况下误动。

1.3 转子侧判据

在一些非失磁异常工况下，定子阻抗判据也会满足，为了弥补这一不足可增加转子电压判据。转子低电压是失磁过程中电量变化的显著特征之一，且能与多种非失磁故障相区分，因此增加转子电压判据可提高失磁保护的可靠性。

转子低电压判据沿用德国西门子公司的0.8 U_f，该定值是发电机在额定功率下达到静稳极限的最小转子电压值。发电机在重负荷下发生失磁故障时，定励磁低电压判据的整定值偏低，导致转子低电压判据比静稳极限判据动作要晚得多，因此需增加定值随功率变化的转子低电压判据。

1.4 灭磁开关联跳

二滩水电站发生过灭磁开关偷跳，失磁保护未动作前单原件横差保护先动作的情况，如果等待失磁保护动作，此时对系统已有较大冲击，可以增加灭磁开关联跳功能进行补充。当灭磁开关跳位开入和GCB处于合闸位置同时满足时，保护动作出口。

2 二滩水电站失磁保护参数

二滩水电站RCS－985发变组失磁保护整定所需参数见表1。

根据《四川220 kV及500 kV电力系统2011年度继电保护整定运行方案》，二滩水电站与系统的联系等值正序电抗标在容量基准值为100 MVA下计算出的标么值为0.008 0/0.011 4(大方式/小方式)。

所有公式均采用以发电机额定容量、额定电压为基准的标么值进行计算。根据表1所示参数以单台发变组为研究对象，将其外部等效为系统电源，失磁保护整定计算等值电路如图1所示。

表1 设备参数

设备	参数名称	数值
发电机	额定容量/MVA	612
发电机	额定功率/MW	550.8
发电机	额定电压/kV	18
发电机	额定电流/A	19 629
发电机	额定励磁电压/V	318
发电机	额定励磁电流/A	2709
发电机	空载励磁电压/V	159.2
发电机	强励倍数/时间/s	2/10
发电机	直轴同步电抗	0.996
发电机	交轴同步电抗	0.71
升压主变压器	容量/MVA	3×214
升压主变压器	电压kV	550/18
升压主变压器	X_T	0.15

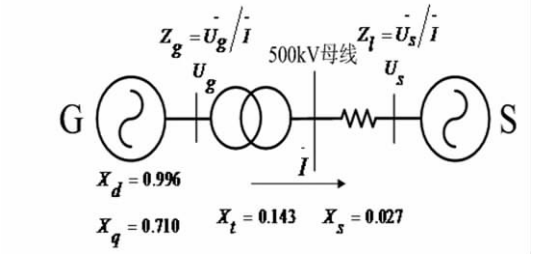


图1 失磁保护等值电路图

3 低励限制与失磁保护配合关系

南瑞RCS－985发变组失磁保护判据可以根据厂家装置技术说明书进行整定。定值的合理性主要在于研究其与低励限制的配合关系。

3.1 水轮发电机PQ功率圆

忽略发电机定子绕组电阻压降，水轮发电机相量图如图2实线所示，图中δ为内功率因数角，φ为外功率因数角。延长E_q使$AB=IX_d$，作平行线$BC//E_0$交AO于C点，以OC为直径作圆交CB于D点，过E_q点作$E_qM\perp BC$，垂足为M，则$BM=(X_d-X_q)I_d=E_0-E_q$，因此$DB=E_0$。

在图2的基础上乘以U/X_d，则三角形ABC可转化为PQ功率平面的特征三角形，如图3所示。

根据发电机定子线棒、端部和转子绕组发热限制和机组最大允许出力确定其功率允许运行区。端电压为额定电压时，以A点为$P-Q$坐标系的原点，建立同步发电机的PQ功率曲线，如图4所示。当

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

机端电压低于额定电压时，该功率曲线随之等比例缩小。由于 DB 正比于 E_0（$E_0 = I_f X_{ad}$），因此 DB 正比于 I_f，OA 则正比于空载额定励磁电流 I_0。

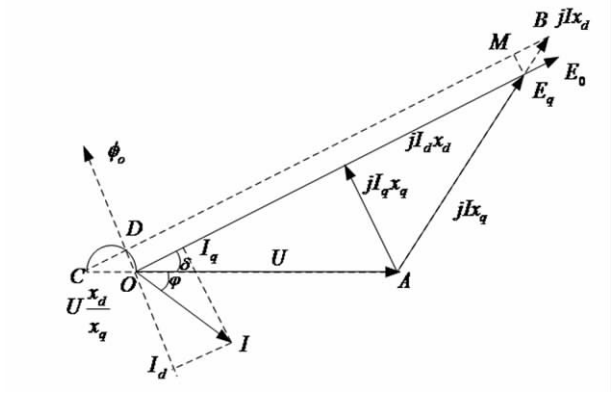


图2 凸极同步发电机相量图

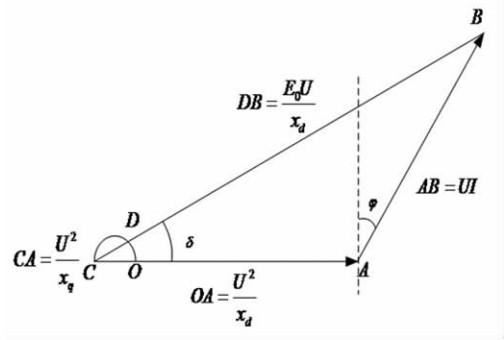


图3 功率圆特征三角形

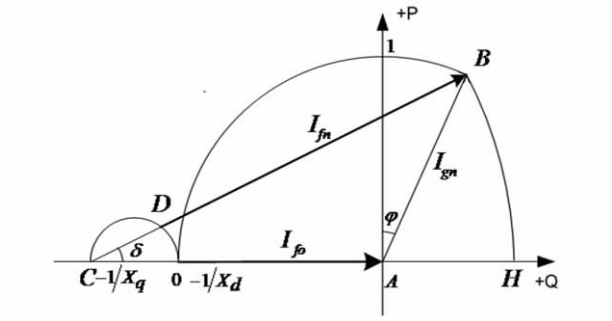


图4 PQ功率圆

二滩水电站发电机励磁系统采用的是ABB UNITROL5000型励磁调节器，该系统低励限制单元包含了额定励磁电流极限、额定定子电流极限、额定有功功率极限。由于二滩水电站在枯水期进相运行较汛期深，这里以枯水期为例进行研究。

励磁系统在自动模式时，起励电流大于空载额定励磁电流的20%，进相运行低励限制为直线，由 PQ（550 MW，－50 MVar）和 PQ（0 MW，－300 MVar）两点确定，定子电流限制曲线由发电机额定电流决定且不受机端电压影响，转子电流限制曲线由额定励磁电流决定，由此可以确定 P/Q 限制曲线，如图5中加粗线所示。

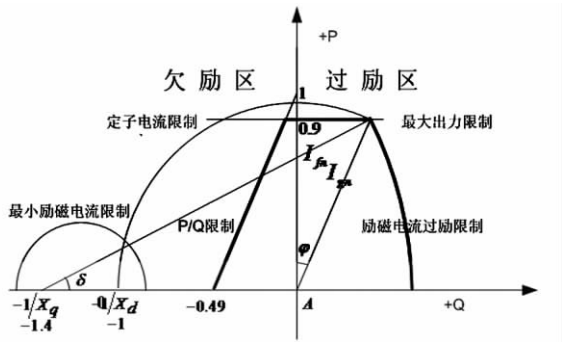


图5 P/Q 限制曲线

在机组运行过程中，机组越过 P/Q 限制曲线时，计算机控制中心会发“P/Q 曲线越限”报警信号，此时必须手动加励磁以减轻进相深度。

P/Q 限制曲线建立在 $P-Q$ 坐标系，由反演定律可知不经过反演极的直线的反演是经过反演极的圆，通过式(1)可以将其转化至图6所示阻抗坐标系，圆与横坐标交点为 M，与纵坐标交点为 N。P/Q 限制曲线在阻抗平面即为该平面第三象限圆弧 MN，当机端阻抗进入圆弧 MN 时，低励限制报警。

$$\begin{cases} r = \dfrac{PU^2}{P^2+Q^2} \\ x = \dfrac{QU^2}{P^2+Q^2} \end{cases} \tag{1}$$

式中，P 为发电机有功功率；Q 为发电机无功功率；U 为机端额定电压。

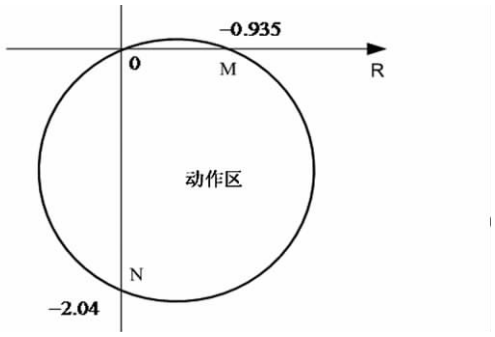


图6 阻抗平面 P/Q 限制曲线

3.2 机端低电压判据

机端三相同时低电压判据整定值如下。

$$U_{op.3ph} = 0.85 U_{gn}/n_v \tag{2}$$

式中，$U_{op.3ph}$ 为机端三相同时低电压定值；U_{gn} 为发电机额定电压；n_v 为机端TV变比。

为了将机端三相同时低电压判据转化到 $P-Q$ 坐标系，首先需计算出其阻抗特性。根据图1所示等值电路图，假定无穷大系统在单机失磁时系统电

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

压 U_s 恒定不变，机端电压为 U_g，系统负荷为 Z_l，发电机出口测量阻抗为 Z_g，则有

$$Z_l = \dot{U}_s / \dot{I} = |Z_l| e^{j\varphi} s \quad (3)$$

$$Z_g = \dot{U}_g / \dot{I} = |Z_g| e^{j\varphi} g \quad (4)$$

式(3)、(4)中，阻抗角均随负荷变化而变化。

定义 $K = |U_g| / |U_s| = 0.85$，则有

$$\dot{U}_g / \dot{U}_s = \frac{Z_g}{Z_l} = \frac{Z_l + X_t + X_s}{Z_l} = K e^{j(\varphi_s - \varphi_g)} \quad (5)$$

由式(5)可得低电压判据阻抗特性。

$$Z_g = \frac{K^2(X_t + X_s)}{K^2 - 1} + \frac{K(X_t + X_s)}{K^2 - 1} e^{j(\varphi - 2\alpha)} \quad (6)$$

式中，$\alpha = \text{arctg} \dfrac{K\sin(\varphi_s - \varphi_g)}{K\cos(\varphi_s - \varphi_g) - 1}$

式(6)是圆的方程，根据二滩水电站相关参数，其机端阻抗特性如下。

$$R^2 + (X + 0.443)^2 < 0.521^2 \quad (7)$$

由于低励限制与失磁保护之间的关系位于发电机欠励区，因此仅绘出欠励区的轨迹，其在 $R-X$ 坐标系的动作区如图7所示，动作区位于曲线1的内侧。

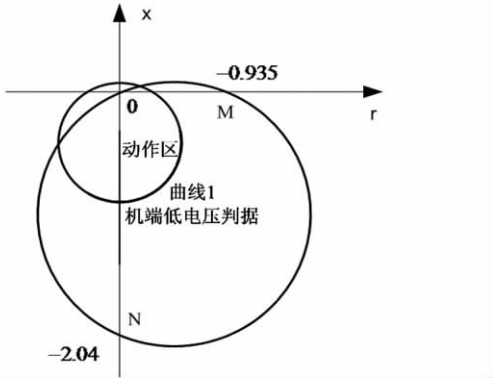


图7 机端低电压 $R-X$ 坐标系动作区

通过阻抗坐标系与功率平面的转换[4]可知，在阻抗 $R-X$ 坐标系中，对于圆心为 $(0, X_0)$、半径为 R_0 的方程可表示为

$$R^2 + (X - X_0)^2 < {R_0}^2 \quad (8)$$

映射到 $P-Q$ 坐标系的表达式为

$$P^2 + \left(Q - \frac{X_0 U^2}{{X_0}^2 - {R_0}^2}\right)^2 > \left(\frac{R_0 U^2}{{X_0}^2 - {R_0}^2}\right)^2 \quad (9)$$

由式(9)可得机端低电压判据在 $P-Q$ 坐标系下的失磁轨迹为

$$P^2 + (Q - 4.261)^2 > 5.005^2 \quad (10)$$

其映射到 $P-Q$ 坐标系的动作区如图8所示，动作区位于曲线2的左侧。

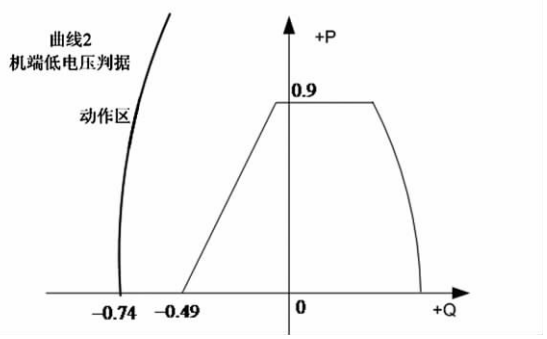


图8 机端低电压 $P-Q$ 坐标系动作区

3.3 定子侧判据

定子侧滴状静稳阻抗圆判据中系统联系电抗包含升压变压器电抗，对应于最小运行方式，整定如下。

$$X_a = X_s + X_t = 0.170 \quad (11)$$

$$X_b = -X_q = -0.710 \quad (12)$$

$$Q_{zd} = -0.090\,9\ P_{Gn} \quad (13)$$

反向无功曲线在阻抗圆上是远离定子阻抗的曲线[4]，因此研究定子侧阻抗时可不作考虑。定子侧滴状静稳阻抗圆在 $R-X$ 坐标系的动作区如图9所示，动作区位于曲线3内侧。

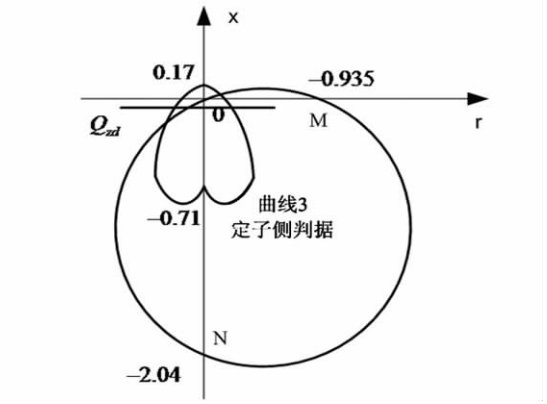


图9 定子侧判据 $R-X$ 坐标系动作区

使用作图法可以作出该判据在 $P-Q$ 坐标系的动作曲线[5]，如图10所示，动作区位于曲线4的左侧。

3.4 转子电压判据

励磁低电压判据整定如下。

$$U_{f.op} = 0.8 U_{f0} \quad (14)$$

式中，U_{f0} 为发电机空载额定励磁电压。

变励磁电压判据中对应于某一有功 P 会有维持静稳极限所必须的励磁电压 $U_{f.op}$ 与之对应，动作判据如下。

$$U_{f.op} = K_{rel}(X_d + X_s)(P - P_t) U_{f0} \quad (15)$$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

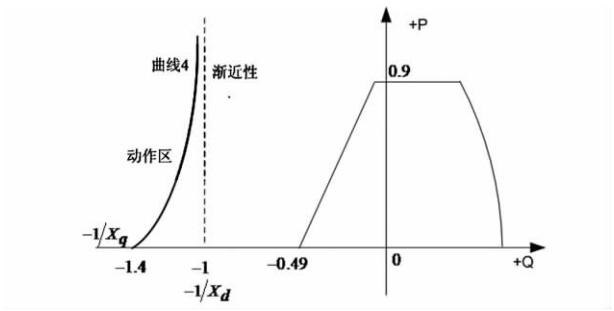


图10 定子侧判据 $P-Q$ 坐标系动作区

式中，K_{rel} 为可靠系数，取0.8；U_{f0} 为发电机空载额定励磁电压；P 为发电机当前有功功率；P_t 为发电机的凸极功率。

$$P_t=\frac{U_s^2}{2}\times\frac{X_d-X_q}{(X_d+X_s+X_t)(X_q+X_s+X_t)} \tag{16}$$

由二滩水电站的参数和式(14)、(15)可计算出转子电压判据如下。

$$\begin{cases}U_f<0.8\\U_f<p-0.07\end{cases} \tag{17}$$

从 PQ 功率圆推导过程可知，图3中 OA 和 DE 以同一比例正比于 U 和 E_0。在派克标幺值系统中 $U_f=E_0$，机端额定电压 $U=1$，空载额定励磁电压为 $U_{f0}=1$，OA 也可以看作空载额定励磁电压 U_{f0}，DB 可以看作是产生 E_0 的励磁电压 U_f。将转子电压判据映射到 $P-Q$ 坐标系的近似动作区如图11所示[6]，其中曲线5为定励磁低电压判据，曲线6为变励磁低电压判据，动作区位于曲线5、曲线6左侧。

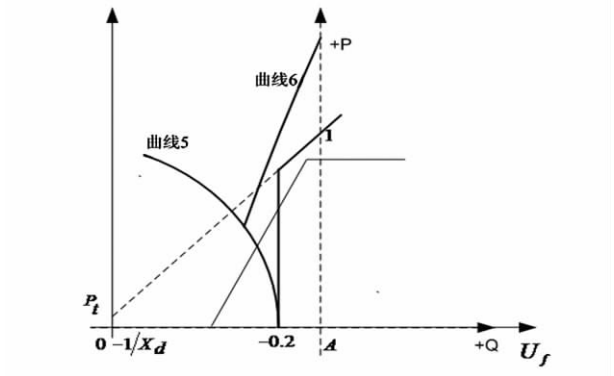


图11 转子电压判据映射到 $P-Q$ 坐标系动作区

由图11可以看出，在重负荷下发生失磁故障时，水轮发电机进入转子变励磁电压判据曲线6的速度要比励磁低电压判据曲线5的速度快。转子电压判据通过式(1)可得到其在 $R-X$ 坐标系的动作区，如图12所示。

3.5 失磁保护逻辑图

二滩水电站失磁保护投 I 段和 II 段，I 段延时1.5 s 报警，II 段延时1.0 s 切机，其逻辑图如图13所示。

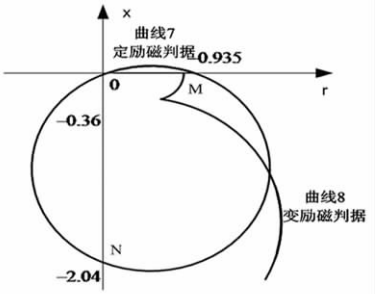


图12 转子电压判据映射到 $R-X$ 坐标系动作区

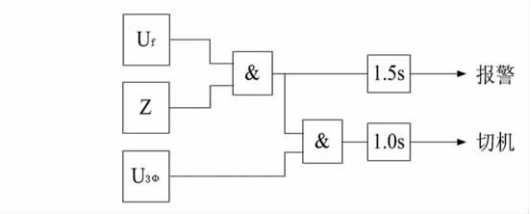


图13 失磁保护逻辑图

3.6 低励限制与失磁保护配合关系

通过失磁保护计算，已经将失磁保护中的三个判据转换到 $R-X$ 坐标系和 $P-Q$ 坐标系中。由逻辑图13可知，3个判据为相与的关系，因此必须三个判据同时满足时失磁保护才会动作。在 $R-X$ 坐标系的图14和 $P-Q$ 坐标系的图15可以验证失磁保护与低励限制配合关系满足低励限制能优先于失磁保护动作，且存在一定的稳定裕度。

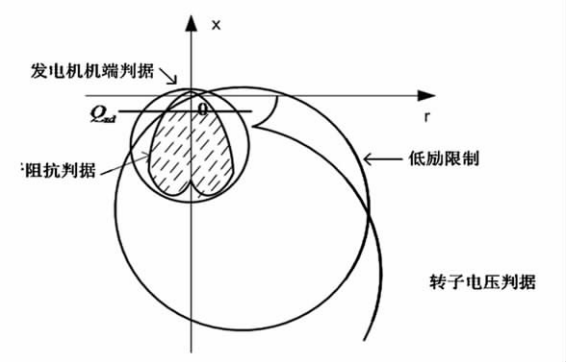


图14 $R-X$ 坐标系低励限制与失磁保护配合关系

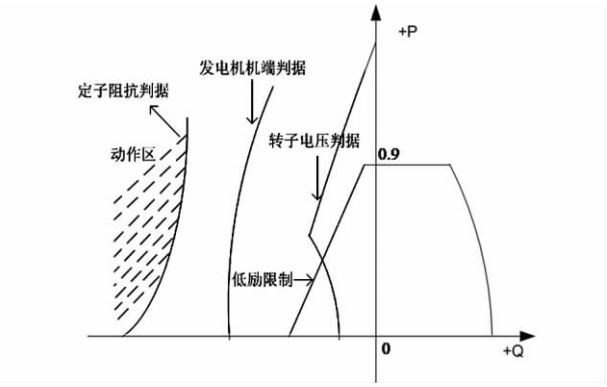


图15 $P-Q$ 坐标系低励限制与失磁保护配合关系

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4 结 语

介绍了二滩水电站RCS－985发变组失磁保护配置方案，并对其采用相应判据的原因作了阐述。结合二滩水电站保护定值和实际运行参数将失磁保护不同坐标系内的判据分别映射到$R-X$坐标系和$P-Q$坐标系，验证了失磁保护与低励限制的配合关系符合国网公司《发电厂并网安全性评价》中低励限制优先于失磁保护动作的要求。

参考文献

[1] DL/T 587－2007，微机继电保护装置运行管理规程[S].

[2] 刘伟良，荀吉辉，薛玮. 发电机失磁保护与低励限制的整定配合[J]. 电力系统自动化，2008，32(18)：77－80.

[3] 殷建刚，彭丰，杨平，等. 发电机失磁保护中系统低电压判据的探讨[J]. 电力自动化设备，2003，23(12)：28－31.

[4] 赵华，吴春红. 两种坐标系下发电机低励限制整定与失磁保护配合[J]. 河南电力，2010(3)：12－14.

[5] DL/T 684－1999，大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S].

[6] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京：中国电力出版社，2002：186－262.

作者简介：

季 杰(1987)，男，本科，助理工程师，从事发电厂继电保护工作；

黄建琼(1984)，女，硕士，工程师，从事发电厂监控系统工作。

(收稿日期：2012－05－22)

(上接第42页)

设计初，常闭母联开关运行时默认为闭合，如图3所示，备自投允许信号中，没有考虑常闭母联开关信息。由于常闭开关配置保护具备切除故障的能力，所以在实际运行中，存在常闭开关跳开的情况。如表2所示，在3 M带3 M、4 M带4 M的工况下，如果母联电缆发生故障，跳开常闭开关，3、4 M均不失电，RS触发器不闭锁备自投。这时再发生3 M或4 M失电，备自投合一备G03K04，常闭开关G04K03已断开，一备G03K04在合位不会启动合二备的逻辑流程，造成母线失电。通过分析，在以上工况下，RS触发器不能解决问题。

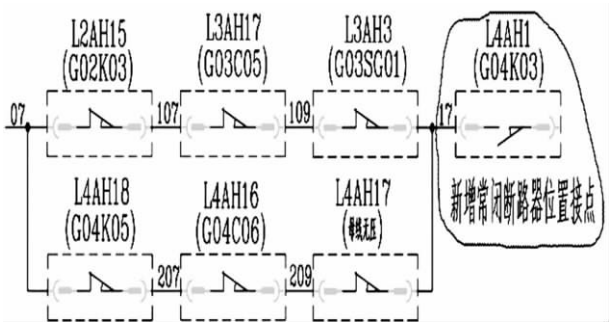


图6 G03K04合闸闭锁回路

无论是保护动作跳开常闭开关，还是其他原因跳开常闭开关，对不同的母线，应单独闭锁与常闭开关相连参与备自投的常开母联开关(一备或二备)，而不是闭锁整个母线的备自投。要解决这个问题，必须引入常闭开关状态信息，在开入有限的情况下，在备自投逻辑里很难实现。经过研究，采用如图6所示的方案，即在常开开关硬接点合闸闭锁逻辑里，引入常闭开关位置接点。常闭开关跳开时，如果母线失电，闭锁常闭母联开关的合闸，常闭母联开关备投合闸失败，延时合其他备投电源使恢复母线供电。

4 结 语

水电站建设日新月异，厂用电接线方式日趋复杂，使备自投逻辑设计难度也相应增加。结合溪洛渡电站的实际情况，通过对备自投设计过程中，备自投的开入、工作模式、闭锁和合闸闭锁等问题的探讨，解决了备自投设计的多个问题，对保障系统安全、稳定、可靠的运行具有重要意义，同时对于其他电站备自投装置的设计有一定的实际借鉴意义。

作者简介：

李光耀(1986)，男，助理工程师，从事继电保护维护管理工作。

(收稿日期：2012－05－22)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

四川220 kV变电站仿真培训考核系统的设计与实现

赵梓蓉
(四川电力科学研究院,四川 成都 610072)

摘 要: 介绍了变电站仿真培训考核系统的设计和实现,变电站仿真培训考核系统在变电站仿真培训系统的基础上增加了考核的功能,使之更能满足实际需要。

关键词: 仿真培训考核系统; 变电站; 事故处理

Abstract: The design and implementation of substation simulation and training evaluation system are described, which has added the function of evaluation on the basis of the substation simulation and training system, so that it can meet the actual needs.

