

四川電力技術

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954



9 771003 695005

四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

Vol.33
2010
No.5

《四川电力技术》 编辑委员会名单

主任委员 王 平

副主任委员 张 伟

刘俊勇

委 员

(按姓氏笔画为序)

方文弟 王 卓 白家棣

刘 勇 朱白桦 朱国俊

朱 康 邓亚军 鄢小端

李兴源 李建明 严 平

胡 灿 徐 波 唐茂林

韩晓言 谢 舫 甄 威

秘 书 李世平

吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN 1003-6954
CN 51-1315/TM

2010年第 33卷第 5期(总 209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)87314278

E-mail:cdsclj@163.com

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册 6.00元

[期刊基本参数] CN 51-1315/TM * 1978 *

b * A4 * 94 * 24 * P * ¥6.00 * 4300 * 26 *

2010-10

目 次

· 分析研究 ·

500 kV同塔双回直线塔挂线方式的研究 田 峻 钟顺洪(1)

惠州地区雷电参数统计分析 谢 鹏 魏 莱 赵紫辉等(4)

新型电力节能金具的试验研究 袁 刚 尹德君 曾 宏(7)

变电站投切电容器组过电压研究 林 静 胡 红 郭 飞(11)

基于小波理论的输电线路故障信号检测的研究 马爱平 刘 磊(16)

基于行波的电力电缆故障测距组合方法研究

..... 古树平 陈奇志 谢 建等(19)

地县继电保护整定管理体系研究 杜凌翔 吴端华 何 东等(23)

基于虚拟电交易的水火电置换机制研究 陈 岭 李 俊(26)

继电保护整定单管理系统的应用研究 周建群 吕 华 李志文等(31)

火力发电厂冷却塔安装空气动力涡流调节装置的研究 熊 涛(35)

相间距离保护 III段在线路过负荷时的动作特性分析

..... 刘高会 王朝霞 刘 敏等(36)

电网网络等值方法分析与讨论 常喜强 周 悦 梁 静等(39)

电容式电流互感器额定电压下介质损耗试验分析

..... 刘 超 苏明虹 何 松等(44)

· 技术改进 ·

ABB主变压器保护跳旁路开关出口回路的改进 沈 彦 林天佑(47)

大型发电厂封闭母线绝缘低的解决办法 林 睿 黄旭丹(50)

两种国内外典型微机母线保护原理的比较 董世勇(53)

300 MW机组冲车过程中振动大的原因及对策

..... 荆永昌 陈荣轩 袁 波等(57)

· 综述评论 ·

大型发电厂厂用电源切换的再思考 张新伟 晁 勤 常喜强(60)

德宝直流四川电网安全稳定控制系统方案设计 吴 冲 刘汉伟 蔡 华(65)

四川绵竹首例智能化配网系统的设计与实现 刘从洪 邓晓林(69)

基于 NSGA II的变电站电压无功控制方法 杨 坤 魏小淤(71)

基于量子进化算法的配电网架规划 王 腾 王 倩 张红涛等(75)

基于 MSI和 IGA的全局多目标电网优化 吕后勇 周步祥(79)

德阳电网 AVC系统省地协调控制的实现 刘青丽 尹 琦 周 鹏等(85)

基于电压凹陷敏感度不确定性和能量损失的敏感负荷电压凹陷经济损失评估

..... 李 浩 刘春芳(89)

关于气体纯度对色谱仪影响的认识 赵海峰 刘贞群 赵燕梅等(93)

封面照片由曾逸农提供

CONTENTS

Line—hanging Research for Tangent Tower in 500 kV Double—circuit Lines on the Same Tower.....	Tian Jun Zhong Shunhong(1)
Statistic Analysis of Lightning Parameters for Huizhou Area	Xie Peng Wei Lai Zhao Zihui et al(4)
Test and Research on New Energy—saved Electric Power Fittings	Yuan Gang Yin Dejun Zeng Hong(7)
Overvoltage Research When Switching Capacitor Bank in Substation.....	Lin Jing Hu Hong Guo Fei(11)
Research on Fault Signal Detection in Transmission Line Based on Wavelet Theory.....	Ma Aiping Liu Lei(16)
Research on Combined Method of Power Cable Fault Location Based on Travelling Wave	Gu Shuping Chen Qizhi Xie Jian et al(19)
Research on Management System of Local Protective Relaying Setting	Du Lingxiang Wu Duanhua He Dong et al(23)
Research of Hydro—thermal Exchange Mechanism Based on Virtual Electricity Trade	Chen Ling Li Jun(26)
Application Research of Setting Card Management System of Protective Relaying	Zhou Jianqun Lv Hua Li Zhiwen et al(31)
Research of Installing Aerodynamic Eddy Adjustment Equipment at Cooling Tower in Power Plant.....	Xiong Tao(35)
Analysis on Operation Characteristics of Interphase Distance Protection of Stage III During Line Overload	Liu Gaojun Wang Zhaoxia Liu Min(36)
Analysis and Discussion of Network Equivalence in Xinjiang Power Grid	Chang Xifang Zhou Yue Liang Jing et al(39)
Experiment Analysis on Dielectric Loss under Rated Voltage for Capacitive Current Transformer	Liu Cao Su Minghong He Song et al(44)
Improvement on Outlet Circuit for Bypass Circuit Breaker of ABB Main Transformer Protection.....	Shen Yan Lin Tianyou(47)
Solution for Improving Insulation of Enclosed Bus in Large—scale Power Plant.....	Lin Rui Huang Xudan(50)
Comparison of Two Typical Microprocessor—based Bus Protection Principles at Home and Abroad	Dong Shiyong(53)
Causes and Countermeasures of Severe Vibration during Impulsing on 300 MW Unit	Jing Yongchang Chen Rongxuan Yuan Bo et al(57)
Reconsideration on Switchover Scheme of Auxiliary Power Source in Large—scale Power Plant	Zhang Xinwei Chao Qin Chang Xifang et al(60)
Stability Control System Design of Deyang—Baojing High—voltage Direct—current Transmission Project in Sichuan Power Grid	Wu Chong Liu Hanwei Cai Hua(65)
Design of Intelligent Distribution Network System in Manzhou and Its Implementation.....	Liu Conghong Deng Xiaolin(69)
Voltage/Reactive Power Control Method of Substation Based on NSGAII	Yang Kun Wei Xiaoyu(71)
Distribution Network Structure Planning Based on Quantum—inspired Evolutionary Algorithm	Wang Teng Wang Qian Zhang Hongtao et al(75)
Global Multi—objective Optimization of Power Grid Based on MST and GA	Ly Houyong Zhou Buxiang(79)
Realization of Coordinated Control between AVC System of Sichuan Power Grid and AVC System of Deyang Power Grid	Liu Qingli Yin Qi Zhou Peng et al(85)
Economic Losses Assessment Caused by Sensitive Equipment Due to Voltage Sag Based on Sensitivity Uncertainty Due to Voltage Sag and Energy Loss	Li Hao Liu Chunfang(89)
Understanding about Impact of Gas Purity on Gas Chromatograph	Zhao Haifeng Liu Zhenchao Zhao Yamei et al(93)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2010 Vol.33 No.5

(Oct No.209)

Bimonthly Started in 1978

Address No.24 Qinghua Road Chengdu Sichuan China

Postcode 610072

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Test and Research Institute of Electrical Power

Editor in chief Hu Can

Editor & Publisher

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

500 kV 同塔双回直线塔挂线方式的研究

田 峻, 钟顺洪

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016)

摘 要:对现阶段国内同塔双回直线塔常用的导线排列方式和挂线方式进行经济技术分析,提出了一种 500 kV 同塔双回直线塔新型挂线方式——“VIV”方式。通过与传统采用的挂线方式进行塔重、占用走廊宽度及电气性能比较,证明该新型布置方案具有较大的优势。最后通过实际工程的应用,证实该新型布置方式在减少铁塔单基重量和节约线路走廊方面取得很好的效果,具有广泛的应用价值。

关键词:输电线路;同塔双回;挂线方式

Abstract: It is proposed to use a new line-hanging method named VIV, for tangent tower in 500 kV double-circuit lines on the same tower. Comparing the tower weight, the usage of the corridor width and the electrical performance of VIV method with those of traditional line-hanging methods, it proves that the new layout program has greater advantages based on economic and technical analyses. The practical engineering applications prove that the new layout method will reduce both corridor width and tower weight, so VIV has a broad application value.

Key words: transmission line; double-circuit lines on the same tower; line-hanging

中图分类号: TM752 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0001-03

0 前 言

1980年,中国第一条 500 kV 同塔双回路输电线路——平武线姚孟电厂出线段建成投产,拉开了 500 kV 同塔双回输电线路在输电线路中应用的篇章。20 世纪 90 年代中后期,随着中国国民经济的高速发展,大型水、火、核电站相继接入系统,500 kV 高电压等级输电线路得到飞速发展。同时由于经济的发展,城镇建设步伐加快,输电线路走廊资源日趋匮乏。为合理利用土地资源,500 kV 同塔双回线路同塔架设技术在电网建设中得到广泛采用。

同塔双回铁塔塔头型式的优化设计对于降低杆塔指标、节省线路走廊、节约线路投资、提高杆塔的安全性具有重要意義。杆塔塔头的优化设计在满足电气间隙和电磁环境要求的前提条件下,应尽可能缩小塔头尺寸,减小线路走廊宽度,优化节点处理,保证传力清晰,降低杆塔指标,以达到安全、经济、美观的目的。

500 kV 输电线路工程直线铁塔的应用数量远大于耐张铁塔,一般可达到整个工程铁塔总使用数量的 80%~90%,因此,只以直线铁塔作为研究对象进行详细论述。

1 导线排列方式

目前中国现有的 500 kV 同塔双回路线路导线排列方式主要有:垂直排列方式和三角排列方式。垂直排列主要采用双曲线型、鼓型、伞型等三层横担塔型;三角排列主要采用二层横担塔型。两个回路的导线布置方式有正相序、逆相序、异相序。不同的导线排列方式、相序布置及分裂方式会导致导线表面梯度、无线电干扰、可听噪声及线路走廊宽度的不同,从而影响塔型选择。

典型的垂直排列和三角排列的杆塔见图 1—图 4。

三角排列方式呈展翅蝶型、伞型塔型,如图 4 示。此类铁塔导线分二层呈“干”字型布置,其主要优点

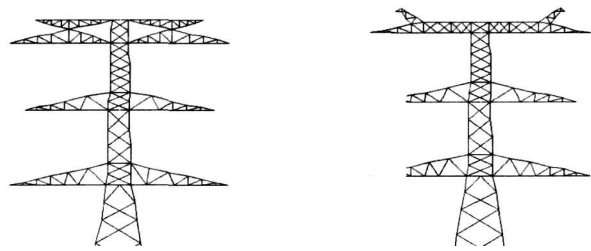


图 1 三层横担垂直排列双曲线型塔

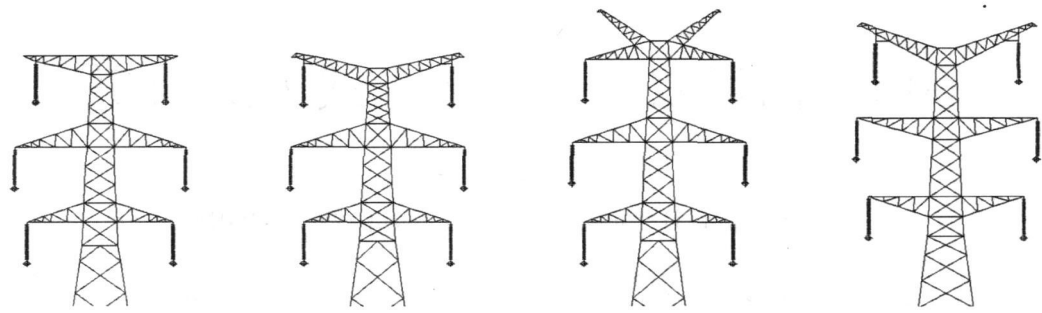


图 2 三层横担垂直排列鼓型塔

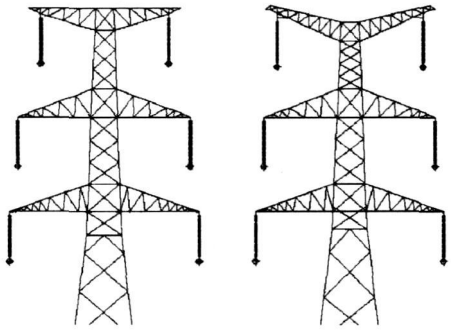


图 3 三层横担垂直排列伞型塔

为:同等条件下,使用双层横担布置铁塔高度有所降低,较垂直排列的三层横担的杆塔高度可以减少 10 m 左右;且因导线呈三角形排列,较垂直排列导线间的间隙大,因而对防冰害及抗导线舞动性能好。由于铁塔导线间距离增大,其横担宽度要比垂直排列的铁塔大一倍,即使在两相导线采用 V 串情况下,走廊宽度仍然比垂直排列的铁塔大一倍左右,因此此类铁塔的应用需要较宽的线路走廊,适合于较高跨越塔及空旷地段。另外,三角型排列的双层横担杆塔结构受力相对复杂,节点处理也比较复杂,铁塔重量比垂直排列的铁塔稍大。

垂直排列方式主要有双曲线型、鼓型和伞型三种布置方式,如图 1、图 2 和图 3 所示。双曲线型和鼓型是目前最常见的布置型式,在中国、美国、英国、日本的双回路设计中应用较多,因为导线呈双曲线型和鼓型布置而得名,地线支架有水平型和羊角型布置,此类塔型适用于覆冰较重的地区,稍短或稍长的

中横担使所有的导线均能达到适当错开的目的,避免导线脱冰跳跃时发生闪络事故,导线垂直排列,可以有效的减小线路走廊,施工放线较为方便,但由于最短和最宽的横担在塔的中部,受力分布相对差一些。伞型也是工程中采用的一种布置方式,因其导线呈伞型布置得名,布置方式有伞型和倒伞型,地线支架有水平型和羊角型布置。伞型塔其横担上短下长,力的分布较为合理,但施工时挂线较为困难,倒伞型由于结构布置不甚合理,实际工程中不常采用,但施工及带电作业较其他塔方便。以下为三层横担布置的双曲线型、鼓型两种常用方式的比较表。

表 1 双曲线型塔和鼓型塔的技术比较

塔型	双曲线型	鼓型
计算呼高 /m	36.0	36.0
塔重 /kg	37.58	36.2
相对塔重	1.035	1.000
节约走廊宽度 /m	0.0	1.4

由上表可知,双曲线型塔较鼓型塔重约 3.5%,线路走廊宽约 1.4 m,无论是从节约走廊宽度还是从铁塔指标的角度来看,鼓型塔均较双曲线型塔有一定的优势。

2 导线挂线方式

直线塔导线的挂线方式,常用的有“ I 串型式 ”和“ V 串型式 ”。 I 串挂线方式由于风偏和摇摆角的因素,使得其走廊宽度较 V 串挂线方式大 3~6 m;同时

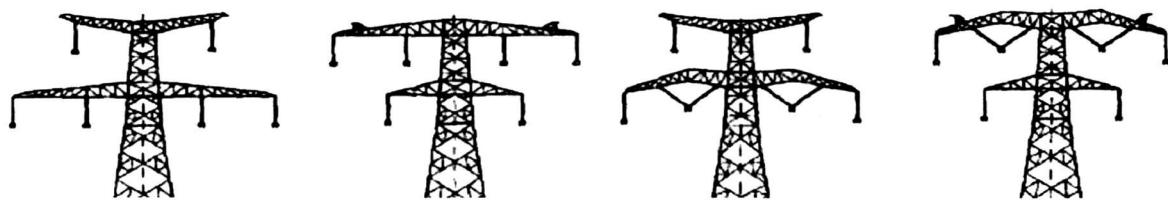


图 4 双层横担展翅蝶型、伞型塔

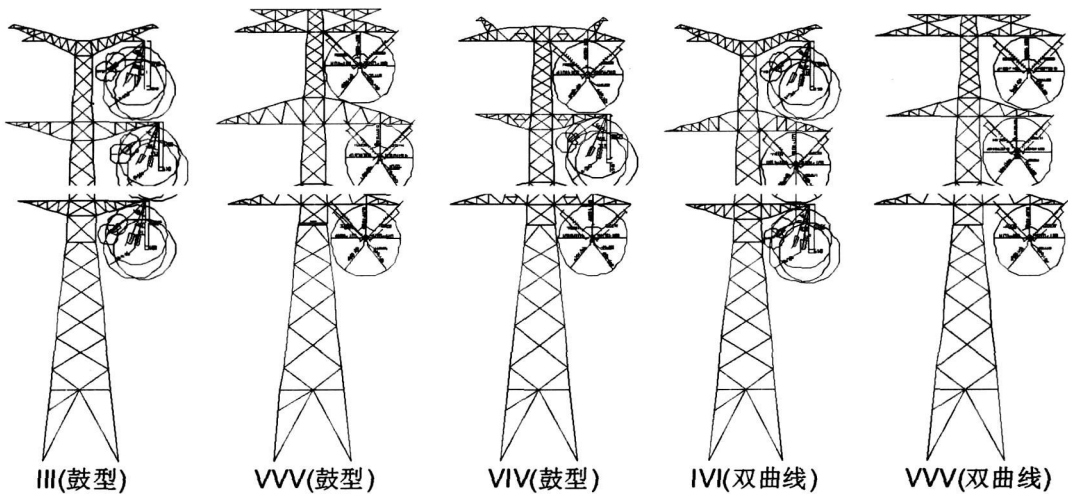


图 5 导线挂线方式

I串由于绝缘子串呈悬垂型式,使得在相同的线高下铁塔高度较 V串方式要高 2 m 左右;但采用 V串的挂线方式,直线塔的绝缘子串用量增加一倍,塔头和横担尺寸更大。最近一段时期,一种 I串和 V串配合使用的新技术开始在 500 kV 同塔双回直线塔上应用,主要有两种组合:鼓型 VIV 挂线方式和双曲线型 IVI 挂线方式。

表 2 不同挂线方式的技术比较

塔型	线路走廊 宽度节约 /m	计算塔重 /t	相对重量 /%
Ⅲ (鼓型)	0.00	24.39	1.05
VVV (鼓型)	2.90	24.31	1.05
VIV (鼓型)	2.90	23.22	1.00
IVI (双曲线型)	2.95	23.80	1.02
VVV (双曲线型)	3.30	24.35	1.05

通过表 2 比较,在塔重方面,“VIV”鼓型直线塔最优,其次为“IVI”双曲线型,“Ⅲ”鼓型、“VVV”鼓型、“VVV”双曲线型较差,相对“VIV”鼓型约重 5%;在节约线路走廊宽度方面,“VVV”双曲线型最优,“VVV”鼓型、“VIV”鼓型、“IVI”双曲线型基本相当,“Ⅲ”鼓型最差。

综合考虑,“VIV”鼓型直线塔,较“Ⅲ”(鼓型),线路走廊宽度和塔重均有明显优势;较“VVV”(鼓型),线路走廊宽度相当,塔重轻 5%左右;较“IVI”(双曲线型),线路走廊宽度相当,塔重轻 2%左右;较“VVV”(双曲线型),线路走廊宽度略有增加,塔重轻 5%左右;后两种方案直线塔为双曲线型,需要双曲线型转角塔与之匹配,经计算,双曲线型转角塔较鼓型重 6%左右。综合以上分析,“VIV”鼓型直线塔最优。

3 “VIV”鼓型直线塔电气性能

下面,对Ⅲ串和 VIV 串布置的鼓型塔进行电气性能比较(选用 4×LGJ-500/45 导线,分裂间距 500 mm)。

表 3 Ⅲ串和 VIV 串布置的鼓型塔电气性能比较

	VIV 串		Ⅲ 串	
	逆相序	同相序	逆相序	同相序
表面最大电场强度 /(kV/m)	20.26	19.49	19.89	19.65
地面最大场强 /(kV/m)	4.55	6.63	4.77	6.66
无线电干扰 /dB	42.78	37.71	42.35	38.72
可听噪声 /dB	41.48	40.39	40.43	40.41

注:对地 15 m 高,中线外 10 m 处值。

3.1 导线表面最大电场强度

导线表面最大电场强度,逆相序布置时较同相序布置大;对于逆相序布置,采用 VIV 型绝缘子串时比采用Ⅲ型绝缘子串大;对于同相序布置,采用 VIV 型绝缘子串时则比采用Ⅲ型绝缘子串略小。

3.2 无线电干扰

逆相序布置时的无线电干扰水平比同相序布置时高;逆相序布置时,VIV 串塔的无线电干扰水平比Ⅲ串塔高;同相序布置时,VIV 串塔的无线电干扰水平则比Ⅲ串塔低。

3.3 可听噪声

当采用同相序布置时,无线电干扰水平较低,可听噪声较低;而采用逆相序布置时,虽然导线表面最大电场强度、无线电干扰水平及可听噪声较高,但均满足要求。考虑到导线逆相序排列有利于改善线路

(下转第 68 页)

[4] 西北—华中直流联网工程四川电网安全稳定控制系统初步设计[R]. 西南电力设计院, 2009.

[5] 四川德阳换流站 SCS—500 分布式稳定控制装置功能说明书[R]. 南京南瑞电网安全稳定控制技术分公司, 2010.

[6] 浙江大学直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 中国电力出版社, 1985.

[7] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[8] 德宝直流与特高压交流试验示范工程运行控制策略研

究[R]. 中国电力科学研究院, 2009

[9] 四川电力系统 2010 年度运行方式[R]. 四川省电力公司

作者简介:

吴冲(1981), 男, 工程师, 从事安全自动装置和继电保护规划设计工作。

刘汉伟(1964), 男, 高级工程师, 从事安全自动装置和继电保护规划设计工作。

蔡华(1981), 男, 工程师, 从事继电保护管理和研究工作。

(收稿日期: 2010—07—10)

(上接第 3 页)

电压的不平衡度, 对抑制双回线路同时跳闸的作用十分显著, 在实际工程中, 一般采用逆相序排列。

计算结果表明, 导线采用“VⅣ”鼓型布置的 500 kV 双回路直线塔的电气性能满足规程规范的要求, 且较导线采用“Ⅲ”鼓型布置方式的铁塔电气性能更有优势。

4 在工程中的运用

2009 年, 四川电力设计公司承担宜宾—泸州 500 kV 同塔双回输电线路新建工程设计工作。该工程起于宜宾(叙府)500 kV 变电站, 止于泸州 500 kV 变电站, 线路全长约 $2\times 81\text{ km}$, 采用同塔双回架设方式, 途径四川省宜宾市和泸州市。根据该条输电线路走线区域经济较发达, 人口众多, 房屋多, 分布广等工程特点, 在该工程中采用导线“VⅣ”布置的鼓型直线塔, 属国内首次使用。

新型导线“VⅣ”布置的鼓型直线塔的应用较传统“Ⅲ”鼓型直线塔, 线路走廊平均宽度缩短了 3.05 m 。走廊宽度的缩短, 全线房屋拆迁减少 $13\,230\text{ m}^2$, 节约房屋拆迁面积 10.8% 。

按相同的使用条件, 用“Ⅲ”鼓型直线塔替换“VⅣ”鼓型塔, 全线直线塔耗钢量增加 300 t 增加塔材耗量 3.43% 。

绝缘子方面, “VⅣ”鼓型塔较“Ⅲ”鼓型塔增加 521 支合成绝缘子, 增加费用约 104.2 万元 。

综合考虑, “VⅣ”串在宜泸线中的使用, 共节约投资 754.5 万元 , 具有很好的经济效益和社会效益。

表 4 Ⅲ串和 VⅣ串在宜泸线经济技术比较表

比较项目	Ⅲ串	VⅣ串
平均走廊宽度 /m	31.37	28.32
房屋拆迁面积 /m ²	116 375	103 145
直线塔材耗量 /t	6 160	5 860
合成绝缘子(支)	875	1 396
综合费用(万元)	754.5	0

5 结 论

双回路直线塔采用“VⅣ”串挂线方式, 能节约输电线路走廊, 降低工程铁塔重量; 同时由于走廊宽度的缩短, 大大减小了房屋拆迁。通过在实际工程中的成功应用, 取得了显著的经济效益和社会效益, 具有广泛的推广价值。

参考文献

[1] 谢开, 刘永奇, 朱治中, 等. 面向未来的智能电网[J]. 中国电力, 2008, 41(6): 19—22.