Key words: simulation and training evaluation system; substation; accident treatment
中图分类号: TM69 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2012)06-0052-02

0 前 言

变电站运行人员的技术素质对变电站的安全稳定运行至关重大,培训和考核是提高变电站运行人员素质的必然途径。增强培训和考核的有效性也就是为电力系统始终不移的追求目标,变电站仿真培训考核系统就是这一努力的结果。该系统有两个突出的特点,一是受训人员可自我测评,发现自己的薄弱环节,更有针对性的学习; 二是受训人员的考核由以往单纯的教师评分改为电脑评分、教师核实,大大提高了考核的公正公平。通过变电仿真培训和公平公正的考核,可以有效地提高变电站运行人员的操作运行水平及现场分析处理事故的能力,使运行人员能够有效防范事故发生及能够在事故发生后正确处理,保证电网安全运行。

1 仿真培训考核系统的设计

基于变电站仿真培训系统的大力发展,根据变电站运行值班员工作实际需要,总结实际工作、变电运行培训、考核经验,根据现行有关变电仿真培训系统模型,在系统基础上扩展开发研究相应的教学培训考核系统,教学培训考核系统是以往仿真培训系统还没有达到的一个重要环节。

变电站仿真培训考核系统的设计采用C/S模式,这是对系统的支撑平台和开发技术的一种新的探索。采用C/S模式将有利于变电站学员在异地进行远程培训,从而使得系统更加实用,更能满足实际需求。通过采用C/S方式对系统进行设计,可以有效地共享系统中的公共资源,具体做法是将一些公共的资源放在服务器中,其他模块需要使用时,通过网络访问资源,避免了资源的重复放置,从而提高了系统资源利用率并降低了系统成本。

变电站仿真培训考核系统是采用纯软件模式设计开发的,主要包括两个部分: 教练机和学员机,教员机和学员机通过网络进行连接。在培训时、学员在装有客户端的学员机上操作,学员机连接到服务器并进行监控然后应对处理。教员机负责对整个变电站的运行情况进行仿真模拟,学员机的客户端连接到教员机上获取相关的数据,教员在教员机上对学员进行指导。在结构上,变电站仿真子系统是整个系统的基础,总控模块对整个系统的各个模块进行管理。其中考核子系统的主要内容有: 变电站安全规程、变电站运行规程考核、倒闸操作及评分、事故处理及评分。

2 考核系统数学模型的创建与应用

2.1 事故处理考核模块数学模型

培训系统主要目的是培训,而培训的效果到底如何,需要按评分标准量化为分数。按照百分制,

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

a_1、a_2、a_3 分别为记录故障现象、设计故障处理方案和故障处理操作各部分的总分，可由教员事先确定，它们总和为100。R_1、R_2、R_3 分别是学员在这三个部分的得分，它们的总和作为最后学员的总得分。

学员在一记录故障现象部分的得分公式为

$$R_1 = \frac{a_1}{n_1} n_r \tag{1}$$

式中，n_1 为故障现象标准答案的总数；n_r 为学员提交的描述故障现象的正确信息的总数。

学员在设计故障处理方案部分的得分公式为

$$R_2 = \sum_{i=1}^{n_2} W_i n_2 K_i \tag{2}$$

式中，n_2 为故障处理步骤标准答案的总数；W_i 为第 i 步骤中的分值权重；K_i 为第 i 步骤的正误系数。

学员在故障处理操作部分的得分公式为

$$R_3 = \frac{\sum_{k=1}^{n_1} \left(a_1 - m_k \frac{a_1}{n_k} \right)}{n_3} \tag{3}$$

式中，n_3 为步骤总数；m_k 为第 k 次错误的设备总数；n_k 为第 k 次操作需要的设备总数。

待学员完成所有任务后，系统给出评价报告。

2.2 倒闸操作考核模块的实现

为了便于说明倒闸操作模块，截取模拟变电站的电气1号220 kV出线接线为例，操作逻辑函数从初始态到目标态的每一步转换过程如表1所示。

表1 元件状态转换

操作步骤	元件状态		
	K_{001}	K_{0013}	K_{0011}
1	0	1	1
2	0	0	1
3	0	0	0

从表1中，001为1号220 kV出线断路器，0013、0011分别为001两侧隔离开关，从表1可以得出各设备的操作逻辑函数为

$F(K_{001}) = K_{0011} \cdot K_{0013}$，表示要操作 K_{001}，K_{0011} 和 K_{0013} 应在合的状态；

$F(K_{0011}) = \bar{K}_{001} \cdot \bar{K}_{0013}$，表示要操作 K_{0011}，K_{001} 和 K_{0013} 应在分的状态；

$F(K_{0013}) = \bar{K}_{001} \cdot K_{0011}$，表示要操作 K_{0013}，K_{001} 应在分的状态，K_{0011} 应在合的状态。

操作时即可取出相应设备操作逻辑函数进行计算以确定该设备的可操作性。逻辑函数值等于1表示可执行操作，逻辑函数值等于0表示不可执行操作。例如对应以上线路，若有 $K_{001}=1$，$K_{0011}=1$，$K_{0013}=1$ 且计算各元件操作逻辑函数值有

$F(K_{001}) = K_{0011} \cdot K_{0013} = 1$，说明现在可执行断路器操作；

$F(K_{0011}) = \bar{K}_{001} \cdot \bar{K}_{0013} = 0$，说明隔离开发 K_{0011} 不能操作；

$F(K_{0013}) = \bar{K}_{001} \cdot K_{0011} = 0$，说明隔离开发 K_{0013} 也不能操作。

同理可以得到各个设备的操作逻辑函数等。

倒闸操作考核模块对学员的倒闸操作进行考核，这里针对仿真与现场实际的比照首次提出了属于潜在危害的完整性评估、正确性评估、操作顺序评估3个方面的校验层次。

(1) 完整性评估：完整性评估主要是评估操作是否完整，是否有被遗漏的步骤。因为遗漏的步骤会带来非常严重的后果，有的遗漏操作并不能“立竿见影”地显现出来，而是为变电站工作埋下了严重的安全隐患。

(2) 正确性评估：正确性评估主要是评估操作是否正确。错误的操作往往会带来严重的错误，因此必须在对学员进行培训时加强这方面的培训，进而提高学员的操作水平，提高变电站的安全性。

(3) 操作顺序评估：操作顺序评估是评估操作的顺序是否正确。在一些步骤多的操作中，由于学员不是很熟悉操作，因此往往会导致操作的时候，顺序不完全正确。在对变电站的操作中必须确保每一次操作中的所有顺序都是正确的，不正确的操作后果不堪设想。因此在对学员的培训中要特别注意对操作顺序的评估，以使得学员能够完全正确的操作。

根据以上的情况，设计了一次设备评价内容分类和评分标准。对于一次设备操作的评价扣分细则分为实时的危害和潜在危害。当学员操作发生实时危害时，即带电合接地开关等，则终止操作扣完分值。当系统判断学员潜在危害，学员每错误操作一次扣除相应分值，潜在危害通过一次设备操作顺序、一次设备操作正确性、一、二次设备配合操作顺序对操作的评分评价。误拉合一次设备的非本次任务的误拉校验，主要是通过特殊规则(非通用规则)来校验操作人员是否拉合设备，校验既包括了对一次设备也包括了二次设备投退的校验，操作了本次任务以外的设备，至于一次设备的本间隔误拉合设备校验是通过“五防”来控制的。

(下转第94页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

…… 黄冰心 龚国兴 赵莉华(32)
110 kV庄北变电站保护定值整定中存在的问题及解决方案 …… 刘高会 刘 敏 师耀林 等(36)
水电站10 kV备自投设计的相关问题及解决方案 …… 李光耀 龚林平 封孝松 等(40)
发电机定子接地保护动作原因分析及故障处理 …… 白 伟(43)
三种失磁保护判据与低励限制配合研究 …… 季 杰 黄建琼(46)
四川220 kV变电站仿真考核系统的设计与实践 …… 赵梓蓉(52)
不同憎水性绝缘子串覆冰电场仿真分析 …… 张 湘 聂鸿宇 龚奕宇(54)
基于K-L特征提取与支持向量机的油浸式变压器故障诊断模型研究 …… 方 飚(58)
基于气相色谱法测油中乙炔含量的不确定度研究 …… 钟 诚(62)
温度对环氧树脂空间电荷特性影响的研究 …… 王青山 陈少卿(65)
城市变电站噪声分析与治理 …… 苟旭丹(68)
排油注氮装置重锤误动引发的主变压器事故分析 …… 刘元生(73)
《油浸式变压器测温装置现场校准规范》规程解读 …… 田 宇(76)
大型双馈异步风力发电机组变桨控制算法研究 …… 丁艳军(80)
微油点火在600 MW超临界W火焰炉的应用研究 …… 刘鹏远 肖宏博 谢明均 等(86)

(上接第53页)

设计的二次设备的校验涉及部分操作顺序校验中的一、二次设备的操作顺序配合以及正确性校验的内容。二次设备的评价,通过潜在操作危害的评价分为:一、二次设备配合顺序评价和操作的正确性评价。操作顺序是否正确,操作项目是否正确,通过对系统模拟对应操作任务数据的统计,相应对二次设备的操作做出电脑性的评分和校验,打印出相关成绩评价。

巡视设备检查项、二次设备的投切漏项检查项、过程操作检查项并不是固定出现的,操作票的操作任务不一样使得这些检查项完全没有固定的模式,甚至在一个操作票中根本没有上述检查项的存在,这些检查项的校验就只能通过非通用规则来进行。

(4)操作效率(时间)评估:操作效率,即对学员的操作时间的评分评估,一旦学员操作超出规定时间范围内,每超出一定时间扣除相应分值。该系统作为评价标准。

2.3 事故处理模块简析

由于事故处理涉及范围较广,以下以主变压器瓦斯保护的故障作简要分析。

主变压器瓦斯保护的故障需要用到仿真系统中的"故障名称表"如表2所示。

3 结 语

对220 kV变电站仿真培训考核系统进行了分析设计,并实现了培训考核系统的相关功能。该系统可以极大地提高变电培训考核效率,对公平公正的考核学员,提高变电站运行人员的操作技能,降低事故风险起到很好的培训考核作用,更有利于公平选拔培养优秀运行技能人才,能很好的杜绝人为考核的暗箱操作。

表2 故障名称表

类名	FTYPENAME	
成员变量	CString Code	代码
	CString CHNName	故障类型
	…	…

判断出CString FTYPENAME::CHNName = = "匝间短路"就可以识别故障。

参考文献

[1] 张东英,杨以涵. 变电站仿真培训综述[J]. 电力系统自动化,1999,23(23):11-14.
[2] 张东英,葛亮,杨以涵,等. 500 kV综合自动化变电站仿真培训系统的实现[J]. 电网技术,2001,25(6):64-66.
[3] 董朝霞,王乘,杨峰,等. 新一代电网调度员培训仿真系统[J]. 计算机仿真,2003,20(2):123-125.
[4] 陈天翼,邱家驹,邱淘西. 电力系统虚拟现实场景开发研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2000,12(5):7-10.
[5] 姜芳芳,来文青,龚庆武,等. 虚拟现实在变电站仿真培训系统中的应用[J]. 高电压技术,2005,31(7):68-70
[6] 龚庆武,姜芳芳,陈义飞. 基于虚拟现实技术的变电站仿真培训系统[J]. 电网技术,2005,29(24):74-77.

(收稿日期:2012-06-01)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

不同憎水性绝缘子串覆冰电场仿真分析

张 湘[1]，聂鸿宇[2]，龚奕宇[2]
（1. 自贡电业局，四川 自贡 643000；2. 四川电力科学研究院，四川 成都 610072）

摘 要： 已有研究表明，通过涂覆憎水性材料可减少绝缘子覆冰量，并提高其覆冰闪络电压。目前使用较为广泛的为RTV涂料，但近年来，国内外一些研究人员研制出了仿荷叶超疏水涂料，其静态接触角超过160°，将其涂覆于绝缘子表面，取得了良好的防覆冰效果。根据普通玻璃绝缘子、涂覆RTV涂料绝缘子以及涂覆有超疏水涂料绝缘子的实际覆冰形态，建立了覆冰绝缘子串电场仿真模型，并进行了仿真分析。结果表明，在相同外施电压下，超疏水绝缘子串模型的最大表面电场与电场不均匀系数均低于RTV绝缘子串模型以及无涂层玻璃绝缘子串模型。研究成果对于防止绝缘子串覆冰闪络事故具有积极的指导意义。

关键词： 绝缘子；憎水性；覆冰；电场；仿真

Abstract: There are some studies shown that the ice – covered quantity of insulator can be reduced and ice – covered flashover voltage can be improved by coating the hydrophobic materials. At present, the RTV coating materials are more widely used. In recent years, however, the domestic and foreign researchers have developed the lotus leaf imitated super – hydrophobic coatings, whose static contact angle exceeds 160°, and a good anti – icing effect is obtained by coating it on the surface of the insulator. According to the actual ice – covered state of the common glass insulator, the RTV – coated insulator and the insulator coated with super – hydrophobic coatings, the simulation model for the electric field of the iced insulator string is established and the simulation analysis is carried out. The result shows that, under the same applied voltage, both the maximum surface electric field and the electric field uniformity coefficient of the hydrophobic insulator strings model is less than that of the RTV insulator string model as well as the uncoated glass insulator string model. The research has a positive significance to prevent the icing flashover accident of insulator strings.

Key words: insulator; hydrophobic nature; ice coating; electric filed; simulation

中图分类号： TM855 **文献标志码：** A **文章编号：** 1003 – 6954(2012)06 – 0054 – 04

0 引 言

输电线路覆冰易造成导线舞动、断线、倒杆（塔）、绝缘子闪络、线路跳闸、甚至使电网瘫痪等事故，严重威胁电力系统的安全运行，影响人们正常的生产和生活，从而造成巨大的经济损失和一定的社会影响[1-4]。2012年年初，持续低温雨雪天气导致南方电网部分电力线路出现严重覆冰，贵州和广西电网共有超过20条500 kV输电线路出现闪络导致跳闸等覆冰事故。随着全球气候变暖影响，极端天气事件频繁出现，输电线路发生冰雪灾害事故的概率有所上升，如何防止输电线路防覆冰，提高绝缘子串冰闪电压显得更加重要和迫切。

目前，国内外研究和探索过30多种防冰除冰方法[5]，其中，憎水性涂料具有优良的憎水性和低表面性能特性，能最大限度地减小过冷却水的被捕获率或冰的附着力，使其极易脱落和除去，且无需附加能量，有助于限制冰灾，可以达到绝缘子防覆冰的目的[6]。文献[7]考察了在雨凇环境中，RTV涂层对735 kV绝缘子串覆冰闪络特性的影响，涂覆RTV硅橡胶涂层后，绝缘子串的最大耐受电压提高了11%。近年来，仿“荷叶”超疏水表面的研究有了重大突破，该表面憎水性比RTV涂料更强，水滴静态接触角通常大于150°，水滴滚动角可小于5°。相关研究表明，超疏水涂料比RTV涂料具有更好的防覆冰效果[8]。

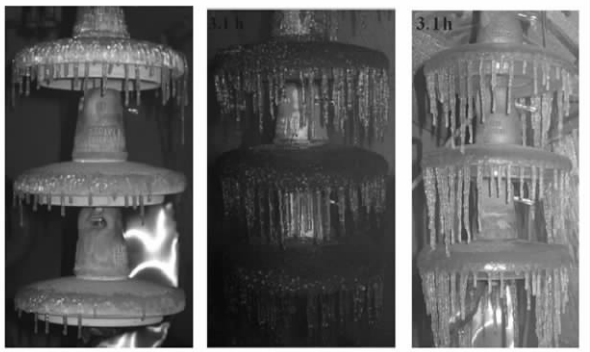
根据FC100/146型玻璃绝缘子串的实际结构与尺寸，并结合普通玻璃绝缘子、涂覆RTV涂料绝缘子以及涂覆有超疏水涂料绝缘子的实际覆冰形态，建立了覆冰绝缘子串电场仿真模型，并进行了仿

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

真分析。研究内容对于防止绝缘子串覆冰闪络事故具有积极的指导意义。

1 不同憎水性绝缘子串覆冰形态

文献[8]对普通玻璃绝缘子、涂覆RTV涂料绝缘子以及涂覆有超疏水涂料绝缘子进行了覆冰试验，在-5 ℃、雨量为90 L/h·m^2、风速为3 m/s的环境下覆冰3 h后，这3种绝缘子的覆冰形态如图1所示。绝缘子局部覆冰形态如图2所示。



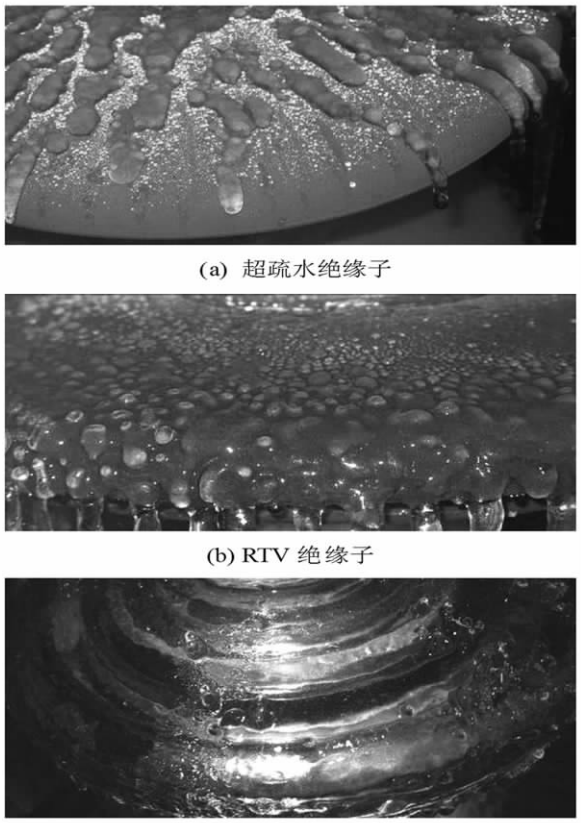
(a) 超疏水绝缘子　(b) RTV绝缘子　(c) 普通绝缘子

图1　覆冰约3 h后的覆冰形貌图

经历约3 h人工覆冰实验后，超疏水玻璃绝缘子串上的覆冰量、伞裙边沿的冰凌长度均明显小于其他两种绝缘子串上的覆冰量。图2显示，超疏水玻璃绝缘子伞群上表面分布着少量相互孤立的冰珠或条状覆冰，伞群边沿冰棱较短且稀疏；涂覆RTV硅橡胶涂层玻璃绝缘子伞群表面的过冷却水滴已经被冻结成很厚的冰层，冰层表面粗糙，牢固地覆盖在整个伞群表面，局部区域冰层不连续，伞群边沿的冰凌粗而密集；无涂层玻璃绝缘子表面的过冷却水滴也被冻结成厚厚的冰层，冰层表面相对平整而透明，伞群边沿的冰凌最密集，长度也最长。

2 覆冰绝缘子串电场仿真模型

根据FC100/146型玻璃绝缘子串的实际结构与尺寸，并结合普通玻璃绝缘子、涂覆RTV涂料绝缘子以及涂覆有超疏水涂料绝缘子的实际覆冰形态，利用Maxwell电磁场仿真软件建立了二维覆冰绝缘子串电场仿真模型，模型如图3所示。FC100/146型玻璃绝缘子的参数如表1所示。

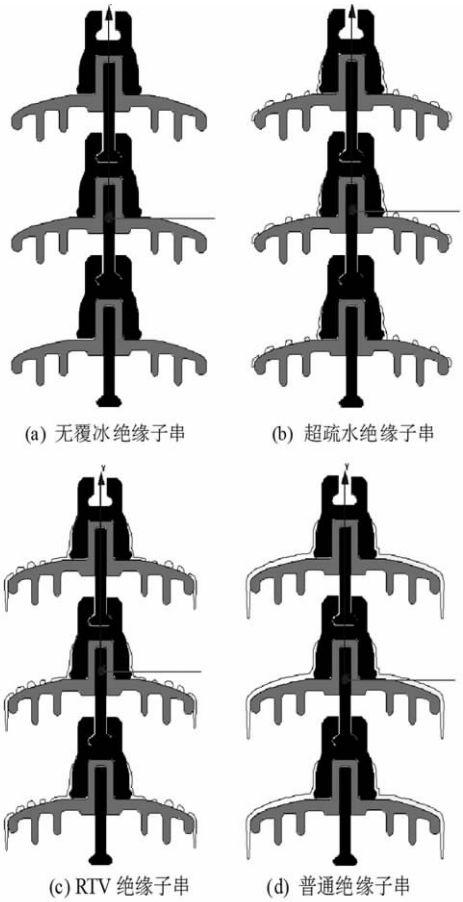


(a) 超疏水绝缘子

(b) RTV绝缘子

(c) 普通绝缘子

图2　覆冰约3小时后不同绝缘子上的覆冰形貌



(a) 无覆冰绝缘子串　(b) 超疏水绝缘子串

(c) RTV绝缘子串　(d) 普通绝缘子串

图3　不同憎水性绝缘子串覆冰电场仿真模型

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 FC100/146玻璃绝缘子参数

型号	结构高度 H/mm	盘径 D/mm	爬电距离 L/mm
FC100/146	146	255	320

3 仿真及结果分析

建立好模型后，按照以下步骤进行电场仿真。

(1) 选择求解器。这里选择静电场求解器。

(2) 设置材料属性，包括电导率、介电常数、磁导率。这里所有材料均选择材料库中默认材料。

(3) 设置激励源和边界条件。将外加激励电压设置为35 kV，施加于底部绝缘子挂钩处，顶端绝缘子高帽设置为零电位。

(4) 自适应网格剖分。

(5) 设置有限元计算参数，包括步长、精度、收敛条件等。这里选择默认设置。

(6) 有限元计算。

(7) 后处理。在后处理模块中，可以观察电场强度云图、电场大小等参数。

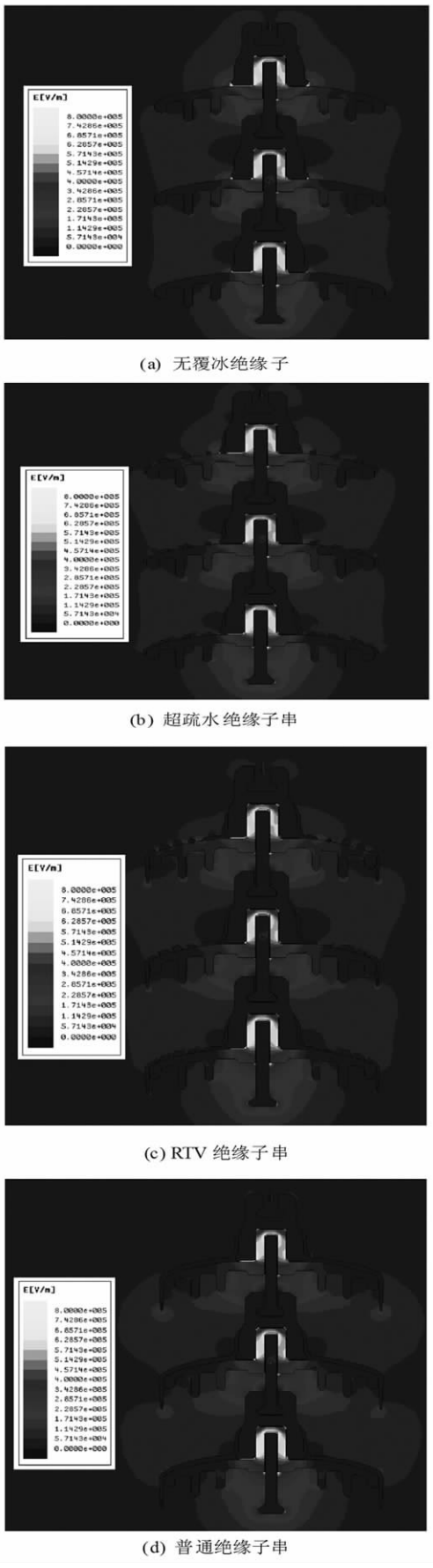
仿真时，忽略了实际输电线路中输电导线、铁塔等对绝缘子串表面电场的影响。仿真所得到的绝缘子串电场云图如图4所示。

将绝缘子串从上至下分别编号为1、2、3号绝缘子。由仿真结果可知绝缘子串钢帽、挂钩钢脚处电场强度较高，易引起局部电弧，从而导致绝缘子闪络；覆冰后，钢帽处电场强度有所下降，而挂钩钢脚处电场强度明显增强，说明覆冰后绝缘子串闪络很可能由挂钩处开始发展；绝缘子伞群边沿冰棱越长，绝缘子底部电场分布越不均匀，冰棱尖端电场明显加强，这将导致电弧会沿着冰棱尖端发展，缩短了绝缘子的爬电距离，增大了绝缘子串闪络概率。将电场不均匀系数f定义为表面最高电场强度E_{max}与平均电场强度E_a的比值[9-10]，即

$$f = E_{max}/E_a \quad (1)$$

不同憎水性绝缘子串不同位置绝缘子表面最高电场强度E_{max}与平均电场强度E_a分别如图5与图6所示。根据式(1)计算出来的不均匀系数f如图7所示。

由图5可知，与没有覆冰的绝缘子串相比，覆冰后，RTV绝缘子模型和无涂层普通绝缘子模型表面最高电场几乎不变，而超疏水绝缘子模型表面最高



(a) 无覆冰绝缘子

(b) 超疏水绝缘子串

(c) RTV绝缘子串

(d) 普通绝缘子串

图4 不同憎水性绝缘子串覆冰电场仿真模型

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

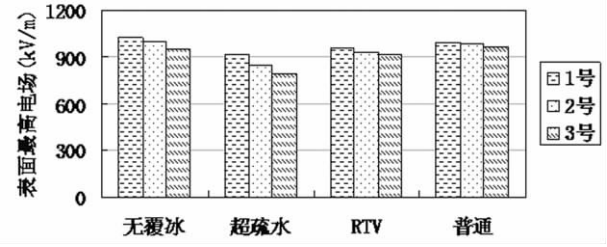


图5 不同位置覆冰绝缘子表面最高电场强度

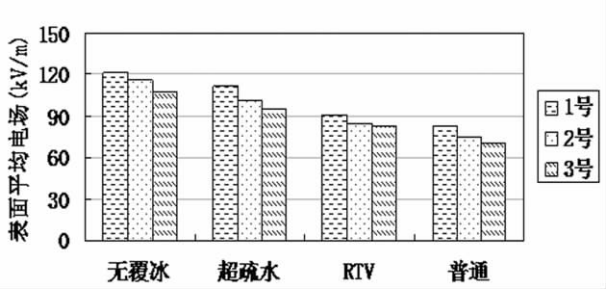


图6 不同位置覆冰绝缘子表面平均电场强度

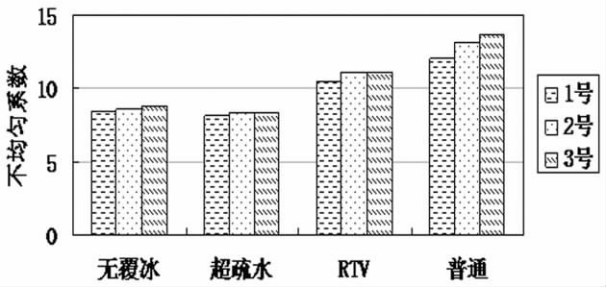


图7 不同憎水性绝缘子表面电场不均匀系数

电场下降约9%。由图6可知,与没有覆冰的绝缘子串相比,覆冰后,3种绝缘子模型表面平均电场强度均有所下降。

表面电场不均匀系数结果表明,RTV绝缘子模型和无涂层普通绝缘子电场不均匀系数均高于没有覆冰时的电场不均匀系数,且无涂层普通绝缘子电场不均匀系数最高,而超疏水绝缘子电场不均匀系数与没有覆冰时的电场不均匀系数相差不大。

相关研究表明,绝缘子沿面闪络电压的大小与表面电场不均匀系数成反比[11],因此可以推断,覆冰后,普通绝缘子串的覆冰闪络电压最低,RTV绝缘子串的覆冰闪络电压稍高,而涂覆超疏水涂层后的绝缘子串闪络电压最高。表明憎水性涂料可提高覆冰后绝缘子的覆冰闪络电压,且憎水性越强,效果越好。

4 结 论

根据FC100/146型玻璃绝缘子串的实际结构与尺寸,并结合普通玻璃绝缘子、涂覆RTV涂料绝缘子以及涂覆有超疏水涂料绝缘子的实际覆冰形态,建立了二维覆冰绝缘子串电场仿真模型,并进行了电场仿真分析,以上工作可总结如下。

①覆冰后,钢帽处电场强度有所下降,而挂钩钢脚处电场强度明显增强,说明覆冰后绝缘子串闪络很可能由挂钩处开始发展。

②绝缘子伞群边沿冰棱越长,绝缘子底部电场分布越不均匀,冰棱尖端电场明显加强。

③与没有覆冰的绝缘子串相比,覆冰后,RTV绝缘子模型和无涂层普通绝缘子模型表面最高电场几乎不变,而超疏水绝缘子模型表面最高电场下降约9%。同时3种绝缘子模型表面平均电场强度均有所下降。

④表面电场不均匀系数结果表明,超疏水绝缘子电场不均匀系数最小,与没有覆冰时的电场不均匀系数相差不大。

⑤憎水性涂料可提高覆冰后绝缘子的覆冰闪络电压,且憎水性越强,效果越好。

参考文献

[1] 孙才新,司马文霞,苏立春. 大气环境与电气外绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
[2] 蒋兴良. 输电线路导线覆冰机理和三峡地区覆冰规律及影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1997.
[3] 张宏志. 大面积导线覆冰舞动事故的调查与分析[J]. 东北电力技术, 2001(12): 15-19.
[4] 逯梅,史惠萍. 绝缘子的覆冰及覆冰绝缘子的放电特性[J]. 广西电力技术, 1995(3): 20-24.
[5] 蒋兴良,张丽华. 输电线线路除冰防冰技术综述[J]. 高电压技术, 1997, 23(1): 73-76.
[6] 蒋兴良,肖代波,孙才新. 憎水性涂料在输电线路防冰中的应用前景[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 13-18.
[7] M. J. Mashmool, C. Volat, M. Farzaneh. A New Method for Measuring Ice Adhesion Strength at an Ice-substrate Interface[J]. Hydrol. Process, 2006, 20: 645-655.
[8] 赵玉顺. 绝缘子超疏水涂层的制备方法与防冰性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
[9] 邱毓吕,施围,张文元. 高电压工程[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.
[10] 朱德恒,严璋. 高电压绝缘[M]. 北京: 水利电力出版社, 1980.
[11] 成俊奇,丁立健. 绝缘子表面电场分布的数值仿真[J]. 电磁避雷器, 2009(6): 16-18.

(收稿日期: 2012-10-23)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基于K－L特征提取与支持向量机的油浸式变压器故障诊断模型研究

方 飚
(四川省电力工业调整试验所,四川 成都 610072)

摘 要: 针对变压器多故障问题,提出了基于Mercer核函数的欧式距离查询策略算法,并建立了基于Karhunen－Loeve(K－L)特征提取与支持向量机的变压器故障诊断模型,利用K－L变换提取信号的特征值,最后通过支持向量机学习算法完成对信号的选择与分类。通过实例应用表明:所训练的SVM分类器较之直接任意选取训练样本作为训练集的传统方法具有更高的诊断率。

关键词: 油浸变压器; 故障诊断; 支持向量机; K－L特征提取

Abstract: Aiming at the multi－fault problems of transformer, the Euclidian distance query algorithm based on Mercer kernel function is proposed and a model based on Karhunen－Loeve (K－L) feature extracting and support vector machine (SVM) is established for fault diagnosis of oil－immersed transformer, the eigenvalue of signal is extracted using K－L transform, and finally, the SVM learning algorithm is introduced to select and classify the training sample data. The result shows that the precision of the trained SVM classifier is better than that of the traditional method, and the reliability and effectiveness using the above mentioned method are satisfied in fault diagnosis.

Key words: oil－immersed transformer; fault diagnosis; support vector machine; K－L feature extracting

中图分类号: TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003－6954(2012)06－0058－04

变压器是电力系统中的重要设备,其运行状态直接影响到系统的安全性。油中溶解气体分析(dissolved gas analysis,DGA)是目前诊断充油电气设备故障的重要手段,已作为变压器内部潜伏性故障的主要试验项目列于DL/T 596－1996变压器试验项目的首位[1]。DGA往往能够较准确、可靠地发现逐步发展的潜伏性故障,防止由此引起重大事故。近年来的研究已将各种人工智能技术如神经网络、粗糙集、聚类算法、支持向量机等引入到变压器的故障诊断当中。

支持向量机算法[2－5]是在统计学理论基础上发展起来的一种新的模式识别方法。它是由Vapnik等人于1995年提出的从统计学习理论发展出的一种模式识别方法,是目前较为流行的适用于小样本训练的大边缘分类器。

K－L变换是经典的传统方法,适用于任何概率分布,它能保留原样本中方差最大的数据分量,所以K－L变换起了减小相关性、突出差异性的效果,因此是在均方误差最小的意义下获得数据降维的最佳变换。

这里针对变压器的5种运行模式(4种故障模式与1种正常运行模式)提出了建立基于支持向量机与K－L特征提取技术的变压器故障诊断模型。该模型的基本思想是在训练数据预选取阶段采用基于Mercer核函数的欧式距离的查询策略选取最能代表各类的样本数据,从而能够更加准确地构造SVM分类器,减少训练样本数和缩短训练时间。同时利用K－L变换的特征提取技术在系统分类精度不降低的情况下将样本数据由六维降到三维,提取了样本数据集的特征值,同时通过三维图表示了降为三维的样本数据,从而为进一步提高分类正确率奠定了基础。

1 支持向量机分类原理

1.1 线性情况

当训练样本集线性可分时,分类超平面的描述为

$$\omega \cdot x + b = 0 \qquad (1)$$

式(1)中,向量ω为分类超平面的权系数;b是分类

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

阈值。最优分类超平面可通过解下面的凸二次优化问题获得。

$$\min\phi(w) = \|\omega\|^2/2 \tag{2}$$

$$y_i(w \cdot x_i) + b - 1 \geq 0, i = 1, 2, \cdots, n \tag{3}$$

通过求解，得到最优分类超平面的分类判别函数为

$$f(x) = \mathrm{sgn}\left[\sum_{i=1}^{n}\alpha_i y_i(x_i \cdot x) + b\right] \tag{4}$$

其中，α_i 为拉氏乘子，拉氏乘子不为0的解向量为支持向量。

1.2 非线性情况

对于非线性问题，SVMs 通过选择适当的非线性变换，将输入空间 X 中的训练样本映射到某个高维特征空间 F，使得在目标高维空间中这些样本线性可分。根据泛函的有关理论，若核函数 $K(x, x_i)$ 满足 Mercer 条件，则对应某一变换空间中的内积 $\langle\phi(x_i) \cdot \phi(x)\rangle$，函数 $\phi: x \rightarrow F$ 是一个从非线性输入空间 X 到高维特征空间 F 的映射，所以求映射 $\phi: x \rightarrow F$ 只要知道如何由输入 x、x_i 计算内积 $\langle\phi(x_i) \cdot \phi(x)\rangle$ 即可，由

$$K(x_i, x) = \phi(x_i) \cdot \phi(x) \tag{5}$$

将式(4)重写，即可得到对应高维空间的分类函数为

$$f(x) = \mathrm{sgn}\left[\sum_{i=1}^{n}\alpha_i y_i K(x_i \cdot x) + b\right] \tag{6}$$

2 核距离与 K－L 变换

根据 SVM 分类原理，经向量化处理的变压器 DGA 数据可直接作为训练样本数据，但此方法使得 SVM 训练算法速度比较慢，这是因为训练样本的数量决定了二次规划问题目标函数中矩阵的维数，使得求解规划问题的速度与维数呈指数增长。为了提高训练速度，减少学习样本数，缩短训练时间，则采取主动选择对于确立分类器最重要的新样本进行训练，来进一步设计新的分类器，从而使得可以用尽可能少的标注样本数来实现较高的分类精度。

支持向量机学习算法包括两个独立的部分 $<c, f>$，c 是一个 SVM 多类分类器，f 是一个查询函数，决定应从候选集中选择哪些样本进行训练。由于检测变压器运行模式是一个多分类的模式识别问题，因此在这里 SVM 分类器采用的是 1－a－r 方法。这里通过引 λ 类质心和基于 Mercer 核函数的欧式距离等概念来定义查询函数 f。其查询策略是通过调节基于 Mercer 核函数欧式距离的选择范围来选择最能代表各类的样本数据。这种策略最大程度地缩减了训练样本数据，降低了算法的运算量。

2.1 基于 Mercer 核函数的欧式距离

Mercer 核函数的原理是将输入样本数据空间非线性映射到新的特征空间。

$$\phi: R^N \rightarrow H, x \mid \rightarrow \phi(x) \tag{7}$$

样本数据空间中的欧式距离在新的特征空间 H 里可以表示为

$$d_H(x, y) = \sqrt{\|\phi(x) - \phi(y)\|^2} = \sqrt{\phi(x) \cdot \phi(x) - 2\phi(x) \cdot \phi(y) + \phi(y) \cdot \phi(y)} \tag{8}$$

根据 Mercer 核映射 ϕ 的性质，输入空间的点积在新的特征空间 H 中可以用 Mercer 核函数来表示，即

$$K(x, y) = (\phi(x) \cdot \phi(y)) \tag{9}$$

由式(7)和式(8)可以表示为

$$d_H(x, y) = \sqrt{K(x, x) - 2K(x, y) + K(y, y)} \tag{10}$$

2.2 基于 K－L 变换的特征提取

K－L 特征提取[6]是通过映射(或变换)的方法把高维特征向量变换为低维特征向量。通过特征提取获得的特征是原始特征集的某种组合，即 $A: Y \rightarrow X$，可见，新的特征中包含了原有全体特征的信息。特征提取的关键问题是求出最佳变换矩阵，使得变换后的 m 维模式空间中，类别可分性准则值最大。

设 x 为 n 维随机向量，x 可以用 n 个正交基向量的加权和来表示为

$$x = \sum_{i=1}^{n}\alpha_i\varphi_i \tag{11}$$

式中，α_i 为加权系数；φ_i 为正交基向量，满足

$$\varphi_i^T\varphi_j = \begin{cases} 1 & \text{当 } i = j \\ 0 & \text{当 } i \neq j \end{cases} \tag{12}$$

从 n 个特征向量中取出 m 个组成变换矩阵 A，即 $A = (\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_m)$ $(m < n)$，这时，A 是一个 $n \times m$ 维矩阵，x 为 n 维向量，经过 A^Tx 变换，得到降维为 m 的新向量。通过选取 m 个特征向量构成变换矩阵 A，使降维的新向量在最小均方误差准则下接近原来的向量 x。

对于式(12)现在只取 m 项，对略去的项用预先选定的常数 b_j 来代替，这时对 x 的估计值为

$$\hat{x} = \sum_{j=1}^{m}\alpha_j\varphi_j + \sum_{j=m+1}^{n} b_j\varphi_j \tag{13}$$

由此产生的误差为

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\triangle x = x - \hat{x} = \sum_{j=m+1}^{n} (\alpha_j - b_j)\varphi_j \quad (14)$$

均方误差为

$$\bar{\varepsilon}^2 = \sum_{j=m+1}^{n} E[\alpha_j^2] = \sum_{j=m+1}^{n} E[(\varphi_j^T x)(\varphi_j^T x)^T] = \sum_{j=m+1}^{n} E[\varphi_j^T x x^T \varphi_j] = \sum_{j=m+1}^{n} \varphi_j^T R \varphi_j = \sum_{j=m+1}^{n} \lambda_j \quad (15)$$

式中，λ_j 是 x 的自相关矩阵 R 的第 j 个特征值；φ_j 是与 λ_j 对应的特征向量。显然所选的 λ_j 值越小，均方误差也越小。

综上所述，基于 K－L 变换的特征提取的步骤如下[6]：(1) 平移坐标系，将模式总体的均值向量作为新坐标系的原点；(2) 求出自相关矩阵 R；(3) 求出 R 的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots \lambda_n$ 及其对应的特征向量 $\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_n$；(4) 将特征值从大到小排序，如 $\lambda_1 \geqslant \lambda_2 \geqslant \cdots \geqslant \lambda_m \geqslant \cdots \geqslant \lambda_n$，取前 m 个大的特征值所对应的特征向量构成变换矩阵 $A = (\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_m)$；(5) 将 n 维的原向量变换成 m 维的新向量 $y = A^T x$。

利用 K－L 变换方法完成了对输入样本的特征值提取，降低了输入样本维数，使 SVM 能够快速分类。

3 故障诊断流程

(1) 计算整个训练数据集的平均值 $v = \frac{1}{N}\sum_{X \in U} X$ 作为整个数据集的质心。

(2) 计算各类的数据 $X_j^i (i = 1, \cdots, 5)$ 与这个质心的基于 Mercer 核函数欧式距离 $d_{ij} = \| \phi(X_j^i) - \phi(v) \|$。

(3) 对得到的每类基于核函数的欧拉距离按一定序列排序。如低温过热故障所得的基于核函数的欧拉距离采用降序排列；而高温过热故障所得的基于核函数的欧拉距离采用升序排列。

(4) 根据各类的欧式距离 d_{ij} 分别为每一类设定一个上限阈值 α_i^+ 和一个下限阈值 α_i^-，进而根据各类的阈值分别选取相应类的训练集。

(5) 得到的 5 类数据集即可作为训练集。

(6) 通过 K－L 变换对所选取的训练集进行特征提取，将其降为三维以降低运算量。

(7) 将测试数据代入训练好的分类器中进行试验，如果测试误差较大，返回步骤(3)。

(8) 达到精度即可作为故障分类器。

4 变压器故障诊断及分析

根据模拟试验和大量的现场试验，将故障类型分为低能放电、低温过热、高温过热和高能放电。与正常运行情况共组成 5 类运行模式。既充分考虑到 DGA 数据自身的可分性，又可使故障的诊断结论可从故障现象明确确定。同时每类故障样本分别由 6 种气体值(H_2、CH_4、C_2H_6、C_2H_4、C_2H_2 和 CO)组成。所收集到故障明确且测量、诊断结果无误的变压器油中溶解气体的含量数据共 161 个样本。各种类型故障样本数目比例基本符合对充油电气设备故障类型的统计结果，较好地反映了变压器的故障模式。在计算基于 Mercer 核函数的欧式距离时选择了线性核函数($K(x,y) = (x \cdot y + 1)^{p_1}, P_1 = 2$)；选择高斯核函数〔$K(x,y) = \exp(\| x - y \|^2 / 2p_1^2)$〕作为 SVM 训练的核函数。通过使用网格搜索法确定最优参数(核宽 $P_1 = 1$，惩罚系数 $C = 1\ 000$)，结束训练条件 eps = 0.001。

通过所提学习方法选取 29 例正常模式、12 例低能放电模式、8 例低温过热模式、9 例高温过热模式和 20 例高能放电模式训练样本组成训练集。同时与通过传统学习方法随机选择等量的样本数据作为训练集进行比较，测试数据如表 1 所示。

图 1 是训练集的相对位置关系图。图中实线表

表 1 两种方法诊断的结果对比

运行模式	测试数据	传统方法	检测精度 /%	所提方法	检测精度 /%
正常	30	30/28	100/93	30/29	100/97
低能放电	10	8/9	80/90	9/8	90/80
低温过热	10	6/4	60/40	7/5	70/50
高温过热	10	9/4	90/50	10/10	100/100
高能放电	10	10/10	100/100	10/9	100/90
总计	70	63/55	90.00/78.57	66/61	94.28/87.14

注：a/b，a 表示基于最优参数的故障诊断率；b 表示基于经验选取的参数的故障诊断率。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

示正常运行模式，虚线表示高能放电模式，星号表示低能放电模式，加号表示高温过热模式，棱形表示低温过热模式。从图中可知，所得的训练集的三维图正确地反映了油浸式变压器实际的运行模式。高能放电模式样本数据与低能放电模式样本数据位置紧密但较易区分；而高温过热模式样本数据与低温过热模式样本数据混淆严重，由此推断，这两种故障模式较难区分。表1显示了两种方法训练的分类器对测试数据正确诊断率的仿真结果。同时为检验参数寻优对分类结果的影响，对基于经验选取参数（$p_1 = 0.1, C = 100$）的多类SVM模型与基于最优参数的多类SVM模型的分类结果进行了对比。

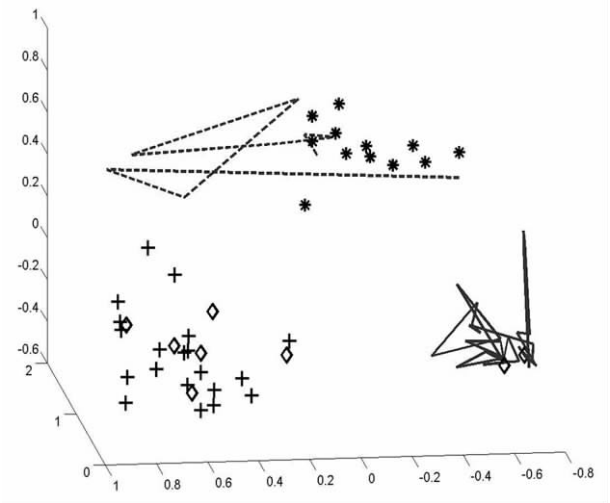


图1 训练集三维图

从表1对测试样本的检测率可知，通过所提方法获得的训练集构造的分类器比传统方法构造的分类器更精确。因此故障诊断正确率更高。同时可知通过寻优所得的基于最优参数的故障诊断模型比基于经验的参数模型具有更高的检测正确率。

通过对变压器油中气体容量（$\times 10^{-6}$）的现场测试，具体值为：$\phi(H_2) = 127$，$\phi(CH_4) = 107$，$\phi(C_2H_2) = 244$，$\phi(C_2H_4) = 154$，$\phi(C_2H_6) = 11$，$\phi(CO) = 174$. 通过所提方法建立的诊断模型，诊断结果为高能放电。通过实际的检测，故障是由于次级线圈放电从而造成整个线圈的损坏。

5 结 论

提出了将支持向量机学习算法与基于K－L特征提取技术应用于变压器故障诊断模型的新算法。通过主动选择各类数据集中能正确代表各类相对关系的样本数据来训练分类器，因此提出的主动学习方法能够在缩减训练样本和计算量的情况下仍能达到传统方法的检测精度。同时引入了基于K－L变换的特征提取技术，使能够实现样本数据从六维降到三维，并通过Matlab作图将其显示在三维图中。实验表明，采用所提方法相对于传统方法具有更高的故障诊断率。在仿真实验中，分类的准确度与核函数类型的选择和相应参数的选取密切相关，因此下一步工作是从SVM的分类机理出发对模型的参数选择与精确度的提高可以展开进一步的研究。

参考文献

[1] DL/T 596－1996，电力设备预防性试验规程[S].

[2] Warmuth M K，Liao J，Ratsch G et a1. Active Learning with Support Vector Machines in the Drug Discovery Process[J]. Journal of Chemical Information and Computer Sciences，2003，43(2)：667－673.

[3] Hsu C W，Chang C C，Lin C J. A Practical Guide to Support Vector Classification[Z]. 2003－07. http://www.csie.ntu.edu.tw/cjlin/papers/guide/guide.pdf.

[4] Wang Liguo，Zhang Ye，GU Yanfeng. The Research of Simplification of Support of Structure of Multi－class Classifier Vector Machine[J]. Journal of Image and Graphics，2005，10(5)：572－574.

[5] Cortes C，Vapnik V. Support Vector Networks[J]. Machine Learning，1995，20(1)：273－297.

[6] 肖建华. 智能模式识别方法[M]. 广州：华南理工大学出版社，2006.

[7] Wilson D R，Tony R M. Improved Heterogeneous Distance Functions[J]. Journal of Artificial Intelligence Research，1997，6(1)：1－34.

[8] 段丹青，陈松乔，杨卫平. 基于SVM主动学习的入侵检测系统[J]. 计算机工程，2007，33(1)：153－155.

[9] Vapnik V. An Overview of Statistical Learning Theory[J]. IEEE Transactions on Neural Networks，1999，10(5)：988－999.

[10] Cui Jiang，Wang You－ren. Analog Circuit Faults Diagnosis Based on Clustering Preprocess and SVM[J]. Computer Applications，2006，26(8)：1977－1979.

作者简介：

方飚(1973)，男，工程师，四川省电力工业调整试验所电气室主任，长期从事高电压技术相关试验工作及研究。

（收稿日期：2012－07－25）

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基于气相色谱法测油中乙炔含量的不确定度研究

钟 诚
(四川省电力工业调整试验所,四川 成都 610072)

摘 要: 测量不确定度评定方法的统一与表示方法是实验室间技术交流的迫切要求,也是与国际接轨的需要。气相色谱仪是一种相对测量仪器,在实际运用中它的测量结果可以通过外标法获得。以气相色谱仪测量油中溶解气体组分含量中的乙炔为例,采用国家二级标准气体为标准物质,分析了气相色谱仪测量乙炔含量的不确定度。

关键词: 不确定度; 乙炔; 绝缘油

Abstract: The coordination and representation of the evaluation methods for the measurement of uncertainty is an urgent requirement by technical exchanges between the laboratories, and it is also the requirement to be in line with international practices. Gas chromatograph is a relative measurement instrument, its measurement results can be obtained by external standard method in practical application. Taking the measurement of acetylene in gases content dissolved in oil by gas chromatograph for example, the uncertainty of the content of acetylene measured by gas chromatograph is analyzed by using the national II - grade standard gas.

Key words: uncertainty; acetylene; insulating oil

中图分类号: TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 - 6954(2012)06 - 0062 - 03

0 概 述

对变压器油中溶解气体组分含量的检测,能及时发现大量充油变压器内部存在的潜伏性故障,及时发现、处理这些潜伏性故障,可避免事故发生和设备损坏,已成为提高变压器运行可靠性和杜绝运行中发生事故有效方法之一。为确保分析数据的可靠性和准确性,依据国家计量技术规范 JJF 1059 - 1999 和 GB/T 17623 - 1998《绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法》的要求,对该方法的测量不确定度进行分析评定。

1 测量原理及数学模型

1.1 测量原理及方法

在试验中使用了以下几种需要计量的器具:气相色谱仪、国家二级标准混合气体、检定合格的大气压力表(测量允许差为 ±0.15 kPa)以及合格的注射器(在 20 ℃时体积为 100 mL ±0.5 mL 和体积 5 mL ±0.05 mL)。

测量过程为:将 100 mL 注射器中的样品油推出,并准确调节注射器芯到 40 mL,用橡胶帽将注射器出口封住。再注入 5 mL 高纯氮气,将混合后的样品放入 50 ℃恒温定时振荡仪中。用机械振荡法振荡 20 min,静置 10 min,脱出油中溶解气体,再将该混合气体注入气相色谱仪,并通过外标法检测出脱出气体中各组分浓度,求出油中溶解气体组分含量。

1.2 建立数学模型

(1) 油中溶解气体各组分浓度计算公式(以下都用峰高来定量)

$$X_i = 0.929 \times \frac{p}{101.3} \times C_{is} \times \frac{h_i}{h_{is}} \times \left(K_i + \frac{V'_g}{V'_L} \right) \quad (1)$$

式中,X_i 为油中溶解气体 i 组分浓度,μL/L; C_{is} 为标准气中 i 组分浓度,μL/L; h_i 为样品气中 i 组分的峰高,mV; h_{is} 为标准气中 i 组分的峰高,mV; K_i 为 50 ℃时国产矿物绝缘油分配系数; V'_g 为 50 ℃时试验压力下平衡气体体积,mL; V'_L 为 50 ℃油样体积,mL; p 为试验时大气压力,kPa; 0.929 为油样中溶解气体浓度从 50 ℃校正到 20 ℃时的温度系数。

(2) 样品气和油样体积校正

$$V'_g = V_g \times \frac{323}{273 + t} \quad (2)$$

$$V'_L = V_L [1 + 0.0008 \times (50 - t)] \quad (3)$$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中，V'_g 为50 ℃时试验压力下平衡气体体积，mL；V_g 为室温 t ℃时试验压力下平衡气体体积，mL；V'_L 为50 ℃时油样体积，mL；V_L 为室温 t ℃时所取油样体积，mL；t 为试验时的室温，℃。

50 ℃时国产矿物绝缘油中溶解气体各组分分配系数(K_i)见表1。

表1 50 ℃时国产矿物绝缘油中溶解气体各组分分配系数(K_i)

气体	K_i	气体	K_i
氢气	0.06	甲烷	0.39
一氧化碳	0.12	乙炔	1.02
二氧化碳	0.92	乙烯	1.46
氧气	0.17	乙烷	2.30
氮气	0.09		

根据式(1)和表1，绝缘油中乙炔气体含量的数学模型为

$$C = 0.929 \times \frac{p}{101.3} \times C_{is} \times \frac{h_i}{h_{is}} \times \left(1.02 + \frac{V'_g}{V'_L}\right) \quad (4)$$

为了便于不确定度的评定，将式(4)简化为式(5)，即

$$X_i = 0.929 \times \frac{p}{101.3} \times C_{is} \times \frac{h_i}{h_{is}} \times R \quad (5)$$

其中，$R = 1.02 + \frac{V'_g}{V'_L}$ (6)

2 测量不确定度来源及其评定

由上面的计算公式可以看出，乙炔气体的不确定度主要与大气压力、标气浓度、标气峰高、样品气峰高(气相色谱仪本身)、脱出气体体积、脱气用油体积、测量重复性误差等几个要素有关，归纳如下。

2.1 测量不确定度来源

油中溶解气体组分含量测量不确定度的来源主要包括如下：大气压力引入的相对标准不确定度 $u_{rel}(P)$；标准气体浓度引入的相对标准不确定度 $u_{rel}(C_{is})$；标样峰高测量与样气峰高测量引入的相对标准不确定度 $u(h_{is})$ 和 $u_{rel}(h_i)$；脱出气体体积引起的不确定度 $u_{rel}(V_g)$；脱气用油样体积引起的不确定度 $u_{rel}(V_L)$；测量重复性引入的相对标准不确定度 $u_{rel}(f_{rep})$。

2.2 测量不确定度各分量的评定

2.2.1 大气压力引入的相对标准不确定度 $u_{rel}(P)$

大气压力引入的相对标准不确定度 $u_{rel}(P)$，用B类评定方法评定。实验用大气压力表测量实验室压力，检定证书中扩展不确定度为0.83 kPa，$k=3$，则标准不确定度为 $U = 0.83/3 = 0.2767$ kPa，满量程为106.64 kPa，因此由大气压力引入的相对标准不确定度 $u_{rel}(P)$ 为

$$U_{rel}(P) = \frac{0.2767 \times 100}{106.64} = 0.259\%$$

2.2.2 标准气体浓度引入的相对标准不确定度 $u_{rel}(C_{is})$

$u_{rel}(C_{is})$ 用B类评定方法评定。混合标准气为二级标准物质，证书中标明，在95%置信度水平下，取包含因子 $k=2$，获得相对扩展不确定度为3%，所以，标准气体浓度引入的相对标准不确定度 $u_{rel}(C_{is})$ 为

$$u_{rel}(C_{is}) = \frac{U_r}{k} = \frac{0.03}{2} = 1.5\%$$

2.2.3 标样峰高测量与样气峰高测量引入的相对标准不确定度 $u_{rel}(h_{is})$ 和 $u_{rel}(h_i)$

标样峰高测量与样气峰高测量引入的相对标准不确定度 $u_{rel}(h_{is})$ 与 $u_{rel}(h_i)$ 由于是被除数与除数的关系，相互抵消。所以这里只考虑气相色谱仪仪器本身的不确定度 $u_{rel}(R_i)$。

气相色谱仪仪器本身的不确定度与柱箱温度稳定性有关。柱箱温度稳定性的不确定度：该气相色谱仪校准证书上，$RSD=0.1\%$，服从均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$，其相对标准不确定度为

$$U_{\text{柱箱温度}} = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.058\%$$

2.2.4 脱出气体体积引起的不确定度 $u_{rel}(V_g)$

体积重复性已归入到输出量 C 的重复性中，温度影响可忽略不计。只需要评定体积校准引入的标准不确定度分量。脱出气体的取样采用5 mL注射器，证书上标明，包含因子 $k=2$，扩展不确定度为3%。即脱出气体体积引起的不确定度为

$$u_{rel}(V_g) = \frac{3\%}{2} = 1.5\%$$

2.2.5 脱气用油样体积引起的不确定度 $u_{rel}(V_L)$

和脱出气体体积引起的不确定度 $u_{rel}(V_g)$ 一样，只需要评定体积校准引入的标准不确定度分量。用B类评定方法评定，油样体积使用100 mL注射器，用油体积为40 mL，证书上标明，包含因子 $k=2$，

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表2 乙炔含量10次测量结果

C_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_2H_2	53.2	49.2	47.4	49.8	50.4	49.7	52.6	47.1	47.8	49.5
$(C_i-\bar{C})^2$	12.460	0.221	5.153	0.017	0.533	0.009	8.585	6.605	3.497	0.029

扩展不确定度为3.0%。即脱出气体体积引起的不稳定度 $u_{rel}(V_g)$ 为

$$u_{rel}(V_L)=\frac{3\%}{2}=1.5\%$$

2.2.6 测量重复性引入的相对标准不确定度 $u_{rel}(f_{rep})$

对绝缘油中乙炔含量 C 进行了10次重复测量，测量结果如表2。

其中，$\bar{C}=\frac{\sum_{i=1}^{10}}{10}=49.67\ \mu L/L$

计算测量的实验标准差为

$$s(C)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10}C_i(C_i-\bar{C})^2}{n-1}}=2.03\ \mu L/L$$

故其重复性引入的标准不确定度为

$$u(f_{rep})=\frac{s(C)}{\sqrt{10}}=\frac{2.03}{\sqrt{10}}=0.642\ \mu L/L$$

绝缘油中乙炔含量测量重复性相对标准不确定度为

$$u_{rel}(f_{rep})=\frac{u(f_{rep})}{\bar{C}}=\frac{0.642}{49.67}=1.29\%$$

3 合成标准不确定度及扩展不确定度评定

表3给出了用气相色谱法测量乙炔含量的不确定度分量。

计算绝缘油中溶解乙炔气体含量测量的相对合成标准不确定度，由于上述评定的各相对标准不确定度分量不相关，则测量结果的合成不确定度为

$$u_{rel}(X)=\sqrt{u_{rel}^2(P)+u_{rel}^2(X_{is})u_{rel}^2(R_i)+u_{rel}^2(V_g)+u_{rel}^2(V_L)+u_{rel}^2(f_{rep})}$$
$$=\sqrt{0.259^2+1.5^2+0.058^2+1.5^2+1.5^2+1.29^2}$$
$$=2.91\%$$

本次试验 $\bar{C}=49.67\mu L/L$，气相色谱测定绝缘油中乙炔含量的合成标准不确定度为

$$u_c(C)=2.91\%\times49.67=1.445\ \mu L/L$$

依惯例取包含因子 $k=2$，则扩展不确定度为

$$U=ku_c(C)=2\times1.445=2.89\ \mu L/L$$

表3 气相色谱法测量乙炔含量的不确定度分量

	不确定度分量	数值	符合表示
1	大气压力引入的相对标准不确定度	0.259%	$u_{rel}(P)$
2	标准气体浓度引入的相对标准不确定度	1.5%	$u_{rel}(C_{is})$
3	标气和样气峰高引入的不确定度	0.058%	$u_{rel}(R_i)$
4	脱出气体体积引起的不确定度	1.5%	$u_{rel}(V_g)$
5	脱气用油样体积引起的不确定度	1.5%	$u_{rel}(V_L)$
6	测量重复性引入的相对标准不确定度	1.29%	$u_{rel}(f_{rep})$

4 结 果

用气相色谱测定绝缘油中乙炔气体含量，本次测定结果为 $\bar{C}=49.67\ \mu L/L$，它的扩展不确定度为 $U=2.89\ \mu L/L$；$k=2$。

5 结 语

由以上的分析和计算可见，用气相色谱法测定绝缘油中乙炔气体含量的不确定度主要是由标准气体、脱出气体体积、脱气用油量体积和进样的重复性不确定度分量引入的。在实际工作中，必须保证注射器的密封性、脱气用油体积和脱出气体测量的准确性、进样口硅橡胶垫的密封性以及进行熟练地操作，同时选择一瓶品质优良的标准气体也是至关重要的。通过对本次试验的不确定度分析，可以更加清楚地了解被测值所处的范围和检测结果的质量水平。

参考文献

[1] GB/T 17623－1998，绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法[S].