[2] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 7—11.

[3] 余贻鑫. 面向 21 世纪的智能配电网[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2(6): 14—16.

[4] 陈建民, 周健, 蔡霖. 面向智能电网愿景的变电站二次技术需求分析[J]. 华东电力, 2008, 36(11): 37—38.

[5] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1—7.

作者简介:

田峻(1971), 男, 硕士, 工程师, 从事高压输电线路设计。

钟顺洪(1978), 男, 硕士, 工程师, 从事高压输电线路设计。

于学玉(1980), 男, 硕士, 工程师, 从事高压输电线路设计。

(收稿日期: 2010—05—18)

惠州地区雷电参数统计分析

谢 鹏¹, 魏 莱¹, 赵紫辉², 马御棠², 吴广宁²

(1 广东电网公司惠州供电局, 广州 惠州 516001; 2 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:雷电定位系统在输电线路雷击故障查询中得到了广泛地应用, 是研究雷电的先进手段。根据广东省雷电定位系统 1999—2007 年间积累的数据, 利用 ArcGIS 软件, 从整个广东省的雷电数据中筛选出惠州地区的数据, 对该地区落雷次数、雷暴日、雷电流幅值等雷电参数进行统计分析, 分析雷电参数随时间变化以及各行政区域之间的差异, 建议提高惠州地区防雷设计标准, 加强现有线路的防雷改造。

关键词:雷电参数; 输电线路; 雷电定位系统; 惠州

Abstract Lightning location system has been widely used in finding lightning stroke fault in the transmission line and it is the advanced means to study lightning. Based on the data accumulated by the lightning location system in Guangdong province from 1999 to 2007, the lightning data of Huizhou region are selected using ArcGIS software. The statistic analyses for lightning parameters of Huizhou region from 1999 to 2007 are done such as the number of lightning thunderstorm days and lightning current amplitude and so on. The differences of lightning parameters changing with time and among the administrative areas are analyzed. It is recommended that the design standards of lightning protection should be improved and the transformation of lightning protection for the existing lines should be enhanced.

Key words: lightning parameters; transmission line; lightning location system; Huizhou

中图分类号: TM863 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2010)05-0004-03

随着电力系统的不断发展, 输电走廊越来越长, 输电线路因雷击引起的事故越来越多, 为快速实现雷击故障查询, 雷电监测系统得到了广泛应用。雷电监测系统可实时探测云对地的雷击时间、位置、雷电流幅值、极性、回击次数等参数, 在线路故障鉴别、快速查找雷击故障点等方面给运行部门提供了方便, 但由于现有的雷电参数统计、雷害分区、雷电参数与输电线路雷击跳闸的相互关系还缺乏深入的研究, 使得雷电监测系统的应用范围十分有限。

惠州地处低纬地区, 是中国雷暴多发区之一, 惠州供电局从 2004 年到 2007 年, 110 kV 以上线路共发生雷击跳闸 99 次, 其中 500 kV 输电线路 5 次, 220 kV 输电线路 37 次, 110 kV 输电线路 57 次, 严重影响输电系统供电的可靠性。广东省雷电定位系统建立于 1997 年, 该系统自建立以来积累了大量的数据^[1], 根据 1999 年至 2007 年 9 年的惠州雷电定位系统数据, 分析惠州地区雷电定位系统雷击次数、雷电极性、雷电流幅值分布规律等雷电参数, 为准确评估惠州供电局雷击跳闸次数打下基础。

1 雷电基础参数及广东雷电定位系统

雷电基础参数主要包括雷电日 T_d 、雷电小时 T_h 、地闪密度 N_g 、雷电流极性和峰值 I_m 、概率分布 $P_{(1)}$ 等。其中 T_d 、 T_h 、 N_g 反映雷电活动的频度, I_m 、 $P_{(1)}$ 反应了雷电活动的强度。中国雷电参数比较匮乏, 现行行业标准^[2]中雷电流幅值的累积概率分布公式是根据新杭线上的磁钢棒测量的测量结果拟合而来^[3]; 雷电日是气象观测站人工观测的结果; 地闪密度过去一直无法直接测量, 刘继等人在 20 世纪 60 年代根据对中国架空线路雷害事故统计, 得出地面年落雷密度 N_g 与雷电日 T_d 关系的经验表达式^[4]。

雷电定位系统是大面积、全自动、实时监测雷电活动的计算机在线系统, 是当今研究雷电活动最先进的手段。广东省雷电定位系统于 1997 年 4 月正式投入运行^[1]。目前主要包括 16 个定向定位和时差定位综合探测站、一个中央处理机和 29 个雷电信息分析显示终端等部分, 其中惠州秋长有一个探测站。广东省雷电定位系统采用微波点对点实时专线通信方式, 通过积累雷电参数、特殊的电路或者算法对定位误差

基金项目: 广东电网公司重点科研项目 (项目编号: JA2508005)

进行修正,目前惠州地区雷电定位精度可达到 0.92 km。通过保持一定站距,选择合理的增益和探测站位置,根据人工引雷试验和广东省雷电故障查询情况,表明目前广东雷电定位系统探测效率在 85%以上。

2 雷电参数统计软件选择

雷电监测系统测量到的雷电数据包含经度、纬度、时间等信息,属于典型的地理信息类数据,需要依靠成熟的地理信息系统平台来对数据进行统计分析。目前常用的 GIS 平台有美国环境系统研究所 (ESRI) ArcGIS、美国 GE 公司 Smallworld 平台,国内北京超图公司 SupperMap2000、深圳雅都公司 GROW、武汉吉奥信息工程技术有限公司 GeoStar 平台等。ESRI 公司是世界最大的地理信息系统技术提供商提供了复杂的制图、数据使用、分析以及数据编辑和空间处理工具,提供了良好的应用程序接口,方便二次开发,为处理海量的雷电定位系统数据提供了极大的方便,因此选择 ArcGIS 作为雷电参数统计分析的平台,对惠州地区雷电数据进行筛选^[5]。

3 雷电参数统计分析

3.1 落雷次数

惠州地区主要包括博罗县、惠东县、惠阳县、龙门县以及辖区五个行政区域,利用 ArcGIS 软件,将惠州地区落雷数据从广东雷电监测数据中筛选出来,对各年数据进行统计分析,从 1999 年到 2007 年惠州地区落雷次数如图 1 所示,由图 1 中可以看出,其中 2002 年落雷次数最少,只有 6 万次左右,2007 年落雷次数最高,达 27 万次,是最小年份的 4 倍多,各年落雷差距比较大。惠州平均雷击次数在 16 万次/年左右,负极性雷平均在 15 万次左右,负极性雷占 94.97%,负极性所占比例与规程描述相符合。同时根据图 1,可以近似地认为以三年为一个周期,落雷次数有一个从低到高的上升过程。

惠州地区每年各月的落雷情况如图 2 所示,其中图 2(a)为 4 月到 9 月落雷情况,图 2(b)为 10 月到 3 月落雷情况,由图 2 可以看出,每年落雷主要集中在 4 到 9 月,这几个月中平均每月落雷次数均在 1 万次以上,6 月落雷次数最多,1 月、2 月及 12 月落雷次数较

少,均少于 100 次。惠州地区每个月均有落雷,雷暴月为 12 个月。

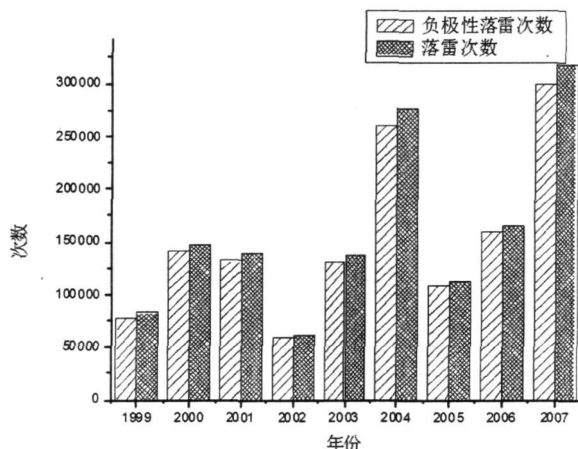
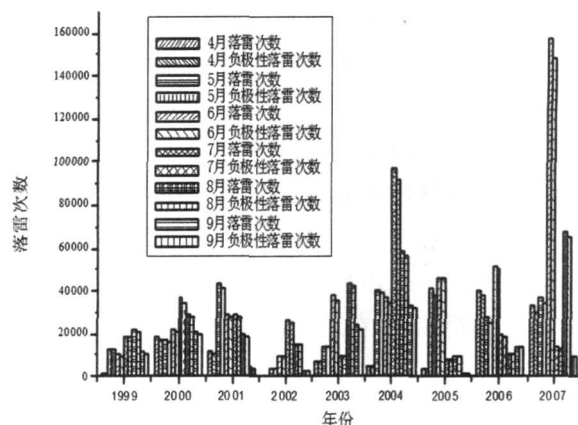
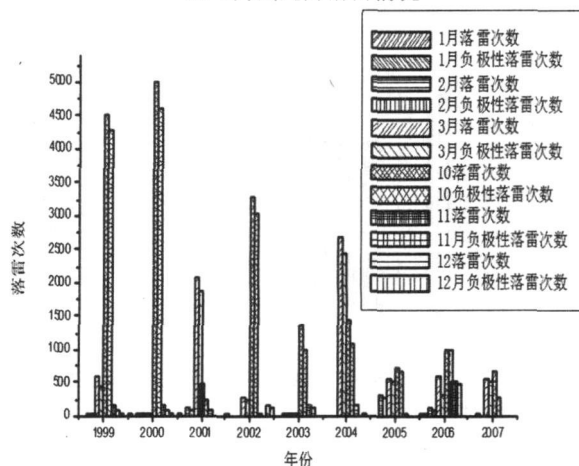


图 1 惠州地区各年落雷次数



(a) 4 月到 9 月落雷情况



(b) 10 月到 3 月落雷情况

图 2 各月落雷情况

各区域落雷次数如图 3 所示,由图 3 可以看出,辖区的落雷次数总是最低,惠阳县出现的落雷次数最多,其次是惠东县。主要原因是惠阳县雷暴日比较高,同时辖区面积比较小,惠阳县的年平均落雷次数达到 5 万余次,辖区面积仅 7 千余次,惠阳县落雷次

数是辖区的 7 倍,二者的差异与雷暴日成正相关。

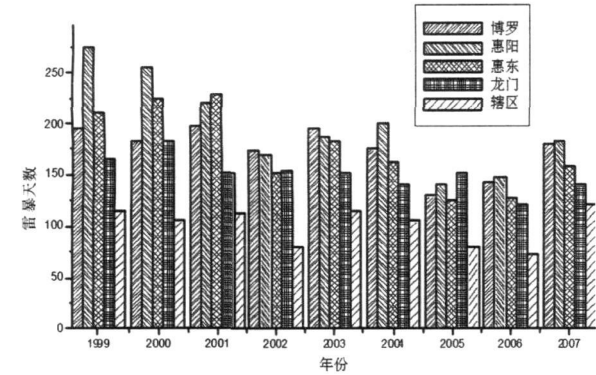


图 3 各区域落雷次数

3.2 雷暴日

各行政区域的雷暴日如图 4 所示。由图 4 可以看出,从 1999—2007 年之间,整个惠州地区的雷暴日天数均较高。辖区的雷暴日最少,最少的 2006 年雷暴日仍然达到 73 天。辖区的平均雷暴日为 100.4 d。惠阳县的雷暴日高达 197.6 d。惠东县与博罗县 175 d。龙门县 150 d。惠阳县 1999 年雷暴日最高,高达 274 d。基本为辖区的 4 倍,比辖区高出 200 d 左右。由此可见,惠州地区均属于特殊强雷区,输电线路经过惠州地区时应当采取更有效的防雷措施。由于各区域雷暴日差距较大,在对其雷击跳闸率进行评价时应当考虑其差异。

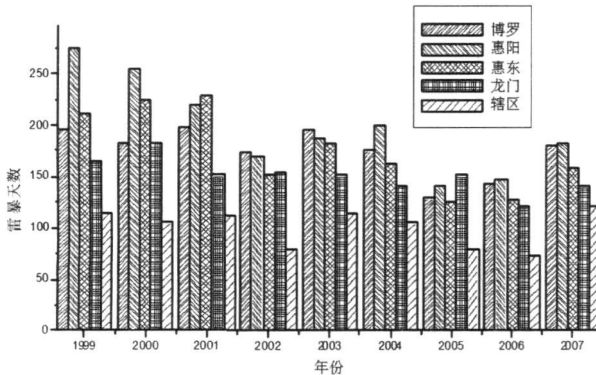


图 4 各区域雷暴日

3.3 落雷密度

采用网格法^[6]对惠州地区的落雷密度情况进行分析,网格大小为 10 km×10 km,其落雷密度情况如图 5 所示,由图 5 可以看出该地区的年落雷次数在 23.6 次/平方公里内,整体情况是由东到西落雷情况密度增加,落雷密度大的区域主要分布在博罗县,惠东县的落雷密度较小,因此对整个惠州地区而言,防雷的重点区域是博罗县。



图 5 惠州落雷密度

3.4 雷电流幅值分布

雷电流的幅值分布范围如图 6 所示,其中横坐标 1 到 9 分别对应区间 $[-800, -200]$ 、 $(-200, -100]$ 、 $(-100, -50]$ 、 $(-50, -40]$ 、 $(-40, -30]$ 、 $(-30, -20]$ 、 $(-20, -10]$ 、 $(-10, 0]$ 、 $(0, 800]$,由图 6 可以看出,雷电流大小主要集中在 -100 到 0 这个范围内,而且在 $(-40, 0]$ 这一范围更是占到 75% 以上,而行业标准 DL/T 620—1997 中雷电流幅值在此范围内为 65%,惠州地区的雷电流幅值小于 40 的概率比规程高出 10 个百分点,认为可能是两者测量方法不一致所引起。同时规程中对耐雷水平计算结果表明 110 kV 输电线路雷击杆塔时耐雷水平计算结果都不低于 41 kA,且雷电流幅值在小于 40 的范围内所占较大的比例,从这个角度出发,认为提高输电线路绕击耐雷水平,减少绕击发生的可能性,对输电线路整体跳闸率的提高效果更好。

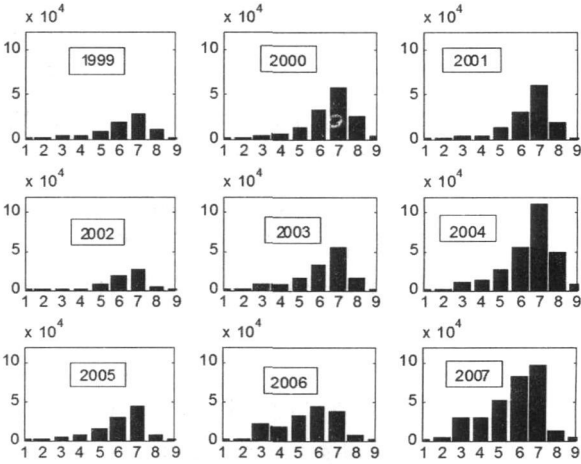


图 6 雷电流幅值分布

(下转第 30 页)

到自身目的同时,通过市场机制实现了水火电置换,水电资源得以充分利用,国家相关政策得到较好的实施。算例结果表明,所提出的模型简单可行,能较好的发挥市场调节功能,在中国电力市场改革初期具有一定的实用性。

参考文献

- [1] 四川省电力公司编.探索中的四川电力市场[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [2] 国家电力监管委员会.华中电力市场建设研究报告[R].北京:国家电力监管委员会,2004.
- [3] 国家电力监管委员会供电监管部.东北区域电力市场试点工作理论与实践探索——两部制电价模式[R].北京:国家电力监管委员会,2004.
- [4] 王雁凌,张粒子,杨以涵.基于水火电置换的发电权调节市场[J].中国电机工程学报,2006,3(26):131—136.
- [5] 江岳春,姚建刚,周丽兰,等.基于“容量合同+效率置换+实时市场”模式的发电竞价系统研究[J].电工技术学报,2006,21(1):52—57.

- [6] 蔡兴国,林士颖,马平.现货交易中梯级水电站竞价上网的研究[J].中国电机工程学报,2003,23(8):56—59.
- [7] 马瑞,贺仁睦,颜宏文,等.考虑水火协调的多目标优化分组分段竞标模型[J].中国电机工程学报,2004,24(11):53—57.
- [8] 陈晓林,刘俊勇,宋永华,等.利用差价合同和金融输电权的组合规避电力市场风险[J].中国电机工程学报,2005,25(10):75—81.
- [9] Bialek J W. Transmission Charging and Growth of Renewables in the UK[C]. Power Engineering Society General Meeting 2007:1—6.
- [10] Soni A. Ozveren C S. Renewable Energy Market Potential in U. K. [C]. Universities Power Engineering Conference 42nd International 2007:717—720.

作者简介:

陈 岭(1971),女,成都人,成都电业局。

李 俊(1981),男,四川大学电气信息学院博士研究生,主要从事电力市场、电力经济评估等方面的研究工作。

(收稿日期:2010—05—27)

(上接第 6 页)

4 结束语

雷电活动具有很大的随机性和分散型,惠州地区的雷电参数统计结果表明,惠州地区属于特殊强雷区,雷电流极性的分布与现行规程分布一致,但是在雷电流小于 40 kA 出现的概率比规程推荐公式高 10 个百分点,认为应当加强 110 kV 以上高压输电线路绕击的防护。而落雷次数几乎以三年为周期呈上升趋势,雷电活动也有增强的趋势,同时惠州地区各行政区域的雷暴日均很高,属于特殊强雷区,落雷次数差异比较大,落雷次数与雷暴日正相关,建议加强现有线路的防雷改造,适当提高惠州地区的防雷设计标准,在防雷设计中应当考虑各区域雷电频度的差异。

参考文献

- [1] 陈水明,樊灵孟,何宏明,等.广东省雷电定位系统运行情况[J].中国电力,2001,34(12):43—47.
- [2] DL/T 62021997.交流电气装置的过电压保护和绝缘配

合[S].北京:电力工业出版社,1997.

- [3] 孙萍,郑庆均,吴璞三,等.220 kV 新杭线 1 回路 27 年雷电流幅值实测结果的技术分析[J].中国电力,2006(7):74—76.
- [4] 杜澍春.关于输电线路防雷计算中若干参数及方法的修改建议[J].电网技术,1996,20(12):53—56.
- [5] 李功新.基于 GIS 的电网生产管理系统建设与应用[M].北京:科学出版社,2008.
- [6] 陈家宏,童雪芳,谷山强,等.雷电定位系统测量的雷电流幅值分布特征[J].高电压技术,2008,34(9):1893—1897.

作者简介:

谢 鹏(1978)男,硕士,工程师,主要从事高电压技术及变电一次设备的管理与研究。

魏 莱,男,工作于广东电网公司惠州供电局。

赵紫辉(1985)男,硕士研究生,主要研究方向为过电压防护与接地技术。

马御棠(1986)男,硕士研究生,研究方向为架空线路防雷与接地技术。

吴广宁(1969)男,教授,博士生导师,主要从事高电压与绝缘技术方面的研究。

(收稿日期:2010—07—15)

新型电力节能金具的试验研究

袁 刚¹,尹德君¹,曾 宏²

(1 乐山电业局,四川 乐山 614000; 2 四川电力试验研究院,四川 成都 610072)

摘 要:针对普通电力金具耗能较大的问题,在对耗能原因进行深入分析后,研究了一种应用新的铸钢奥氏体合金材料制造的新型电力节能金具;论述了新材料与新型节能金具的技术特点;介绍了对新型节能金具所作的耗能试验,结果表明,该金具具有非常良好的节能效果。

关键词:节能;金具;铸钢奥氏体合金

Abstract: In view of the problems that the common electric power fittings consume much energy, a new material which is called cast-steel austenite alloy is studied after the causes of energy loss are analyzed in detail. Based on the result, the new energy-saved electric power fittings which are made of the new material are put forward. Then its technical characteristics are described and the laboratory tests are introduced. The experimental results show that the new electric power fittings have a better effect of energy conservation.

Key words: energy conservation; electric power fittings; cast-steel austenite alloy

中图分类号: TM753 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0007-04

早在 20 世纪 40 年代,国外就开展了对电力节能金具的试验研究。英国曼彻斯特大学和美国 Ohio Brass 公司都曾对铁磁金具和铝合金金具进行过能耗对比试验,发现电力线路中所用的铁磁金具的耗电量很高,而铝合金金具的耗电量却很少。中国直到 20 世纪 70 年代,才开始对电力节能金具进行试验研究,结果表明,铝合金金具的节能效果明显,但由于当时国内制造条件的限制,使得铝合金金具的推广应用受到障碍。随着中国制造技术的不断提高,用国产铝合金材料制造的铝合金金具已完全满足电力金具的各项技术要求,但由于铝合金金具的造价较高,目前国内还主要应用在 330 kV 及以上电压的输电线路。对于 220 kV 及以下电压的输配电线路,仍大量使用着造价较低但耗能却较高的铁磁金具。虽然铁磁金具的一次性建设投资较小,但却每时每刻在消耗着大量的电能,日积月累,其耗电量十分惊人,在给国家造成巨大经济损失的同时,还很不利于环境保护,这对于中国正在建设资源节约型 and 环境保护型的社会目标来说,是非常不适应的。

1 电力金具耗能原因分析

在电力线路输送交变电流过程中,电力金具的耗能主要由金具上的磁滞损耗 ΔP_h 和涡流损耗 ΔP_e 产

生。

1.1 磁滞损耗 ΔP_h

在线路传输交变电流过程中,电力金具会受到相应的交变磁化,产生磁滞损耗。在交变磁场下,当磁感应强度 $B > 1\text{T}$ (特斯拉) 时,可用下面公式简化计算 ΔP_h ^[1,2]。

$$\Delta P_h = \gamma B^2 G \tag{1}$$

式中, γ ——金具材料的磁滞损耗常数,随材料的特性不同而发生变化,其变化范围在 0.024~0.047 之间。

f —— 交变磁场的频率;

B —— 磁感应强度;

G —— 金具材料的重量。

当导线通过交变电流时,包裹在导线上的金具所产生的磁感应强度为

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{I}{2\pi R} \tag{2}$$

式中: B —— 金具内由导线电流产生的磁感应强度;

μ_0 —— 常数,真空磁导率;

μ_r —— 金具材料的相对磁导率,其取值由金具材料的磁导特性决定。例如,铸铁为 250~450,普通碳素钢为 300~1000,而铝、铜和空气都为 1。

I —— 通过导线的电流;

R —— 金具上某点至导线中心的距离。

由式 (1) 和 (2) 看出, 当导线通过的电流 I 相同, 而金具材料的相对磁导率 μ_r 不同时, 在金具内部所产生的磁感应强度 B 不同, 所产生的磁滞损耗 ΔP_h 也不同。且由于 B 与 μ_r 成正比, ΔP_h 与 B 的平方成正比, 使 ΔP_h 与 μ_r 的平方成正比。因此, 对于铸铁和普通碳素钢等铁磁材料来说, 由于其 μ_r 值是铝 μ_r 值的 250~1 000 倍, 这就意味着用铸铁和普通碳素钢等材料制造的铁磁金具, 其产生的磁滞损耗 ΔP_h 要比用铝合金制造的金具高 (250~1 000) 的平方倍。

1.2 涡流损耗 ΔP_e

当导线通过交变电流时, 在金具上会产生感应电动势和感应电流 (涡流)。根据楞次定律和法拉第电磁感应定律, 金具上产生的感应电动势为

$$e = K \frac{d\varphi}{dt} = -K \frac{\mu_0 \mu_r H dS}{dt} \quad (3)$$

式中, e —— 感应电动势;

K —— 金具材料的涡流损耗系数;

φ —— 磁通强度;

μ_0 —— 常数, 真空磁导率;

μ_r —— 金具材料的相对磁导率;

H —— 磁场强度, 与通过导线电流 I 的大小成正比;

S —— 金具中垂直于磁力线方向的横截面积;

t —— 时间。

根据式 (3), 感应电动势与通过导线电流的大小、金具材料的相对磁导率 μ_r 等参数成正比。当通过导线的电流相同, 且金具的磁路结构和几何尺寸也相同时, 影响感应电动势大小的唯一参数就是金具材料的相对磁导率 μ_r 。 μ_r 的数值越高, 则产生的感应电动势 e 就越高, 所产生的涡流损耗就越大。

磁滞损耗 ΔP_h 和涡流损耗 ΔP_e 在金具上以内能的形式消耗, 散发热量。故当导线传输相同的交变电流时, ΔP_h 和 ΔP_e 较大的金具比 ΔP_h 和 ΔP_e 较小的金具在运行中所产生的温度要高。已有的试验表明^[3], 在同一环境温度下, 当截面积为 300 mm^2 的导线通过 400 A 的交变电流时, 在铸铁金具上产生的温度高达 77°C , 而在铝合金金具上产生的温度仅为 37°C 。这就是说, 由于铸铁金具存在较高的 ΔP_h 和 ΔP_e , 使得它的温升比铝合金金具高了 40°C 。

因此, 如要减少电力金具的能耗, 就必须减少金具的磁滞损耗 ΔP_h 和涡流损耗 ΔP_e 。而要减少 ΔP_h 和 ΔP_e , 最根本的途径就是要研究新的能用于制造电

力金具的低耗能材料, 该材料应当在相对磁导率 μ_r 的值尽量小且满足机械强度等技术指标的同时, 其制造价格也较低。

2 新材料研究与节能金具的技术特点

2.1 制造电力金具新材料的研究

普通金属材料的相对磁导率 μ_r 与该材料的金相组织密切相关。当金属材料为铁素体组织时, 其具有较强的磁性, μ_r 的值较大; 当金属材料为奥氏体组织时, 其磁性较弱, μ_r 的值较小。根据这一理论, 通过相关试验并进行了大量的研究工作后, 发现了一种以碳素钢为主要原料, 在加入少量的锰等有色金属材料并经过特殊的冶炼和热处理工艺后, 所得到的一种新型的铸钢奥氏体合金材料, 其磁性已变得十分微弱, 相对磁导率 μ_r 的值已变得很低。由于这种材料的主要成分是碳素钢, 因而其仍然很好地保留了碳素钢材料的优良特性, 造价不高, 这就为大量使用这种新材料制造电力节能金具创造了良好条件。

2.2 新型电力节能金具的技术特点

研究表明^[3], 当用铸铁或铸钢制造的铁磁金具本体部件不形成磁回路时, 将使本体部件内磁场强度 H 的值极大减小 (这时的 H 主要由漏磁通产生), 从而使该部件内产生的涡流损耗极大降低。这时, 尽管该部件内仍然存在磁滞损耗, 但由于涡流损耗被极大降低后已使该部件的总能耗得到了较大程度的降低。

根据这项研究成果, 考虑到在金具制造过程中, 金具本体部件所用材料要占金具全部材料绝大部分的生产成本的实际情况, 从有利于节约资源和提高产品的性能价格比出发, 则在研究和设计新型节能金具时, 仍采用铁磁材料制造不形成磁回路的金具本体部件, 而仅把新型铸钢奥氏体合金材料用于制造金具的压条、U 型螺丝和挂板等部件, 因为这些部件不能通过不形成磁回路的方式来达到降低涡流损耗的目的, 是当前铁磁金具中耗能最大的一部分部件。由于压条、U 型螺丝和挂板等部件所用材料仅占金具全部材料的很小部分, 这就使得整个金具在使用新型材料后所增加的生产成本不是太多, 而取得的节能效果却十分显著。

这种新型节能金具的部件组合模式, 还对已经投运的电力线路进行节能改造十分有利。当线路停电施工时, 就可在保留原有铁磁金具本体部件不变的条

件下,只更换金具的压条、U型螺丝和挂板等部件,所需的施工量较少,施工时间较短,工程费用较低,因而更易于在线路的节能改造计划中安排与实施。当然,对于那些对金具节能要求特别高的线路,将采用新型铸钢奥氏体合金材料制造包括本体部件在内的金具的全部部件。

新型节能金具所达到的节能效果,比之于铝合金金具的耗能会略高一些,但产品的价格却低得很多,且不大量使用铝等贵金属,这无论从产品的性能价格比来说,还是从节约国家资源和降低贵金属的大量消耗来说,都是符合国家发展政策的。因此,新型电力节能金具具有材料优良、价格低廉、部件组合灵活实用、节能效果显著、施工方便等优点,其发展前景十分广阔。

3 耗能试验及试验结果分析

3.1 电力金具节能产品的评价标准

2006年 2 月 23 日,中标认证中心 (CSC)发布并实施了新的《电力金具节能产品认证技术要求》,电力金具节能评价价值如表 1 所示。

3.2 新型电力节能金具试验样品的制作

以电力金具中的 XGu-4 型悬垂线夹为例,制作了不包括悬垂线夹本体部件在内的悬垂线夹的压条、U型螺丝 (其螺帽、平垫圈和弹簧垫圈除外)和挂板等部件的试验样品一套,该试验样品的表面全部采用了热浸镀锌处理,与现在使用的同类铁磁悬垂线夹的

表面镀锌方式一致。试验样品所用的悬垂线夹本体部件和 U型螺丝的螺帽、平垫圈和弹簧垫圈仍使用铁磁悬垂线夹的相应镀锌部件。与此同时,作为试验的参照物,取用一套普通的 XGu-4 型铁磁悬垂线夹的全套部件,由此,得到了以下两组试验样品。

1)全部为普通的 XGu-4 型铁磁悬垂线夹的部件,表面都已热浸镀锌。这组样品称之为普通铁磁悬垂线夹的试验样品,简称试验样品 A。

2)本体部件和 U型螺丝的螺帽、平垫圈和弹簧垫圈采用现在使用的 XGu-4 型铁磁悬垂线夹的相应部件,而悬垂线夹的压条、U型螺丝 (其螺帽、平垫圈和弹簧垫圈除外)和挂板等部件采用新型铸钢奥氏体合金材料制作的节能部件,且节能部件的表面已热浸镀锌。这组样品称之为新型节能悬垂线夹的试验样品,简称试验样品 B。

3.3 对悬垂线夹试验样品进行耗能试验的线路构成与耗能的测量方法

在对以上两组试验样品进行耗能试验时,其试验线路的构成和对试验样品进行耗能测量的方法都是按照《电力金具节能产品技术认证要求》中相关的规定进行的。具体的试验线路接线图如图 1 所示。

图中,试验所用的大电流发生装置,通过连接与 XGu-4 型悬垂线夹所对应的标称导线即 LGJ-240/30 型钢芯铝绞线后构成完整的试验线路。两组电力金具的试验样品在做耗能试验时,按照测量要求分为两次试验被接入到试验线路上。测量耗能所用仪表

表 1 电力金具节能评价价值											单位:W
导线截面 /mm ²	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500	≥ 630
悬垂线夹		0.41	0.72	1.14	1.65	2.71	4.85	7.21	12.7	20.4	32.4
耐张线夹	0.16	0.37	0.84	1.73	3.08	4.86	8.67	14.1	21.9	33.0	50.7
防振锤		0.22	0.28	0.31	0.40	0.50	1.72	1.86	3.45	6.79	12.0

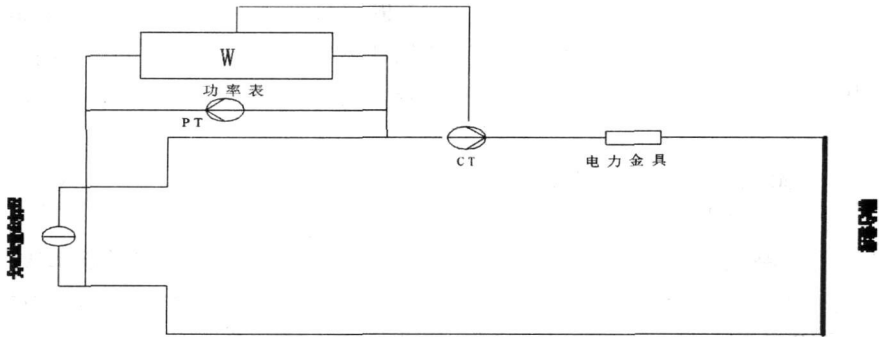


图 1 电力金具耗能试验线路接线图

为高精度的有功功率表 W,且 W 通过电流互感器 TA 和电压互感器 TV 与试验线路连接,用于测量试验线路总的有功功率损耗。同时,通过连接在 TA 二次回路上的电流表 A,持续监测试验线路总的运行电流。

试验样品耗能测量采用的是差值法。按照电力金具节能评价规定的对应于 XGu-4 型悬垂线夹的经济载流量为 240 A 的考核要求,仔细调整大电流发生装置的输出电流,使试验线路持续保持在 240 A 的稳定电流下运行。在此试验工况下,第一次试验是试验线路为空载即未接入任何试验样品时,测量试验线路总的有功功率损耗值 P_1 。第二次和第三次试验是试验线路分别接入试验样品 A 和 B 时,测量试验线路总的有功功率损耗值 $P_{\Sigma A}$ 和 $P_{\Sigma B}$ 。由此可得

$$P_j = P_{\Sigma j} - P_1 \quad (j = A, B)$$

式中, P_j ——试验样品 A 或 B 实际的有功功率损耗;
 $P_{\Sigma j}$ ——包含试验样品 A 或 B 时试验线路总的有功功率损耗;

P_1 ——不包含试验样品时试验线路总的有功功率损耗。

3.4 耗能试验结果

本耗能试验在四川电力试验研究院的相应实验室进行。所用试验设备与测量仪器均符合国家相关技术标准,试验运行工况稳定,试验运行环境良好,在试验线路周围注意避免了其他铁磁物质可能对试验样品产生的电能损耗影响。

按照差值法的测量要求,首先在试验线路中分别对试验样品进行了 3 次耗能试验,试验结果如表 2 所示。

表 2 电力金具试验样品的耗能试验结果

项目	总的有功 功率损耗 /W	A 和 B 的 有功功率 损耗 P_j /W	B 对 A 减少 的有功功率 损耗 ΔP /W	B 对 A 的 节能率 %
线路空载时	42.6	/	/	/
接入试验样品 A	52.0	9.4	/	/
接入试验样品 B	44.4	1.8	7.6	80.85

之后,按照《电力金具节能产品认证技术要求》中对金具表面温度的相关考核规定,接着对试验样品 A 和 B 进行了温升试验。做该项试验时,试验线路周围的环境温度为 9.8℃,在试验线路中同时接入了试验样品 A 和 B,并使试验线路在安全运行电流 400 A 的条件下持续运行一小时以上。与此同时,用高精度的红外线测温仪对 A 和 B 的表面温度变化过程进行测量。从得到的温度变化测量图可知,试验样品 A

和 B 的表面温度分别从最低值的 10.7℃和 10.4℃逐步升高到最高值的 39.0℃和 20.2℃,并在温度最高值时保持不变。由此得出,A 和 B 表面温度的升高值分别为 28.3℃和 9.8℃,即是说,A 和 B 在 400 A 的相同运行条件下,A 表面的温升值已接近为 B 表面温升值的三倍。该项温升试验,在准确测出 A 和 B 表面温度变化过程的同时,也进一步表明了试验样品 B 确实具有非常良好的温升特性和节能效果。

3.5 试验结果分析

1)试验样品 A 的有功功率损耗 $P_A=9.4$ W。用电力金具节能评价的标准进行对照,由于 9.4 W $>$ 4.85 W,因此,试验样品 A 的节能评价不满足国家规定的《电力金具节能产品认证技术要求》。由此判定,现在使用的普通铁磁悬垂线夹不是电力金具的节能产品。

2)试验样品 B 的有功功率损耗 $P_B=1.8$ W。由于 1.8 W $<$ 4.85 W,因此,试验样品 B 的节能评价已满足国家规定的《电力金具节能产品认证技术要求》。由此判定,新型节能悬垂线夹已属于电力金具的节能产品。

3)试验样品 B 比试验样品 A 的有功功率损耗降低了 7.6 W,其节能率高达 80.85%,相当于有功功率损耗降低了 5 倍以上,其节能效果相当显著。

4)试验表明,新型节能悬垂线夹比之于普通铁磁悬垂线夹在表面温度的温升特性方面要优良得多。这种结果,对于提高线路的安全运行水平是十分有利的。在电网实际运行中,线路输送电流往往会达到较高数值,这就使得与这两种不同金具相连接的导线会受到两种不同金具表面温度的影响。对于与新型节能金具相连接的导线,可长期处于较低金具表面温度的影响下,从而避免了导线因受到金具表面持续高温的影响所导致的机械性能下降,进而导致导线断股甚至断线等故障的发生。新型节能金具的这项优点,为保证线路的长期安全运行和提高线路的运行年限,以及为线路的增容创造了良好条件。

4 结 语

试验表明,应用新型铸钢奥氏体合金材料并按照新的金具部件组合模式所制造的试验样品 B,不仅其节能评价已满足国家规定的《电力金具节能产品

(下转第 15 页)

重燃后过电压波形基本恢复到零点附近波动如图 12。

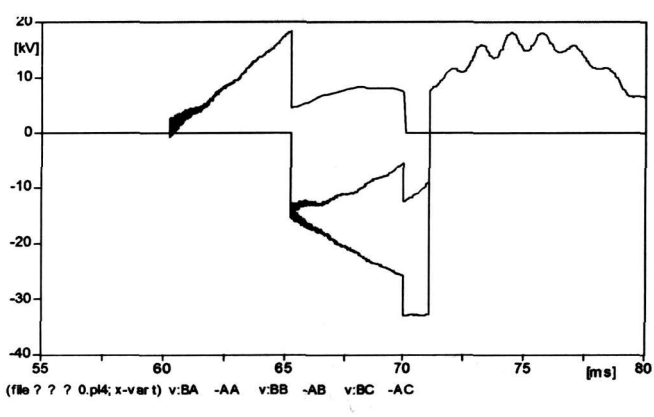


图 12 断路器断口恢复电压波形

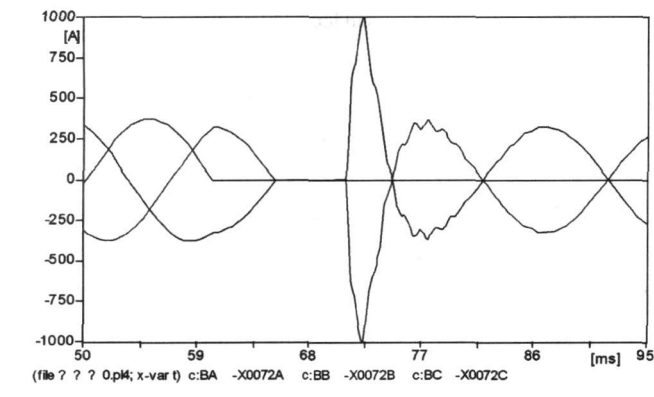


图 13 流经电容器组三相电流

(上接第 10 页)

认证技术要求》，而且，其节能率高，制造产品需要的贵金属材料又较少，因此，产品无论在符合国家的产业发展政策方面还是在性能价格比方面都具有十分明显的优势。下一步，在把 U 型螺丝的螺帽、平垫圈和弹簧垫圈等全部改用新型铸钢奥氏体合金材料制造后，将进一步提高产品的节能率和性能价格比。

虽然本次试验的样品仅为一种节能型悬垂线夹，但其试验结果，从原理上是普遍适用于各型悬垂线夹、耐张线夹和防振锤等电力金具的。今后，将对各型电力节能金具进行全面的试验研究，以期得到更加完善的结果。

参考文献

[1] 余虹云. 电力金具能耗与节能的探讨 [J]. 浙江电力,

5 结 论

借助 ATP—EMTP 仿真平台，建立了贵州某变电站仿真模型，对投切电容器组过电压情况进行了仿真分析，得到以下结论。

- 1) 在分析真空断路器开断交流电弧物理过程的基础上建立了真空断路器的仿真模型。
- 2) 投切补偿电容器组过程中电容器上承受的过电压幅值均未超过 2.0 p.u 不会对电容器造成威胁，但在电容器入口端会产生较高的对地过电压，达 3.0 p.u
- 3) 在切除电容器组过程中发生断路器两相重燃时，由于断路器相间电压较高，将会在重燃相产生上千安的涌流，对电容器组的通流能力要求较高。

参考文献

[1] 王季梅. 真空电弧理论研究及其测试 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993.

[2] 沈黎明. 变电站补偿电容器投切过电压的仿真与测试 [D]. 华北电力大学硕士论文, 2006.

[3] Dawn M. Dunsmore, Edgar R. Taylor, Bernard F. Wirtz et al. Magnifica Lion of Transient Voltages in Multi-voltage-level Shunt-capacitor-compensated circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992 (7): 664—673.

(收稿日期: 2010—06—09)

1999, 18(4): 58—59.

[2] 秦曾煌主编. 电工学 (第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.

[3] 吴国宏. 节能金具的研制 [J]. 吉林电力, 2002(4): 14—16, 19.

[4] 徐乃管. 论节能金具的开发与应用 [J]. 输配电设备网, 2007.

[5] 中标认证中心. 《电力金具节能产品技术认证要求》[S]. 2006.

作者简介:

袁 刚,男,助理工程师,从事电力勘测设计工作。
(收稿日期: 2010—06—30)

变电站投切电容器组过电压研究

林 静, 胡 红, 郭 飞

(成都电业局龙泉驿供电局, 四川 成都 610100)

摘 要:投切补偿电容器组电力系统最常发生的内部过电压,以贵州某变电站为原型,建立了仿真计算模型。操作过电压仿真研究中,断路器模型起着关键性作用,在分析了真空断路器开断时交流电弧物理过程的基础上建立了断路器的仿真模型,大大提高了仿真精度。仿真计算结果表明:投、切电容器组过程中电容器上承受的过电压幅值较小,不会对电容器造成威胁,但会在电容器入口端产生较高的对地过电压;在切除电容器组过程中发生断路器两相重燃时,由于断路器相间电压较高,将会在重燃相产生上千安的涌流,对电容器组的通流能力要求较高。

关键词:暂态过电压;断路器模型; ATP—EMTP

Abstract: Switching compensating capacitor bank and switching transformer are two kinds of the main causes of overvoltage and failure of electrical equipment. The causes of the above-mentioned overvoltage are analyzed. The simulation model is constructed using ATP—EMTP simulation program based on a substation in Guizhou. The simulation results show that the overvoltage endured by capacitors is small during switching compensating capacitor bank, but the overvoltage to earth of the interface is much greater with 3.0 pu amplitude. It is a risk for compensating capacitor bank when two phases are re-closed.