[2] JJF 1059－1999，测量不确定度评定与表示[S].

[3] 中国合格评定国家认可委员会. CNAS－GL06 化学分析中不确定度的评估指南[R].

(收稿日期：2012－05－30)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

温度对环氧树脂空间电荷特性影响的研究

王青山[1]，陈少卿[2]
（1. 内江电业局，四川 内江 641003；2. 四川电力科学研究院，四川 成都 610072）

摘 要： 用电声脉冲法（PEA）测量了纯环氧试样不同温度下玻璃化温度转变前后的空间电荷分布，并分析了不同电场下环氧材料中异极性电荷形成的原因。实验发现不同温度下的空间电荷分布具有明显的差异；水分等挥发性杂质对环氧材料中的空间电荷形成具有较大影响。

关键词： 玻璃化温度；环氧树脂；空间电荷；挥发性杂质

Abstract: The space charge distributions below and above the glass transition temperature (T_g) at different temperatures are measured with the pulsed electro – acoustic (PEA) method. And the formation of hetero – charge under different electrical field at each temperature is also analyzed. The results show that the space charge distributions at each temperature have the obvious diversity, and the water content and other volatile impurities have great influence on the formation of space charge.

Key words: glass transition temperature; epoxy resin; space charge; volatile impurity

中图分类号： TQ323 **文献标志码：** A **文章编号：** 1003 – 6954(2012)06 – 0065 – 03

0 引 言

由于环氧树脂具有优良的介电及机械性能，因此在国民经济的多个领域中被广泛应用。无论是通用技术领域还是高新技术领域，无论是国防军事工业，还是民用工业，以至于人们的日常生活中都可以看到它的踪迹[1]。在电力及电子领域环氧被用做浇铸料并广泛应用于干式变压器、电力互感器、绝缘子、干式套管、电容器、印刷电路原件等[2-5]。在直流电力设备绝缘中，空间电荷易于积聚，从而畸变电场，影响绝缘寿命。而当温度升高时，绝缘的电性能以及金属电极注入电荷的能力都将发生变化，但温度对环氧中空间电荷的影响如何，却少有报道。这里制备了低玻璃化转变温度的纯环氧材料，研究了电场强度10～50 kV/mm，玻璃化转变前后及相变温度附近纯环氧材料的空间电荷特性，并给出了相应解释。

1 试验方法

1.1 试样制备

1）材料选取。由于PEA法测试系统中压电传感器（PVDF）温度上限（80 ℃）的限制，为了研究环氧玻璃化转变前后的空间电荷特性，基料使用E51环氧（75W%）与柔性环氧（25W%）的混合体，通过DSC测到所得材料的玻璃化转变温度为62 ℃。

2）材料制备。取E51环氧（75W%）与柔性环氧（25W%）充分搅拌混合。向混合溶液中加入适量的酸酐固化剂和促进剂并充分搅拌，再将混合溶液置于搅拌、抽真空和控温一体的环氧浇注系统中进行搅拌和抽真空（真空度控制在100 Pa左右，避免小分子物质挥发）40 min左右，然后通过真空浇注，将混合溶液注入不锈钢的模具中，在80 ℃下固化5 h，最后再在120 ℃下固化10 h后降至室温。所得材料厚度为0.1 mm和0.3 mm两种，尺寸为100 mm×100 mm的方形平板材料。

1.2 空间电荷测量

采用电声脉冲法（pulsed electroacoustic method，简称PEA）测量环氧材料中空间电荷分布，测量装置的结构如图1所示。直流电源为0～30 kV，脉冲宽度为5 ns，幅值为0～1 kV。压电传感器（PVDF）薄膜厚度为9 μm。以半导电橡胶作为测量系统上电极，金属铝板作为下电极，声耦合剂是硅油。适用循环油加热系统实现不同温度下的空间电荷测量。空间电荷测量系统的分辨率取决于外加纳秒脉冲电压的半峰宽、压电传感器的厚度及放大器的频率带宽。由计算可得本实验室的空间电荷测量装置的测

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量分辨率为10 μm[6,7]。

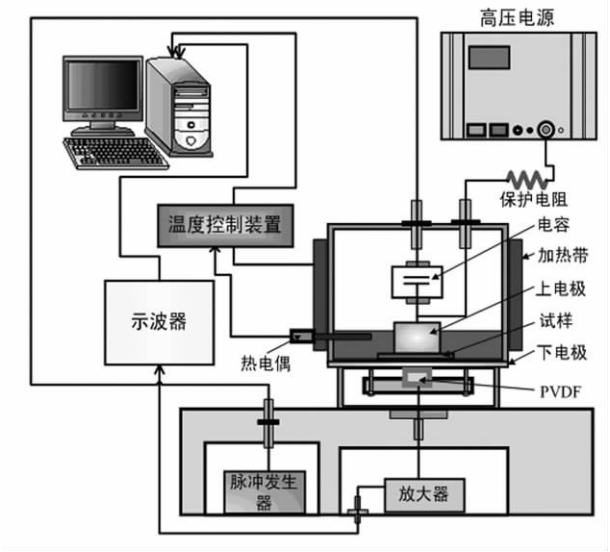


图1 空间电荷测试系统

2 试验结果及讨论

实验记录了加压以及短路过程中材料中的空间电荷分布，实验场强为10～50 kV/mm，加压时间为1 h；研究了短路10 s时各电场强度下的空间电荷分布，而且分析了各温度下(40 ℃、60 ℃和80 ℃)空间电荷衰减随短路时间的变化；并通过陷阱计算方法，分析了材料中陷阱的分布情况。实验发现温度对环氧材料的空间电荷集聚及消散有重要影响。

由于材料较厚(0.3 mm)在声波传播过程中畸变比较严重，直接得到的空间电荷波形不能反映材料中真正的空间电荷特性，故对所得测量结果进行了波形恢复[8]。

图2所示为40 ℃下施加不同电场强度后短路10 s时的空间电荷分布情况。由图可见，在该温度下，当电场强度较低时(≤20 kV/mm)，材料内部观察不到空间电荷的注入，只在金属电极上出现因极化而产生的空间电荷峰。而当电场强度进一步提高时(≥30 kV/mm)，在正电极附近出现正的电荷峰，在负电极附近出现负电荷峰，即当电场强度进一步提高时材料中出现明显的同极性电荷峰，并在金属电极处感应相反极性的电荷峰。

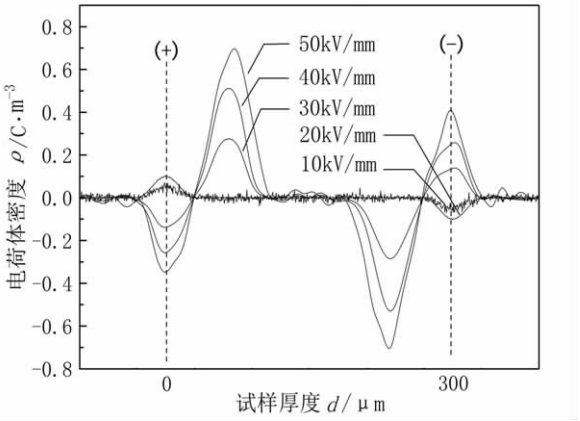


图2 纯环氧材料40 ℃下不同场强预压1 h后短路10 s时的空间电荷分布

图3所示为60 ℃下施加不同电场强度后短路10 s时的空间电荷分布情况。从图中可见，当电场强度较低(<20 kV/mm)时，材料中不存在空间电荷的注入，仅在金属电极上出现少量的感应电荷，这与40 ℃时的情况是相同的。当电场强度进一步升高(E=20 kV/mm)时，材料内部没有明显的空间电荷峰，但金属电极上感应的电荷峰明显增大。当电场强度继续升高(30 kV/mm≤E≤60 kV/mm)时，在正电极附近出现明显的负电荷峰，而在负电极附近出现明显的正电荷峰，即此时材料中出现明显的异极性空间电荷。而且当电场强度从50 kV/mm上升到60 kV/mm时，材料中的异极性空间电荷的总量基本不变，呈现一种“饱和”的状态。异极性电荷的产生是由材料中的反应副产物和添加剂引起的[9]。实验温度从40 ℃提高到60 ℃，接近了材料的玻璃化转变温度，使得杂质离子易于在电场作用下发生迁移，并聚集在相反极性的电极附近，形成异极性空间电荷。

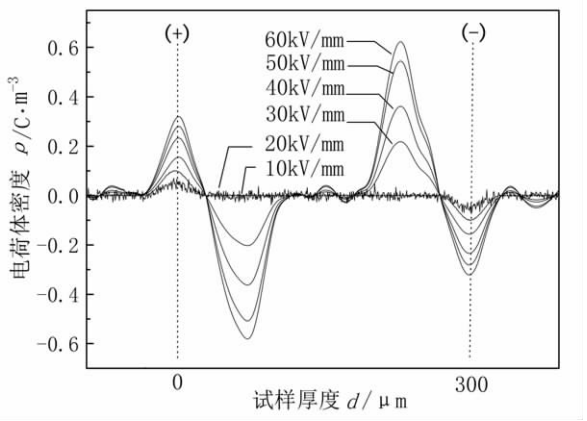


图3 纯环氧材料60 ℃下不同场强预压1 h后短路10 s时的空间电荷分布

为了进一步研究异极性电荷的成分，将材料先进行烘干和抽真空处理，脱去材料中的水份等挥发性杂质，并在同样条件下进行了空间电荷测试实验。结果如图4所示：发现经过真空处理后材料中的电荷虽然仍然是异极性空间电荷，但电荷峰值明显有

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

所降低。这种差别说明大气中某种挥发性杂质是引起异极性空间电荷的因素之一。当抽真空时，可以将其去除，但如果放置在大气中则会吸附而产生异

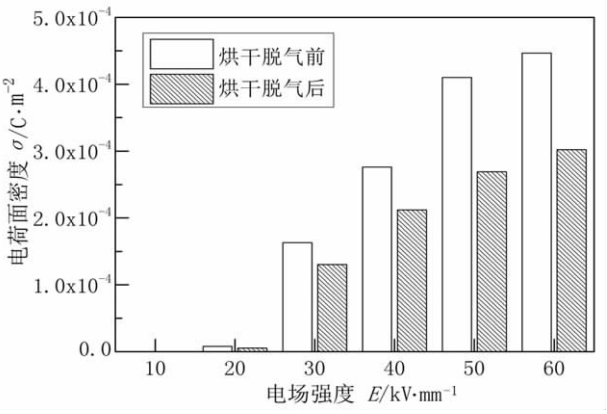


图4　纯环氧材料经烘干脱气处理60 ℃下不同场强预压1 h后短路10 s时的空间电荷量

极性电荷。这种杂质可能是空气中的水分，由于环氧材料表面易于吸附空气中的水分，而水分子在电场下又可被电离成 H^+ 和 OH^- 而产生异极性电荷。

图5所示为80 ℃下施加不同电场强度1 h后短路10 s时的空间电荷分布图，由图可见，当电场强度较小时（$E=10$ kV/mm），材料中有少量的负空间电荷注入，在正电极附近出现负电荷峰，而负电极感应正电荷。当电场强度进一步升高（$E\geqslant 20$ kV/mm）时，材料内部出现大量的负空间电荷，并且负的空间电荷贯穿材料，在两个金属电极上，均感应出正的空间电荷。

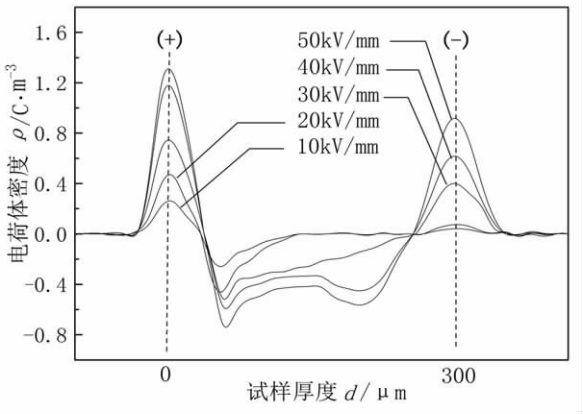


图5　纯环氧材料80 ℃下不同场强预压1 h后短路10 s时的空间电荷分布

由以上结果可以看出，温度和电场强度严重影响环氧中的空间电荷分布，特别是当温度高于环氧的玻璃化转变温度的情况。在外施电场下，不同温度时，环氧材料中均出现了不同程度的极化现象。当 $T=40$ ℃，在电场强度 $E\leqslant 20$ kV/mm 时，环氧材料内部无空间电荷积聚，金属电极上出现空间电荷的感应峰。温度升高为 $T=60$ ℃时，当电场强度 $E\leqslant 20$ kV/mm 时，金属电极上出现空间电荷感应峰，材料内部无空间电荷出现。但这种情况下，当 $E=20$ kV/mm 时，金属电极上的空间电荷感应峰明显增大，这是由于此时的温度接近环氧材料的玻璃化转变温度（$T_g=62$ ℃），所以环氧中的极性分子易于在电场作用下发生转向，故感应电荷增多，金属电极上的空间电荷感应峰增大。当 $T=80$ ℃时，在极低的电场强度下 $E\leqslant 20$ kV/mm 时，有明显的注入现象。这说明当温度和电场强度升高时，注入的电荷会掩盖极化现象。

$T=40$ ℃，当 $E\geqslant 30$ kV/mm 时，材料中出现同极性空间电荷，说明在40 ℃时，环氧材料的空间电荷注入阈值应该介于20 kV/mm和30 kV/mm之间。但与 $T=40$ ℃不同，当 $T=60$ ℃时，材料中出现了异极性空间电荷。异极性空间电荷的出现主要是由于材料中的杂质和副产物引起的，当温度接近环氧的玻璃化转变温度时，这些副产物易于形成异极性电荷峰。但此时同极性电荷的注入仍然是存在的，之所以没有显现出来是被形成的异极性空间电荷所掩盖。这也是 $T=60$ ℃时，注入量相对 $T=40$ ℃时较少的原因。当 $T=80$ ℃时，由于此时的温度远高于环氧材料的玻璃化转变温度，故其机械和电性能与玻璃态时有所不同。与 $T=40$ ℃和 $T=60$ ℃不同的是，此时当 $E=10$ kV/mm 时，环氧材料中出现负电荷的注入，这说明高温有利于电子的注入，此时没有出现杂质及副产物引起的正电荷峰，这是由于被负电荷峰所掩盖的原因。这种条件下，正电极出现正电荷峰，负电极仍然为负极性，只是幅值有所下降，这说明负电荷的注入量还不够多，不足以在负电极处感应正电荷峰。但当 $E\geqslant 20$ kV/mm 时，环氧材料内部出现大量的负电荷，此时金属电极上均感应出正电荷峰，说明当电场强度升高时，出现了大量的电荷注入。在 $T=80$ ℃时，环氧材料的电导增大，在高电场强度下会释放较多的焦耳热，但由于环氧材料浸渍在绝缘油中，故其影响可以忽略，可以认为此时的材料温度仍为80 ℃[9]。

3　结　语

研究了环氧材料中的空间电荷特性，测量了不

（下转第85页）

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献

[1] N. Horiuchi、T. kawahito. Torque and Power Limitations of Variable Speed Wind Turbines Using Pitch Control and Generator Power Control. IEEE, 2001.

[2] Yousif EI – Tous. . Pitch Angle Control of Variable Speed Wind Turbine. American J. of Engineering and Applied Sciences, 2008.

[3] Olimpo Anaya – lara, Nick Jenkins, Janaka Ekanayake, Wind Energy Generation Modelling and Control [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[4] 叶杭冶. 风力发电机组控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[5] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

[6] Lulian Munteanu, Luliana Bratcu, Nicolaos – Antonio Cutululis, et al. Optimal Control of Wind Energy Systems [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

[7] 樊国平, 智能PID控制系统的设计与研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2005.

作者简介:

丁艳军, 男, 工程师, 研究方向为风力发电机组控制系统。

(收稿日期: 2012 – 04 – 13)

(上接第67页)

同温度、不同电场强度下环氧材料中的空间电荷分布; 分析了温度、电场强度、加压时间等因素对环氧材料中空间电荷特性的影响; 并进一步研究了环氧材料玻璃化转变前后的空间电荷特性。主要得到以下结论。

(1) 环氧材料中的空间电荷分布受到温度及外施电场的影响。温度对环氧中空间电荷的影响较大。当温度与环氧的玻璃化转变温度(T_g)相比, 处于不同状态(低于T_g、接近于T_g、高于T_g)时, 环氧材料中的空间电荷分布呈现出较大区别。环氧材料中的空间电荷量随温度升高而增大; 特别是当温度为80 ℃时, 空间电荷量明显增大。

2) 环氧材料中异极性电荷的出现主要是由于材料中的水分等挥发性杂质, 以及固化过程中形成的其他杂质电离在玻璃化转变温度附近迁移而造成的。当温度高于环氧树脂的玻璃化转变温度时, 材料中出现大量的空间电荷, 说明环氧树脂由玻璃态向高弹态的转变更有利于空间电荷的形成。

参考文献

[1] 王德中. 环氧树脂生产与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

[2] T. Iizuka and H. Takai. Effect of Temperature and Water Salinity on Hydrophobicity of Epoxy Resin [C]. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1997, 1: 41 – 44.

[3] D. Fabiani, G. C. Montanaril, A. Dardano, G. Guastavino, L. Testa and M. Sangermano. Space Charge Dynamics in Nanostructured Epoxy Resin [C]. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2008: 710 – 713.

[4] J. C. Fothergill. Space Charge in Dielectrics: Old Theories and New Measurements [C]. Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, 2000: 1 – 8.

[5] Hole, S. Sylvestre, A. Guillermin, C. Rain and P. Rowe, S. Space Charge Measurements on Filled Epoxy [C].

[6] 王霞, 吴超一, 何华琴, 等. 茂金属聚乙烯改性低密度聚乙烯中空间电荷机理的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 158 – 162.

[7] 王霞, 成霞, 陈少卿, 等. 纳米ZnO/聚乙烯复合材料的介电特性 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 13 – 19.

[8] Montanari GC, Ghinello I. Space Charge and Electrical Conduction – current Measurements for the Inference of Electrical Degradation Threshold [J]. Vide Science, Technique et Applications, 1998, (287, suppl. issue): 302 – 311.

[9] Mazzanti G, Montanari GC, Alison JM. A Space – charge Based Method for the Estimation of Apparent Mobility and Trap Depth as Markers for Insulation Degradation – theoretical Basis and Experimental Validation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10 (2): 187 – 197.

作者简介:

王青山(1975), 男, 工程师, 现任四川省电力公司内江电业局东兴供电局副局长。

(收稿日期: 2012 – 07 – 12)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

城市变电站噪声分析与治理

苟旭丹
(成都城电电力工程设计有限公司,四川 成都 610041)

摘 要: 随着变电站在城市中心的布点深入,城市变电站的噪声治理已成为环境问题的一个重要方面。分析了城市变电站的噪声来源,简述了消声降噪的基本原理,并对城市变电站噪声的综合整治进行了一定探讨。

关键词: 城市变电站; 噪声; 消声降噪; 综合治理

Abstract: With the distribution of more and more substations in the inner city, the noise reduction in urban substations has become an important aspect in dealing with the environment problems. The sources of the noises in urban substations are analyzed, the basic principles of noise reduction is described, and the solutions to comprehensively improve the noise problems in urban substations are discussed.

Key words: urban substation; noise; noise reduction; comprehensive improvement

中图分类号: TM63 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2012)06-0068-05

0 前 言

近年来,城市化进程的推进逐步提速,工业和居民对用电需求增长迅猛,越来越多的变电站布点深入到城市中心。但由于城市用地资源的紧缺,也加剧了变电站选址的难度,造成部分变电站与居民区的距离较近。同时随着环境法律、法规的完善和公众环境意识的不断提高,治理污染、保护环境的意识和呼声也越来越高。特别是夏季的用电高峰期间,变电站的负荷率都很高,噪声较大;即使是地下变电站,噪声也是不容忽视的问题。近年来由于噪声引起的居民投诉有逐年上升的趋势,由此引发民事纠纷、上告事件逐年增多。因此,如何解决好变电站的噪声污染对周围居民的危害问题已经成为电力设计、建设部门的当务之急,也是构建和谐社会、城市共建共享必须正视的问题。

1 现行噪声控制目标及标准

1.1 噪声排放执行标准

GB 12348-2008《工业企业厂界环境噪声排放标准》主要内容摘录见表1。

1.2 声环境质量执行标准

GB 3096-2008《声环境质量标准》主要内容摘录见表2。

表1 燥声排放标准 单位: dB(A)

厂界外声环境功能区类别	昼间	夜间
0	50	40
1	55	45
2	60	50
3	65	55
4	70	55

表2 声环境质量标准 单位: dB(A)

功能区类别	适应地区	昼间	夜间
0	高级别墅区、疗养区	50	40
1	居住、文教机关为主地区	55	45
2	居住、商业、工业混杂区	60	50
3	工业、仓储地区	65	55
4	交通干线及内河航道两侧	70	55
	铁路干线两侧	70	60

2 城区变电站噪声分析

2.1 噪声的影响

从物理定义而言,振幅和频率上完全无规律的

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

震荡称之为噪声，但从环境保护的角度而论，凡是人们所不需要的声音统称为噪声。噪声的影响主要表现为干扰有效获取有用的声音信号、信息；干扰休息和睡眠等。当人在70 dB的环境中，谈话就会感到困难。因此，世界上许多国家都对环境噪声提出了相应的容许范围，中国也不例外。

2.2 城区变电站的主要噪声源

以220 kV两台主变压器的全户内变电站为例，来自变电站内的噪声源主要有以下设备(见表3)。

表3 变电站内噪声源主要来自设备

主要噪声源位置或设备名称	数量
通风机	若干
蓄电池室	2
主控制室	1
主变压器	2
主变压器散热器	2
1号电容器	3
2号电容器	3
220 kV GIS室	1
110 kV GIS室	1
电抗器	6
10 kV消弧线圈室	1
10 kV配电装置室	1

2.3 各区域设备噪声分析

(1) 主变压器噪声分析

变压器的噪声来源于变压器本体和冷却系统两个方面。变压器本体振动产生噪声的根源在于：①硅钢片的磁致伸缩引起的铁心振动。②硅钢片接缝处和叠片之间存在着因漏磁而产生的电磁吸引力而引起铁心的振动。③当绕组中有负载电流通过时，负载电流产生的漏磁引起线圈、油箱壁的振动。其中第①项所占比例最大。冷却装置的噪声也是由于它们的振动而产生的。

图1、图2为典型220 kV变压器噪声频谱。

(2) 110 kV GIS室及220 kV GIS室噪声分析

GIS全称气体绝缘组合电器设备(gas insulated switchgear)。它将断路器、隔离开关、互感器等一次设备有机地组合成一个整体。主要噪声有电晕放电、风机运转声等。

(3) 并联电抗器噪声分析

电抗器噪声产生机理与变压器基本一致，传播

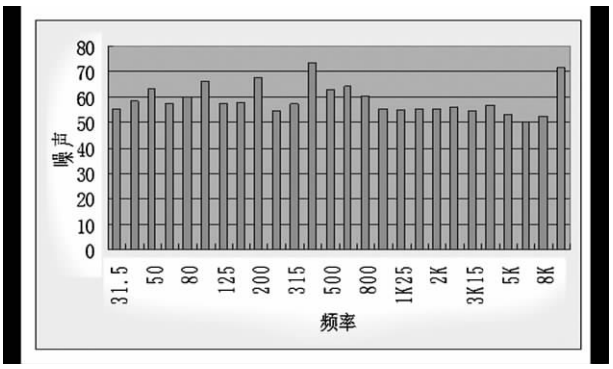


图1 变压器噪声频谱特性(数据来源于济南清河220 kV变电站)

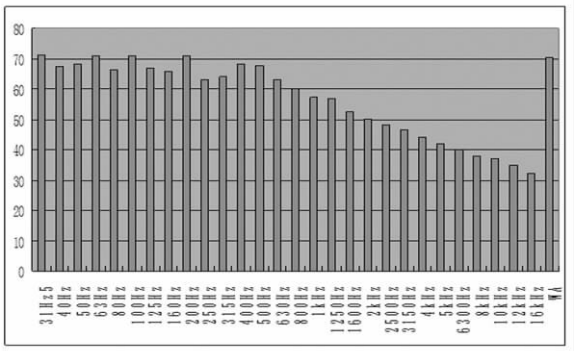


图2 变压器噪声频谱特性(数据来源于成都金牛220 kV变电站)