Key words: transient overvoltage; breaker model; ATP—EMTP

中图分类号: TM864 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2010)05—0011—05

0 简 介

由于真空断路器的电弧重燃对投切电容器组过电压有巨大影响,而 ATP—EMTP 软件本身不具有考虑燃弧特性的断路器模块,从真空电弧的特性入手,利用 ATP—EMTP 提供的 Model 语言编写了具有燃弧特性的真空断路器模型,利用该模块,对贵州某变电站真空断路器投切电容器组时产生的过电压情况进行了研究。

1 仿真模型的建立

虽然 ATP 中提供的开关模块能够比较真实地反映出整个开合过程的暂态变化,但其均未涉及真空断路器断口在恢复过程中的特性,因此需要根据真空断路器开合过程中介质的恢复特性建立新的断路器仿真模型才能更真实仿真计算出操作断路器时的过电压的情况。该变电站在 10 kV 侧采用的是 ZN28A 型真空断路器,断路器电弧状态取决于电流过零后开关触头间介质恢复强度与恢复电压的比较。王季梅等^[1]曾对优化后的真空灭弧室模型,在不同触头开

距下,作了冲击耐压特性的测量,将实验得到的触头冲击耐压特性 U_d 拟合成触头间距 x 的函数

$$U_d = 51\,155 \cdot x^{0.2382} = 51\,155 \cdot (vt)^{0.2382} \quad (1)$$

其中: v 是平均分闸速度。通过比较触头冲击耐压特性 U_d 和暂态恢复电压 U_{pr} 即可判断断路器的开合状态。采用 ATP 软件提供的 Model 语言依据上述分析建立断路器模型,其计算流程如图 1。

变电站其它仿真模块大多采用 ATP—EMTP 中原有模块,在此不再详述。变电站整体仿真模型如图 2。

2 合闸电容器组过电压分析

2.1 合闸电容器组过电压的理论分析

在实际配网系统中,无功补偿电容器常采用星形不接地方法接入 10 kV 系统,见图 3。当电容器投入时假设断路器三相同期合闸,其暂态过程可按单相电路进行分析,忽略线路电阻,单相等值电路^[2]如图 4 所示。

图中 L 为电源的等效内电感, U_{nc} 为补偿电容器 C 的残留电压,电源电势 $e(t) = E_m \cos(\omega t)$ 。不计回路损耗电阻,合闸后电容器 C 上电压 $U_C(t)$ 可表示为

小河变电站仿真模型

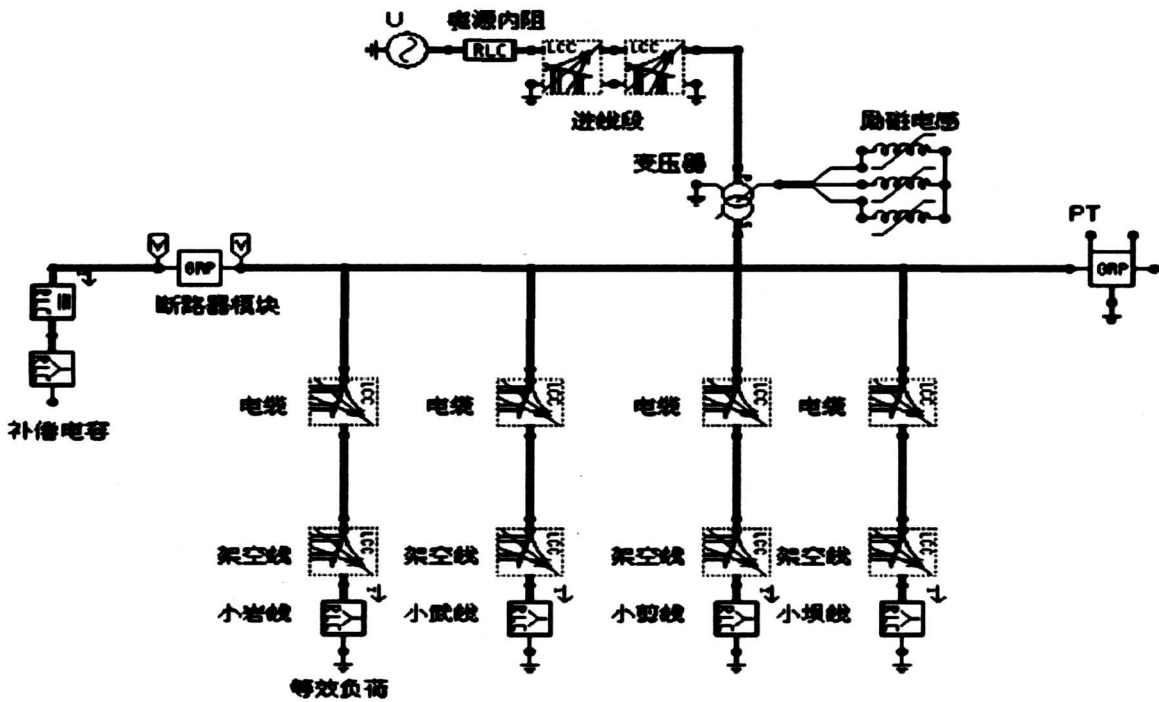
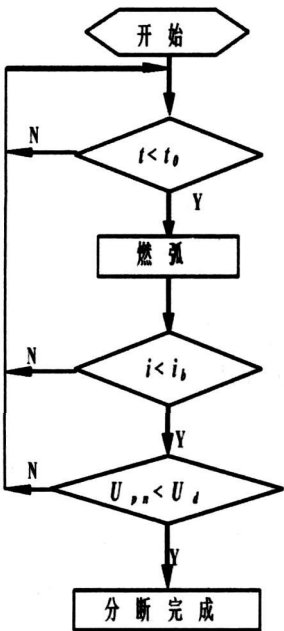


图 2 变电站仿真模型



t_0 为设置的断路器动作时间; i_b 为真空断路器的截断电流; U_{pm} 为断路器断口的恢复电压, U_d 为断路器介质恢复强度。

图 1 断路器模型流程图

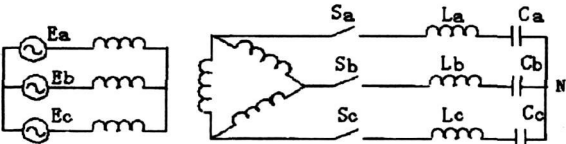


图 3 无功补偿电容器的近似投切等效电路图

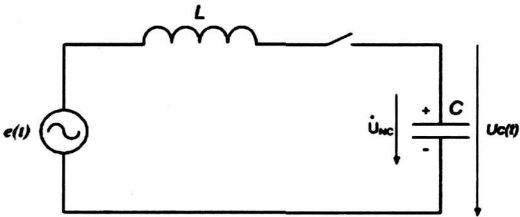


图 4 投入电容器单相等值电路

$$U_c(t) = U_{Cm} \cos(\omega t) - (U_{Cm} - U_{NC}) \cos(\omega_1 t) \quad (2)$$

其中, $U_{Cm} = \frac{E_m}{1 - (\omega / \omega_1)^2}$ 为电容器稳态电压幅值; ω

为工频角频率; $\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ 为上述回路的自振角频率, 通常 ω 较 ω_1 大得多, 因此 $U_{Cm} \approx E_m$ 。

当并联电容器 C 的极板上留有反极性残余电压时, 如 $U_{NC} = -E_m$, 则 $U_c(t)$ 的最大值可达 $3E_m$ 。一般情况下, 并联电容器并联接有放电线圈, 因此在断路器合闸前其极板上的残余电压很小, 近似为 0, 所以根据上式可以得到, 在此情况下并联电容器合闸时可能出现的最大电压为 $2E_m$ 。

在以上建立模型的基础上, 仿真了小河变电站在带一定负荷情况下系统稳定后, $t=0.04$ s 时投入电容器组过电压情况。针对投切过程中电容器容易损坏问题, 仿真过程中特别对星形接法的电容器组投切

过程中承受的线电压进行了分析。图 5 为电容器端口 A、B 相线电压波形。

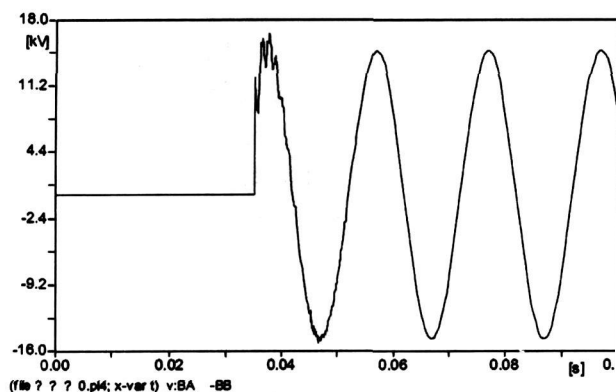


图 5 电容器端口线电压波形 (AB 相)

由图可以看出在投入电容器组时对电容器端口电压未造成剧烈的扰动,电容器组端口电压只是在投入瞬间在系统工频分量的基础上叠加了一个微小的扰动,过电压幅值不超过 $1.1 p.u.$ 此外还对断路器不同期合闸情况进行了研究,结果表明过电压幅值都没有超过 $1.3 p.u.$ 没有超过电容器组的允许范围。

3 分闸电容器组过电压分析

3.1 分闸电容器组过电压理论分析

补偿无功功率的并联补偿电容器是接在相间的,它们的对地电容很小,开断并联电容器组时,一组断路器的重燃会影响其他两组。按运行状态来分,开断电容器组重燃过电压可以分为单相重燃、两相等几种类型^[3]。

①单相重燃

开断中性点绝缘的三相并联补偿电容器组并发生单相重燃现象时,过电压主要出现在并联电容器组的中性点与地之间。并联电容器极间一般没有比较高的过电压出现。重燃相过电压并不是最高的,往往是通过中性点传递至不重燃的两相中的一相,成为过电压的最高相。即使是单相重燃(在小于 $1/4$ 周期内重燃)时,在非重燃相中的一相也会出过电压。

②二相重燃

如 A 相电容器为首先断开相,则 C 相电容器上所产生的过电压最高。由于单相重燃时回路的振荡频率很高,因此中性点对地电压可能在很短时间内上升,结果会立即导致 C 相断口重燃,造成两相重燃。另外,若断路器分闸延迟时间过长,如 B 相电容器延

迟分闸至 A 相电容器的断路器重燃之后,虽然是 A 相单相重燃,实质上与两相重燃相同。该情况下,电容器组过电压分析如下:设 A 相断路器在电流过零时首先开断,因电容电压在相位上落后电流 90° ,此时 A 相电源电压为最大值 E_m ,令 $E_m = 1$,A 相开断后 A 相电容 C_A 上留有直流电压分量为 1, B、C 相电容 C_B 、 C_C 上电压各为 0.5,如图 6 所示。

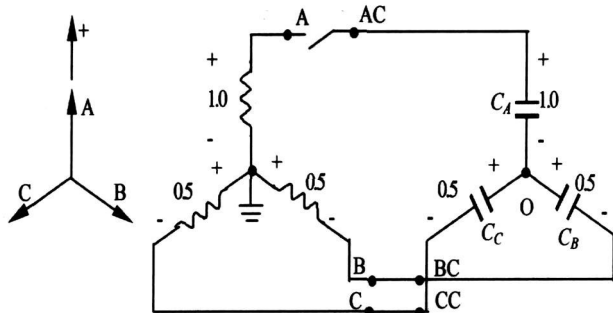


图 6 断路器 A 相在电压幅值处开断后各点电位示意图

设 A 相断路器在电流过零时首先开断,因电容电压在相位上落后电流 90° ,此时 A 相电源电压为最大值 E_m ,令 $E_m = 1$,A 相开断后 A 相电容 C_A 上留有直流电压分量为 1, B、C 相电容 C_B 、 C_C 上电压各为 0.5。此后电流仅在 B、C 相间流过,中性点 O 的电位从 0 开始上升,经过半个工频周期 ($0.01 s$), A 相电源电压从正到负反相, AC 点处对地电压为 $(0.5 + 0.5 + 1.0)/2$ 中性点 O 对地电压恰好上升到相电压幅值 1, A 相断路器触头间隙 A-AC 的恢复电压为 $2 - (-1) = 3$ 如图 7 所示。

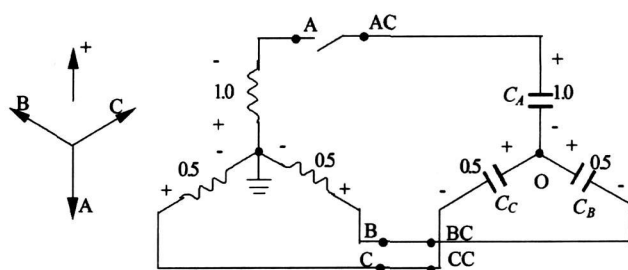


图 7 半个周期后各点电位示意图

若此时 A 相断路器重燃,三相电路恢复对称,中性点 O 的稳态电位应为零, AC 点的稳态电位应为 -1。因此 CA 上的电压将由 +1 向 -1 振荡,当其高频振荡电流第一次过零时,电弧熄灭, C_A 上留有最大电压 -3。同理, C_B 、 C_C 上将各保留有 $-3/2$ 电压,如图 8 所示,此时 AC 对地电位最大将为 -4。

由此可见,由于真空断路器灭弧室高频熄弧特性,开断过程中的重燃及熄弧导致了特殊的运行状态,而在电容器及中性点上出现过电压。

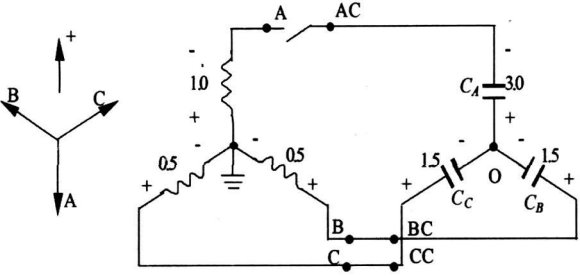


图 8 断路器 A 相高频熄弧后各点电位示意图

3.2 单相重燃分闸电容器组过电压仿真分析

系统在进入稳态后 $t=0.06$ s 时刻切断电容器组, 断路器 A 相在半个周期后 $t=0.07$ s 时刻重燃的过电压情况。

断路器开断时刻设置为 $t=0.06$ s 此时 A 相电压刚好得到幅值, 由于电容器可近似为纯容性负载, 电流电压相位相差 90° , 此时电容器 A 相电流刚好过零, 电容器开断, 未产生截流, 开断造成的电压波动不剧烈, 虽然断路器在 $t=0.07$ s 时刻产生了重燃, 但断路器在开断时, 电弧的熄灭是以电弧电流过零为基础的, 假设 A 相断路器在电流过零时首先开断, 相隔 $1/4$ 个周期后, B、C 两相电弧电流同时过零, 即 B、C 两相断路器在此时 (0.065 s) 也熄弧, 由于 B、C 两相均处于断开状态, 无法形成通路, 电容器上电压仍然被钳制了, 同时由于断路器 A 相是在开断后 0.01 s (半个周期) 发生的重燃, A 相断路器电源端电压得到相电压负幅值, 重燃后由于电容器组对 A 相电压的钳制作用, 强迫电容器组中性点 O 电压立刻发生突变, 随即引起电容器组端口对地电压突变, 如图 9。此时电容器组端口 C 相对地电压在断路器 A 相重燃时刻接近 3.0 p.u. B 相对地电压接近 1.5 p.u.

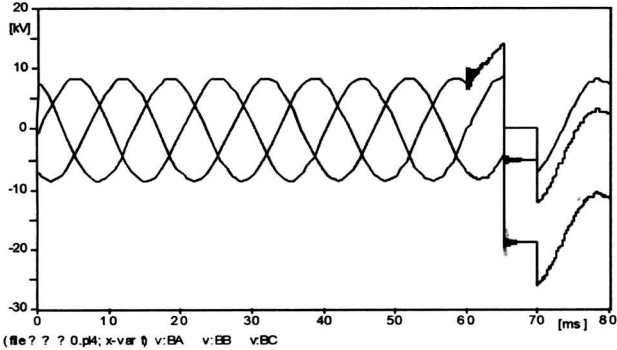


图 9 电容器三相对地电压波形

对于断路器断口恢复电压分析。以 A 相为例子以说明, 在 $t=0.06$ s A 相断路器断开后由于断口靠近电容器组一侧电压被钳制, 靠电源侧电压随时间往

负电压峰值发展, 在此期间恢复电压呈上升趋势。在经过 0.05 s 后 $t=0.065$ s 时, 由于 B、C 两相电流过零断路器开断导致恢复电压出现了第一次截波。在 $t=0.07$ s 时由于断路器 A 相重燃强性将恢复电压制零, 出现了第二次截波。具体变化情况见图 10, 可以看出断路器 A 相重燃后将引起断路器 C 相恢复电压快速上升, 极容易造成 C 相断路器的重燃。

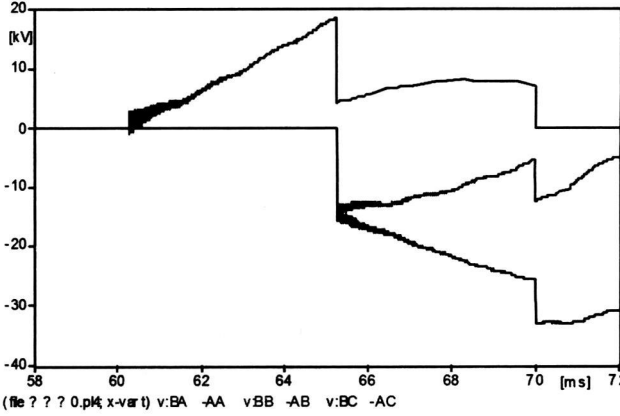


图 10 断路器断口恢复电压波形

3.3 两相重燃分闸电容器组过电压仿真分析

断路器 A 相重燃导致断路器 C 相上恢复电压飙升, 引起断路器 C 相断口间电弧重燃时的过电压仿真研究情况如下。

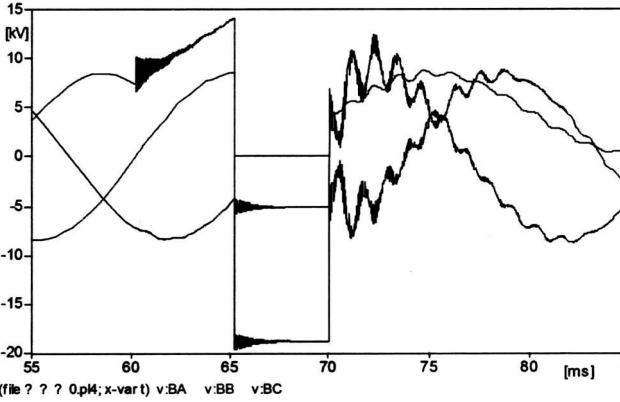


图 11 电容器三相对地电压波形

在 C 相断路器重燃后电容器 A 相上电压不再钳定不变, 而是出现了剧烈振荡, 在 $t=0.072$ s 时刻出现了 1.3 p.u. 的过电压峰值。此时 A、C 两相电流剧增, 幅值达到上千安培, 较容易损坏通流能力较差的电容器组。同样由于电容器组 A、C 两相构成了电流通路, 出现涌流如图 13, 断口产生的对地过电压, 电压幅值较单相重燃是有所下降, C 相过电压仍然为三相中最大 2.5 p.u. 同样由于电容器组 A、C 两相构成了电流通路, 电容器组对电压的钳制作用不再明显,

重燃后过电压波形基本恢复到零点附近波动如图 12。

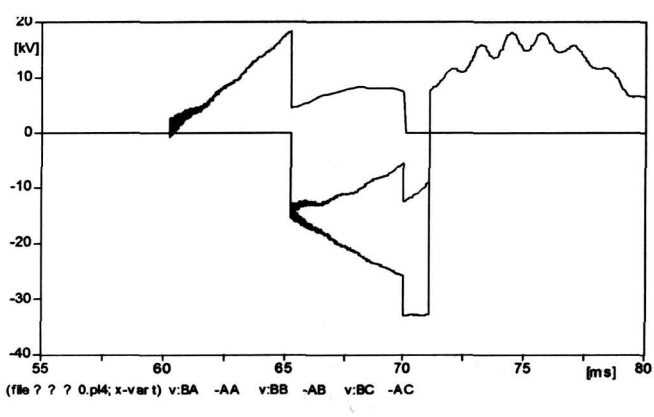


图 12 断路器断口恢复电压波形

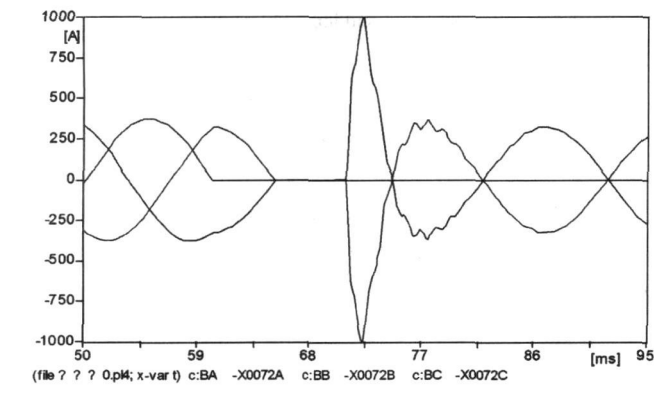


图 13 流经电容器组三相电流

(上接第 10 页)

认证技术要求》，而且，其节能率高，制造产品需要的贵金属材料又较少，因此，产品无论在符合国家的产业发展政策方面还是在性能价格比方面都具有十分明显的优势。下一步，在把 U 型螺丝的螺帽、平垫圈和弹簧垫圈等全部改用新型铸钢奥氏体合金材料制造后，将进一步提高产品的节能率和性能价格比。

虽然本次试验的样品仅为一种节能型悬垂线夹，但其试验结果，从原理上是普遍适用于各型悬垂线夹、耐张线夹和防振锤等电力金具的。今后，将对各型电力节能金具进行全面的试验研究，以期得到更加完善的结果。

参考文献

[1] 余虹云. 电力金具能耗与节能的探讨 [J]. 浙江电力,

5 结 论

借助 ATP—EMTP 仿真平台，建立了贵州某变电站仿真模型，对投切电容器组过电压情况进行了仿真分析，得到以下结论。

- 1) 在分析真空断路器开断交流电弧物理过程的基础上建立了真空断路器的仿真模型。
- 2) 投切补偿电容器组过程中电容器上承受的过电压幅值均未超过 2.0 p.u 不会对电容器造成威胁，但在电容器入口端会产生较高的对地过电压，达 3.0 p.u
- 3) 在切除电容器组过程中发生断路器两相重燃时，由于断路器相间电压较高，将会在重燃相产生上千安的涌流，对电容器组的通流能力要求较高。

参考文献

[1] 王季梅. 真空电弧理论研究及其测试 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993.

[2] 沈黎明. 变电站补偿电容器投切过电压的仿真与测试 [D]. 华北电力大学硕士论文, 2006.

[3] Dawn M. Dunsmore, Edgar R. Taylor, Bernard F. Wirtz et al. Magnifica Lion of Transient Voltages in Multi-voltage-level Shunt-capacitor-compensated circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992 (7): 664—673.

(收稿日期: 2010—06—09)

1999, 18(4): 58—59.

[2] 秦曾煌主编. 电工学 (第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.

[3] 吴国宏. 节能金具的研制 [J]. 吉林电力, 2002(4): 14—16, 19.

[4] 徐乃管. 论节能金具的开发与应用 [J]. 输配电设备网, 2007.

[5] 中标认证中心. 《电力金具节能产品技术认证要求》[S]. 2006.

作者简介:

袁 刚,男,助理工程师,从事电力勘测设计工作。

(收稿日期: 2010—06—30)

基于小波理论的输电线路故障信号检测的研究

马爱平, 刘 磊

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 输电线路发生故障后, 其行波信号是一个突变的、具有奇异性的信号^[1]。小波分析具有很多有用的性质, 利用小波多分辨率的特性可将突变信号进行多尺度分解, 然后通过分解后的信号来确定突变信号的突变位置。Lipschitz 指数被用来定量描述函数的奇异性^[2]。当小波变换尺度越来越精细时, 小波变换模的极大值信号的突变点位置越精确。其衰减速度取决于信号的突变点的 Lipschitz 指数。小波变换不仅可以确定突变点发生的时间, 而且可以进一步判断突变点的性质。通过检测小波变换模极大值来找到信号的奇异点, 从而确定信号发生突变的位置。

关键词: 小波分析; 信号突变性; Lipschitz 指数; 故障暂态信号; Daubechies 小波

Abstract: After the failures occurring in the transmission lines its traveling wave signal is a sudden-change signal with singularity. Wavelet analysis has many useful properties. Using the characteristics of wavelet multi-resolution, the multi-scale decomposition can be carried out for the sudden-change signal and the location of the sudden-change signal can be determined through the decomposed signal. Lipschitz index is used to quantitatively describe the function of the singularity. When the scale of wavelet transform is more and more fine, the location of the sudden-change point is more precise. The rate of decay depends on the Lipschitz index of the sudden-change signal. Wavelet transform not only can determine the time that the sudden-change point occurs, but can further determine the nature of sudden-change point. Through detecting the modulus maxima of wavelet transform, the singular point can be found and the location of the sudden-change signal can be determined.