方式也与变压器一致。在多个220 kV变电站降噪工程中检测了电抗器的本体噪声，噪声测试结果统计见表4(昼间/夜间)。

表4 电抗器噪声测试值

最大值/dB	最小值/dB	平均值/dB
74.5/74.3	59.0/60.4	67.3/69.7

从总的统计数据看，电抗器噪声主要集中在65~80 dB之间。

(4) 10 kV配电装置室噪声分析

主要噪声有风机运转声和电机运转声等。

(5) 电容器噪声分析

电容器在运行时产生噪音的原因：套管放电、缺油放电、脱焊放电、接地不良放电。

(6) 消弧线圈噪声分析

消弧线圈的噪声主要取决于材料、磁通密度的大小和铁心本体结构的合理性。

(7) 通风设备噪声分析

风机辐射的噪声主要有：进气口和出气口辐射的空气动力性噪声；电机辐射的噪声；机壳、管壁以及电机轴承等辐射的机械噪声；基础振动辐射的固体声。在这几部分噪声中，以进气口、出气口部位辐

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

射的空气动力性噪声为最强。一般情况下空气动力性噪声比其他部位辐射的噪声值高10～15 dB(A)。

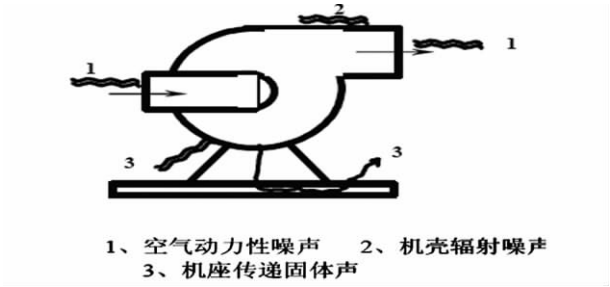


图3 风机噪音源部位

(8) 集中空调设备室外机噪声分析

空调机的主要噪声源为压缩机的噪声、风扇噪声和风扇电机噪声。噪声频率主要分布在160～1 000 Hz之间,属于中、低频噪声,噪声值均在70 dB(A)以上。

3 城市变电站消声降噪措施

3.1 变电站噪声治理的基本原理

根据前述分析,变电站噪声的治理应综合应用吸声、隔声、消声、隔振与阻尼技术,以保证满足降噪要求。

(1) 隔声:通常采用封闭式隔声围护结构。

(2) 消声:消声器是一种既能使噪声得到有效的衰减又能保证气流正常通过的一种设备。

(3) 吸声:在噪声源周围设置了隔声围护结构的内侧壁面上做必要的吸声处理,不但可有效加强隔声围护结构的隔声量,而且可降低室内的混响声达3～8 dB(A),同时改善操作人员的操作环境,起到一定的劳动保护作用。

(4) 隔振降噪:任何机械都会产生振动,振动将激发噪声,因此从减少扰动、防止共振、振动隔离、动力吸振等方面着手,进行降噪方案的设计。

(5) 阻尼降噪:在薄板隔声维护结构的隔声背板上涂刷特殊配比的阻尼材料能有效增加隔声结构的内阻尼,它能使隔声构件的动能转化为热能,从而减少了构件的振动,因而阻尼对提高隔声构件尤其是薄板隔声结构的隔声量特别是低频共振时的隔声量有明显的作用。

3.2 城市变电站噪声治理的具体措施

(1) 主变压器室、主变压器散热器室及电抗器室室内吸声设计

方式1:在内墙四周安装模块式吸声体,吸声体主要由穿孔板和吸声材料组成,加工制作成标准块,表面喷涂防腐处理,成品提供现场安装。吸声体内部使用的吸声材料采用超细玻璃棉,并以双层玻璃丝布包裹,外加一层吸声膜覆盖表面。

方式2:在主变压器室内墙四周现场铺设复合吸声结构,选择穿孔板和多孔吸声材料组合。板后留有一定厚度的空腔,腔内填有吸声材料,腔内采用Z型龙骨。Z型龙骨用不锈钢膨胀螺钉固定在墙体。

方式1为工厂制作,成品提供,方式2为现场铺设,存在二次污染问题。

(2) 主变压器室大门设计

待主变压器及其散热器推入室内就位后,在室前墙分别安装防火降噪大门,其余部分用实心砖密封,内外水泥砂浆抹平。为有效治理低频噪声,主变压器室大门采用平开双扇折叠门,门扇采用面密度大的降噪结构。具体为喷涂3 mm厚阻燃阻尼层的2 mm不锈钢板面板+吸声材料组成,其骨架采用型钢制作,以保证门扇强度和刚度。门扇内部使用的吸声材料采用双层玻璃丝布包裹的超细玻璃棉,外加一层吸声膜覆盖表面。门扇下部留有专用进风口,进风消声百叶(自带防火百叶)采用嵌入式安装在门扇内。为保证降噪效果,门扇四周需做密封处理。

(3) 风机的消声降噪设计

措施1:隔振消音,橡胶隔振垫是一种最常用的弹性减振材料,它具有较低的自振频率,对高频具有良好的隔振效果。风机安装时在风机底座和安装基础之间加专用减振器,为避免风机运行振动影响,在风机进出口处有软连接。

措施2:使用消声器(消音箱)

在风机上加装风机消声器以减小风机噪音的外泄。风机消声器由消声器外壳、阻性消声片和消声片导流尖等构成,它通过阻性消声片片厚中的离心玻璃棉板等吸声材料达到消声的目的。

(4) 管道本体降噪方案设计

方案1:采用降噪型管道,各段之间用法兰连接,结合面处贴阻燃密封胶带。因管道内存在气体流动,为避免吸声材料在时间久后产生“飞毛”现象,降噪型管道的吸声材料采用8 kg/m^{3}的三聚氰胺吸声材料,三聚氰胺在用PVF膜包裹。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

方案2: 通风管采用普通管道做法,降噪措施是在管道外包裹一层柔性吸隔声被。柔性吸隔声被是一种专门针对管道降噪的产品。

方案3: 通风管采用普通管道做法,降噪措施是在管道外表面直接喷涂一层3 mm左右的高分子阻尼材料。

以上3种方案均可达到通风管道消声降噪的目的。

(5) 管道隔振降噪设计

为减少风机的振动和空气流动振动引起管道振动带来的噪音,必须在风机与管道间、管道与管道间、以及管道与建筑物间设置隔振措施。如在设备与管道间、管道与管道间设置橡胶软连接或不锈钢波纹软管连接,以衰减设备、管道振动噪声通过管道传播; 在管道与建筑物间使用弹簧的弹性吊件(或在吊架上铺设弹性隔振材料) 以衰减管道振动噪声通过建筑物的传递。

(5) 通风百叶设计

消声百叶选用150 mm厚标准单元制作形式的消声百叶,根据需要任意组合安装即可。消声百叶边框用1.2 mm镀锌板制作,消声片护面板采用不低于0.8 mm镀锌孔板,骨架采用1 mm镀锌板,阻性消声片片厚150 mm,片间距100~130 mm。由1 mm镀锌穿孔板(双面喷塑) +1.5 mm镀锌板骨架+48 kg/m^{3}离心玻璃棉板+无碱憎水玻璃布,外加一层吸声膜覆盖表面,增强消声的效果。

4 几种吸声材料比较

在城市变电站的噪声治理中,吸声材料使用的效果对降噪的影响较大,以下就目前国内常用的几种材料进行简单分析。

通常吸声材料分金属吸声材料和非金属吸声材料两类。金属吸声材料里常用的有铝纤维吸声板和铝泡沫吸声板,非金属吸声材料里常用的有玻璃棉、聚氨酯泡沫、三聚氰胺泡沫。

(1) 铝纤维吸声板: 铝纤维吸声板是在两种不同网孔的铝板网中间放置一层铝纤维吸声毡,通过滚压机压成1.0~2.5 mm的薄板。

(2) 铝泡沫吸声板: 铝泡沫吸声板是新一代功能性吸声降噪产品和新型环保产品。它具有吸声、不燃、屏蔽、耐候、质轻、无污染,可回收利用等特性。

铝泡沫吸声板是一种多孔性吸声材料,由于金属板坚硬刚度大,弯折易断裂,一般使用厚度比无机纤维材料要小得多,厚度加大,成本提高。实际使用厚度为4~10 mm。安装时其后部一定要留有空腔。若无空腔,贴实安装,其吸声系数很低。

(3) 玻璃棉:: 玻璃棉属于玻璃纤维中的一个类别,是一种人造无机纤维。采用石英砂、石灰石、白云石等天然矿石为主要原料,配合一些纯碱、硼砂等化工原料熔成玻璃。在融化状态下,借助外力吹制式甩成絮状细纤维,纤维和纤维之间为立体交叉,互相缠绕在一起,呈现出许多细小的间隙。这种间隙可看作孔隙。因此,玻璃棉可视为多孔材料,具有良好的绝热、吸声性能。

(4) 三聚氰胺泡沫塑料: 三聚氰胺泡沫塑料是一种高开孔率的三维网络结构泡沫塑料,有较优异的吸声性、阻燃性、隔热性、耐湿热稳定性、卫生性和二次加工能力。

(5) 聚氨酯泡沫塑料: 聚氨酯泡沫塑料是一种孔隙率较高的泡沫塑料,有吸声系数较高、密度小、富有弹性,易加工施工。

(6) 穿孔板共振吸声结构: 该类型产品针对特定噪声的频谱特性制造,因而对特定的频谱特性的噪音吸声效果特别好。但其局限性也在此,如特定产品能实现宽频共振吸声或针对变压器频谱特性专门生产,则其效果将也是一般吸声材料无法具有的。

(7) 吸声材料吸声性能比较

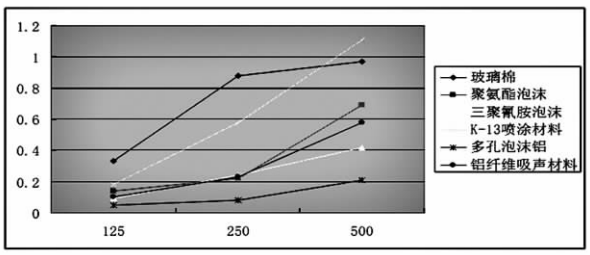


图4 6种吸声材料低频吸声性能对比图

从对比图4看出,就低频性能而言,还是玻璃棉的效果最好。

(8) 吸声材料经济性比较

从上述价格可以看出,玻璃棉的价格相对较低。

从综合考虑性价比角度考虑,吸声材料(结构) 选用玻璃棉最优。但在有明确针对性实测数据的前提下,从降噪角度出发,吸声材料(结构) 选用穿孔板共振吸声结构最优。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表5 各种吸声材料价格对比表

序号	名称	参数	单位	价格
1	玻璃棉	密度: 48 kg/m³, 厚度: 50 mm	元/m²	20
2	聚氨酯泡沫	开孔型	元/m²	160
3	三聚氰胺泡沫	300×200×50(mm)	元/m²	160
4	K-13喷涂材料	植物纤维(50 mm厚) 45 kg/m³	元/m²	300
5	多孔泡沫铝	密度: 1.16 孔隙率: 57.04	元/m²	800
6	铝纤维吸声材料	密度: 38.2 kg/m³, 厚度为10 mm, 臂后空腔深度为40 mm	元/m²	220~500

5 结 语

城区变电站的噪声治理应根据噪声特性、变电站结构及其所处位置、噪声水平、周围敏感点等具体情况,运用不同的治理手段; 同时应通过计算、技术经济比较,科学选材,制定综合治理的具体方案,以达到环境噪声标准的要求。并应进行试点整治,典型分析,跟踪监测,总结提炼,根据治理效果进行总结推广。

(收稿日期: 2012-09-12)

(上接第3页)

性时有所提高。但从图4中也可以明显看出: 联络线跳开的瞬间,水电机组的功率并非直接上升,而是因为水电机组的动态反调特性作用,机组出力先下降后上升。在机组出力下降过程中,地区电网频率加速下降,有可能造成低频减载装置滑差闭锁或者切荷量不足,最终造成频率失稳,电压崩溃。

4 结论与建议

4.1 结 论

(1) 考虑水电机组调速特性时,联络线(220 kV联络线) 极限传输功率为100 MW,略大于不考虑水电机组调速特性时的极限传输功率80 MW。

(2) 地区电网绝大部分电源为水电机组,由于水电机组动态反调特性的影响,考虑水电机组调速特性时联络极限传输功率提高幅度有限。

4.2 建 议

(1) 加快建设与主网联系第二通道,增强地区电网与主网联络。

(2) 尽快在地区电网内建设火电机组,利用火电机组一次调频作用中和水电机组动态反调特性,提高地区电网与主网解列后频率稳定性。

(3) 加强对应急燃机电源的维护及相关工作,确保应急电源在关键时刻可以起到电源作用。

参考文献

[1] 时珊珊,鲁宗相,闵勇,等. 微电网孤网运行时的频率特性分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(9): 36-41.

[2] 赵强,张丽,王琦,等. 系统负荷频率特性对电网频率稳定性的影响[J]. 电网技术,2011,35(3): 69-73.

[3] 陈桥平,蔡泽洋,李爱民,等. 互联电网的地区频率特性差异性及其对低频减载的影响研究[J]. 中国电力,2009,42(8): 1-5.

[4] 熊小伏,周永忠,周家启. 计及负荷频率特性的低频减载方案研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(19): 48-51.

[5] 赵庆波,曾鸣,刘敏,等. 电力市场中的负荷频率控制方案研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(11): 45-50.

[6] 曾启明,陈伟乐,谢志堂,等. 电力系统频率新的跟踪算法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(19): 48-51.

[7] 秦明亮,杨秀朝. 减少低频减载方案过切的措施的研究[J]. 电网技术,2002,26(2): 83-86.

[8] 肖遥,孟·让·柯洛德. 电力系统频率测量误差成因分析[J]. 电网技术,2002,26(1): 29-42.

[9] 新疆电力调度通信中心. 2011年度运行方式[R]. 2011.

[10] QIU Bin, LIU Yi-yu. Lan-based Control for Load Shedding[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2001,14(12): 38-43.

作者简介:

吴茂乾(1988),男,江苏连云港人,硕士研究生,从事电力市场及电力系统安全稳定分析研究。

(收稿日期: 2012-09-13)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

排油注氮装置重锤误动引发的主变压器事故分析

刘元生
(攀枝花电业局,四川 攀枝花 617067)

摘 要: 随着大容量主变压器在系统内的运行数量的增加,排油注氮消防系统得到大量使用。在防止主变压器故障着火的同时,排油注氮装置的可靠性对主变压器安全运行起着重要作用。装置重锤结构设计的不合理,可能会在外部故障诱因的影响下扩大事故,造成主变压器的损坏。通过一起主变压器事故,分析事故过程,结合排油注氮装置重锤的结构特点,阐述了该装置存在误动的可能性,并提出了相应的预防措施。

关键词: 排油注氮; 重锤; 误动; 事故

Abstract: With the increase of large - capacity main transformer running in the system, the oil - drainage nitrogen - injection fire - fighting system has been used greatly. The reliability of oil - drainage nitrogen - injection device plays an important role in the safe operation of main transformer while preventing the main transformer firing caused by fault. The unreasonable design of the structure of the heavy hammer may expand the accident by the influence of external fault so as to cause the damage of main transformer. Through the analysis on an accident process of main transformer, and combined with the structure features of heavy hammer in oil - drainage nitrogen - injection device, the possibility of misoperation is described and the corresponding precautionary measures are proposed.

Key words: oil - drainage nitrogen - injection; heavy hammer; misoperation; accident

中图分类号: TM406 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003 - 6954(2012)06 - 0073 - 03

0 引 言

目前系统大容量主变压器多采用自耦变压器结构,尽管主变压器故障时发生变压器油燃烧的情况较为少见,但一旦发生主变压器燃烧将产生巨大损失。目前220 kV及以上主变压器消防系统主要采用水喷雾消防系统、排油注氮消防系统、合成泡沫消防系统3种形式,其中排油注氮的使用较为普遍。

排油注氮装置的作用在于:当变压器着火时,达到燃烧温度的油仅局限于上表层油。将化学性质稳定的压缩氮气从变压器底部注入使箱体的油自下而上搅动,加速油在油箱里的循环。这样使已达燃烧温度的上表面层油被下部大量的油冷却,使油的温度降至其闪点以下减缓燃烧。运行期间,一旦变压器起火,重瓦斯和变压器顶盖的热敏探测器均会动作,它们发出的信号使排油系统开始排油,为搅拌做好准备。紧接着搅拌系统启动,氮气瓶内液氮经减压注入变压器油箱,在1~2 min内控制燃烧。在排油过程中,油枕与油箱间形成的油流将装在瓦斯继电器前的流量启闭阀关闭,从而避免"火上浇油"。

1 事故过程

1.1 事故前方式及负荷情况

1.1.1 变电站运行方式

220 kV某站220 kV主变压器两台,1号主变压器容量为300 MVA,2号主变压器容量为240 MVA。220 kV为双母线接线方式,出线4回;110 kV为双母线接线方式,出线7回;35 kV为单母分段接线方式,35 kV 1M、3M共22回出线(其中包括电容器出线8回,备用1回),站用变压器8B、9B分别接于35 kV 1M、3 M。故障前该站负荷158.67 MW,1号主变压器201断路器负荷88.17 MW,101断路器负荷(-)10.19 MW,301断路器负荷(-)71.34 MW;2号主变压器202断路器负荷70.5 MW,102断路器负荷(-)43.69 MW,302断路器负荷(-)33.32 MW;35 kV故障线路负荷4.85 MW。

1.1.2 2号主变压器基本情况

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2号主变压器型号为OSFPS9－240000/220，额定电压为230/121/38.5 kV，冷却方式为ODAF，联结组别为YNaod11，额定分接短路阻抗%为高－中:8.99、高－低:29.3、中－低:18.2。其主变压器排油注氮装置生产日期为2007年5月，投运日期为2007年9月30日。正常运行时该装置处于手动状态。

1.2 事故经过

2010年8月12日15时54分，该站35 kV出线开关过流Ⅰ段保护动作，断路器跳闸，故障选相ABC三相，短路电流7 473.8 A(出线保护装置显示)；15时55分2号主变压器轻瓦斯动作发信号；16时10分2号主变压器差动保护、重瓦斯、压力释放保护动作，2号主变压器三侧开关断路器跳闸。1号主变压器未过负荷。经现场初步检查，2号主变压器差动、重瓦斯、压力释放保护动作，2号主变压器三侧断路器均在分闸位置，2号主变压器压力释放阀处正下方地面上有油迹，瓦斯继电器内无油，主变压器排油注氮装置重锤落下、排油阀门打开、排油管道处有油迹，氮气瓶电磁阀门未打开，未对主变压器进行充氮，因该装置运行于手动位置，装置电源处于断开状态。

1.3 故障点初步分析

事故发生后迅速隔离发生故障的35 kV出线间隔及2号主变压器回路，安排恢复35 kV 3 M及非故障出线运行；迅速组织人员对2号主变压器本体进行检查、试验，并对2号主变压器油进行取样分析。根据油化试验数据，油中溶解气体的“三比值”编码为“102”，属于高能量放电故障。高压电试验数据显示绕组及铁心绝缘较低，直阻、变比与上次测试结果相比较正常。主变压器绕组变形测试结果横向比较与上次测试结果基本吻合，无明显变形迹象。综合上述试验结果，结合继电保护动作情况及故障录波报告，可初步判断2号主变压器内部有放电故障。故障点在主变压器220 kV C相绕组端部附近。

1.4 主变压器解体情况

对主变压器附件进行拆除时，发现220 kV C相套管中部法兰套筒下部有多处放电痕迹，均压球有5 cm^2的烧伤孔洞，套管下尾瓷套表面多处被电弧灼伤、釉质损坏；升高座内壁对应处有放电痕迹，绝缘纸筒被电弧明显烧伤、严重碳化。从套管安装洞对内观察，变压器内未见明显异常。附件及套管拆除后，再次试验结果：①直阻：高压、中压、低压侧与上次检修试验及出厂试验数据相比较正常；②三相变比：高/中、高/低、中/低与上次检修试验及出厂试验数据相比较正常。

主变压器吊罩检查中高、中、低压侧绕组各部位外观均无异常现象；C相高压套管正对油箱底部有被烧伤的绝缘纸和炭渣，高压绕组围屏及铁心表面有微小金属粉末。

2 事故原因分析

2.1 排油注氮安装简图

排油注氮安装简图见图1。

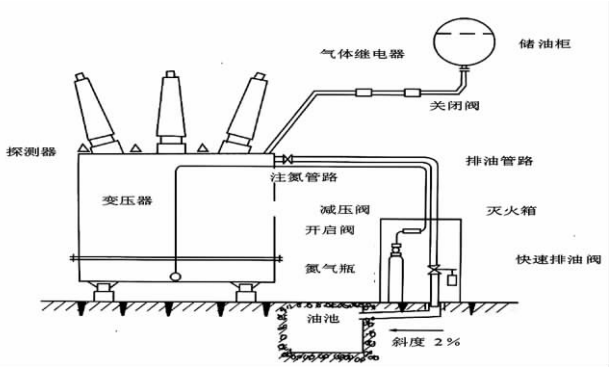


图1 排油－注氮式变压器灭火装置在变压器上的安装简图

2.2 排油注氮装置结构分析

根据排油注氮装置已开始排油、未充氮气的现场实际，初步判断该起事故为主变压器排油注氮装置误动引起。随后技术人员对2号主变压器的排油注氮装置进行模拟试验，将重锤重新放置在支撑的电磁阀阀芯上，模拟外部震动，发现该电磁阀阀芯慢慢后退，最后导致重锤落下。

该装置结构设计不合理，支撑的电磁阀阀芯约有20°左右的坡度，连接重锤的阀杆也有反向的相同坡度，在重锤自身的重力下，有一向电磁阀阀芯动作方向的推力，在装置震动的情况下，该推力更大，致使支撑重锤的电磁阀阀芯慢慢沿动作方向移动，最后，在重锤自身重力下推开电磁阀阀芯而落下，打开排油管道的快速排油阀门。在日常的检查维护中，难以发现和判断该装置中支撑重锤的电磁阀阀芯的后退现象。

因此，导致该排油注氮装置重锤脱落的原因是因为该装置在现场运行环境中，因各种震动使支撑重锤的电磁阀阀芯慢慢沿动作方向移动，最后导致

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

重锤脱落，打开排油管道的快速排油阀门排油。所以该装置结构设计不合理，是造成重锤落下的直接原因。

2.3 主变压器故障分析

2号主变压器因35 kV出线短路故障，短路电动力引起主变压器震动（主变压器与排油注氮装置通过排油管硬连接），造成主变压器排油注氮装置重锤脱落，打开排油阀门，变压器油在自重及油枕内油的压力下开始快速排油，使油枕与瓦斯继电器间的控流阀关闭，此时，该变压器相当于一密闭容器，排油速度迅速放缓，随着瓦斯继电器内油位的下降，使轻瓦斯动作发信（在重锤落下后12 s）。随着变压器油继续排放，空气将沿排油管进入变压器内部，使排油速度逐渐加快，油位继续下降，因排油管与C相升高座距离最近，致使C相升高座内油位低于A、B相套管升高座内油位。随着油位继续下降，C相升高座内绝缘强度逐渐下降，开始发生非贯穿性放电，当油位下降到一定位置时（重锤落下后约15 min），升高座内绝缘强度不能承受均压球处的强电场作用而对升高座内壁放电，产生大量的气体，电弧飞溅烧伤套管法兰，同时使变压器器身内压力急剧上升，瓦斯继电器跳闸节点闭合，跳开三侧断路器，同时因变压器内部压力达到压力释放阀动作值而动作喷油。

3 设备恢复及事故防范

3.1 抢修恢复

将烧伤的220 kV套管、绝缘纸筒更换及全部密封垫更换，将变压器油处理成合格的绝缘油，随后进行了真空注油和热油循环，经静置、油压试漏及常规试验后，主变压器在事故发生20日后恢复送电。

3.2 采取的防范措施

对运行的所有220 kV主变压器的排油注氮装置进行排查，重点对其可能发生误动的重锤等机械部分进行检查。在确保排油注氮装置保持在手动位置的基础上，将排油管道的碟阀暂时设置为关闭状态。同时，积极联系相关设备厂家，对存在隐患的排油注氮装置进行完善化改造，重点将电磁阀拉杆与排油蝶阀摆杆之间的斜面接触改为嵌入式接触，使重锤直接挂在电磁阀上，保证受力点完全在电磁阀拉杆上。

4 结 语

主变压器排油注氮装置对预防主变压器火灾事故的发生起着重要作用。然而，部分装置结构设计的不合理性，可能会在外界故障的诱因下发生误动，从而扩大故障范围造成主变压器事故。排油注氮装置日常状态下应设置为手动（鉴于无人值班变电站的现状，应考虑远方人工启动功能）。同时，对于可能发生误动的重锤、连杆等机械装置，应纳入日常运行巡视范围，确保主变压器安全稳定运行。

参考文献

[1] 王艳，李士林. 大型变压器排油注氮消防系统改造[J]. 河北电力技术，2009，28(5)：45－47.

[2] 高常发 裘永卫. 排油注氮式灭火装置的应用[J]. 电气时代，2005(10)：100－101.

作者简介：

刘元生(1977)，男，工程师，长期从事变电设备检修、高电压及油化等生产技术管理工作。

（收稿日期：2012－09－12）

四川电科院设备状态评价中心完成扎窝变电站220 kV侧GIS设备耐压试验

扎窝变电站位于阿坝藏族羌族自治州的黑水县扎窝乡，是阿坝藏区灾后重建加大提前项目，主变压器容量2×150 MVA。该站220 kV侧共8个间隔，其中设备用间隔1个。在对GIS耐压试验前测得220 kV侧的Ⅰ母和Ⅱ母并联的被试品绝缘电阻仅为22 kΩ，其绝缘电阻远低于规程规定的兆欧级单位，初步判断被试品存在直接接地。经重新分闸接地开关、断开母线联络开发和断开Ⅰ母、Ⅱ母TV间隔，最终发现Ⅰ母、Ⅱ母TV存在接地。将Ⅰ母、Ⅱ母TV一次侧接地线与地断开后，再测其绝缘电阻，兆欧表显示无穷大，表明具备耐压试验条件。于2012年11月13日19点45分，高压室完成了220 kV侧GIS设备耐压试验。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

《油浸式变压器测温装置现场校准规范》规程解读

田 宇
(成都电业局修试所,四川 成都 610000)

摘 要: 变压器投运后安装的监控测温系统在工作原理、使用环境、元件受环境温度影响下,往往附加误差超标。现场温控装置实际工作范围,正常运行条件下,几乎没有可能工作在指示器刻度的上限(终点)和下限(起始点)刻度点位置,由此催生了实验室(按规程)首检合格后现场安装运行的温控装置在工作范围内进行现场再校准的技术要求,就油浸式变压器测温装置现场校准规范以及方式进行了讨论,对降低变压器测温装置误差以及提高仪表测试精确度有一定指导意义。

关键词: 变压器; 测温装置; 校验

Abstract: The additional errors of temperature monitoring and measurement system installed after putting the transformer into operation always exceed the standard, which is influenced by the working principle and the service environment while the elements are under the influence of environmental temperature. The actual working scopes of temperature control devices under the normal operating conditions almost can not work in the upper limit (the end point) and the lower limit (the starting point) of the indicator scale, so it gives birth to the technical requirements, that is, the temperature control devices should be calibrated in the field after the first qualified inspection in the laboratory (according to the regulations) for the site installation and operation. The local calibrating standard of temperature - measuring equipment for oil - immersed transformer and its methods are discussed, which has the guidance significance for reducing the errors of temperature - measuring devices and improving the testing accuracy of instruments.

Key words: transformer; temperature - measuring equipment; calibration

中图分类号: TM406 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003 - 6954(2012)06 - 0076 - 04

1 问题的提出

(1) DL/T 572 - 2010《电力变压器运行规程》中明确规定: 变压器投运后,现场温度计指示的温度、控制室温度显示装置、监控系统的温度三者基本保持一致,误差一般不超过5 ℃。

(2) 基于就地安装的压力式温控器与远方温度显示装置(监控测温系统)是两个独立的检测系统,分别按照JJG 310《压力式温度计检定规程》(以下简称规程)和JJF 1183《温度变送器校准规范》检测,两台检测合格装置,亦可能存在3 ℃ ~4 ℃的系统误差。两套装置在工作原理、使用环境、元件受环境温度影响的附加误差各不相同,更使得两表一致性问题突出,往往超标。

(3) 现场温控装置实际工作范围,正常运行条件下,几乎没有可能工作在指示器刻度的上限(终点)和下限(起始点)刻度点位置。

为此,催生了实验室(按规程)首检合格后现场安装运行的温控装置在工作范围内进行现场再校准的技术要求,并出台了Q/GDW 440 - 2010《油浸式变压器测温装置现场校准规范》(以下简称规范)。

2 关于现场校准

2.1 校准点的选择

参照油浸式变压器A级绝缘耐温上限为105 ℃的技术参数,同时力求避开刻度上、下限,原则上在工作温度范围内取三点。中心刻度一般取工作温度范围的中值点,再增加中心点上下对应两点作为现场校准点(详见《规范》中表4)。

2.2 现场校准的主从关系

"指针温度计可用于就地示值读取,温度控制和非电量保护,其远方显示装置仅用于对指针示值的远方读数"。《规范》准确地点明了两者关系和位置。两者就是主从关系,远方显示的地位就是就地

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

示值的“跟随器”，充当就是就地温控器的远方读数器而已。为此，在指针表、变送(显示)器、监控系统中交流采样测量装置(测温直流通道)、后台机温度数据标度系数的联合调试中，关键是先校准指针表的校准点，再调试远方测温系统与指针表示值的一致性。

2.3 两表偏差应不大于±0.5 ℃的校准难关

(1) 精准读数与分辨率

一般指针表最小刻度间隔为2 ℃，倘要满足≦0.5 ℃指标，势必要求精准细分到1/4最小间隔以下，而人工读数分度、视差、观察条件的局限都将影响示值读数的准确性。

(2) 非线性影响

温度变送器、指针式表计、监控系统测量环节，在不同的三点温度刻度上，均存在一定的非线性因素。若远方测温系统系Pt100经温度变送器至交流采样测量装置，首先Pt100的$Pt-t$曲线自身就呈现上凸特性的非线性特征，变送器、交流采样(模拟)直流通道也存在一定程度的非线性放大问题。

(3) 多数早已投运的远方测温系统都进行相应的技术改造还不太现实，倘能在如下环节进行改进，还是比较有可操作性的。分别利用变送器、交流采样测控装置的零点和满度调整，还可利用监控系统后台机的测温YC点标度系数和偏移值修正的“组合奏”来满足三点校准的准确度要求。

(4) 关于高度差造成的静态柱的影响

《规程》规定“检定时，表头和温包之高度差应不大于1 m”。实验室检验时，通常是表头高于温包近1 m左右，而实际现场安装运行条件，大多是温包高于表头2~4 m，其温包内的液体介质将产生静态柱差，若现场检验(校准)时，图方便将恒温槽置于地面，传感器温包取下后放入温槽，此时静态柱差将出现最大值(校准位置与运行位置完全相反，其影响量出现最大差值)。欲满足调合“两表差”要求，这一个环节亦是不能忽略的。

3 校准后的两表偏差

《规范》要求“校准后的指针温度计，在校准点两表偏差应不大于±0.5 ℃”。据引用国内外相关标准一致规定，准确度1.5级、测量范围160 ℃的温度计在环境温度变化±40 ℃时，最大允许误差为±3.2 ℃。重复性误差不超过±1.2 ℃。(重复性误差指，从同一方向对同一输入值进行(至少三次)的多次连续测量所获得的随机误差，它是压力式温度计不可克服的最小误差)。即使检定合格的温度计其上述两项误差相加后与远方测温系统的“两表偏差”故有的最大偏差可达4.4 ℃，而DL/T 572《电力变压器运行规程》规定本体和远方测温系统示值限值为±5 ℃，所以，在扣除两套(不同工作原理)测温系统固有的系统误差4.4 ℃后，仅乘0.6 ℃空间。为此，提出了现场校准后，两表偏差不应大于±0.5 ℃的指标。可否理解为，这个不超过±0.5 ℃的两表偏差，是针对现场校准时的调试准确度要求，而运行中的随机温度检查(因其影响量甚多)还是应按《变压器运规》的不超过±5 ℃为准。

4 关于环境温度变化量影响

基于环境温度变化影响量的质量保证，应属于制造厂家设计、选材、生产环节质量控制及特性试验项目，运用中的现场几乎是不可能改变其结构性特征，所以在《规范》中并未将其列入校准项目。

通过《规范》编写专家组组织对当前系统内采用的国内外油浸温控器主要型号进行的较细致、严谨的附加温升项目及影响量(附加误差)测试，为今后选型、技术改造、校准提供了重要的参考数据。

另外有一个设想，之所以现有表内(温度补偿用波纹管、波登管)不能完全补偿环境温度影响，其毛细管长度差异，温包毛细管处户外环境与补偿用毛细管处于表内环境等温度环境条件差异而造成附加误差较大。倘若从温包处开始设计为双毛细管相似于补偿用毛细管延伸(补偿用毛细管另一侧不焊入温包内)，使压力式温控器主转矩传导毛细管与补偿用毛细管的长度、工作环境条件(即受环境温度影响的外在条件)完全相同，则补偿将更加彻底，环境温度(即使温度毛细管处于变压器顶部行线槽内)带来的附加温升误差将成数量级减小。

5 接点动作误差

《规范》要求“指针式温度计的上行程接点动作误差应不超过±2.4 ℃”。显然是按准确度1.5级、

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1 主要采用厂家型号基础数据表

厂家	项目				
	准确度	接点动作误差	接点切换误差	接点功率(阻性)	传感器温包尺寸
AKM	±3 ℃	4 ℃	10 ℃~14 ℃	AC250 V/15A DC220 V/0.3 A	Φ14 mm×113 mm
特曼	±2.5%	2%(全刻度)	4%(全刻度)	AC250 V 标准微动开关 5 A 高性能微动开关 10 A	Φ16 mm×180 mm
MESSKO	±2 ℃	≤3.6 ℃	3%(测量上限)	AC250 V/5 A	Φ9.5 mm×150 mm
科宏	±2 ℃	≤3.6 ℃		AC250 V/10 A(5 A)	Φ14 mm×150 mm
华立	1.5级	±3 ℃	6 ℃±2 ℃	AC250 V/3 A	Φ14 mm×150 mm
大连世有	1.5级	±2 ℃	(6±2) ℃	AC250 V/5 A	Φ14 mm×150 mm

测量范围160 ℃表计来考虑的。此处有以下三点值得注意。

(1)《规程》接点设定误差规定应不超过±3.6 ℃,而《规范》要求之差限值±2.4 ℃,即此规程要求更严,将出现首检按《规程》"接点动作误差"合格而运行后现场按《规范》校准时,相同数值都被判超标不合格的状况。

(2)《规程》中"接点设定点误差",系指上切换值和下切换值的平均值(即切换中值)与接点设定值的差值。《规范》中"接点动作误差"系指接点上行程动作值与温度计接点设定值之间的差值,两者之间有较大的实质区别,从运用角度,显然《规范》考核接点上行程瞬间示值比《规程》中取上、下行程动作平均值更贴近接点输出实取上行程动作值的实际运行情况(运用于油泵,风机启动后降温后返回者除外)。

(3)为避开微动开关接点在动作点附近出现反复弹跳,国内外一厂家专门设计了"宽范围"接点切换差表计,详见下表1。

如AKM厂表,接点切换差10 ℃~14 ℃,在实际运用中,拉开距离的接点切换差完全避开了温度在动作值附近绕动时出现的接点弹跳(即频繁地出现启动、停运状态),同时,因其宽范围的切换差性能,使同一组接点的下切换动作值又充当了风扇和油泵启动后,变压器运行温度下降时需要的停机返回功能角色。此处还可节省两组"返回"接点。显然,与《规程》"切换差"越小越好的指标是背向的(但确又是非常实用的)。为此,在评判上还是不要一刀切为好,本身就是特殊功能者,理应按出厂技术指标为准。

6 关于接点功率

《规范》明确提出了"接点功率(阻性)负载不小于AC250 V/10 A"要求。从接受动作后,普遍要带一个中间继电器负载,返回后线圈还有反电势冲击,对接点容量有一定要求是很到位的。遗憾的是除AKM等少数厂家选用微动开关满足要求外,多数厂家均≤5 A,而不满足不小于10 A的《规范》要求。

7 关于跳闸输出用一段闭锁二段

按国网公司【2004】生产营(104号)《变压器温度保护指导意见》"油浸式变压器的本体油温度保护一段作用于信号,二段作用于跳闸,用一段输出闭锁二段输出"。即用顶层油温85 ℃温高报警闭锁115 ℃油温过高跳闸。在原设计和技术改造中,普遍采用同一表内两组接点串联完成一段闭锁二段功能,基于同一表内两组接点在接近动作值时,其两组微动开关也相继进入行程接近动作导通临界距离(即离动作行程距离很靠近),倘表计受外力、振动因素作用下,极易出现误动,从而起不到闭锁,增加可靠性的初衷。《规范》附录F中明确提出用两侧不同温度计接点串联(完成闭锁),此举是十分必要的和符合现场运行实际的,可增加可变温度保护动作的可靠性,减少误动发生。与贯彻四川省公司135号文时,提出的改进闭锁措施也是完全相同的。

8 关于绕组温控器检定时基础油温的选定

《规范》附录D,绕组温控器热模拟试验时,选择基础油温为80 ℃,认为是较合理的,因在基于油浸式变压器A级绝缘耐温上限105 ℃极限下,实际选择基础温度越高则附加温差越低,得到的热模拟试验结果将更真实。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

9 关于校准周期

《规范》要求结合Q/GDW 168－2008《输变电设备状态检修试验规程》开展温控器现场校准工作，168号规程中要求对测温装置3年检查一次，每6年校验一次。即《规范》中校准周期一般不超过6年时限。在实际执行中，可参照3年进行一次接点、整体传动、本体、远方数值核对(并记录)，6年进行一次现场再校准试验。这样，既可减少不必要的频繁折腾，又保证准确、可靠性。

10 结 语

变压器投运后安装的监控测温系统在工作原理、使用环境、元件受环境温度影响下，往往附加误差超标。现场校准方法的正确运用不仅能使测温装置准确反映变压器运行状态的真实温度，而且更能安全可靠地保障变压器正常运行，校准规范既为现场检验(校准)工作的开展提供了更为科学的依据和更人性化的准绳，同时亦兼顾了测温装置现场实际运行中的诸多实际问题，适用性强。在当前电网不断扩容的背景下，变压器温度监测更是提到了前所未有的高度，测温装置的重要性更是不言而喻。前面就油浸式变压器测温装置现场校准规范以及方式进行了讨论，对降低变压器测温装置误差以及如何提高仪表测试精确度有一定指导意义。

参考文献

[1] JJG 310－2002，压力式温度计[S].
[2] Q/GDW 168－2008，输变电设备状态检修试验规程[S].
[3] DL/T 572－2010，电力变压器运行规程[S].
[4] 变压器用温控器说明书(R).
[5] 国网公司，(2004)生产营(104号)变压器温度保护指导意见(R).

作者简介：

田 宇(1982)，男，技师，从事变电站电测、热工及电能质量技术监督，监控系统及变电站自动化装置的维护工作。

(收稿日期：2012－05－22)

(上接第13页)

其相应的具体控制流程图如图1所示。

5 结 语

普通电力用户在低负荷情况下，通常受到力率电费考核，在极端情况下甚至达到总电费的40%以上，不仅用户的利益受到了极大的损失，也增加了电网的线损。

通过合理配置电容器的大小，改进电容器的配置方式，同时对智能投切控制器程序进行优化设计，使之具备电容器的寻址功能和不同负荷电流大小的判断功能，既可不仅满足低负荷时负荷的无功补偿，也可满足低负荷时对变压器无功的补偿，使得用户在低负荷情况下功率因数显著提高，避免了用户不必要的经济损失，对降低电网线损也起着积极的作用。

参考文献

[1] 闻桂陈，李湘君. 变压器无功补偿问题探讨[J]. 电气技术，2009(10)：87－87.
[2] 薛明琪，纪勇兵. 电网无功补偿容量的选择[J]. 低压电器，2009(1)：47－49.
[3] 张元军，刘绍东等. 智能无功补偿装置的研究[J]. 煤矿安全，2007(11)：9－12.
[4] 王娟，杨淑英. 低压无功功率补偿系统的实用化设计一例[J]. 华东电力，2007(1)：79－81.
[5] 薛明琪，徐洪. 低压无功补偿投切电容装置选用探讨[J]. 电气应用，2007(4)：44－46.
[6] 李克芹，刘冬英. 切换电容器交流接触器在无功补偿中的应用[J]. 低压电器，2009(5)：63－66.
[7] 王志洁，季美红. 低压并联电容器无功补偿方案的确定与实现[J]. 电工电气，2009(6)：29－31.

作者简介：

黄 斌(1977)，男，研究生，四川德阳电业局，工程师，主要从事营销管理工作；

吕飞鹏(1968)，男，博士，教授，研究方向为电力系统继电保护和综合信息处理智能系统。

(收稿日期：2012－05－22)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大型双馈异步风力发电机组变桨控制算法研究

丁艳军
(许昌许继新能源控制系统公司,河南 许昌 461000)

摘 要: 变桨控制系统[1]是变速恒频风力发电机组的重要组成本分,它不仅关系到大型MW级风机的安全运行,而且对风能的吸收具有较好的控制作用。其中变桨控制算法是其控制系统的核心部分,为减小整机机械载荷、风机功率的稳定输出做出重要贡献。基于2.0 MW双馈风力发电系统的基础上,提出了具有转速二阶陷波滤波器的增益调度-双PI(notch filter gain-schedule double PI)控制算法,对风机运行于额定风速以上的变桨控制策略[2],使风机能够以最佳的速率变桨到最佳桨距角位置,从而输出稳定的功率,减小整机的振动,减小风机在3P、6P处产生过大的振动。最后对2.0 MW双馈异步风机变桨控制进行仿真和实际监控图分析,结果表明,其控制算法具有良好控制效果。

关键词: 变桨控制; 增益调度; PI控制; 双馈异步; 陷波滤波器

Abstract: Pitch control system is an important part of the variable speed constant frequency (VSCF) wind power generators. It is not only related to the safe operation of large MW grade wind generators, and also to the better control effect on the absorption of wind power. The pitch control algorithm is the core part of the control system, which makes an important contribution to the reduction of the mechanical load and the stability of the power output. Based on 2.0 MW double-fed wind power systems, gain scheduling-double PI (notch filter gain-schedule double PI) control algorithm with second-order notch filter is proposed, which makes wind generators in the best rate to reach the best position for the pitch control strategy in which the wind generator is operating above the rated wind velocity. This algorithm is able to output the stable power and reduce the vibration of the whole machine. Finally, the simulation and practical monitoring diagram analyses for the pitch control of 2.0 MW double-fed induction generators are carried out. The results show that the proposed control algorithm has good control effect.

Key words: pitch control; gain scheduling; PI control; double-fed induction generator; notch filter
中图分类号: TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2012)06-0080-06

0 引 言

在大型双馈异步风力发电机组中,由于变桨距风力发电机组与定桨距风力发电机组相比,具有在额定功率点以上输出功率平稳的优点,因此当前世界上主流机型为变桨距控制的大型并网式风力发电机,中国风电机组正由定桨距型向变桨距型过渡。因此对风力发电机的变桨距控制及变桨距原理的研究是必要的也是紧迫的。

当风速达到或超过额定风速后,风力发电机组进入额定功率状态,在传统的变桨距控制方式中,这时将转速控制切换至功率控制,变桨距系统开始根据发电机的功率信号进行控制。控制信号的给定值是恒定的,即额定功率。功率反馈信号与给定值进行比较,当功率超过额定功率时,桨叶桨距就向迎风面积减小的方向转动一个角度,反之则向迎风面积增大的方向转动一个角度。然而这种方法不能快速反映发电机转速变化情况,容易导致发电机转速上升,对风机安全造成影响。因此提出了基于发电机转速的具有二阶陷波滤波器的增益调度-双PI(notch filter gain-schedule double PI)控制算法,此算法对发电机转速的干扰起到较好的滤波作用,并且对于转速的波动具有快速平稳调节作用,保障风机安全运行。

1 变桨距角的调节原理[3]

风力机吸收风能产生的输出功率为

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

式中,P为输出功率;C_p为风能利用系数;ρ为空气

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

密度; R 为风轮半径; V 为风轮正面风速。

风力机将风能转化[4]为机械能传递给负载，机械能表达式为

$$P_m = T\omega = P \tag{2}$$

式中，P_m 为机械能; T 为风力机扭矩，ω 为风力机角速度。这里的风力机扭矩 T 是由负载决定的，这样由式(1)，式(2)得出

$$\omega = \frac{1}{2}\rho\pi C_p R^2 V^3 / T$$

当风力机处于一定的风速 V 下，对于一定的负载，ρ、π、R 是常数。那么转速就取决于风能利用系数 C_p 的大小，即 $\omega \infty C_p$。

根据叶素特性理论，分析风轮起动后以某种速度稳定旋转时叶片的受力情况，从而得出理想情况下气流与叶片角的关系为

$$I = i + \beta, \mathrm{tg}I = \frac{V}{\omega r} = \frac{1}{\lambda}$$

其中，i 为攻角; β 为桨距角; I 为倾角; λ 为叶尖速比。

根据力的平衡关系，叶片的扭矩为

$$T = \frac{1}{2}\rho C_m R V^3 A \tag{3}$$

$$C_m = \frac{C_L(\sin I - \frac{1}{C_L/C_D}\cos I)}{\sin^2 I}$$

式中，C_m 为扭矩系数; A 为风轮的扫掠面积; R 为风轮半径; V 为叶片的相对风速。由式(3)可得

$$\frac{1}{2}\rho C_p R^2 V^3 = \frac{1}{2}\rho C_m R V^2 A\omega \tag{4}$$

所以有

$C_p = C_m \frac{R\omega}{V} = C_m\lambda_0$，$\lambda_0$ 为叶尖速比。

可见 C_p 正比于 C_m，所以当攻角 i 增大时风能利用系数 C_p 增大; 反之，当攻角 i 减小时风能利用系数就减小。当风速与风力机负载一定时，当攻角 i 增大，C_p 增大，风力机转速增大; 反之，当攻角 i 减小，C_p 减小，风力机转速减小。再由式 $I = i + \beta$ 知，i 增大，β 将减小，i 减小，β 将增大。为了直观起见，通常用桨距角 β 来表示上述关系，当桨距角 β 增大时，风力机转速下降，当桨距角 β 减小时，风力机转速增加。

又定义桨距为 $H = 2\pi r\mathrm{tg}\beta$

所以通过改变桨距角 β 就改变了桨距 H，也可以改变风力机的转速 ω，这就是风力机变桨距的调节原理。

图1是变速风力发电机控制运行原理[5]。

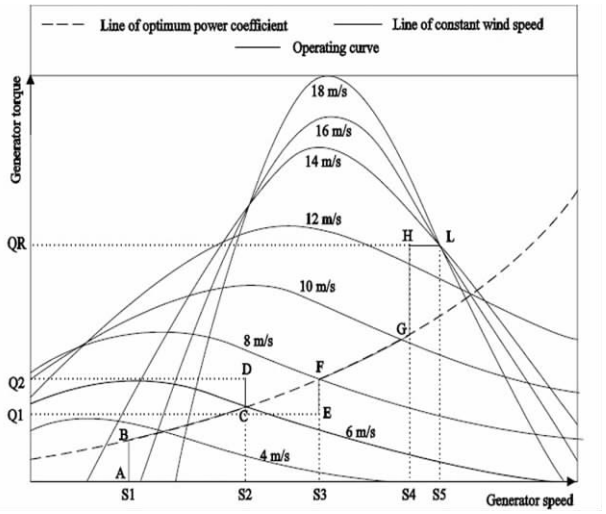


图1 变速变桨距调节运行曲线

图1是变桨距调节运行曲线，横坐标为发电机转速(generator speed)，纵轴是加入的发电机转矩(generator torque)。反映风机在运行时发电机根据转速、转矩的风机分别在各个阶段的运行曲线[6]。

稳态运行参数如下。

(1) 低于额定转速时，也即从点 A 到 H。

(2) 在额定转速以上，叶片桨距被调节到并保持在所选定的由 L 标明的运行点。一旦在 H 点达到额定扭矩，在所有更高的风速中，扭矩需求量保持常数，并由桨距控制来调节叶轮的转速。在点 H(此处扭矩达到最大值)与(此处开始桨距控制) L 之间允许有一小段余量，以防在低于和高于额定扭矩的控制模式之间作过度频繁的模式切换。

2 基于2.0 MW双馈风机变桨控制的算法

基于双馈风力发电系统的基础上，使用具有转速二阶陷波滤波器的增益调度－双PI控制算法。二阶陷波滤波器可以抑制塔筒的3p、6p振动频率，防止引起共振。带增益调度－双PI控制器对于不同的风速引起不同的变桨角度，使叶片在不同桨距角使用不同的变桨速率，使发电机转速平稳运行。

2.1 变桨控制结构图

图2为所提出的双馈异步风力发电机组的变桨

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

控制结构图，采用具有转速二阶陷波滤波器的增益调度－双 PI 控制算法。发电机实时测量转速经过二阶陷波滤波器后通过变桨调度表(pitch－sche table) 非线性处理，输入给双 PI 控制器。PI 控制器给定输入为发电机转速实际值与给定转速的差值。将桨距角通过增益调度技术(gain－sche table) 后加入 PI 控制器的参数 k_P 中，得到需求的变桨角度。

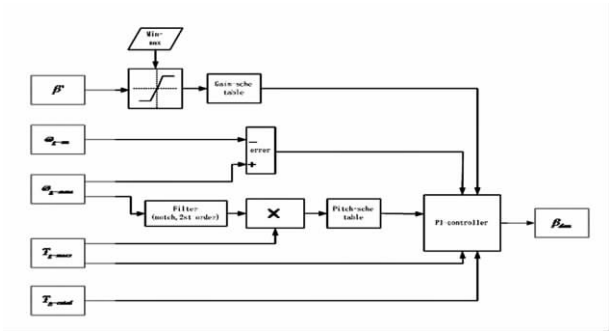


图 2　变桨控制结构图

2.2　二阶陷波滤波器

二阶滤波器对发电机转速滤波，增加了系统的衰减，避免塔筒的振动和转速的快速变化。

二阶滤波器的传递函数如下。

$$G(s) = \frac{s^2 + \omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2}$$

其中，ω 为滤波器的固有频率; ξ 为衰减系数。

固有频率 ω 的取值应当与驱动器频率接近; 衰减系数 ξ 反应滤波器的宽度和强度，ξ 应增大直到对目标频率产生明显的滤波效果。

2.3　二阶驱动滤波器的仿真效果

其传递函数如下。

$$G(s) = \frac{s^2 + \omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \quad (5)$$

利用 Matlab 求出式(5) 的幅频特性曲线如图 3。

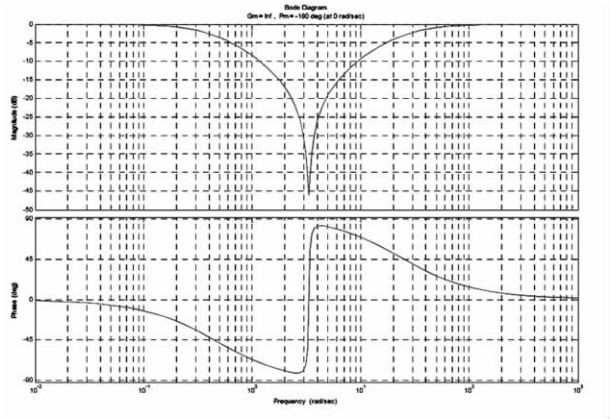


图 3　二阶陷波滤波器的幅频特性曲线

$$G(s) = (s^2 + \omega^2) / (s^2 + 2\xi\omega + \omega^2)$$

3　变桨的双 PI 控制算法[7]

目前，变桨距风机的桨距角多以 PID 控制方法，PID 具有控制技术成熟、结构简单、易于工程实现等特点。模糊控制、神经网络控制等先进的智能控制技术可以解决系统非线性、多干扰、切换鲁棒性等问题，但实用性上还有待实际验证，目前处于研究阶段。把微分项确定为零，采用 PI 结合增益调度技术控制是基于桨距角控制的基本思路。

3.1　PI 控制算法

大型风力发电机组的桨距角不仅需要满足限制范围的要求，还应满足变桨距速率的要求。在满足控制性能指标的基础上，适当放宽变桨距速率可以节省变桨距驱动设备的投资。图 4 描述了 PI 变桨距控制技术。

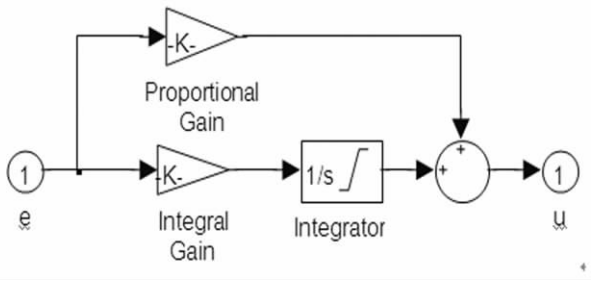


图 4　PI 变桨距控制技术

在控制系统中，调节器最常用的控制规律是 PID 控制。所谓 PID 控制，就是指根据系统偏差 $e(t) = r(t) - c(t)$ 的比例 P、积分 I、微分 D 环节，通过线性组合构成控制量对控制对象进行的控制。实际的运行经验和理论分析都表明，PID 控制器具有结构简单、稳定性好、可靠性高等优点，因此在变桨距控制系统中使用的比较广泛。常规 PID 控制系统原理框图如图 5 所示。

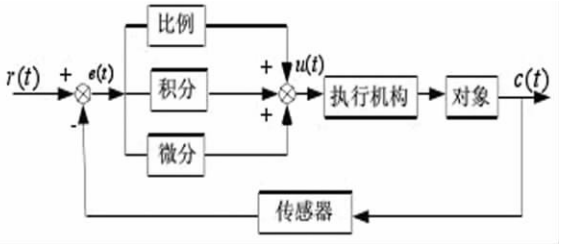


图 5　PID 控制系统原理框图

PID 调节器的控制规律为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_1} \int_0^t e(t)\, dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (6)$$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中，K_P 为比例系数；T_I 为积分时间常数；T_D 为微分时间常数。简单来说，PID 调节器各校正环节的作用如下。

(1) 比例环节即时成比例地反应控制系统的偏差信号 $e(t)$，偏差一旦产生，调节器立即产生控制作用以减小偏差。

(2) 积分环节主要用于消除静差，提高系统的无偏差度。积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_I，T_I 越大，积分作用越弱，反之越强。

(3) 微分环节能反应偏差信号的变化趋势(变化速率)，并能在偏差信号的值变得太大之前在系统中引入一个有效的早期修正信号，从而加快系统的动作速度，减少调节时间。

PID 控制器的传递函数为

$$D(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p\left(1 + \frac{1}{T_1 s} + T_D s\right) \quad (7)$$