Key words: wavelet analysis; signal mutation; Lipschitz index; fault transient signal; Daubechies wavelet

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0016-03

0 引 言

长期以来, 傅里叶变换是研究信号奇异性的主要工具, 其方法是研究信号在傅里叶变换域的衰减以推断信号是否具有奇异性及奇异性大小。但傅里叶变换缺乏空间局部性, 它只能确定一个信号突变性的整体性质, 而难以确定突变点在空间的位置及分布情况^[3]。由于小波具有空间局部性, 它能“聚焦”于信号的局部结构, 因此, 利用小波变换来确定信号的突变性位置更有效。

1 信号的突变性与小波变换

S Mallat 将函数 (信号) 的局部奇异性与小波变换后的模局部极大值联系起来。通过小波变换后的模极大值在不同尺度上的衰减速度来衡量信号的局部奇异性。

设小波 $\psi(t)$ 是实函数且连续, 具有衰减性: $|\psi(t)| \leq K(1+|t|)^{-2-\epsilon}$, ($\epsilon > 0$), $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 在区间 I 上是一致 Lipschitz 指数 α ($-\epsilon < \alpha \leq 1$), 则存在常数 $c > 0$, 使得对 $\forall a, b \in I$ 其小波变换满足

$$|(Wf)(a, b)| \leq ca^{\alpha+\frac{1}{2}} \quad (1)$$

反之, 若对于某个 α ($-\epsilon < \alpha \leq 1$), $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 的小波变换满足式 (1), 则 f 在 I 上具有一致 Lipschitz 指数 α 。

若 t 是 $f(t)$ 的奇异点, 则 $|(Wf)(a, b)|$ 在 $b=t$ 处取得极大值, 即此时式 (1) 等号成立。

在二进制小波变换情况下, 式 (1) 变成

$$|(Wf)(2^j, b)| \leq c \times a^{j(\alpha+\frac{1}{2})} \quad (2)$$

在信号处理中, 常采用卷积型小波变换。为此, 这里引入卷积型小波变换的概念。

设 $f(t), \psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$, 记

$$\psi_s(t) = \frac{1}{s} \psi\left(\frac{t}{s}\right), s > 0 \quad (3)$$

则称

$$(Wf)(s, b) = f \cdot \psi_s(b) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{b-t}{s}\right) dt \quad (4)$$

为 $f(t)$ 的卷积型小波变换,也称为 $f(t)$ 的小波变换。

在式 (1) 中,如果将 $f(t)$ 的小波变换理解成卷积型小波变换,则式 (1) 和式 (2) 就变成

$$|(Wf)(s, b)| \leq c s^\alpha \quad (5)$$

及

$$|(Wf)(2^j, b)| \leq c 2^{j\alpha} \quad (6)$$

式 (1) 或式 (2) 表明,若 $\alpha > -\frac{1}{2}$, 则小波变换模极大

值随着尺度 j 的增大而增大;若 $\alpha < -\frac{1}{2}$, 则小波变换模极大值随着尺度 j 的增大反而减小。这种情况说明,该信号比不连续信号 (如阶跃信号, $\alpha=0$) 更加奇异,这正是噪声对应的情况,可以利用小波变换模极大值随尺度变化的情况来推断信号的突变点类型^[4]。

2 信号的突变点检测原理

信号的突变性检测是先对原信号在不同尺度上进行“磨光”,再对磨光后信号的一阶或二阶导数检测其极值点或过零点。对信号进行磨光处理,主要是为去除噪声而不是边缘,因此磨光函数应是局部化的。常用的磨光函数 (又称平滑函数) $\theta(t)$ 可选取 Gauss 函数或 B-样条函数。磨光函数满足

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \theta(t) dt = 1 \quad (7)$$

$$\lim_{t \rightarrow \pm\infty} \theta(t) = 0 \quad (8)$$

式 (7) 表示 $\theta(0)=1$, 即 $\theta(t)$ 可理解为低通滤波器。

由定义及卷积的性质,有

$$f \cdot \psi_s^{(1)}(t) = f \cdot \left(s \frac{d\theta_s}{dt}\right) = s \frac{d}{dt} (f \cdot \theta_s(t)) \quad (9)$$

$$f \cdot \psi_s^{(2)}(t) = f \cdot \left(s^2 \frac{d^2\theta_s}{dt^2}\right) = s^2 \frac{d^2}{dt^2} (f \cdot \theta_s(t)) \quad (10)$$

式 (9) 和式 (10) 中的卷积 $f \cdot \theta_s(t)$, 也称为磨光 (或平滑) 算子, 表示 $f(t)$ 经算子作用后的一个信号。直观的意思是 $f(t)$ 的“角点”被磨成光滑弧, 从而使 $f(t)$ 变成一个光滑函数 $f \cdot \theta_s(t)$ 。

式 (9) 和式 (10) 表示, $f(t)$ 的小波变换 $(Wf)(s, t) = f \cdot \psi_s^{(1)}(t)$ 与 $f \cdot \theta_s(t)$ 的一阶导数成正比。而 $(Wf)(s, t) = f \cdot \psi_s^{(2)}(t)$ 与 $f \cdot \theta_s(t)$ 的二阶导数成正比。这就可以说明小波变换用于突变点检测的基本

原理,即选取光滑函数 $\theta(t)$ 以后,信号 $f(t)$ 的突变点,可以通过检测小波变换 $f \cdot \psi_s^{(1)}(t)$ 和 $f \cdot \psi_s^{(2)}(t)$ 的模极大值而得到^[5]。

结合 $\theta(t)$ 选取 Gauss 函数来说,常用反对称小波 $\psi^{(1)}(t)$ 检测阶跃突变点,用对称小波 $\psi^{(2)}(t)$ 检测局部极值点。在实际应用中,仅在一个尺度下检测突变点常常还很难确定真正的突变点位置,因此需要多尺度检测。只有在多尺度上都是极值点的位置才是真正的突变点所在位置。

3 电力系统输电线路故障暂态信号的奇异性^[6-10]

当输电线路发生故障时,故障信号成分非常复杂。在实际中一般按 (11) 式的故障暂态信号模型来描述。

$$f(t) = \begin{cases} A_m \sin(\omega t + \varphi), & t < t_0 \\ \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) + A e^{-\lambda t}, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (11)$$

输电线路负载大多数是感性的,其电流信号在故障时刻 t_0 是连续的,而其某阶导数是不连续的,属于缓变奇异信号。

三相输电线路电压信号在故障时刻 t_0 发生跳变,是不连续但有界的函数,属于剧变奇异信号,其 Lipschitz 指数为 0。

4 采用算法

(1) 选择小波 ψ , 分解层次 J 和阈值 T

(2) 对 $\{f[n]\}$ 进行二进制小波变换,得到各层小波系数: $\{(W_1 f)[k]\}$, $\{(W_2 f)[k]\}$, ..., $\{(W_J f)[k]\}$;

(3) 对 $\{(W_j f)[k]\}$, $j=1, \dots, J$ 进行阈值处理,即若 $|\{(W_j f)[k]\}| \leq T$ 则 $(W_j f)[k]=0$;

(4) 检测 $\{(W_j f)[k]\}$, $j=1, \dots, J$ 的模极大值点,即如果 $k=m$ 是极大值点,则满足下列 3 个条件。

① $|(W_j f)[m]| \geq T$

② $|(W_j f)[m]| \geq |(W_j f)[m-1]|$ 且 $|(W_j f)[m]| \geq |(W_j f)[m+1]|$

③ $|(W_j f)[m]| > |(W_j f)[m-1]|$ 或 $|(W_j f)[m]| > |(W_j f)[m+1]|$ 可得 $t[0]$, $t[1]$, ..., $t[l]$, $j=1, 2, \dots, J$

(5) 对第 (4) 步得到的点逐一检查是否是各尺度

上的极值点,得到突变点。

5 Matlab仿真实验及结果

Daubechies系列小波是工程上应用最广泛、最成熟的紧支集正交实小波函数族,简称 dbN 小波系 (其中 N 为小波序号这一系列),小波共有 49 个 (db1~db49);其特点是:支集长度 $L=2N$,消失矩阶数 $p=N$;随着序号 N 的增大,时间局部性变差,但频域局部性变好。其它类似的紧支集正交小波,例如 coif 小波, Sym 小波特性均不如 db 小波,因此,通过比较分析,选择 db4 小波作为故障信号分析的小波函数。db4 小波函数及其尺度函数图形如图 1 所示。

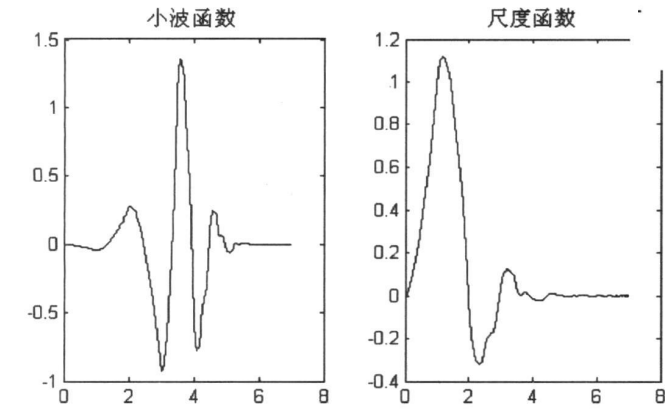


图 1 db4 小波函数及其尺度函数

设有如图 2 所示的 220 kV 电力系统输电线路,在距离 M 端 100 km 处发生 A 相短路故障,为了便于对故障点定位,需要得到故障发生的准确时刻。运用所提出的算法对 M 点检测到的 A 相短路故障电流信号进行小波分解,分析该奇异信号,得到输电线路故障发生的时刻。



图 2 220 kV 输电线路故障模型

本次实验采用 db4 小波对检测到 M 点的故障电流信号进行五层小波分解如图 3 所示;利用小波多尺度分析,故障电流信号 S 可分解成一尺度空间的低频概貌 a_1 和 高频细节部分 d_1 ,然后将 a_1 分解成二尺度空间的低频概貌 a_2 和 高频细节部分 d_2 ,逐次分解,最终得到第五层上信号的 低频概貌和 高频细节部分。

分解后细尺度的系数如图 4 所示,故障信号可表

示为 $s=d_1+d_2+d_3+d_4+d_5+a_5$,其中 a_5 为第五层 低频概貌, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 分别为高频细节。

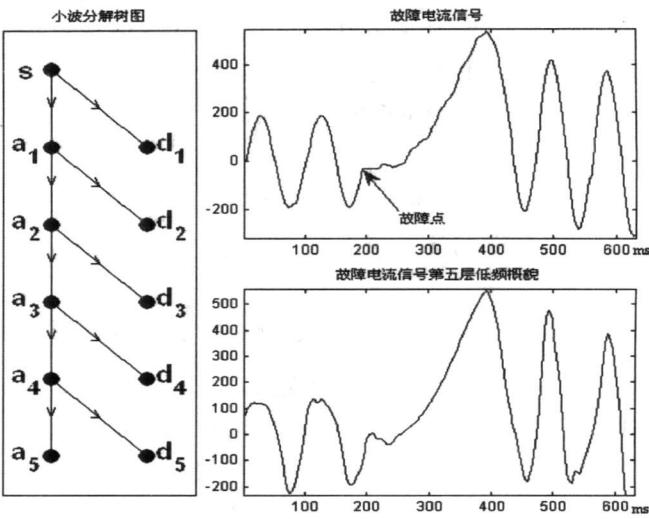


图 3 故障电流小波分解树图及第五层低频概貌

通过对图 4M 点 A 相故障电流 1~5 层细尺度小波变换的波形进行分析,可得故障初始行波到达 M 端的时刻为 $t=t_0$ 。

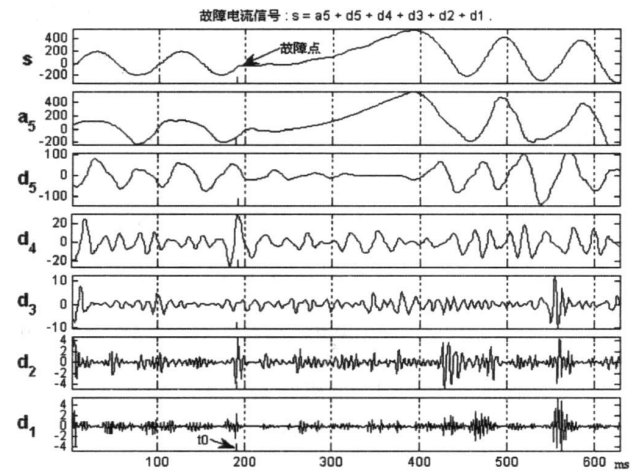


图 4 M 点 A 相故障电流的五层小波分解

6 结 语

提出了一种以 Mallat 算法为基础,利用小波多分辨率的特性,将突变信号进行多尺度分解,然后根据各细尺度系数模的极大值,判断信号发生突变的时刻。根据实验结果分析,本算法能有效、及时地确定故障信号发生畸变的时刻,形象地阐述了小波变换在时域和频域上都具有表征信号局部特性的能力。

(下转第 43 页)

值与无功补偿容量采取量化、负荷重的无功功率跟随修正量化等值不同,产生的误差也不相同,需要优化考虑,考虑到实际电网中无功补偿容量是已知部分,故采用先将无功补偿容量进行量化等值之后,在进行负荷的无功功率负荷进行跟随修正等值,方法简单可行,同时误差较小。采用此种方法等值之后,潮流计算及稳定计算的误差大大减少。

6 结 论

综述了网络等值方法,并将其应用到实际的系统中,针对新疆电网的实际情况,进一步优化了工程等值方法,并在应用中对比了等值前后的计算结果,并对误差进行了分析,并提出以下结论和建议。

1)进行电网稳定计算分析前,对电网进行等值时,应事先分析,综合考虑等值部分的情况,而采用不同的等值方法,以满足工程要求,不能一概而论,应将动态等值、静态等值综合考虑,将同调等值法和模态等值法,估计等值法有效结合,以不偏离电网动态等值为要求,必要时可不简化等值,但要试研究目的进行综合分析,避免局部特性过大或者过小。

2)在对系统电源进行等值时,需对要等值的小电源进行分类、研究、分析、细化等值方案,分类等值。

3)等值后系统还是能非常好的描述整个系统的动态过程,但是等值造成了初始潮流有了偏差,并且这种偏差主要是由于对无功的等值误差造成的。

4)对于负荷无功功率等值、低压无功补偿设备的等值需要认真分析,认真考虑,双变量的动态等值,不但关系到静态潮流、同时也关系到负荷的动态特

性。

5)对中性点接地变电站的等值需考虑零序回路的等值,以减少稳定计算时不对称故障的稳定特性的误差。

参考文献

[1] Tinney W F, Powell W L. The REI Approach to Power Network Equivalents. Proc of PICA Conference. 1977.

[2] 张伯明,陈寿孙,严正. 高等电力网络分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2007.

[3] 李健,李栋. 静态等值方法的综合分析与评价 [M]. 电气应用, 2006, 25(9): 97—101.

[4] 吴际舜. 电力系统安全分析 [M]. 上海:上海交通大学出版社, 1985.

[5] 刘绪斌,王良,闫有朋. 电力系统静态等值改进算法的研究 [J]. 华北电力计算, 2010(3): 1—5.

[6] 张海波,张伯明,王俏文,等. 不同外网等值模型对 EMS 应用效果的试验研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(3): 1—6.

[7] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2008.

[8] MA J, VALLE R J. Identification of Dynamic Equivalents Preserving the Internal Modes Ramirez. IEEE Power Tech Conference Proceedings. BER IN; Bologna. 2003: 415—419.

作者简介:

常喜强 (1976), 男, 高级工程师, 研究方向: 电网稳定与控制;

周悦 (1985), 男, 硕士研究生, 研究方向: 电网电压稳定和电网规划。

(收稿日期: 2010—06—08)

(上接第 18 页)

参考文献

[1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 2007.

[2] 魏明果. 实用小波分析 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 2005.

[3] Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets [M]. Philadelphia: Philadelphia City Press. 1992.

[4] 潘泉. 小波滤波方法及应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005.

[5] 谭剑,黄震,等. 基于小波变换的同杆并架双回路双端行波故障测距 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 51—55.

[6] 舒乃秋,胡芳,周静. 基于小波变换的含噪声行波信号奇异点检测 [J]. 电网技术, 2004, 10(28): 59—62.

[7] 吕艳萍,陈允平,刘珠明. 基于小波分析的超高压输电线路故障定位的研究 [J]. 中国电力, 2003, 36(2): 32—36.

[8] 吴军基,吴秋伟. 电力系统故障时刻提取的小波分析 [J]. 继电器, 2000, 28(12): 1—3.

[9] 覃剑,陈祥训. 基于小波变换技术的新型输电线路故障测距系统 [J]. 电网技术, 2003, 5(20): 45—47.

[10] 王先明,陶时伟,陶冶,蔡德礼. 小波变换奇异性在电力系统行波故障测距中的应用 [J]. 贵州工业大学学报, 2001, 3(30): 50—85.

(收稿日期: 2010—05—31)

基于行波的电力电缆故障测距组合方法研究

古树平,陈奇志,谢建,陈旺虎,魏杰
(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘 要:分析了现有行波故障测距方法所存在的问题,在单端行波测距法的基础上推导出一种与行波波速无关的测距方法,然后将此方法与传统双端行波测距方法相结合形成一种组合测距方法。这种方法在测量端的近端线路故障时采用传统双端测距方法,解决了近端测距的盲区问题;在非近端故障时采用波速无关的测距方法,提高了测距精度。

关键词:电力电缆;行波;故障测距;组合方法

Abstract: The existing problems of the current fault location methods based on travelling wave are analyzed and a location method is derived which is unrelated to wave velocity. Then a combined location method is formed which combines the above mentioned location method with the traditional two-terminal location method. The traditional two-terminal location method is used to solve the blind zone problem of near-end fault location, and the location method which is unrelated to wave velocity is used to improve the location precision of the far-end fault.

Key words: power cable; travelling wave; fault location; combined method

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0019-04

0 引 言

电力电缆线路广泛应用于低压配电网中,解决了架空输电线路走廊空间狭窄等问题。由于电力电缆运行时间和负荷的不断增长^[1]等原因,导致其故障也越来越频繁。

地下电力电缆线路故障后无法通过直观法发现故障点,因此快速而准确地确定故障点位置非常重要。基于行波的故障测距方法能有效解决故障点的定位问题,有利于快速排除故障恢复系统运行,减小经济损失。

1 行波法存在的问题

现有行波在线测距方法主要有单端行波测距法和双端行波测距法两种^[2]。行波测距法相比传统阻抗测距法的优点在于不受故障类型和过渡电阻影响,但在实际应用中也有着诸多问题。

(1)测量端反射波的识别。采用单端行波法测距时,需要确定测量端所获取的行波信号是故障点的反射波,还是线路对端母线反射波即经故障点透射至测量端的行波。行波在故障线路的传播过程中,在除

故障点之外的其他阻抗不匹配点,也存在多次反射和透射现象,给反射波的识别带来困难。

(2)反射波到达时刻的确定。无论采用单端还是双端行波测距方法,都必须确定行波达到测量端的准确时间。时间测量的精度将直接影响故障测距的精度。

(3)近端故障测距盲区。测量端的近端线路发生故障时,入射波与反射波之间的重叠使得第一个反射波无法识别,造成单端行波测距方法的失效,这也正是单端行波测距法在原理上的缺陷。

(4)行波波速的确定。现有行波测距法的研究与应用多采用经验波速作为行波的波速,而实际上行波在电缆线路传输的过程中将发生衰减,并包含丰富的频率成分,不同频率的行波其衰减程度和速度也不同^[3],频率越高衰减越快,传播速度也越快。因此,以一个经验值代替实际的行波波速进行故障测距,必然会造成较大的误差。

2 波速无关的行波故障测距方法

由前面的分析可知,行波波速的确定问题直接决定着故障测距的精度。如果能消除波速这个影响因素无疑将大大减小故障测距的误差。以下依据单端

行波测距法的原理并增加可用条件, 推导一种波速无关的测距方法。

行波在电力电缆线路中的传播过程如图 1 所示。由图 1 可知, 母线测量端 M 所能获取的行波信号包括故障初始行波、故障点反射波和线路对端反射波。

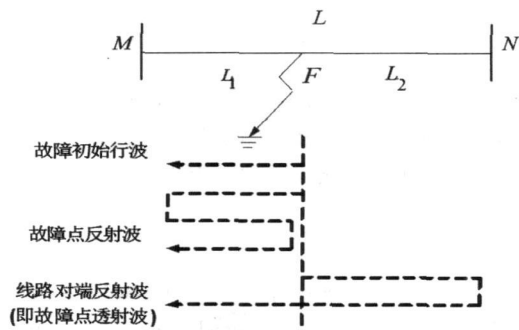


图 1 行波传播过程示意图

运用单端行波故障测距法测距时, 必须识别出所获取的第二个行波的波头来自故障点反射波还是线路对端的反射波。在识别出第二个行波波头后, 对故障初始行波和故障点反射波加以利用, 而摒弃线路对端反射波。然而, 线路对端反射波也蕴含着线路故障的特征, 完全可以充分利用其进行故障测距, 下面将据此推导一种波速无关的行波测距方法。

如图 1 所示, 电力电缆线路全长为 L 设在线路前半程的 F 点发生单相接地故障, 在 M 端所测得的前三个行波波头的到达时刻为 t_1 、 t_2 和 t_3 。根据行波的折反射原理, 故障点反射波先于线路对端反射波到达 M 端, 因此 t_1 、 t_2 和 t_3 分别为故障初始行波、故障点反射波和线路对端反射波到达测量端的时刻。在线路后半程发生故障时, 则 t_1 、 t_2 和 t_3 分别为故障初始行波、线路对端反射波和故障点反射波到达测量端时刻。

根据以上分析, 当故障发生在线路前半程时可列出如下两个时间距离方程为

$$\frac{3L_1}{v} - \frac{L_1}{v} = t_2 - t_1 \quad (1)$$

$$\frac{2L - L_1}{v} - \frac{L_1}{v} = t_3 - t_1 \quad (2)$$

联立方程得

$$L_1 = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - 2t_2 + t_1} L \quad (3)$$

当故障发生在线路后半程时两个时间距离方程为

$$\frac{2L - L_1}{v} - \frac{L_1}{v} = t_2 - t_1 \quad (4)$$

$$\frac{3L_1}{v} - \frac{L_1}{v} = t_3 - t_1 \quad (5)$$

联立方程得

$$L_1 = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - 2t_2 + t_1} L \quad (6)$$

从式 (3) 和式 (6) 可以看出, 通过推导所得出的故障测距公式不含行波波速 v 这个变量, 因此在理论上消除了波速对测距精度的影响, 形成了波速无关的行波故障测距方法。该方法的关键在于必须准确识别测量端 M 所获取的第二个行波是故障点反射波还是线路对端反射波。

3 行波故障测距的组合方法

上述波速无关的行波故障测距方法是在单端行波测距法的基础上推导而来的。因此不可避免地, 也存在着与单端测距法相同的问题, 即在测量端的近端线路故障时入射波与反射波之间的重叠使得无法准确识别反射波, 导致该方法失效, 同样存在测距盲区。

双端行波测距法则可以很好地解决近端故障测距盲区的问题, 该方法只需在线路两端准确识别到达测量端的第一个行波信号 (即故障初始行波) 并获取准确的达到时刻即可, 而不需考虑故障点反射波与线路对端反射波。如图 2 所示, 设在距离线路 M 端 L_1 处发生接地故障, T_M 、 T_N 分别为故障初始行波到达线路两端的时刻。

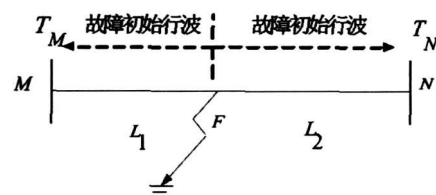


图 2 双端行波测距示意图

根据图 2 进行简单的数学推导, 可得出如下的故障距离计算公式。

$$\begin{cases} L_1 = \frac{(T_M - T_N)v + L}{2} \\ L_2 = \frac{(T_N - T_M)v + L}{2} \end{cases} \quad (7)$$

式中行波波速 v 可结合线路的具体参数根据式 (8)^[4] 计算得出, 其中 L_1 、 C_1 分别为电力电缆线路的单位长度电感和电容。

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (8)$$

基于以上分析, 波速无关的行波故障测距法存在不受行波波速影响的优势, 双端行波故障测距法解决

了线路近端故障的测距盲区问题。因此,综合这两种方法的优点可形成一种组合测距方法。具体为:当在线路近端发生故障时,采用双端行波测距法测距;当在线路非近端发生故障时,则采用波速无关的行波故障测距法。这种组合测距方法既消除了近端故障测距的盲区,又提高了测距的精度。

考虑到故障点的不确定性,事先无法得知故障发生于线路近端还是非近端,在具体运用时,可以根据测量端获取的暂态行波信号特征以及进行消噪、小波分析等信号处理后来判断。若经信号处理后行波信号的波头严重重叠并分布于很小的一个时间范围,则表明该故障为线路近端故障,反之为非近端故障。据此,灵活选择何种测距方法,判断的关键在于有效的信号处理手段,已有的研究和应用表明小波分析在非平稳信号检测中具备很高的分辨率^[5-7],可解决故障行波的信号处理问题。

4 仿真实验

为验证组合测距方法的可行性,建立如 10 kV 电力电缆线路故障测距的仿真模型。其中,线路全长为 $L=37.25$ km,电缆线路采用交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯三芯电力电缆。

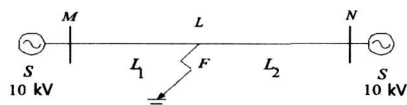


图 3 故障测距仿真示意图

电缆线路的单位长度电阻、电感和电容参数为 $r_1=0.193$ ohm/km, $L_1=0.2573 \times 10^{-3}$ H/km, $C_1=6.6904 \times 10^{-3}$ F/km, $C_2=0.2390 \times 10^{-6}$ F/km。

为更好地验证组合测距方法的测距效果,设定距离线路测量端 M 端 15 km (非近端) 和 1.5 km (近端) 处发生 A 相单相接地故障两种情况进行仿真实验,设定采样频率为 500 kHz 在 0.025 s 发生故障。在距离 M 端 15 km 处发生故障时测量端所获取的三相电压行波信号如图 4 所示,经相模变换三相解耦后信号的零模、线模分量如图 5 所示。

选取故障相电压行波的线模分量作为测距信号,线模分量 U_{m1} 经 Gauss 小波变换后的模极大值波形如图 6 所示。从中可以看出前三个行波的波头能被准确识别。由于故障发生于线路前半程,因此故障点反射波先于线路对端反射波到达 M 端,再者,由电压

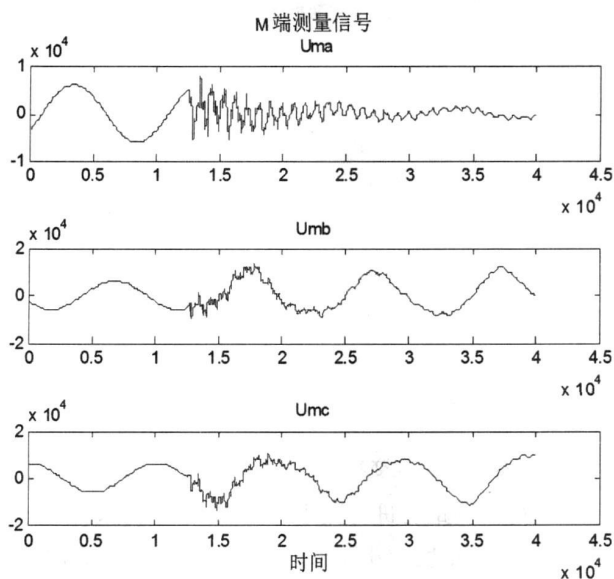


图 4 M 端获取的行波信号

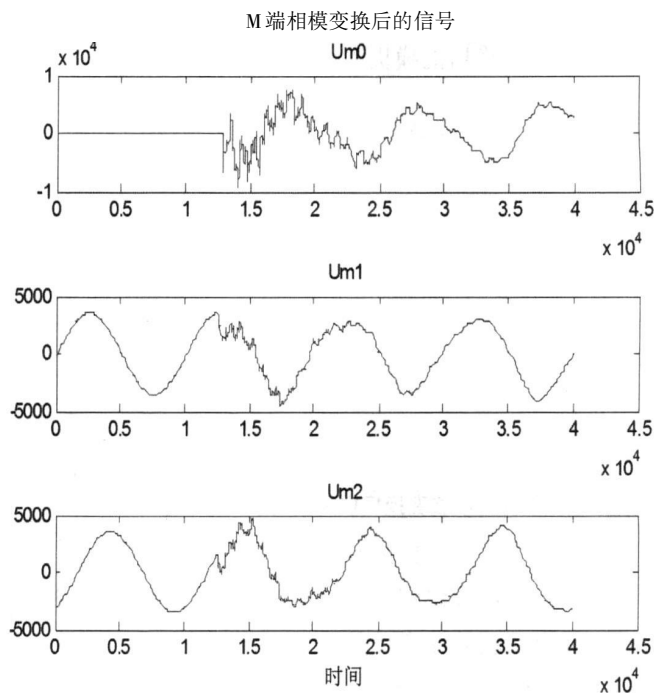


图 5 三相解耦后的行波模分量

行波的传播特性得知,故障点电压反射行波与初始电压行波反极性。因此可以判断图 6 中 1 号、2 号和 3 号波头分别对应故障初始行波、故障点反射波和线路对端反射波。

图 6 细节经放大后可得出前三个行波波头对应的离散时间采样点为 12 560、12 676、12 733,由采样频率可以计算出准确的到达时刻。根据式 (3) 计算出故障距离 $L_f=14.9516$ km,故障测距的绝对误差为 0.0484 km,相对误差 $e\%=0.13\%$ 。此误差范围完全满足电力电缆线路故障测距的现实要求。若采

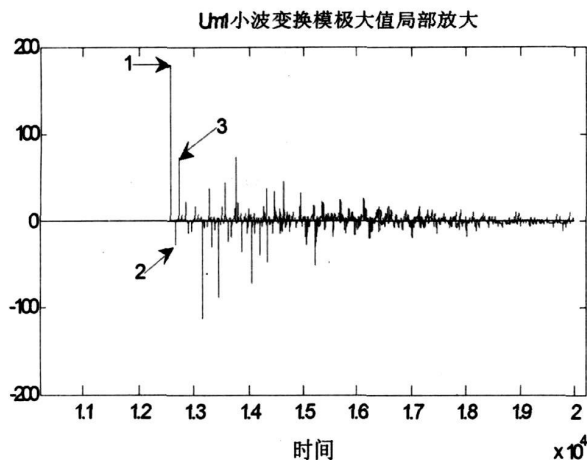


图 6 U_{m1} 小波变换模极大值波形局部示意图

用双端行波测距法进行测距,则因为存在波速这个影响因素,测距精度要小于波速无关的行波测距方法。

类似地,当距离测量端 1.5 km 处的近端线路发生故障时,故障相 A 相电压行波的线模分量 U_{m1} 经 Gauss 小波变换后的模极大值波形如图 7 所示。

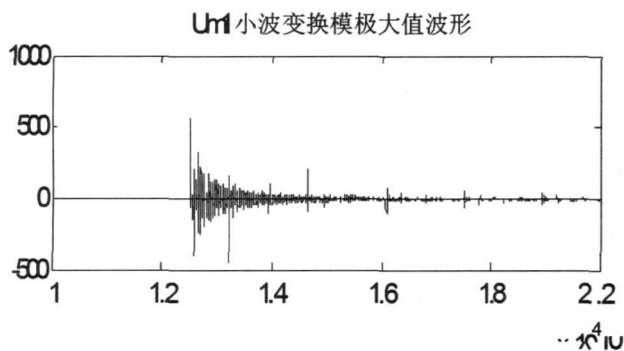


图 7 U_{m1} 小波变换模极大值波形局部示意图

从图 7 可以看出,在测量端获取的行波信号发生严重的重叠,难以识别前三个行波波头,即难以识别故障初始行波、故障点反射波和线路对端反射波,使得运用波速无关的行波测距法实现测距非常困难,这也就是近端故障的测距盲区问题。为了解决这一问题,必须采用双端行波故障测距方法。双端测距法需要分别于线路 M、N 端准确识别第一个到达测量端的行波波头。

线路 M、N 端所获取的故障相 A 相电压行波线模分量 U_{m1} 、 U_{n1} 经小波变换后的模极大值波形如图 8、图 9 所示。

图 8、图 9 细节经放大后可获取 M、N 端第一个行波波头对应的离散时间采样点分别为 12 530、12 660,同样根据采样频率可计算出准确的到达时刻。行波波速根据式 (8) 计算得 $v=127.52 \text{ km/ms}$ 再由

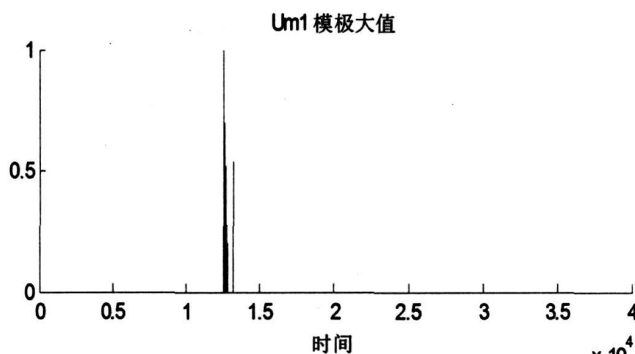


图 8 U_{m1} 小波变换模极大值波形局部示意图

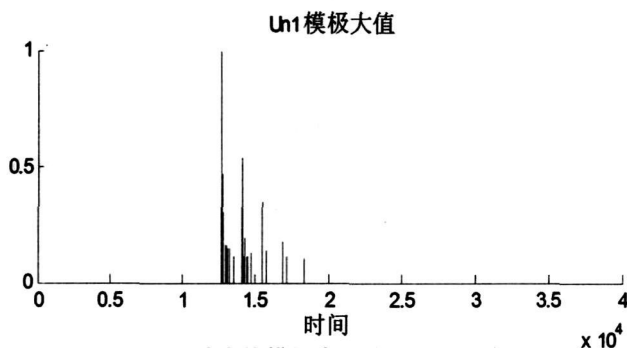


图 9 U_{n1} 小波变换模极大值波形局部示意图

式 (7) 可计算出故障距离为 $L_d=2.047 \text{ km}$ 。故障测距的绝对误差为 0.547 km , 相对误差 $\delta\% = 1.47\%$, 此误差范围基本满足电力电缆线路故障测距的现实要求,测距精度较高。

以上仿真实验验证了组合测距方法在电力电缆线路故障测距中的可行性与准确性。线路近端故障时采用双端行波故障测距法,解决了波速无关的行波测距法存在的测距盲区问题。线路非近端故障时采用波速无关的行波测距法,消除了双端行波测距法存在的波速这个影响因素,提高了测距精度。

5 结 论

通过分析现有行波故障测距方法所存在的诸如行波波速不确定和近端故障测距盲区等问题,基于单端行波测距法的原理推导出了一种与波速无关的测距方法,并将传统双端行波测距法与波速无关的行波测距法相结合形成一种组合测距方法。仿真实验证明这种组合测距方法是可行的,并提高了测距精度。

电力电缆线路发生故障时,无论采用哪种单一的行波故障测距方法均存在自身无法解决的问题。因此,结合各种测距方法的优点形成组合测距方法具有

(下转第 52 页)

表 2 DMC绝缘子更换前后的绝缘值

日期 (天气)	6 kV 厂用 OBL 分支对地绝缘 /MΩ		6 kV 厂用 OBM 分支对地绝缘 /MΩ	
	更换前	更换后	更换前	更换后
2003. 06. 09 阴雨	1. 5		1. 5	
2003. 11. 05 晴天		2 500		2 500
2003. 10. 10 阴雨	2. 5		2. 5	
2004. 04. 24 连阴雨 后		30		30
2003. 10. 11 阴雨	1. 3		1. 3	
2004. 05. 16 连阴雨 后		10		15

(注:在一般气候条件下测绝缘均在 1 000~2 500 MΩ 之间,上述绝缘值目前在阴雨天气下降较大的原因包括:绝缘子未全部更换完;俄罗斯 6 kV 封闭母线带换相节,该换相节包裹绝缘未处理;Y 型布置绝缘子端盖密封未全部处理好。)

期带电备用,既浪费了厂用电也未从根本上解决问题。从 2003 年下半年开始进行绝缘改造:用 DMC 绝缘子替换瓷绝缘子,从该厂电气运行测绝缘记录可进行 DMC 绝缘子更换前后的对比,见表 2。

从上述数据可看出,国华盘山电厂封闭母线共箱封闭母线更换 DMC 绝缘子后,即使在最差的阴雨天气测绝缘,绝缘值亦能大于合格值 6 MΩ 以上,未出现过不合格情况。盘山电厂封闭母线于 2004 年 4 月将 2 台高压备用厂用变压器由带电备用改为不带电备用,恢复为正常运行方式。盘山电厂封闭母线运行情况证明:封闭母线更换 DMC 绝缘子的改造是成功的。

3 结 语

经过上述论述,可认为:尽管 DMC 绝缘子比一般瓷瓶造价高,但绝缘子的造价在整个封闭母线的成本中所占的比重较小,但它所产生的效益却远远大于封闭母线成本的增加。故此,采用 DMC 绝缘子替换瓷

绝缘子解决封闭母线瓷绝缘子吸潮导致绝缘降低引发电气事故问题,是长期有效的、可行的实施方案,是能适用于南方尤其是海边电厂高潮湿度、高盐雾的气候特点。

参考文献

[1] 徐通训,徐喜佑. 电力设备防污闪技术 [M]. 能源部电力局, 1995.

[2] 水利电力部西北电力设计院编. 电力工程电气设计手册 (电气一次部分) [M]. 北京:中国电力出版社: 2008

[3] 孔庆东,等. 大电流母线的设计、制造及安装 [M]. 北京:水利电力出版社, 1988

[4] 吴励坚. 大电流母线的理论基础与设计 [M]. 北京:水利电力出版社, 1985.

作者简介:

林 睿 (1979), 女, 大学本科, 广东省电力设计研究院工程师, 大型火电、百万级核电工程主设人;

黄旭丹 (1977), 男, 大学本科, 广东省电力设计研究院 工程师, 大型火电、百万级核电工程主设人, 南方电网数字化变电站项目主要负责人。(收稿日期: 2010—06—09)

(上接第 22 页)
十分重要的意义。

参考文献

[1] 罗俊华,邱毓昌,杨黎明. 10 kV 及以上电力电缆运行故障统计分析 [J]. 高电压技术, 2003, 29(6): 14—16.

[2] 徐丙垠,李京,陈平,等. 现代行波测距技术及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62—65.

[3] 覃剑,陈祥训,郑建超. 行波在输电线上传播的色散研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 27—30.

[4] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 1998.

[5] 李俊,范春菊. 基于小波分析的电力电缆行波故障测距

[J]. 继电器, 2005, 33(14): 15—18.

[6] 何正友,钱清泉. 电力系统暂态信号的小波分析方法及其应用 (一)小波变换在电力系统暂态信号分析中的应用综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(4): 1—5.

[7] 王 征. 小波分析检测线缆故障的应用研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 155—157.

作者简介:

古树平 (1986), 男, 硕士, 主要从事电力系统故障暂态信号检测的研究;

陈奇志 (1970), 女, 副教授、高级工程师, 长期从事变电站自动化系统通信的研究;

谢 建 (1985), 男, 硕士, 主要从事现代信号处理技术的研究。(收稿日期: 2010—05—05)

地县继电保护整定管理体系研究

杜凌翔, 吴端华, 何 东, 洪行旅, 郝文斌
(四川成都电业局, 四川 成都 610021)

摘 要:提出了地县继电保护整定专业管理的目标、思想及适用范围, 并建立专业管理指标体系; 在上述基础上, 重点介绍了整定系统的工作流程及定值流转审批程序; 同时论述了继电保护整定专业评估方法。

关键词:继电保护; 整定; 管理

Abstract: The object the idea and the application scope of local protective relaying setting system is put forward. And the speciality management target is established. On this basis, the work flow, the procedure for examination and approval of setting system are introduced. At the same time, the speciality evaluation method for protective relaying setting is discussed.

Key words: protective relaying setting management

中图分类号: TM77 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2010)05—0023—03

0 引 言

随着电力系统的不断发展, 保护整定技术也从手工整定管理发展为微机整定管理, 有效地提高了整定效率及准确性; 网络技术的发展使保护定值实现了集中式管理。可以说, 保护定值整定技术^[2-6]得到了飞跃性的发展。但是在技术较为成熟的情况下, 继电保护整定管理尚处于初级阶段, 不能够适应未来智能电网的发展, 在文献 [1] 的基础上将继电保护计算机整定技术与管理进行有效结合, 形成有效的地县继电保护整定管理体系。

1 继电保护整定专业管理的策略思想

整定计算和定值管理相关工作整体流程的智能化和自动化为最主要的策略思想, 解决整定计算中的关键问题, 如运行方式组合、断点处理以及定值配合优化, 同时充分考虑用户在工作中的各种需求; 利用网络数据库为基本的数据平台, 实现各种软件功能模块充分共享和数据交换; 通过全面图形化方式表达电网拓扑及配置, 用户在整定和管理过程中的任何操作都可在图形上完成, 任何参数和结果都可从图上观测。采用规范的面向对象和先进的面向组件的软件开发方法, 将系统合理划分为多个模块, 并全面考虑了整定计算和定值管理的地域差别及下一代系统的

可能需要, 最大限度地保证软件的事务处理并发性、事务完整性、可移植性与可扩展性。同时应考虑与调度及其他系统的兼容性。

2 范围和目标

2.1 继电保护整定管理系统的适用范围

软件的使用应满足地调、县调电网 10 kV、35 kV、110 kV、220 kV 及以上电压等级的电网进行系统管理、整定计算、故障计算、定值单在线流转查询管理及整定值的仿真校验功能等。

2.2 继电保护专业管理系统的目标

- 提高继电保护整定工作的自动化水平和管理水平;
- 实现全新的图形化建模方法;
- 实现通用的故障计算功能, 提供全面的专业数据;
- 实现手动整定计算和自动整定计算的有机结合, 整定过程全程可视, 提高保护整定的精确性和准确性;
- 实现完备的继电保护专业的数据库管理;
- 实现各局共用一张图, 数据共享的功能, 避免数据交换;
- 实现定值单流转的自动化。

3 指标体系及目标值

指标体系及目标值见表 1。

表 1 指标体系及目标值

指标	分项	目标值
定值四统一管理正确性	变电站、继保所、调度室、调度继保科 主网绘制及布局	定值使用存放部门要求一致 布局要求合理规范
图形绘制、网络布局及参数录入合理性	子站内绘制、布局及参数录入,包括变压器、母线、电容器、内部接线、站用变压器	绘制规范一致,布局合理,参数录入正确
整定原则制定及选择	各电压等级保护装置整定原则选择及定义	正确合理
定值单规范性	定值单名称、表头、编号、项目、发布	一致规范合理要求审核、批准
工作量考核 (权重)	220 kV 保护 (20 分)	正确合理
	110 kV 保护 (10 分)	正确合理
	35 kV、10 kV 保护 (5 分)	正确合理
	网络带宽要求	各级网络 100 M 带宽达到 99% 以上
计算机网络及硬件要求	计算机硬件	保护专责计算机要求配置 100%
	网络维护	网络正常运行率 99%
整定系统操作	熟练程度	要求保护专责精通熟练,进行上岗考核,不能通过考核者不可上岗

4 主要做法

4.1 整定计算工作流程

首先明确整定计算相关人员配置及职责:一般地调为四级审核,整定计算人员 2 组,每组 2 人,分别负责计算和校核工作;审核人员 1 人,一般为继保科科长;批准人为调度中心主管继保的副主任。县调为三级审核,整定计算人员 1 人,校核人员一人,批准人为主管生产的副局长。

整定计算工作步骤:

(1)明确整定任务归口,新投项目根据调度任务工作分配,由计算人归口完成,相关项目的资料收集及确认工作。

(2)资料完备后,该计算人要进入整定系统,按照绘图规范要求绘制主网图、子站图、录入相关设备参数,并配置相关保护。

(3)检查各设备配置保护是否在保护定值单库中已有该型号版本保护,如有此保护型号版本,根据收集现场打印定值单资料核对定值项是否一致,如不一致查明原因并修改。

(4)检查各保护计算原则是否符合本保护计算要求,若不符合及时修改。

(5)检查整定计算系统参数设置,一般此参数有系统管理员设定完成,不可修改。

(6)进行整定计算,根据系统特点,一般原理级保护建议使用手动整定方式,装置级整定采用自动整定方式。计算出定值,根据定值仿真系统仿真相关保

护动作情况,确认保护定值的配合关系正确性,并由系统自动形成计算书后,转化为 WORD 文档,检查整定计算正确性,如有问题修改正确后,使用电子签章签名并提交给对应校核人。

(7)校核人校核计算书,并给出意见,并使用电子签章签名,并提交审核人。

(8)审核人审核计算书,并给出意见,并使用电子签章签名。

(9)计算人完成计算书后,由系统自动形成定值单,并导入定值单流转系统。同时锁定原理级定值及装置及定值,形成保护配置图,便于以后查阅。

4.2 定值单流转系统工作流程

定值单管理系统与整定及故障计算模块之间交互配合要充分,实现定值单内容、形式和流转流程的完全自定义,且自定义界面要友好方便。能够根据整定计算程序的计算结果自动生成定值单,并且对定值单的审核、修改和执行流程实现了网络化控制,可以方便的支持定值单的 WEB 显示和发布。

定值单状态管理:

对定值单按照“草拟”、“待执行”、“已执行”、“作废”四种状态进行状态管理,完成定值单状态转换、分类查询和打印功能,并可查阅各定值单对应的装置型号、保护对象、定值单编号、定值单并能按变电站统一管理。

定值单流转:

(1)定值单管理在 WEB 显示和发布中实现区域化管理。例如从成都电业局主页专业实时系统中进入定值单 WEB 页面,要显示地调及各县调控件,按

照管辖区域进入各自管理页面。

(2)计算人在整定计算软件中生成定值单后,定值单状态为草拟状态,计算人签字,进入审核流程,审核流程进行完后签字,进入审批流程,审批完成,签字盖保护定值专用章以后,定值单进入待执行状态。该过程中如发现问题,由相应人员将相关定值单附相应原因发回计算人重新编制。如有其他原因,该定值单不能继续流转,由审批人员直接将该定值单打入作废库,并标记已作废。