3.2 变桨双 PI 控制算法

双馈异步发电机组变桨的双 PI 控制如图 6。

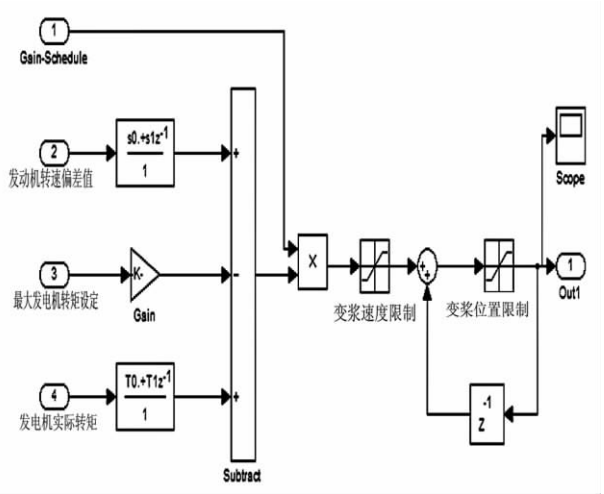


图 6 变桨的双 PI 控制图

取 $K_p = 0.037$，$K_i = 0.18$，如图 7 为输入为 PI 输入曲线，通过 PI 控制后得到图 8 的曲线。

4 Gain－schedule 控制思想

增益调度技术广泛地应用于实际的工程项目中，这种技术与一簇线性时变控制器及一种算法相联系，当工作点进行计算时，将会改变控制器使之应用到模型中去。线性变参数增益调度模型可以用如下方程组进行描述。

$$\begin{cases} x(t) = A(\theta(t))x(t) + B(\theta(t))\omega(t) \\ z(t) = C(\theta(t))x(t) + D(\theta(t))\omega(t) \end{cases} \quad (8)$$

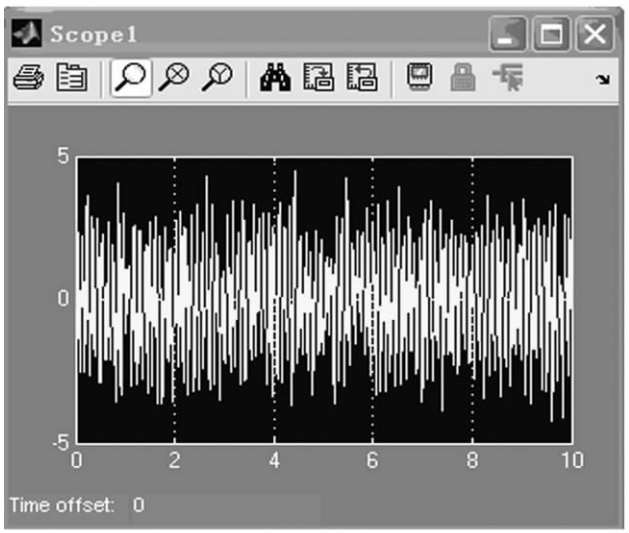


图 7 输入为 PI 输入曲线图

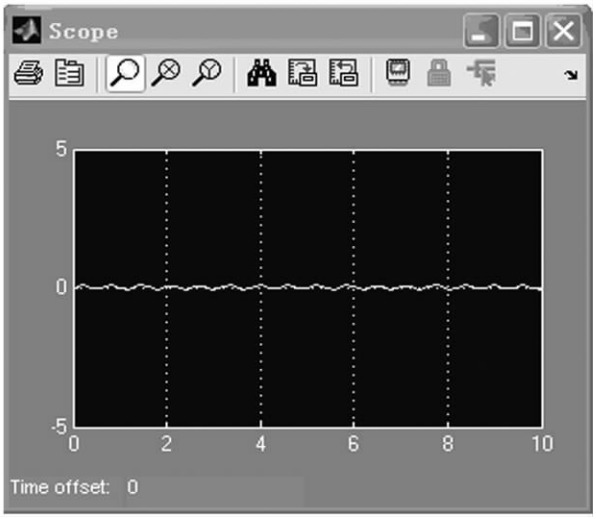


图 8 PI 控制效果图

式中，$A(\cdot)$、$B(\cdot)$、$C(\cdot)$、$D(\cdot)$ 为时变参数在有界集 Θ 中取值时向量 $\theta(t)$ 的连续函数。对于任意给定的角度 $\theta(t)$，线性变参数增益调度模型都将衰变为一个 LTV 模型，当 $\theta(t)$ 取常数时，LPV 模型实际为 LTI 模型。对一组平衡点附近的工作点进行线性化是从一个非线性系统中获取 LPV 模型最常用的方法，这种方法通常应用于 LPV 模型控制策略，同时也应用于经典增益调度技术中。

对桨距角测量作为 $\theta(t)$ 向量，对变桨角度的变化为参变量，增益值从起始角度为 5°，终止角度为 25°的桨距角做增益线性化改变。使变桨控制器的 PI 参数具有可变性，对风机处于不同的桨距角位置，控制参数线性的改变，具有较好的变桨控制效果。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5 Matlab 总体实现框图及实际截图的分析

取发电机转速的给定值为 1 800 r/min，实际转速函数为 1 800 + 10 sin(ωt) 加入 Simulink 中自带的高斯噪声函数为输入的发电机转速。如图 9 Scope1 所示。

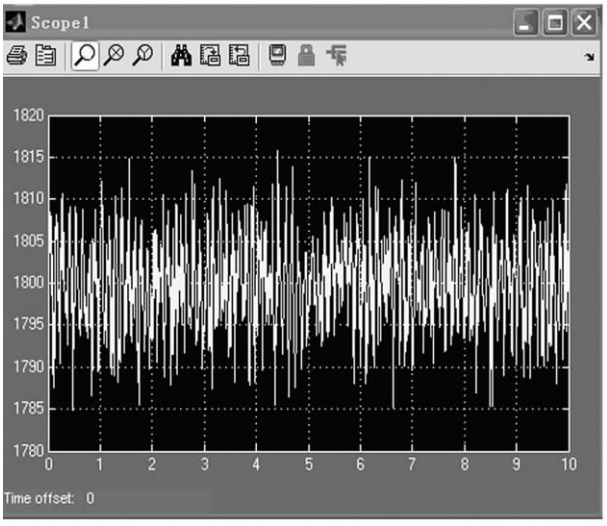


图 9 输入发电机转速

利用所提的控制算法得到图 10Scope 变桨角度，可以看出变桨角度控制较为平缓稳定。

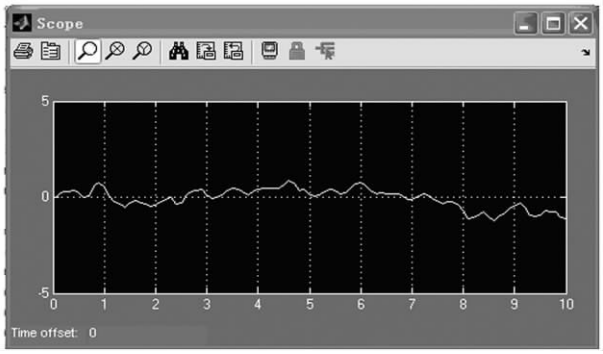


图 10 风机变桨角度

下面是在 2.0 MW 双馈异步风机运行中采用所提控制算法得到的实际截图。图 11 为实际风速 - 发电机转速 - 功率运行曲线，绿色曲线为风速变化曲线且平均风速在 11 m/s 以上，蓝色曲线为发电机转速变化曲线并且维持在额定转速附近工作，红色曲线为功率输出曲线且维持恒定功率处运行。图 12 为桨叶角运行曲线，红色曲线为采用变桨控制算法得到的变桨运行曲线。图 13 为风机振动曲线，振动值小于 0.2。

从实际运行图可以看出：使用具有转速二阶陷波滤波器的增益调度 - 双 PI 控制算法，对风机运行于额定风速以上的变桨控制策略，风机能够以最佳的速率变桨到最佳桨距角位置，从而输出稳定的功率，减小整机的振动，减小风机在 3P、6P 处产生过大的振动。所以，所提的变桨控制算法具有较优越的控制效果。

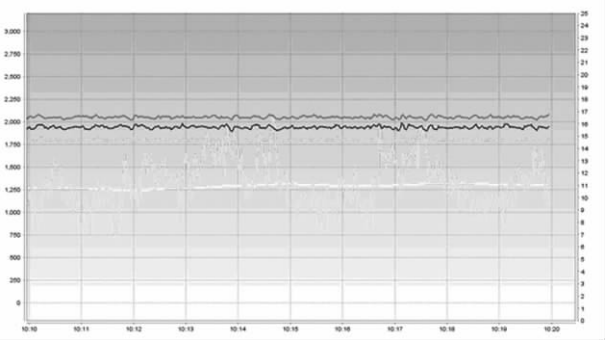


图 11 实际风速 - 发电机转速 - 功率运行曲线

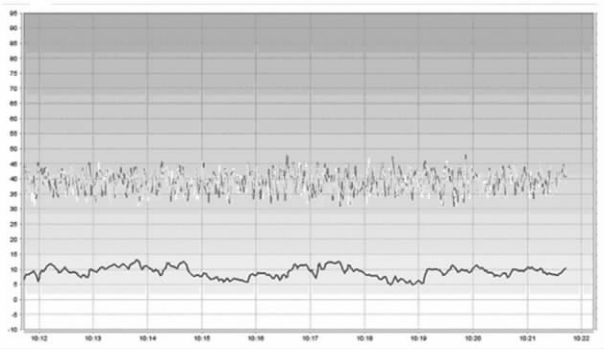


图 12 桨叶角运行曲线

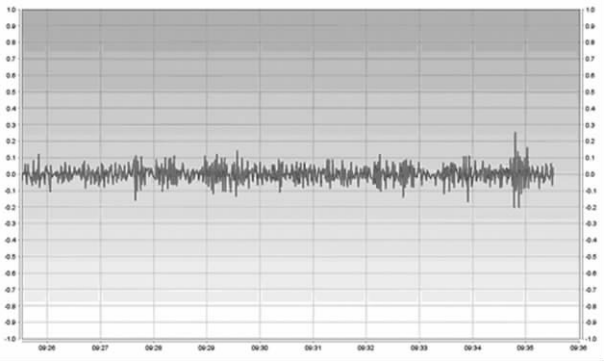


图 13 风机振动曲线

6 结 语

采用所提的控制算法，能够使风机变桨控制比较平稳，并以最佳的速率变桨到最佳桨距角位置，从而使输出稳定的功率，减小整机的振动，减小风机在 3P、6P 处产生过大的振动。所采用的变桨控制算法具有很好的实际应用效果。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献

[1] N. Horiuchi、T. kawahito. Torque and Power Limitations of Variable Speed Wind Turbines Using Pitch Control and Generator Power Control. IEEE, 2001.

[2] Yousif EI – Tous. . Pitch Angle Control of Variable Speed Wind Turbine. American J. of Engineering and Applied Sciences, 2008.

[3] Olimpo Anaya – lara, Nick Jenkins, Janaka Ekanayake, Wind Energy Generation Modelling and Control [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[4] 叶杭冶. 风力发电机组控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[5] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

[6] Lulian Munteanu, Luliana Bratcu, Nicolaos – Antonio Cutululis, et al. Optimal Control of Wind Energy Systems [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

[7] 樊国平, 智能PID控制系统的设计与研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2005.

作者简介:

丁艳军, 男, 工程师, 研究方向为风力发电机组控制系统。

(收稿日期: 2012 – 04 – 13)

(上接第67页)

同温度、不同电场强度下环氧材料中的空间电荷分布; 分析了温度、电场强度、加压时间等因素对环氧材料中空间电荷特性的影响; 并进一步研究了环氧材料玻璃化转变前后的空间电荷特性。主要得到以下结论。

(1) 环氧材料中的空间电荷分布受到温度及外施电场的影响。温度对环氧中空间电荷的影响较大。当温度与环氧的玻璃化转变温度(T_g)相比, 处于不同状态(低于T_g、接近于T_g、高于T_g)时, 环氧材料中的空间电荷分布呈现出较大区别。环氧材料中的空间电荷量随温度升高而增大; 特别是当温度为80 ℃时, 空间电荷量明显增大。

2) 环氧材料中异极性电荷的出现主要是由于材料中的水分等挥发性杂质, 以及固化过程中形成的其他杂质电离在玻璃化转变温度附近迁移而造成的。当温度高于环氧树脂的玻璃化转变温度时, 材料中出现大量的空间电荷, 说明环氧树脂由玻璃态向高弹态的转变更有利于空间电荷的形成。

参考文献

[1] 王德中. 环氧树脂生产与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.

[2] T. Iizuka and H. Takai. Effect of Temperature and Water Salinity on Hydrophobicity of Epoxy Resin [C]. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1997, 1: 41 – 44.

[3] D. Fabiani, G. C. Montanaril, A. Dardano, G. Guastavino, L. Testa and M. Sangermano. Space Charge Dynamics in Nanostructured Epoxy Resin [C]. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2008: 710 – 713.

[4] J. C. Fothergill. Space Charge in Dielectrics: Old Theories and New Measurements [C]. Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, 2000: 1 – 8.

[5] Hole, S. Sylvestre, A. Guillermin, C. Rain and P. Rowe, S. Space Charge Measurements on Filled Epoxy [C].

[6] 王霞, 吴超一, 何华琴, 等. 茂金属聚乙烯改性低密度聚乙烯中空间电荷机理的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 158 – 162.

[7] 王霞, 成霞, 陈少卿, 等. 纳米ZnO/聚乙烯复合材料的介电特性 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 13 – 19.

[8] Montanari GC, Ghinello I. Space Charge and Electrical Conduction – current Measurements for the Inference of Electrical Degradation Threshold [J]. Vide Science, Technique et Applications, 1998, (287, suppl. issue): 302 – 311.

[9] Mazzanti G, Montanari GC, Alison JM. A Space – charge Based Method for the Estimation of Apparent Mobility and Trap Depth as Markers for Insulation Degradation – theoretical Basis and Experimental Validation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10 (2): 187 – 197.

作者简介:

王青山(1975), 男, 工程师, 现任四川省电力公司内江电业局东兴供电局副局长。

(收稿日期: 2012 – 07 – 12)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

微油点火在600 MW超临界W火焰炉的应用研究

刘鹏远[1]，肖宏博[2]，谢明均[2]，赵兴华[2]，杜维毅[3]，廖永浩[1]
(1. 华电电力科学研究院，浙江 杭州 310030; 2. 四川华电珙县发电有限公司，四川 珙县 644502;
3. 山西鲁晋王曲发电有限责任公司，山西 长治 047500)

摘 要: 介绍了微油点火技术在600 MW超临界W火焰炉上的应用情况，并进行了微油燃烧器运行方式优化试验，锅炉升温升压稳定。与不采用微油点火相比，锅炉冷态启动过程油耗明显降低，节油效果明显。

关键词: W火焰锅炉; 微油点火; 节油率

Abstract: The application of tiny - oil ignition technology to 600 MW supercritical W flame boiler is presented, the optimization tests for the operation of tiny - oil burners are carried out, and the temperature rise and pressure rise rates of boiler are stable. Compared with the ignition without tiny oil, the oil consumption is significantly reduced during the cold start - up process of boiler, and the effect of oil saving is obvious.

Key words: W flame boiler; tiny - oil ignition; oil saving rate

中图分类号: TK229.92 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003 - 6954(2012)06 - 0086 - 05

0 引 言

微油点火技术在燃用烟煤、褐煤锅炉上已得到广泛应用。其基本原理是将微油量油枪放置在一次风喷口内，煤粉采用浓缩技术后形成浓相煤粉，利用油枪引燃浓相煤粉，再由浓相煤粉着火燃烧放出的热量点燃更多的稀相煤粉，煤粉分级燃烧，燃烧能量逐级放大，最终实现用微油量启动锅炉的目的，节省启动用油[1~3]。珙县电厂为燃用无烟煤的W火焰炉超临界机组，由于机组需要经常性参与调峰，为减少锅炉冲管、启停及低负荷稳燃阶段的油耗，锅炉设置了微油点火燃烧器，通过微油枪助燃来实现冷态条件下的直接投粉，从而减少锅炉基建调试及启动油耗。

1 设备概况

珙县电厂一期2×600 MW机组锅炉，为东锅首台600 MW超临界W型火焰锅炉，型式为超临界参数、一次再热、垂直管圈水冷壁变压运行直流锅炉。锅炉采用正压直吹式制粉系统，配备6台双进双出钢球磨煤机，磨煤机采用动静态分离器，煤粉细度R90可控制在6%以内。24只煤粉燃烧器顺列布置在下炉膛的前后墙炉拱上，每台磨煤机带4只双旋风煤粉燃烧器。燃烧器的布置型式如图1所示。

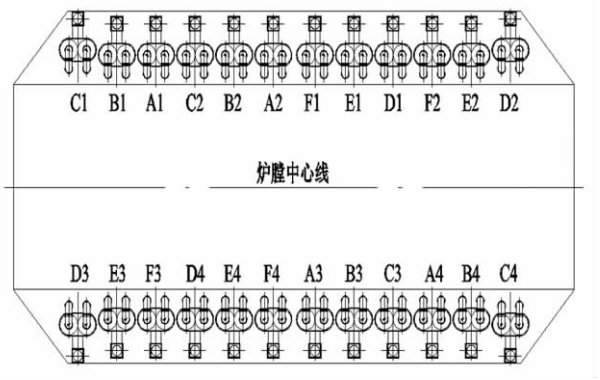


图1 煤粉燃烧器布置图

在1号和2号锅炉上皆采用了微油点火技术。在保留原有大油枪的基础上，将B磨和E磨对应的8只煤粉燃烧器改为可用于点火的独立配风、分级燃烧的微油煤粉燃烧器。在启动时采用大油枪配合微油启动的点火方式。微油煤粉燃烧器在原FW双旋风煤粉燃烧器的基础上进行了改进，将原燃烧器的喷口直段延长，并在直段内设置分级煤粉燃烧室。带独立配风的微油油枪从燃烧器乏气弯头沿燃烧器轴向插入到一级煤粉燃烧室的入口。在旋风筒喉口区域设置了浓缩装置，将煤粉从边壁区域浓缩到位于中心的一级燃烧室内。其所涉及到与原燃烧器的改动为：将燃烧器拔高，相应一次风接口位置也升

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

高;取消可活动的消旋杆,代之以固定的消旋叶片。除此之外,其余均同原燃烧器布置相同,保持了原大油枪的位置不变,保持原喷口的位置和大小不变,并保持原有的风量配比风速,基本保持了炉内总体流场分布和燃烧组织配风不变。

每支双旋风煤粉燃烧器配一支油枪,油枪紧靠煤粉喷嘴布置在拱上,设计总容量为30% B-MCR输入热量;油枪采用机械雾化,设计单支油枪出力为1 600 kg/h,在实际调试运行过程中将B、E磨油枪改为标称出力1 000 kg/h(2.7 MPa)的雾化片,其余油枪改为标称出力800 kg/h(2.7 MPa)雾化片。本机组采用暖风器,利用邻炉蒸汽或启动锅炉产生的蒸汽来加热磨煤机的干燥风。当锅炉炉温逐渐升高,烟气温度上升,进入磨煤机的干燥风温度逐渐升高,可逐渐减小暖风器蒸汽供应量,最后停运暖风器。

2 微油点火系统运行方式优化试验

2.1 乏气挡板开度优化调整

在微油点火燃烧器安装以前,在冷态实验台上对其风量及粉量分配特性进行了测试。在乏气管上开孔,采用等截面取平均值的方法测量乏气风速。测试了3种一次风速下的乏气风速,风量对比如图2所示。

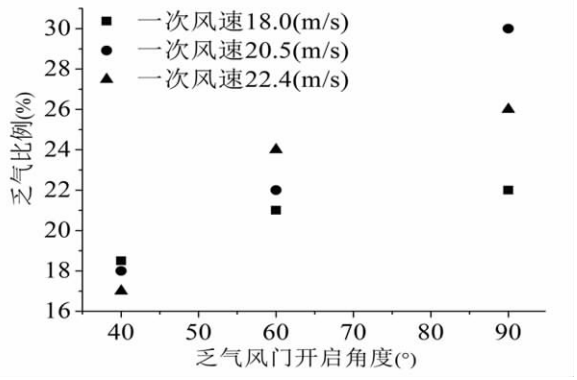


图2 乏气挡板开启角度和乏气量的关系

在不同一次风速下,乏气蝶阀开启角度分别为40°、60°和90°时,乏气所占一次风量比例平均约为18%、23%和26%。

在乏气风门开启角度为90°时(即全开状态)对粉量的分配进行了测试,投粉量在2~10 kg/min,一次风速控制在16~20 m/s之间,通过对乏气中携带的粉量进行收集称重。结果表明乏气含粉的比例很小,基本在6%以下。在微油燃烧器投运时,为保证主喷口较好的煤粉浓缩效果,乏气风门开启角度调整到90°。

2.2 磨煤机优化运行

磨煤机配备了动静态分离器,通过调整动态分离器转速,可对煤粉细度进行调节。在锅炉冷态启动过程中,为缩短煤粉着火时间,应保证较高的煤粉细度。采用小出力、高细度运行方式是冷态启动过程中保证煤粉着火的重要条件。此时动态分离器调节到最大转速,手动操作单台给煤机,以最小的给煤量10 t/h运行。此时对B磨的4根粉管进行煤粉细度和均匀性测试,R_{90}平均值为6.26%。各粉管细度和均匀性测试结果见表1。

表1 B磨煤粉细度

B1		B2		B3		B4	
R_{90}/%	均匀性	R_{90}/%	均匀性	R_{90}/%	均匀性	R_{90}/%	均匀性
7.90	0.90	5.85	0.85	4.50	0.57	6.79	0.82

2.3 微油枪一次风速优化调整试验

为掌握不同运行方式下燃烧器出口温度,将一根长热电偶从微油燃烧器B3的看火孔插入至燃烧器出口,热电偶测点位置如图3所示。在不投粉情况下,投入B磨的微油枪。在微油枪投入初期,一次风速控制在22 m/s,此时,B3燃烧器的出口温度在900 ℃左右。后逐渐降低一次风速,燃烧器出口温度迅速升高。测得的燃烧器出口温度变化趋势如图4。

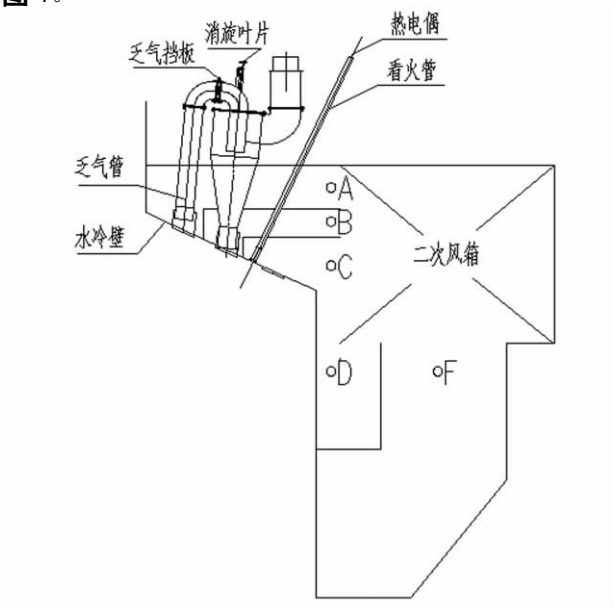


图3 热电偶测点位置示意图

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

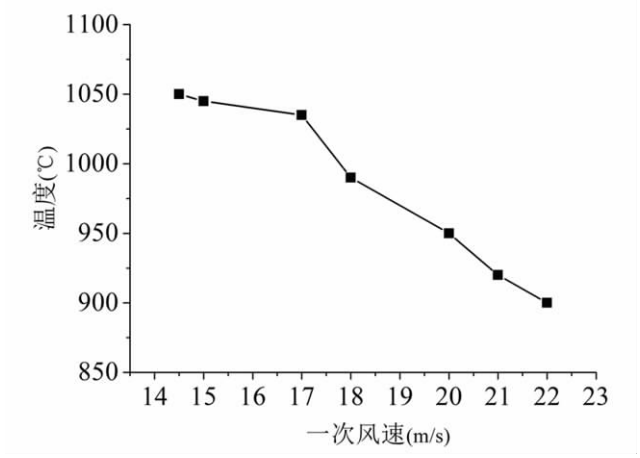


图4 燃烧器出口气体温度变化

从图4看出，随着一次风速降低，燃烧器出口温度逐渐升高。这主要是由于一次风量超过理论空气量，过多的一次风会冷却燃烧器出口温度。但是，当一次风速降到17 m/s后，继续降低一次风速对提高燃烧器出口温度的作用减弱，燃烧器出口温度升幅在10 ℃以内。因此为保证较高的温度，一次风速不宜过大，在不投粉情况下应控制在17 m/s左右。

2.4 锅炉冷态投粉试验和燃烧器周界风优化

锅炉冷态投粉时水冷壁出口温度为65～70 ℃，一次风速为15 m/s，燃烧器出口温度为1 140 ℃。投粉后燃烧器温度开始急剧下降，投粉10 min后燃烧器出口温度降至800 ℃。后调整一次风速至18 m/s，投粉16 min后燃烧器出口温度降至610 ℃，随后将一次风速降至16 m/s，燃烧器出口温度升温至650 ℃；将风速降至15.5 m/s，燃烧器出口温度升至670 ℃；进一步将一次风速降至14.5 m/s，燃烧器出口温度升至700 ℃。此后燃烧器出口温度稳定在700～730 ℃。在投粉50 min后，将B挡板由50%关至30%开度，燃烧器出口温度迅速升至840 ℃，后又将B挡板关至20%开度后，燃烧器出口温度迅速升至1 000 ℃，此后燃烧器出口温度逐渐升高至1 200 ℃左右，此时火焰明亮，燃烧稳定。整个调整过程见图5和图6。

在冷炉直接投粉过程中，一次风速和燃烧器周界风量的调整对燃烧器出口温度影响很大。一次风速升高，燃烧器出口温度降低，煤粉的着火条件较差。当一次风速达到18 m/s时，燃烧器出口温度降低到600 ℃左右，可以被点燃的煤粉比例大幅度减少，所以在冷态投粉过程中要尽量降低一次风速。考虑到煤粉输送过程中的携带能力，防止煤粉管堵

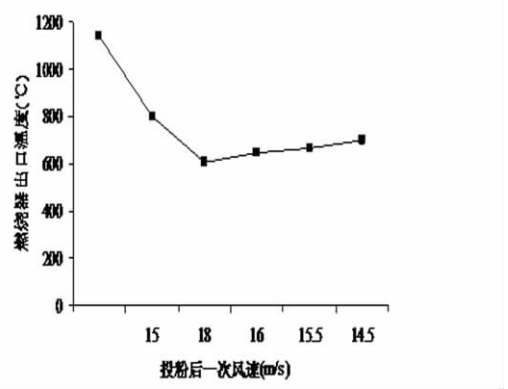


图5 投粉后一次风速变化对燃烧器出口温度的影响

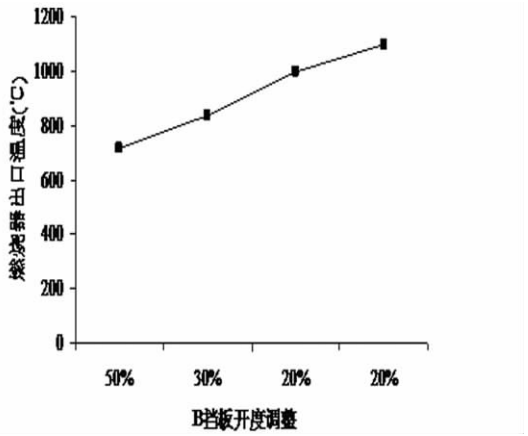


图6 B挡板开度调整对燃烧器出口温度的影响

塞，冷态投粉启动过程中维持一次风速在15 m/s，进行投粉。该风速范围一方面可以满足煤粉输送的要求，另一方面又兼顾了尽量降低一次风速的需要。

主燃烧器周界风挡板(B挡板)的开度调整对燃烧器出口温度影响显著。冷态启动过程中，随着B挡板开度的减小燃烧器出口温度显著升高，当B挡板开度达到20%时，燃烧器出口温度达到1 200 ℃。此时，燃烧器出口煤粉大部分已经被可靠点燃，稳定燃烧。因此在启动过程中将B挡板开度调整至20%再进行投粉，可维持较高的燃烧器出口温度。此外，燃烧器有周界风冷却，投粉后燃烧器壁温最高不超过350 ℃，可靠性较高，并未出现燃烧器烧损或超温结焦的问题。锅炉负荷较高时再将其调至50%左右，与其他燃烧器一致。