(3)定值单进入待执行状态后,自动生成 pdf 格式文件,并挂在成都电业局主页专业实时系统中,可由调度、生技部、保护所、变电站(监控)及所需部门被指定授予权限人员在线查询、下载、保存及打印;调度、变电站(监控)等部门收到定值单后,自动回执给保护科一份已收到信息。

(4)调度科在定值单执行条件许可后,以调令形式下达执行命令。如定值单执行完毕,执行人签字及执行时间后,调度科发令人签字,并将定值单状态改为已执行。如执行过程中发现问题,由调度人员将相关定值单并附相应原因发回给审批人。

(5)已执行定制单进入运行定值单查询库(各相关部门、变电站、监控按权限可在线查询、打印),相同装置或线路原定值单自动进入作废定值单历史库,并标记已作废。进入作废定值单历史库定值单保存一年,保护整定人员可查询、打印、编辑、删除作废定值单。

(6)定值单管理模块应实现各部门之间的交流平台,从而能够实时地反应对定值反馈的问题。定值单管理模块还应实现与各部门(调度、生技部、基建部、

保护所、变电站及监控)之间其它文件的交换功能。

4.3 确保流程正常运行的人力资源保证

按照国网公司对整定计算的要求,地调范围整定计算要求有计算人、校核人、审核人及批准人四级审核,目前地调人员配置已经满足要求。县调整定计算要求计算人、校核人及批准人四级审核,目前县调无专职整定计算专责,应配置专职整定计算专责。

4.4 绩效考核与控制

(1)图形绘制、网络布局及参数录入的及时性及合理性;

- (2)整定原则制定及选择;
- (3)定值单制作的及时性及规范性;
- (4)继电保护整定及时完成率;
- (5)定值四统一管理正确性;
- (6)参与成都电网整定计算方面的培训工作。

5 评估方法

评估方法见表 2。

6 结 语

该项目研究成果在成都电网的运用,极大地提高了继电保护的日常工作效率,对提高整定计算定值的正确性和可靠性提供了强有力的保障,加强了继电保护的日常管理工作。该体系在成都地、县调的运用情况表明,经过定值的核算,说明了系统计算结果的正确可靠,工作效率也得到了极大的提高。为进一步规

表 2 评估方法

评价项目	评价标准	评估方法
图形绘制、网络布局及参数录入的及时性及合理性	制定相关图形绘制标准,按标准执行。	查看网络整定系统,使用不定时抽查的方式
整定原则制定及选择	按照国标和行业标准	查看网络整定系统,使用不定时抽查的方式
定值单制作的及时性及规范性	制定相关定值单制作标准,按标准执行。	查看网络整定系统,使用不定时抽查的方式
继电保护整定及时完成率	按照国标和行业标准	查看网络整定系统计算书及整定定值单,使用不定时抽查的方式
定值单制作的及时性及规范性	制定相关定值单制作标准,按标准执行。	查看网络整定系统,使用不定时抽查的方式
继电保护整定及时完成率	按照国标和行业标准	查看网络整定系统计算书及整定定值单,使用不定时抽查的方式
定值四统一管理正确性	变电站、继保所、调度室、调度继保科	查看网络系统及各部门留存定值单
参与成都电网整定计算方面的培训工作	调度中心组织考核组	现场考核

(下转第 38 页)

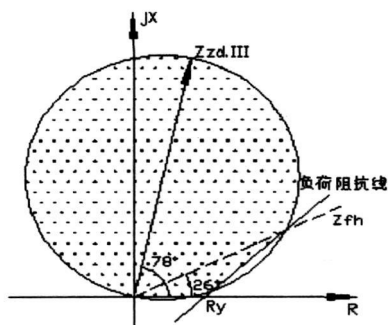


图 4 PRS-753D 的负荷限制方向阻抗继电器
动作特性示意图

段计算所采用的最大负荷电流时,考虑用相间距离保护Ⅲ段的测量阻抗角进行闭锁,因为线路在发生相间短路故障时,故障角一般在 70° 以上,而线路的负荷阻抗角一般为 26° ,考虑到一定的裕度,对测量阻抗角低于 30° 的相间距离保护Ⅲ段的阻抗继电器的动作区域进行闭锁,是一种值得尝试的方法^[7]。

3) 继电保护整定计算及运行维护工作,要熟悉不同厂家及不同产品的继电保护装置的动作原理及动作特性,能够从原理上进行分析,不同的保护装置其分析结果可能是不同的。

4) 以上从技术方面对线路过负荷时的相间距离保护Ⅲ段的动作原理提出了建议,在工作中要求继电保护整定计算人员必须熟悉各种事故预案及事故时

各条线路事故过负荷的具体情况,相间距离保护Ⅲ段的整定应可靠躲过事故过负荷时的负荷电流,这样相间距离保护Ⅲ段的保护范围会比只考虑正常最大负荷电流时的要小一些,对于 110 kV 保护远后备配置的原则来说,远后备的灵敏度会有所降低。

参考文献

- [1] DL/T 584-95, 3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程 [S]. 中国电力出版社, 2001.
- [2] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 崔家佩, 孟庆炎, 陈永芳, 等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1993.
- [4] 南京南瑞继电电气有限公司. RCS-943A 高压输电线路成套保护装置技术说明书 [C]. 2006.
- [5] 国电南京自动化股份有限公司. PSL 620 系列数字式线路保护装置技术说明书 [C]. 2004.
- [6] 深圳南瑞科技有限公司. PRS-753D 光纤分相纵差成套保护装置技术说明书 [C]. 2007.
- [7] 王梅义. 高压电网继电保护运行与设计 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

作者简介:

刘高会 (1973), 男, 陕西富平人, 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: 2010-06-22)

(上接第 25 页)

范和统一电网的继电保护工作起到了极大的促进作用。并且该体系向全国推广的前景广泛, 该项目的进一步实施, 将带来巨大的经济效益和社会效益。

参考文献

- [1] 洪行旅, 郝文斌, 吴端华, 等. 基于集中式网络结构的继电保护定值管理系统总体设计 [J]. 继电器, 2009, 37 (9): 82-85, 96.
- [2] 吴晨曦, 盛四清, 杜振奎, 等. 地区电网继电保护整定计算智能系统的研究 [J]. 继电器, 2004, 32 (7): 35-38, 44.
- [3] 陈金富, 石东源, 段献忠. 电网继电保护整定计算原则自定义技术研究 [J]. 继电器, 2007 (Z1).
- [4] 朱浩骏, 蔡泽祥, 侯汝峰, 等. 面向对象的图像化地区电网继电保护整定软件研究 [J]. 电网技术, 2004, 28 (22): 20-25.
- [5] 葛耀中, 赵梦华, 彭 鹏, 等. 微机式自适应馈线保护的

研究和开发 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (3): 19-22.

- [6] 赖业宁, 韦 化, 文 杰, 等. 220~500 kV 电网继电保护整定计算专家系统 [J]. 继电器, 2001, 29 (3): 31-34.

作者简介:

杜凌翔 (1977), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统分析及电网运行管理等。

吴端华 (1964), 女, 本科, 工程师, 主要研究方向为电力系统分析及电网运行管理等。

何 东 (1972), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电力系统综合自动化等。

洪行旅 (1956), 男, 硕士, 副总工程师, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护及调度管理系统等。

郝文斌 (1976), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护、变电所综合自动化及调度管理系统等。

(收稿日期: 2010-03-02)

基于虚拟电交易的水火电置换机制研究

陈 岭¹, 李 俊²

(1. 成都电业局, 四川 成都 610041; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 电力产业能效严重影响着整个能源行业的效率。如何通过经济手段提高发电能效是提高整个能源行业效率的关键。在遵循国家能源政策, 充分有效利用水资源的前提下, 引入了市场机制的调节作用, 构建了基于水火电置换的虚拟电交易市场, 其市场交易主体包括各发电企业、供电企业及大型用电企业。在虚拟电交易的基础上, 各交易主体根据各自利益最大化原则, 制定市场参与计划, 并建立置换电量在虚拟电交易主体中的优化分配模型, 应用线性规划法进行求解, 以合理分配各方利益。计算表明该模型简单实用, 能够较好地兼顾国家能源政策和市场机制的调节作用两方面的因素, 在中国电力市场改革的初级阶段具有一定的实用性。

关键词: 电力市场; 水火电置换; 虚拟电; 虚拟电交易

Abstract: The efficiency of power industry is related to the efficiency of the entire energy industry. How to improve the power efficiency in production process by economic method is the key to increase the efficiency of the entire energy industry. With the preconditions of complying with the state energy policies and sufficiently utilizing the water resource, the regulation of market mechanism is introduced. A market for virtual electricity trade is constructed on the basis of hydro-thermal exchange. The main participants of this market include power generation companies, power supply companies and high energy-consuming enterprises. Based on the virtual electricity market, each participant formulates their own plan considering the principle of maximizing benefits. An optimal dispatch model is set up for electricity volume exchanged among the plants which participate in the virtual electricity trades, and the linear programming approach is used to calculate the results. The calculation and results indicate that the discussed model is simple and easy to use. It can give consideration to both state energy policies and market mechanism quite well, and can be practically used in the initial phase of electricity market reform in China.

Key words: electricity market; hydro-thermal exchange; virtual electricity; virtual electricity trade

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0026-05

0 前 言

电力产业在整个能源行业中居于核心地位, 水电是中国未来电力市场中参与市场竞争交易的主要电源类型。因此, 如何通过经济手段设计合理机制, 实现水火电能源置换, 以提高水电资源的利用效率, 是提高发电能效的关键, 也是提高整个能源行业效率的关键。

水火电置换就是采用签订双边容量合同 (合同中确定合同电量与合同电价) 的方式, 解决各发电公司 (或电厂) 由于历史原因而引起的容量 (固定) 成本的差异, 从而使它们处在“同一起跑线上”竞争。当前对水火电置换交易的研究文献相对比较少, 四川电力公司和华中电网都对水火电置换进行过实验性

研究^[1-3]。文献 [4] 对水火电置换的发电权调节市场进行了研究, 提出了以社会总效用最优的置换电量优化模型。文献 [5] 提出了“容量合同+效率置换+实时市场”模式。文献 [6] 研究了在水火电混合系统中制定现货交易计划, 将水电和火电划分成两个独立的子集, 各子集内部分别按照购电费最低的原则竞价上网。文献 [7] 在研究水火电协调的日交易计划时, 综合考虑了水火协调与能源、环境和经济的关系, 将多目标优化问题较好地统一到购电费用最低这个单目标问题中。以上研究主要集中在两个方面: 一方面是利用电力准确调度实现水火电置换, 需要电网调度中心信息充分并能准确预测; 二是通过经济学办法, 设计发电权交易市场, 利用市场机制实现资源的合理配置。但在发电权交易市场中, 由于发电权的局限, 市场参与方只能是发电企业, 对合同电能的风险

规避能力不强。

在借鉴国外可再生能源市场 (ROS)^[9-10]发展的基础上,考虑中国自身资源特点,引入了市场机制的调节作用,构建了基于水火电置换的虚拟电交易调节市场。在虚拟电交易的基础上,各交易主体根据各自利益最大化原则,制定市场参与计划,并建立置换电量在虚拟电交易主体中的优化分配模型,应用线性规划法进行求解,以合理分配各方利益。

1 虚拟电及虚拟电交易市场

1.1 虚拟电概念及特点

虚拟电是指发电企业在电网公司分配的发电权之外以及和工业用户已经签订的直购电合同之外还具有的剩余发电能力,是指以“虚拟”的形式隐形于发电企业发电剩余能力中的电。虚拟电的特征主要表现为:①非真实性。虚拟电是以“虚拟”的形式包含在生产能力中的电,是“看不见”的电。②社会交易性。没有虚拟电交易及虚拟电交易市场,虚拟电就只是一种发电能力,不能通过这种发电能力转为真正的电。③便捷性。基于实体电能交易中的种种瓶颈,虚拟电以“无形”的形式存在于发电企业剩余发电能力中,其市场化交易的特点使虚拟电交易成了一种可以利用市场基础功能优化能源配置的有用工具,并为实现水火电量置换及充分利用可再生能源发电提供了有效途径。

1.2 虚拟电交易市场

虚拟电交易是指发电企业剩余发电能力的交易,其交易主体包括电网内的各种竞价发电企业(主要指火电厂和水电厂)和供电企业,还包括电网外的大型用电企业。

虚拟电交易市场是在合约市场、月竞价市场和日前市场的基础上建立起来的,其任务是通过市场机制,利用发电企业的剩余发电能力,进行电量置换。交易主要采用市场方式,各交易主体采用挂牌交易的方式。被批准进入市场的各交易主体根据平等自愿的原则,在不推动上网电价上涨的前提下,按照市场运行规则和约定,相互之间进行虚拟电量转让交易,通过竞价实现买进或卖出虚拟电量。虚拟电交易市场实质上是一种剩余电量的期货交易市场。结合合约市场上各方年度电量合约的签定情况,虚拟电卖方是在合约电量基础上卖出自身的剩余发电能力,并在交易的虚拟电中确定的执行时段发电或利用年初合

同电补偿,即在期货市场提前卖出产品并通过现货市场平仓,其虚拟电卖价是其自愿利用其剩余发电能力发电的价格;而虚拟电买方是在经济上自身发电不划算或电力需求超过年初预测的情况下,通过买入虚拟电量,并利用虚拟电量执行合约电量或利用虚拟电满足增加的电力需求,其虚拟电买价是其自愿放弃自身发电能力发电或为满足电力市场新增需求时的价格;市场调度交易中心负责计算买卖双方的交易是否符合电网潮流约束,并在通过潮流约束条件下同意双方执行交易,并收取相应的费用。

这里的虚拟电交易类型指月间虚拟电交易市场,其最大的时间范围为申报月的下一个月到当年年底,交易时段为“月”。其他日间虚拟电交易及小时虚拟电交易与月间发电类似,只是交易时段的不同,在此不再详述。

1.3 各利益方交易价格限值

由于各发电企业发电成本不同,各参与方是否参与虚拟电市场的买卖价格上下限存在了差异。目前,水、火电及大型用电企业并没有在同一电能市场平台上参与竞争的实际情况,根据各参与方的利润最大化原则,虚拟电交易的价格上下限,见表 1。

表 1 虚拟电市场各参与方报价限值		
参与方	卖方(价格下限)	买方(价格上限)
水电	水电边际成本	未完成合同电量的惩罚成本
火电	火电边际成本	火电边际成本
供电企业	0	销售电价
用电企业	合同电价+生产利润	合同电价

1.4 虚拟电交易市场组织流程

虚拟电交易市场的组织流程类似于期货市场,不同之处在于需要考虑电力系统的网络约束性,即交易必须在通过潮流约束后才能成交。其组织流程如图 1 所示。

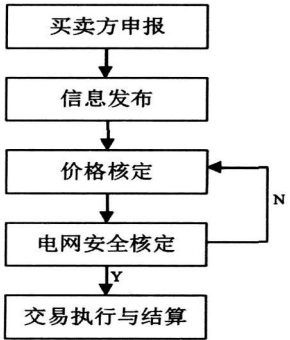


图 1 虚拟电交易市场组织流程

(1)虚拟电卖方申报:虚拟电卖方针对年度内未来某月自身发电能力的预测,考虑已签定的合约电量,计算该月度自身的剩余发电能力多少,并向交易中心进行申报,申报内容包括:虚拟电时间、虚拟电量与每个交易时段的虚拟电卖价,以及到期平仓时对应实际电能的来源。

(2)虚拟电买方申报:买方通过分析自身的生产成本、经营特点等,按照利益最大化原则向交易中心申报:虚拟电时间、虚拟电量与每个交易时段的虚拟电买价。

(3)交易中心发布信息:在规定的时间内,交易中心发布虚拟电卖方和买方的交易信息。

(4)价格核定:交易中心按照 PAB 模式进行交易价格核定,并将成交价格反馈与买方和卖方,双方同意即通过价格核定。

(5)电网安全核定:对价格核定通过的虚拟电交易前,调度中心应进行电网的潮流计算和安全校核,若无法通过安全校核,交易无效。

(6)虚拟电交易确认:在规定的时间内,交易中心发布通过价格核定和电网安全核定的虚拟电交易结果,内容包括:交易时段、虚拟电交易量、成交价格及到期平仓对应实际电能的来源。

(7)交易执行与结算:交易确定后,买卖双方执行虚拟电交易。买方获得虚拟电量,并按照价格核定内容支付卖方虚拟电价格。买卖双方平摊安全校核费用。

1.5 相比发电权交易市场的优势

发电权市场转让的只是发电权,而发电权是调度中心分配给各电厂的发电权利,市场参与方局限于拥有发电权和需要发电权的发电企业,相比而言,虚拟电市场参与方除了发电企业外,增加了供电企业和大型用电企业,大型用电企业通过参与产品期货市场安排自身用电时段及用电量,可将电力系统中无法解决的问题(如电力传输、垄断定价)转移到成熟的商品市场给予解决。

当市场参与主体签定年初发电合同或购电合同后,由于经济原因或不可抗力因素出现了市场预测错误时,参与方可以通过在虚拟电市场买入虚拟电或卖出虚拟电的形式,增加自身收入或减少自身损失,因此,虚拟电市场相对于发电权市场而言,提高了参与方的风险规避能力。

2 交易电量电价优化模型

2.1 假设条件

(1)假设共有 I 个发电企业(包括火电和水电),第 i 个企业用下标 i 表示;有 J 个大型用电企业,第 j 个企业用下标 j 表示;有 K 个供电企业,第 k 个供电企业用下标 k 表示。

(2)合约电量和合约电价分别为 W_e 和 P_e ;虚拟电量和价格核定的虚拟电价分别为 W_v 和 P_v ,虚拟电市场参与方卖出虚拟电时 W_v 为正,买入虚拟电时 W_v 为负。 C 表示企业的单位生产成本。

(3)假定共有 T 个时段,且信息不对称。

2.2 发电企业

发电企业在自身发电能力的约束下通过虚拟电市场实现自身的利益最大化,目标函数为

$$M \propto S_i = P_{e,i} W_{e,i} - C_i W_{e,i} + \sum_{i=1}^T P_{v,i} W_{v,i} - C_i \sum_{i=1}^T W_{v,i}$$

约束条件包括电厂共有约束和水电特有约束,其中共有约束为

①电厂发电能力限制

$$W_{e,i,t} + W_{v,i,t} \leq E_{i,t}$$

$E_{i,t}$ 为发电企业 i 在第 t 时段的最大发电能力。

水电特有约束包括水流平衡约束和水电发电出力约束。

②水流平衡

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} - I_{i,t} - Q_{i,t} - S_{i,t}$$

式中, $V_{i,t}$ 为第 i 个电站水库 t 交易时段初存水量; $I_{i,t}$ 为水库 i 交易时段天然来水量; $Q_{i,t}$ 水库 i 交易时段发电用水量; $S_{i,t}$ 水库弃水量。有不等式约束条件:

$$V_{i,t \min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t \max}$$

$$Q'_{i,t \min} \leq Q'_{i,t} \leq Q'_{i,t \max}$$

③水电厂发电出力

$$P_{h,j,i,t} = R_{i,t} H_{i,t} Q'_{i,t}$$

式中, $R_{i,t}$ 第 i 水电厂 t 交易时段出力系数,由水库水头和发电效率决定; $H_{i,t}$ 水电厂 i 交易时段平均水头。

④水库存水量边界条件

水库在调度期始末的存水量分别为 V_b 和 V_e 。

2.3 大型用电企业

大型用电企业是在自身产品生产能力的约束下通过虚拟电市场购电或投机获得自身利益最大化。对用电企业 i 其目标函数为

$$MaxS_j = P_jQ_j - C_jQ_j - \sum_{i=1}^T (P_{ujt}W_{ujt} + P_{ejt}W_{ejt})$$

其中 P_j 为企业产品单价, C_j 为企业产品的单位成本。 Q_j 为企业产品产量, 企业产品产量与企业的实际生产用电量呈正相关关系, 为简化模型, 假设为线性关系:

$$Q_j = \alpha \sum_{i=1}^T (W_{ejt} + W_{ujt})$$

约束条件为生产能力约束:

$$Q_{jt} \leq Q_{jmax}$$

2.4 供电企业

供电企业根据自身利润最大化制订参与虚拟电市场计划, 其目标函数为

$$MaxS_k = P_kW_{ek} - P_{ek}W_{ek} + \sum_{i=1}^T P_{uk}W_{uk} - P_k \sum_{i=1}^T W_{uk}$$

约束条件为负荷需求约束:

$$W_{ek} - W_{uk} = D_k$$

其中, D_k 为供电企业 k 管辖区域在 t 时段的负荷需求。

2.5 调度中心

虚拟电市场价格核定通过之后, 调度中心要计算电网的安全约束, 即虚拟电交易能否满足平衡约束和电网输电约束。

①平衡约束

$$\sum_{i=1}^I (W_{eit} + W_{uit}) = \sum_{j=1}^J (W_{ujt} + W_{ejt}) + \sum_{k=1}^K (W_{ekt} + W_{ukt})$$

即 t 时段总的发电量等于总的用电量。

②输电约束

$$I_i \leq I_{imax}$$

I_{imax} 表示线路 i 的最大输电能力。

3 算例分析

利用前面所建立的数学模型, 针对水火电置换问题, 在虚拟电交易市场规则中, 应用线性规划法对丰水期 (8 月份) 的虚拟电量在虚拟电市场进行交易。

设 8 月份来水偏丰, 提前一个月将进行 8 月份的虚拟电市场交易。各参与方在 7 月份预测自身 8 月份的发电量见表 2。

从交易结果可以看出, 在 8 月份共完成水火置换电量 30 000 MW h。其中火电企业 2 和火电企业 3 根据自身生产平均成本和各参与方报价, 决定不参与虚

拟电市场; 水电企业 1 和水电企业 2 通过虚拟电市场交易, 增加了利润; 火电企业 1 和用电企业 1 通过虚拟电交易, 降低了生产成本。

表 2 八月份预测发电量

电厂	月份	预计发电量 /MW h
火电 1	8	48 000
火电 2	8	42 000
火电 3	8	24 000
水电 1	8	750 000
水电 2	8	450 000

表 3 八月已签合同电量

参与方	月份	类型	合同 电量 /MW h	合同 电价 /(元 /MW h)	平均 成本 /(元 /MW h)
火电 1	8	卖出	40 000	288	130
火电 2	8	卖出	42 000	288	120
火电 3	8	卖出	24 000	288	114
水电 1	8	卖出	400 000	288	84
水电 2	8	卖出	420 000	288	60
供电 1	8	买入	180 000	288	288
企业 1	8	买入	12 000	160	160

表 4 水电厂约束条件

水电	R_i /10 ⁻⁴	Q'_{max} /(m ³ /s)	Q'_{min} /(m ³ /s)	V_{max} /(10 ⁸ m ³)	V_{min} /(10 ⁸ m ³)	H_i /m
1	87	1 500	170	170	70	115
2	86	1 100	70	65	15	100

表 5 各市场参与方申报数据

参与方	类型	月份	虚拟电量 /MW h	报价 (元 /MW h)
火电 3	买家	8	24 000	94
火电 2	买家	8	40 000	100
火电 1	买家	8	30 000	106
企业 1	买家	8	10 000	110
水电 2	卖家	8	30 000	120
水电 1	卖家	8	350 000	140
企业 1	卖家	8	12 000	200

表 6 八月份虚拟电市场交易结果

交易 次序	卖方	买方	虚拟电量 /MW h	成交价格 /(元 /MW h)
1	水电 2	企业 1	10 000	115
2	水电 2	火电 1	20 000	113
3	水电 1	火电 1	10 000	123

4 结 论

建立月间虚拟电交易市场, 各参与主体可根据自身能力和市场条件确定是否参与虚拟电交易。通过虚拟电市场, 发电企业可实现自身利益最大化, 供电企业和大型用电企业可规避市场风险。参与主体达

到自身目的同时,通过市场机制实现了水火电置换,水电资源得以充分利用,国家相关政策得到较好的实施。算例结果表明,所提出的模型简单可行,能较好的发挥市场调节功能,在中国电力市场改革初期具有一定的实用性。

参考文献

- [1] 四川省电力公司编.探索中的四川电力市场[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [2] 国家电力监管委员会.华中电力市场建设研究报告[R].北京:国家电力监管委员会,2004.
- [3] 国家电力监管委员会供电监管部.东北区域电力市场试点工作理论与实践探索——两部制电价模式[R].北京:国家电力监管委员会,2004.
- [4] 王雁凌,张粒子,杨以涵.基于水火电置换的发电权调节市场[J].中国电机工程学报,2006,3(26):131—136.
- [5] 江岳春,姚建刚,周丽兰,等.基于“容量合同+效率置换+实时市场”模式的发电竞价系统研究[J].电工技术学报,2006,21(1):52—57.