2.5 燃烧状况分析

通过上述优化调整，在只投运B磨的情况下，对飞灰和底渣进行了取样分析。取样时给煤量维持在20～25 t/h，氧量最开始投粉时在17%～18%，后通过降低总风量逐渐降至15%～16%。油枪只投运

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表2 试验煤质分析

	C_{ar}/%	H_{ar}/%	O_{ar}/%	N_{ar}/%	S_{ar}/%	V_{daf}/%	M_{ar}/%	A_{ar}/%	$Q_{net,ar}$/(kJ·kg^{-1})
设计值	50.50	2.10	2.17	0.68	2.80	7.50	9.50	32.25	19 200
校核值	47.59	2.02	2.30	0.66	2.95	9.60	9.00	35.48	18 000
试验值	48.66	2.02	2.09	0.66	2.70	14.01	7.11	36.76	18 213

了B磨对应的大油枪和微油枪。试验时煤质与设计煤质对比见表2。

由煤质分析看出，冷态点火时所用煤的挥发份要高于设计值，这也为将煤粉点燃创造了有利条件。对微油点火工况的飞灰进行取样分析，结果如图7所示。

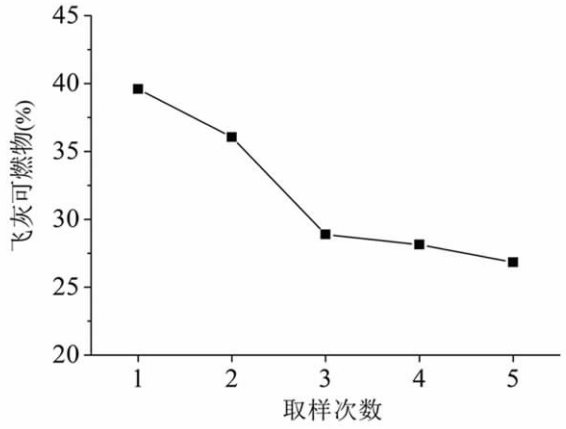


图7 锅炉启动初期飞灰可燃物变化

第一次取样是冷态投粉后约1 h，最后一次取样是冷态投粉后约8 h，中间基本间隔1.5 h取一次样。由趋势看出，刚投粉后炉膛温度较低，燃烧效果较差，飞灰可燃物在35%以上；后随着锅炉升温升压的进行，炉膛内温度提高，燃烧环境改善，飞灰可燃物逐渐降低。当主蒸汽压力达到8 MPa、主汽温到455 ℃工况下，空气预热器入口烟温在340 ℃，飞灰可燃物降至26%左右。测试期间底渣平均含碳量为28.7%。由于煤粉燃尽效果较为理想，加之微油点火期间尾部受热面吹灰及时，并未发生尾部受热面二次燃烧问题。

3 锅炉升温速率及出口烟温分析

在用微油点火进行冷态启动时，一般先投入B磨，给煤量在10～20 t/h。起压后初期主汽温升温速率为1.4 ℃/min，再热汽温温升速率为1.3 ℃/min，满足电厂运行规定。

锅炉点火初期，由于高压过热器和高压再热器受热面未建立正常的冷却流量，因此需要控制炉膛出口烟温不超过管材的允许使用温度。当煤量在10 t/h时烟温探针温度为248 ℃，当煤量20 t/h时烟温探针温度为537 ℃，并未超过565 ℃的规定值。在点火初期过、再热器无超温问题。

5 节油率统计

对新建机组，调试期间的节油率和许多因素相关，如机组各部件的故障率、安装质量情况、MFT次数等等，笼统比较机组调试期间的总油耗并不客观。因此拟用1号炉和2号炉的两次冷态启动油耗作为比较依据。以锅炉冷态启动到机组冲转作为计算节点，比较的蒸汽参数定在8 MPa，450 ℃左右。其中1号炉未使用微油点火，2号炉使用了大油枪配合微油枪启动方式。统计油耗数据见表3。

表3 1号炉和2号炉启动油耗

项 目	1号炉		2号炉	
	第一次启动	第一次启动	第一次启动	第二次启动
给水压力/MPa	0.37	0.41	0.39	0.39
给水温度/℃	50	39	40	40
主汽压力/MPa	8	8	8	8
主汽温度/℃	405	445	455	455
累计油耗/t	114	82	73	52
平均油耗/t			98	62.5

由于每次启动时略有差异，在保证主汽压力相同时，主蒸汽温度略有不同，如表3所示。2号炉在两次启动过程中所用的油耗明显低于1号炉的启动油耗，采用了大油枪配合微油枪启动方式的2号炉在两次启动过程中平均节油率为36.2%。

5 结 语

①通过微油枪的优化运行，在大油枪协助下，首次实现了无烟煤锅炉在冷态启动过程中直接投粉启动。采用高煤粉细度，较低的一次风速及较小的燃烧器周界风挡板开度，投粉后燃烧稳定，火焰明亮，火检信号正常，火焰电视清晰可见。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

②投粉后随着炉膛温度的升高，燃烧逐渐改善，飞灰可燃物逐渐降低，在单台磨投运外加4支大油枪的情况下飞灰可燃物最低可降至26%，部分煤粉已被有效点燃。

③采用大油枪配合微油枪启动方式，2号炉在两次冷态启动过程中油耗明显降低，与1号炉不采用微油点火相比，平均节油率为36.2%。

参考文献

[1] 赵铁军，宋绍伟. W型火焰锅炉节油技术应用[J]. 中国电力，2009，42(9)：61－65.

[2] 束长勇. 微油点火稳燃技术在600 MW机组中的应用[J]. 电力设备，2008，9(10)：74－76.

[3] 车丹，林树彪. 微油点火在燃用贫煤锅炉上的试验研究[J]. 山西电力，2009(3)：39－41.

[4] 付忠广，王志鹏，史亮亮. 燃煤锅炉微油点火燃烧器的数值计算分析[J]. 工程热物理学报，2008，29(4)：609－612.

(收稿日期：2012－05－22)

(上接第45页)

接地变压器并网投运，检修后测量中性点开口3次谐波电压从故障前0.12 V上升到3.08 V，3次谐波电压比值也由故障前15.92降低到0.586，与出厂值没有明显电气特征变化，同时发变组A、B屏“定子接地3次谐波告警信号”解除，C屏“定子接地”告警信号解除，2号机运行参数正常，说明2号机中性点接地变压器二次引线锈蚀松动故障得到成功处理。

4 结 语

发电机定子接地故障发生在中性点附近时，其故障电流的3次谐波分量和3次谐波电压比值将非常大，远远超过接地保护动作整定值，这一点继电保护人员在实际检修维护过程中必须引起足够重视。为了提高继电保护人员故障处理效率和可靠性，除了要熟悉定子接地故障参数特征知识，根据现场故障信号和保护动作情况，灵活采取各种处理方案外，还需注重以下多个方面的内容[7-8]。

①继电保护工作除了需要扎实理论知识外，还需要有较强的责任心和耐心，工作认真仔细，否则将会引起故障进一步扩大成事故；

②认真落实电厂继电保护关于集成型、微机型继电保护装置的调试、整定、抗干扰等技术措施，确保继电保护装置具有较高动作保护性能，避免其出现“拒动”、“误动”等问题；

③定期检修维护工作中，要牢记定期试验、检定的三要素，即：测绝缘、清灰、紧固端子等。本例中就是由于接地变压器紧固端子发生锈蚀松动，引起电位的悬浮而引起100%定子接地保护故障告警。要加强一次、二次设备巡检力度，尤其应注重观察运行记录和运算分析各机组处于不同运行工况条件下特征参数的变化特性，一旦发现异常应及时采取有效方法措施予以消除。

参考文献

[1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京：中国电力出版社，2002.

[2] GB/T 14285－2006，继电保护和安全自动装置技术规程[S].

[3] 张琦雪，陈佳胜，陈俊，等. 大型发电机注入式定子接地保护判据的改进[J]. 电力系统自动化，2008，32(03)：66－69.

[4] 姚晴林，赵斌，郭宝甫，等. 自适应20 Hz电源注入式定子接地保护[J]. 电力系统自动化，2008，32(18)：71－73.

[5] 张长彦，原爱芳，杨兆阳，等. 发电机定子绕组接地保护整定原则[J]. 电力系统保护与控制，2009，37(17)：65－70.

[6] 王翔，张成，沈全荣. 一次典型的定子接地故障分析与优化保护原理[J]. 电力系统自动化，2006，30(11)：52－55.

[7] 毕大强，王祥珩，王维俭，等. 发电机中性点接地装置等效电路的分析[J]. 继电器，2003，31(1)：12－16.

[8] 徐金兵，楼国才. 发电机100%定子接地保护误动作分析[J]. 中国电力，2007，40(5)：67－70.

作者简介：

白 伟，(1985)，男，汉，助理工程师，继电保护检修工。

(收稿日期：2012－07－09)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2012年《四川电力技术》总目录

第1期

一种改进的保护协调配合方法及其仿真研究 …… 张 燃(1)
模块化多电平储能单元改善并网风电场稳定性研究 …… 张振华 冯 涛(6)
基于线性和非线性混合预测的改进连续潮流法 …… 李 林 康积涛(9)
搜寻者优化算法在含风电机组系统最优潮流中的应用 …… 冯 跃 李明翔 黄彦全(12)
自贡电网无功补偿及其优化 …… 刘代顺 常建磊(16)
新疆电网频率的时空分布分析 …… 吴茂乾 陈 江 王 筱 等(19)
二滩水电站5号机组负荷波动原因分析及处理 …… 吴建荣 王秀梅(22)
一例双馈发电机的并网故障分析 …… 袁 炜 胡文胜 赵 宇(24)
电能质量数据压缩算法研究 …… 杨超颖(26)
电能计量装置故障分析与差错电量计算 …… 万忠兵(31)
电能计量在线监测系统应用实例及分析 …… 李 剑(34)
调度运行过程管理系统的设计与应用 …… 刘青丽 尹 琦 任 铃(39)
基于模糊理论的配电网电压层级优化的应用 …… 冯 景 周步祥 林 楠(43)
东西关电厂作为南充遂宁电网黑启动电源点的可行性分析 …… 袁 川 刘俊勇 张国松 等(48)
锦屏水电站枯期运行方式浅析 …… 李金明 季苏蕾 窦学刚 等(54)
可中断负荷参与系统备用研究综述 …… 孔祥清 雷 霞 刘庆伟 等(57)
基于电网安全稳定运行前提下的梯级水电站优化调度新探讨 …… 陈 策 袁明友 黄 强 等(61)
母线负荷预测的实用算法 …… 陈小平(66)
基于光传感器技术的500 kV交直流输电线路盐密在线监测研究及对比分析 …… 范 强 蒋 丽(69)
对500 kV断路器膜纸绝缘均压电容介质损耗试验探讨 …… 文 剑(73)
电压互感器二次回路N600多点接地查找及处理 …… 钟文华(77)
提高变电站一次设备预防试验效率的可行方法 …… 汪 立 刘代祥(80)
基于两起故障实例的500 kV CVT故障原因对比分析 …… 杨 洋 覃 伟 许 强 等(83)
成都地区输变电工程电磁环境影响分析及其防护对策 …… 南 方 姜南希(85)
水轮发电机组集电环温度过高原因分析及技改措施 …… 向春见 顾 轩 李友安(89)
高压加热器跳闸对超临界机组的影响及处理 …… 薛森贤(92)

第2期

智能变电站二次设备系统级调试方法探讨 …… 姜振超 刘明忠(1)
智能变电站二次系统试验方法综述 …… 王 彪 甄 威 张 华 等(4)
变压器铁心接地电流在线监测装置现场检测浅析 …… 刘 睿 陈 凌(9)
电子式互感器现场检测及问题分析 …… 刘 刚 江 波 杨华云(12)
基于ARM和FPGA的智能变电站全场景试验装置硬件平台设计 …… 吴 杰 黄 琦 井 实 等(15)
基于区域电压距离的无功补偿投入的研究 …… 朱 觅 刘俊勇(19)
基于广域测量系统的地区电网稳定性研究 …… 郭 翔 黄潇文 苟 竞(24)
基于内模控制的VSC-HVDC风电并网系统控制策略研究 …… 范帅军 凌 颖 赵莉华(28)
基于多种群分层粒子群优化算法的电力系统低压减载优化方法研究 …… 刘 丽(33)
基于博弈论的区域小水电虚拟电交易研究 …… 陈 岭 蒋 乐 李 俊 等(37)
中山电网10 kV线路合环转供电操作原则研究 …… 欧昌岑(41)
开关柜局部放电综合在线检测装置的研究与应用 …… 王 戈 王 强 田志刚 等(44)
采用独立地网的变电站二次系统防雷测试分析 …… 郭 强 李建明 田志岗 等(49)
ABB开关(ELK-SP3)机构三相不一致的安全隐患 …… 李宗宇(52)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基于UAPCPlatform的天广直流换流变压器分接头控制原理 …… 刘 洋(56)
300 MW燃煤机组FSSS改造 …… 朱 静 崔超超 肖 胜(61)
循环水泵电动机双速改造在600 MW机组中的应用 …… 李继忠(65)
微型燃气轮机发电系统建模与特性分析 …… 邓 浩 李春艳(70)
二滩电站枯水期3机运行必要性与可行性分析 …… 姜开波 杨 东(73)
发电厂次同步振荡(SSO)问题的解决办法 …… 刘代祥 汪 立(78)
发电机励磁及SVC非线性最优协调控制 …… 何振宇 李华强(85)
"两个细则"下广安电厂AGC控制策略优化 …… 郭伯春(91)

第3期

云南电网外送交直流潮流最优分配研究 …… 曾雪松 张瀚月 廖晨淞 等(1)
雷电电流的频谱和能量分析 …… 程 锐 李 梅 张新燕(4)
不同风力机风速突变对其并网系统影响分析 …… 罗 庆 晁 勤 袁铁江 等(8)
考虑网内外功率特性的含风场电网日内发电需求滚动预测 …… 何洪业 汪 颖 肖先勇(11)
电压暂降扰动源电压空间矢量辨识法 …… 李 滨 汪 颖 肖先勇(14)
关于电网黑启动中厂网配合机制的研究 …… 王莉丽 韩 伟(20)
基于合作型协同进化遗传算法分布式发电供电恢复 …… 万 强 孙 昊 王 乾 等(23)
并网光伏发电系统对吐鲁番地区配电网影响的研究 …… 胡仁祥 王晓斌 常喜强(27)
基于交替迭代法的AGC与AVC协调优化控制策略研究 …… 吕连洁 汪 颖 肖先勇 等(30)
风功率预测系统在新疆电网中的应用及改进 …… 孙立成 马成林 常喜强 等(36)
故障定位系统及其关键技术探讨 … 宋友文 赵继光(40)
基于连续潮流的静态分岔点追踪方法 …… 李 林 刘 玲(44)
TCSC次同步谐振阻尼控制器设计 …… 王 敏 康积涛 李 康 等(48)
线路差动保护判别TA二次断线的新方法 …… 周 伟 刘宏君(52)
基于频率特性的合闸于故障线路选相 …… 黄 霞 陈 皓(55)
基于GPRS的电费抄收催一体化技术在电力系统中的应用 …… 刘芯宇(58)
交流串入直流造成500 kV主变压器无故障跳闸的分析及改进措施 …… 胡晶晶 曾 丽(61)
广角红外透镜在封闭高压开关柜温度检测上的应用 …… 赵 云(64)
电容式电压互感器二次电压偏低现象分析 … 刘同杰(67)
基于雷电定位系统对一起220 kV同塔双回输电线路雷击跳闸故障查找与研究 …… 魏文伟 刘义平 王 伟(70)
架空地线的绝缘化改造及融冰方法 …… 陈义刚 范松海(74)
高电压设备在线监测技术在智能电网中的研究与实施 …… 拉 贵 扎西曲达 尼玛石达 等(78)
基于油色谱分析的变压器有载开关油渗漏缺陷诊断方法创新研究 …… 蒋福佑 袁 鹰(82)
DG2028/17.45-Ⅱ5型锅炉受热面改造的重要性 …… 彭 林 王建华 王 亮(88)
浅谈印度某发电工程镉镍蓄电池选择计算 …… 龙 军(92)

第4期

微网并网运行存在的问题及应对措施 …… 安典强 常喜强 李 梅 等(1)
不同控制策略下含直驱机组风电场的系统电压稳定研究 …… 赵海岭 王维庆 姚秀萍 等(5)
双馈风电机组的建模仿真及其等值方法研究 …… 李智才 李凤婷(10)
考虑系统峰谷时变区间特性的电压暂降频次评估 …… 张 忠 徐培栋(15)
计及分布式电源的配电网可靠性分析 …… 张 燃 吕 林 李 勇 等(21)
电网黑启动方案关键问题探讨 …… 张 莉 王 晋 卢政尧(25)
浅议美国智能配电网建设及其关键技术 …… 武云霞 余 熙 田 伟(31)
接有小电源上网的110 kV系统故障分析和保护调整方案 …… 周 建 彭 燕 曾 俊(35)
备用调度可视化系统的数据同步解决方案初探 …… 李成鑫 刘俊勇(38)
500 kV输电线路光纤保护联调探讨 …… 李凡红 庄秋月(41)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

四川电网二次设备在线监视与分析系统实用化浅析 …… 陈 愚(46)
基于混合遗传神经网络的电动汽车充电站最优选址的研究 …… 李海峰 康中敏(49)
电力系统外网一种控制个人移动设备的网络准入实现 …… 母继元(53)
电流互感器油中氢气产生机理研究 …… 蒋福佑 袁 鹰(56)
BP神经网络在油浸式变压器过热性故障诊断中的应用 …… 曾成碧 蒲 维 曾先锋(60)
一起因雷击导致变压器停运的分析 …… 李 源 冯 藩(64)
电能计量装置错误接线查找及追补电量计算方法 …… 熊晓岚 李 琦(68)
CPU卡在智能电表中的应用 …… 肖 丽(73)
无线防窃电系统研制及应用 …… 万忠兵 赵智辉(76)
不确定度分析在电站锅炉效率计算中的应用 …… 韩 伟 刘慧超(80)
NFPA12标准下水电站发电机CO_2灭火管路设计探讨 …… 王 伟 曹 静(84)
大型火力发电厂主系统继电保护可靠性分析 …… 张 蓉(87)
锅炉尾部烟道振动原因分析及处理 …… 楼 杰 蒋建伟(91)

第5期

基于CIM/E交互的省地EMS异构系统状态估计设计与实现 …… 伍凌云 王民昆 李 强 等(1)
风电智能有功控制系统研究与实现 …… 姚秀萍 常喜强 张慧玲 等(4)
基于风电场系统联络线故障时单相重合闸对系统影响的研究 …… 王银萍 王维庆 常喜强(8)
微电网孤岛模式下多种下垂控制策略的研究 …… 罗锐鑫 刘承志 游先亮 等(11)
基于内模控制的静止同步补偿器研究 …… 张花芝 张花云 高 俊 等(15)
地区电网日负荷特性分析及预测方法研究 …… 张 莉 蒲晓瑛 卢政尧(21)
电力市场下风电-抽水蓄能混合系统的运行优化 …… 罗承军 李安军 王 曦 等(28)
备自投在DTS逻辑式仿真中的配置 …… 陈 曦 任 铃 韦 涛(33)
对一起主变压器零序过流保护动作逻辑缺陷的分析 …… 岑冬梅 欧昌岑(37)
基于110 kV内桥接线的母线保护思考 …… 曾 明(38)
风电接入对电能计量影响的初探 …… 晏荣贵 黄 程(41)
基于智能开关的广州10 kV架空馈线自动化新模式 …… 宋友文 廖伟炎(46)
电力光纤通信的技术原理及其应用前景分析 …… 肖 丽(51)
失压后多功能电表差错电量的计算 …… 李 琦(55)
一种新型故障限流器在电力系统中的应用研究 …… 姚守学 程健雄 蔡盛舟 等(61)
四川省电力公司输变电设备状态检修体系建设与应用 …… 吴晓晖 甘德刚 王红梅 等(64)
电力设备全寿命周期管理分析模型的建立及应用研究 …… 马 薇(68)
变压器状态评估技术现状研究 …… 郑朝晖 徐 伟 吕鸿宾等(73)
ZF11-252(L)型断路器控制回路安全隐患分析 …… 李宗宇(77)
高速铁路电力电缆不对称接地故障对二次电缆的影响 …… 周思宇 冷 怡(81)
输电线路杆塔冲击接地阻抗测量 …… 何云峰 赵若涵 张 榆 等(85)
一起断路器弹簧储能故障分析与处理 …… 刘滨涛 肖建华 黄 倩(89)
汽轮机轴瓦垫铁改造方案研究与实现 …… 韩兴全(92)

第6期

水电机组调速特性对联络线极限传输功率影响分析 …… 吴茂乾 白宇辉 任锡林 等(1)
大型风电基地集中并网关键技术 …… 姚天亮 郑 昕 杨德洲(4)
基于多汇集风电场SVC无功补偿的研究 …… 张东明 姚秀萍 孙立成(8)
用户低负荷状况下无功补偿问题探讨 …… 黄 斌 吕飞鹏(11)
一种基于扰动能量与功率谱的电容器组投切的定位方法 …… 邓扶摇 赵 静 万 力 等(14)
不同类型电磁环网解环研究的基本原则与方法 …… 王莉丽 韩 伟(20)
基于动态惯性权重粒子群算法的配电网状态估计 …… 尹 专 刘天琪 江东林(23)
风电场接入新疆某地区电网暂态电压稳定性研究 …… 张瑞明(27)
谐波对电网电能计量系统影响的研究

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

…… 黄冰心 龚国兴 赵莉华(32)
110 kV庄北变电站保护定值整定中存在的问题及解决方案 …… 刘高会 刘 敏 师耀林 等(36)
水电站10 kV备自投设计的相关问题及解决方案 …… 李光耀 龚林平 封孝松 等(40)
发电机定子接地保护动作原因分析及故障处理 …… 白 伟(43)
三种失磁保护判据与低励限制配合研究 …… 季 杰 黄建琼(46)
四川220 kV变电站仿真考核系统的设计与实践 …… 赵梓蓉(52)
不同憎水性绝缘子串覆冰电场仿真分析 …… 张 湘 聂鸿宇 龚奕宇(54)
基于K-L特征提取与支持向量机的油浸式变压器故障诊断模型研究 …… 方 飚(58)
基于气相色谱法测油中乙炔含量的不确定度研究 …… 钟 诚(62)
温度对环氧树脂空间电荷特性影响的研究 …… 王青山 陈少卿(65)
城市变电站噪声分析与治理 …… 苟旭丹(68)
排油注氮装置重锤误动引发的主变压器事故分析 …… 刘元生(73)
《油浸式变压器测温装置现场校准规范》规程解读 …… 田 宇(76)
大型双馈异步风力发电机组变桨控制算法研究 …… 丁艳军(80)
微油点火在600 MW超临界W火焰炉的应用研究 …… 刘鹏远 肖宏博 谢明均 等(86)

(上接第53页)

设计的二次设备的校验涉及部分操作顺序校验中的一、二次设备的操作顺序配合以及正确性校验的内容。二次设备的评价,通过潜在操作危害的评价分为:一、二次设备配合顺序评价和操作的正确性评价。操作顺序是否正确,操作项目是否正确,通过对系统模拟对应操作任务数据的统计,相应对二次设备的操作做出电脑性的评分和校验,打印出相关成绩评价。

巡视设备检查项、二次设备的投切漏项检查项、过程操作检查项并不是固定出现的,操作票的操作任务不一样使得这些检查项完全没有固定的模式,甚至在一个操作票中根本没有上述检查项的存在,这些检查项的校验就只能通过非通用规则来进行。

(4)操作效率(时间)评估:操作效率,即对学员的操作时间的评分评估,一旦学员操作超出规定时间范围内,每超出一定时间扣除相应分值。该系统作为评价标准。

2.3 事故处理模块简析

由于事故处理涉及范围较广,以下以主变压器瓦斯保护的故障作简要分析。

主变压器瓦斯保护的故障需要用到仿真系统中的"故障名称表"如表2所示。

3 结 语

对220 kV变电站仿真培训考核系统进行了分析设计,并实现了培训考核系统的相关功能。该系统可以极大地提高变电培训考核效率,对公平公正的考核学员,提高变电站运行人员的操作技能,降低事故风险起到很好的培训考核作用,更有利于公平选拔培养优秀运行技能人才,能很好的杜绝人为考核的暗箱操作。

表2 故障名称表

类名	FTYPENAME	
成员变量	CString Code	代码
	CString CHNName	故障类型
	…	…

判断出CString FTYPENAME::CHNName = = "匝间短路"就可以识别故障。

参考文献

[1] 张东英,杨以涵. 变电站仿真培训综述[J]. 电力系统自动化,1999,23(23):11-14.
[2] 张东英,葛亮,杨以涵,等. 500 kV综合自动化变电站仿真培训系统的实现[J]. 电网技术,2001,25(6):64-66.
[3] 董朝霞,王乘,杨峰,等. 新一代电网调度员培训仿真系统[J]. 计算机仿真,2003,20(2):123-125.
[4] 陈天翼,邱家驹,邱淘西. 电力系统虚拟现实场景开发研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2000,12(5):7-10.
[5] 姜芳芳,来文青,龚庆武,等. 虚拟现实在变电站仿真培训系统中的应用[J]. 高电压技术,2005,31(7):68-70
[6] 龚庆武,姜芳芳,陈义飞. 基于虚拟现实技术的变电站仿真培训系统[J]. 电网技术,2005,29(24):74-77.

(收稿日期:2012-06-01)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

乐山一拉得电网自动化有限公司

乐山一拉得电网自动化有限公司成立于1998年，是西南地区最早生产箱式变电站及高低压电气成套产品的生产厂家之一。目前，公司产品覆盖了箱式变电站、高低压成套设备、电力系统自动化三大领域，16个种类，120多个系列。公司通过了ISO9001质量管理体系认证和ISO14001环境管理体系认证，低压产品通过了国家电气行业3C强制认证。公司产品被国家经贸委列入《推荐目录》。公司自行研发的专利产品环保型箱式变电站被四川省人民政府授予“四川省名牌产品”称号；同心式高漏抗可调消弧线圈获得国家5项专利，其中IDC-3000-10型智能消弧线圈成套装置被列为“国家火炬计划项目”。目前产品畅销国内各大省市，并远销东南亚及世界其他市场。

公司连续7年获得市级“守合同重信用企业”称号，连续5年获得省级“守合同重信用企业”称号，“一拉得”商标获四川省著名商标称号。2007年被认定为国家火炬计划重点高新技术企业，是乐山市第一家国家级高新技术企业。

四川省著名商标

证 书

一拉得

刊号：ISSN1003-6954 CN51-1315/TM　广告经营许可证号：5100004000578　公开发行　国内定价6.00元/期