- [6] 蔡兴国,林士颖,马平.现货交易中梯级水电站竞价上网的研究[J].中国电机工程学报,2003,23(8):56—59.
- [7] 马瑞,贺仁睦,颜宏文,等.考虑水火协调的多目标优化分组分段竞标模型[J].中国电机工程学报,2004,24(11):53—57.
- [8] 陈晓林,刘俊勇,宋永华,等.利用差价合同和金融输电权的组合规避电力市场风险[J].中国电机工程学报,2005,25(10):75—81.
- [9] Bialek J W. Transmission Charging and Growth of Renewables in the UK[C]. Power Engineering Society General Meeting 2007:1—6.
- [10] Soni A. Ozveren C S. Renewable Energy Market Potential in U. K. [C]. Universities Power Engineering Conference 42nd International 2007:717—720.

作者简介:

陈 岭(1971),女,成都人,成都电业局。

李 俊(1981),男,四川大学电气信息学院博士研究生,主要从事电力市场、电力经济评估等方面的研究工作。

(收稿日期:2010—05—27)

(上接第 6 页)

4 结束语

雷电活动具有很大的随机性和分散型,惠州地区的雷电参数统计结果表明,惠州地区属于特殊强雷区,雷电流极性的分布与现行规程分布一致,但是在雷电流小于 40 kA 出现的概率比规程推荐公式高 10 个百分点,认为应当加强 110 kV 以上高压输电线路绕击的防护。而落雷次数几乎以三年为周期呈上升趋势,雷电活动也有增强的趋势,同时惠州地区各行政区域的雷暴日均很高,属于特殊强雷区,落雷次数差异比较大,落雷次数与雷暴日正相关,建议加强现有线路的防雷改造,适当提高惠州地区的防雷设计标准,在防雷设计中应当考虑各区域雷电频度的差异。

参考文献

- [1] 陈水明,樊灵孟,何宏明,等.广东省雷电定位系统运行情况[J].中国电力,2001,34(12):43—47.
- [2] DL/T 62021997.交流电气装置的过电压保护和绝缘配

合[S].北京:电力工业出版社,1997.

- [3] 孙萍,郑庆均,吴璞三,等.220 kV 新杭线 1 回路 27 年雷电流幅值实测结果的技术分析[J].中国电力,2006(7):74—76.
- [4] 杜澍春.关于输电线路防雷计算中若干参数及方法的修改建议[J].电网技术,1996,20(12):53—56.
- [5] 李功新.基于 GIS 的电网生产管理系统建设与应用[M].北京:科学出版社,2008.
- [6] 陈家宏,童雪芳,谷山强,等.雷电定位系统测量的雷电流幅值分布特征[J].高电压技术,2008,34(9):1893—1897.

作者简介:

谢 鹏(1978)男,硕士,工程师,主要从事高电压技术及变电一次设备的管理与研究。

魏 莱,男,工作于广东电网公司惠州供电局。

赵紫辉(1985)男,硕士研究生,主要研究方向为过电压防护与接地技术。

马御棠(1986)男,硕士研究生,研究方向为架空线路防雷与接地技术。

吴广宁(1969)男,教授,博士生导师,主要从事高电压与绝缘技术方面的研究。

(收稿日期:2010—07—15)

继电保护整定单管理系统的應用研究

周建群¹, 吕 华¹, 李志文¹, 杜俊红¹, 胡亚平², 吕飞鹏², 李运坤²

(1 浙江省临安市供电局, 浙江 临安 317000; 2 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 长期以来, 传统的继电保护整定单管理广泛采用基于纸质的人工管理模式, 工作量较大, 存在问题较多。随着电网的飞速发展, 大量保护整定单的上报、检索、浏览、审批流程等管理工作日益繁琐。本文系统采用 workflow 技术、电子签名技术、利用计算机网络实现了整定单管理业务过程的自动化、网络化, 极大地提高了业务处理效率, 具有较高的实用价值。

关键词: 保护整定单; 继电保护; 工作流技术

Abstract For a long time the manual management mode based on paper medium is widely used for the traditional management of the setting card of protective relaying. The workload required is huge and a lot of other problems exist under this kind of work mode. With the rapid development of power grid nowadays, the setting card management work such becomes even harder and much complicated. The automation of setting card management is realized through computer network by the proposed system, so the work efficiency is greatly raised. The system introduced has a higher application value.

Key words: setting card of protective relaying; protective relaying; workflow technology

中图分类号: TM77 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0031-04

0 引 言

电力系统继电保护整定单数目庞大、种类繁多。长期以来, 传统的整定单管理模式以纸为介质, 主要依靠人工方式管理, 工作量较大, 存在问题较多。大量的保护整定单的上报、检索、浏览、审批流程等工作量相当繁重。管理上也长期使用资料柜保存, 查询、复制、存档非常麻烦。保护整定单的审批流过程需要多部门不同人员之间协同配合工作, 传统的人工管理模式已经不适应建设一流供电企业的发展要求^[1-6]。

虽然已有一些相关的研发和产品报道, 但由于其实现的功能大多不够完善, 采用传统的软件技术和系统架构, 采用的技术手段不够先进, 用户界面与业务逻辑的紧耦合, 导致系统扩展、维护和重用困难, 开发成本高、效率低, 在实际生产中发挥的作用并不显著, 不能满足实际应用的具体需要, 对网络化集成日常管理工作的要求有较大差距。

为了能够使多部门有效地协同工作, 提高管理工作的效率, 使有关管理工作规范化、流程化和信息化, 有必要紧密结合各部门日常管理工作的习惯和工作内容, 采用先进的协作系统和自动化办公系统来提高工

作效率, 使得各部门不同人员可以在一个统一的集成环境下完成各种管理工作。利用 workflow 技术可以有效地实现电力企业业务过程管理的自动化、网络化, 提高业务处理效率, 工作流技术在电力信息系统建设中已广泛应用。现有的基于 workflow 的应用系统, 有的是利用 workflow 的思想开发的基于数据库的应用系统, 但数据库本身缺乏对 workflow 应用的直接支持; 有的系统根据特定的应用, 直接从最底层设计开发 workflow 引擎, 开发难度大, 周期长, 系统可扩展性、通用性差; 还有一类系统是在 Lotus Notes 平台上进行二次开发的办公自动化应用系统, 能提供基于文件的工作流支持, 由于需要购买第三方软件, 系统实现成本较高。

下面介绍了已在临安市供电局投入实际应用的基于 Web 的整定单管理系统, 本系统采用先进的 WF (Workflow Foundation) 工作流技术、基于 PDF 文档的电子签名技术, 实现了基于网络的整定单管理。

1 系统构架

本系统采用目前比较成熟的“三层构架”思想来设计, 整个应用划分为表示层、业务逻辑层、数据访问层, 这样使系统的构架更加清晰, 每个层次完成的功能专一, 功能代码有规律可循。

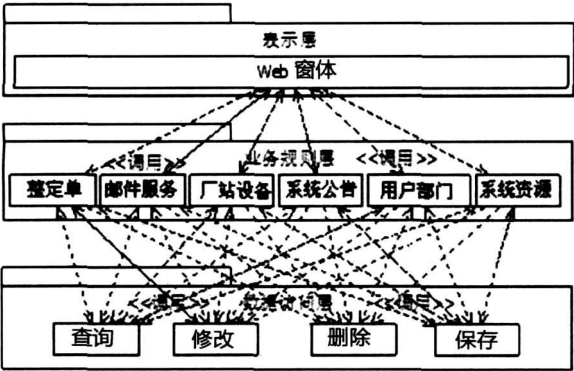


图 1 系统三层架构模式

如图 1 所示，客户端表示层负责与用户交互，实现数据显示、输入、修改及打印功能，表示层不直接与数据库进行交互，而是将数据传递给业务规则层，再经由业务规则层与数据访问层进行交互。本系统的表示层采用 ASP.NET AJAX 技术以尽可能减少冗余请求，实现页面的无刷新更新，拥有更好的用户体验；把以前的一些服务器负担的工作转移到了客户端，利用客户端闲置的处理能力处理数据，减轻服务器和带宽的负担，节约空间和带宽。

业务规则层接受来自表示层的控制，调用相应逻辑处理模块实现如整定单管理、邮件服务管理、厂站归属和设备运行状态管理、公告资源管理、用户和部门信息管理等功能，并把运算结果以消息的方式发送回表示层，业务规则、数据访问、合法性校验等在业务规则层进行处理。

数据访问层接收上层消息，负责访问系统数据库 MS SQL Server 2000。本系统数据访问层使用了微软的最新的数据库访问技术 LINQ to SQL 数据访问技术、实现对关系数据库的图形化建模，当数据库结构改变时容易实现数据访问层的重构。如图 2 所示。

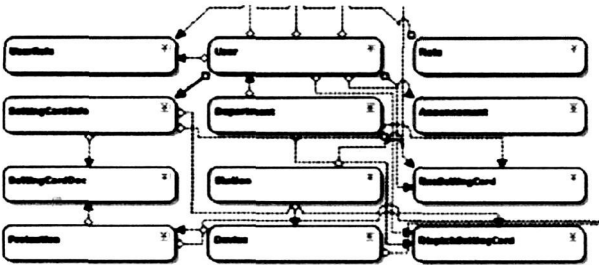


图 2 LINQ to SQL 数据访问层

三层架构中每一层只实现相对独立的功能，当任何一层发生变化时，只要保持层间接口关系不变，其它各层都不受影响，系统可扩展性强。

2 系统技术特点

2.1 PDF 多重数字签名技术

数字签名也称电子签名，在信息安全方面有重要应用，是实现认证的重要工具，是整定单管理系统中是不可缺少的。它利用数字技术实现在网络传送文件时附加个人标记，完成传统上手书签名盖章的作用，以表示确认、负责、执行等。

数字签名的基本原理是：对消息 M 用散列函数 H 得到消息摘要 $h_1 = H(M)$ ，然后发送方 A 用自己的私钥 K_{SA} 对这个散列值进行加密： $E_{K_{SA}}(h_1)$ ，来形成发送方 A 的数字签名。然后，这个数字签名将作为消息 M 的附件和消息 M 一起发送给消息接收方 B 。消息的接收方 B 首先把接收到的原始消息分成 M' 和 $E_{K_{SA}}(h_1)$ 。从 M' 中计算出散列值 $h_2 = H(M')$ ，接着再用发送方的公钥 K_{PA} 来对消息的数字签名进行解密 $D_{K_{PA}}(E_{K_{SA}}(h_1))$ 得 h_1 。如果散列值 $h_1 = h_2$ ，那么接收方就能确认该数字签名是发送方 A 的，而且还可以确定此消息没有被修改过，数字签名的实现原理如图 3 所示。

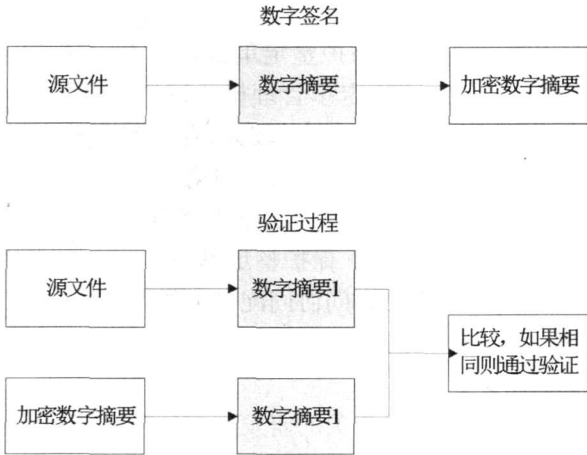


图 3 数字签名实现原理

本系统利用开源项目 iTextSharp 将上报的 Excel 或者 Word 格式的整定单文档转为 PDF 格式，并在附件中保留原上传的整定单文档，同时在 PDF 中添加多个空白签名，在整定单流转的过程中，由不同权限的人结合数字证书对空白签名进行签名更新。PDF 的多重签名如图 4 所示。

打开 PDF 格式的整定单文档时系统会自动进行签名有效性验证，用户也可以通过 PDF 阅读器自行

临安市供电局继电保护整定单

装置型号: RCS-9612A 第2007-浙川-01号 (代版第2006-浙川-14号) 日期: 2007/01/09

变电站: 35kV浙川变	设备名称: 塔山222线	装置版本: 3.31.1	校验码: F140	额定电压: 10kV
变比: 300/5	整定原因: 塔山222线	变比: 10/0.1		
28 线路电压额定100V	UNCE	0/1	1	
29 PT断线检查	PTDX	0/1	1	
30 PT断线退出与电压有关的电流保护	TUL	0/1	1	

说明:
1、整定原因: 线路连接关系改变。
2、在经主变送电方式下, 允许转送塔山临时变城后512线。
3、考虑塔山变水127线转送10kV母线和出线, 此时不考虑转送塔山临时变城后512线。
4、保护限幅315A。
5、做进线时, 保护停用。

编制人: 校核人: 审核人: 签发人:

执行期限: 未签名域 (单击来签名) 实际校验日期:

图 4 PDF多重签名

查看验证结果,如图 5所示。由于 PDF不可修改,可确保整定单文档的有效性。

签名验证

签名有效, 由“临安市供电局”签名。

文档 签名者 日期/时间 法律声明

签名者(S): 临安市供电局 显示证书(h)...

原因(R): 整定单上报

日期(D): 2010/03/10 18:41:41 +08'00' 位置(L): 不可用

有效性小结

自应用本签名以来,“文档”未被修改。

文档是由当前用户签名。

签名日期/时间来自签名者计算机上的时钟。

图 5 签名验证

2.2 状态机工作流模型

根据整定单管理的要求和特点,本系统采用 Microsoft的工作流解决方案的新技术 WF。WF支持 2 种基本工作流样式: 顺序工作流 (Sequential Workflow)和状态机工作流 (State Machine Workflow), 其中顺序工作流适用于操作按顺序依次执行直至最后一个活动完成的流程管理;状态机工作流是以事件 (Event)为驱动, 由一组状态、转换和操作组成, 首先将一个状态表示为起始状态, 然后基于事件执行向另一个状态转换。在整定单的流转过程中涉及多个部门不同人员的异地协同合作, 为满足用户对工作流管理柔性的要求, 采用 State Machine Workflow 模型来实现。

利用 WF提供的可视化设计器可通过拖曳的方式实现整定单审批流程的图形化设计和修改维护。State Machine设计视图中, 流程定义是通过向可视化设计器中拖放 State Activity来实现的。State Activity 是一种容器类型控件, 状态机工作流实例的运行依赖于有关事件的产生和响应, 因此还需要向不同的状态

控件中添加对应的 Event-driven Activity控件来实现事件的响应和处理。

整定单的状态机工作流如图 6所示, 其中上报、校核、审核等表示相应的 State Activity 每个 State Activity里的文字表示对应的 Event-driven Activity 如校核状态的“校核通过”、“校核驳回”、“定值单追回”等。

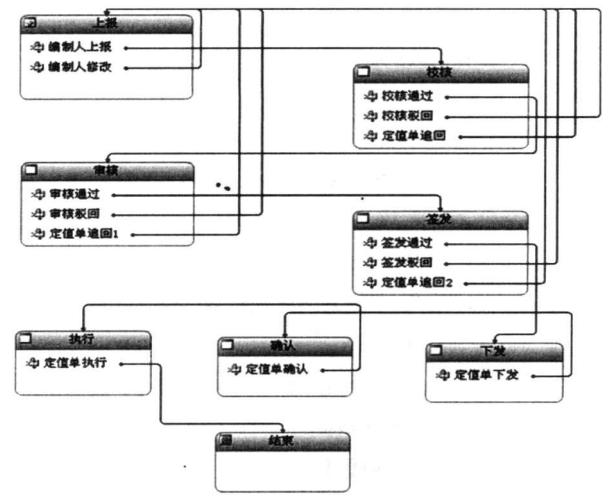


图 6 整定单状态机工作流模型

3 系统功能特点

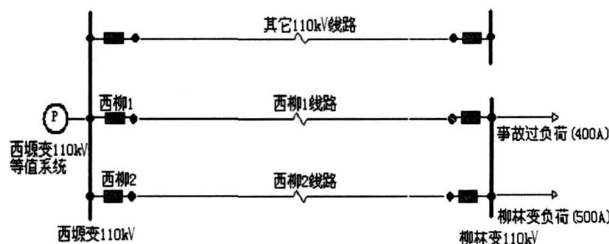
- 1)基于 Web的保护整定单网络化管理;实现继电保护整定单上报查阅、检索、浏览、审批流程等日常管理工作的网络化、自动化和网络数据库管理。
- 2)可实现基于角色的用户权限设置管理。用户分为系统管理员、用户和访客。针对各种用户可以设置不同权限,包括整定单编制、校核、审核、签发和执行等,同一用户可具有多种角色。
- 3)支持 EXCEL、WORD、RTF、JPG 等格式的整定单。
- 4)整定单的编制:能实现历史整定单的查询,并在当前整定单的基础上新建保护整定单,并对新整定单自动编号。上报整定单时系统能够自动解析出整定单文档中的基本信息数据经用户确认后存入数据库,如整定单编号、填报日期、厂站名称、设备名称、额定电压、装置型号、整定原因等,用户也可以修改系统自动解析出的数据,不需要预先录入有关的设备基础数据,在数据解析页面编制人可以从多个具有校核权限的人员中任选一个作为校核人。如图 7所示。
- 5)整定单的审批:在整定单流转过程中实现编

整定单管理	
整定单编号	第2006-山边-01号
编制日期	2006/12/19
厂站名称	山边电站
设备名称	主变
额定电压	10 KV
装置型号	HST5330
整定原因	山边变二期投运。
校核人:	☒ 222 ☒ 2222
确定 取消	

制人、校核人、审核人、签发人的电子签名,结合数字证书文件实现基于 PDF 的电子签名有效性验证;基于 workflow 技术实现整定单的上报、校核、审核、签发、下发、确认、执行、存档等流过程的自动化管理,以及将待处理定值文档通过 OA 以电子邮件形式通知下一环节具有相应权限的工作人员处理,相应人员可以通过邮件里的链接不用输入工号和密码直接登录进系统相应审批页面,如图 8 所示。流程流转人员可根据实际情况对整定单进行驳回或批准。编制人员可以对已上报尚未执行的整定单追回或删除。系统支持三人或四人审批流程,用户可灵活选择。

[illegible]

7)整定单的查询:能够按照厂站名称、设备名称、调度类型、编制日期、签发日期、执行日期进行查询、检索、浏览和打印历史整定单、当前整定单;若编制人需要对某个设备新建一份整定单,可以点击图10中“新建”链接,系统将自动生成新的整定单编号,同时为防止人员的错误操作导致编号混乱,系统设计了整定单编号管理功能,编制人可以手动修改各厂站的整定单编号。

[illegible]

4 结束语

本整定单管理系统利用网络实现了整定单管理过程的自动化、网络化,提高了工作效率,全面提高了企业管理工作的自动化水平,对电力系统稳定运行和规范管理具有重要的经济价值和现实意义,具有较高的实用价值和应用推广价值。本文系统已成功用于临安市供电局继电保护日常管理工作,取得了较好的

(下转第 92 页)

Trans PowerDel, 2006, 21(2): 935—932

[17] Gámez JC, Morcos M M. Voltage Sag and Recovery Time in Repetitive Events[J]. IEEE Trans PowerDel 2002, 17(4): 1037—1043.

[18] 张志刚,殷科生. 基于负荷敏感性及能量损失的电压凹陷的评价[J]. 西北电力技术, 2005(4): 1—2, 18.

[19] 李光荣,代红才. 定量评价电压凹陷引起的用户损失[J]. 江西电力, 2006, 30(4): 37—39.

[20] S A Yin, C N Lu, Edwin Liu, Y C Huang and C Y Huang Assessment of Interruption Cost to High-tech Industry in Taiwan [C]. Proceedings of the IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta, GA, USA, 2001.

(收稿日期: 2010—08—15)

(上接第 34 页)
技术经济效益。

参考文献

[1] 萨师煊. 数据库系统概论 [M]. 高等教育出版社, 2000.

[2] 郑耀东. ASP.NET 2.0 编程指南 [M]. 人民邮电出版社. 2007.

[3] 张杰. 基于 Web 的工作流管理系统的设计与实现 [J]. 电脑编程技巧与维护, 2009, 22(1): 56—58.

[4] 石邵郡,林小村,文杰,等. 电力系统继电保护配置及定值管理系统 [J]. 电网技术, 1996, 20(8): 26—29.

[5] 谢熹,吕飞鹏,雷云川,等. 基于工作流的继电保护定值管理系统 [J]. 电网技术, 2006, 30(16): 64—69.

[6] 彭晓兰,刘沛,程时杰,等. 一个实用的继电保护运行与管理专家系统 [J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(6):

421—426.

作者简介:

周建群 (1969),女,工程师,大学本科,从事电力系统调度运行工作;

吕 华 (1980),男,工程师,大学本科,从事电力系统自动化专业工作;

李志文 (1978),男,工程师,硕士,从事电力系统继电保护专业工作;

杜俊红 (1975),女,工程师,硕士,从事电力系统继电保护专业工作。

胡亚平 (1986),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护研究。

吕飞鹏 (1968),男,博士,教授,从事电力系统继电保护研究。

李运坤 (1987),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护研究。

(收稿日期: 2010—05—12)

(上接第 88 页)

AVC 系统是保证电网安全、经济、优质运行并作为电网安全稳定预防性控制措施的重要技术手段。省、地调之间的协调控制的实现为有效提高德阳电网电压控制水平、降低网损、提高电压稳定裕度提供了可靠的保证。

因此,下一步德阳电业局将根据德阳地区电网电压无功控制的特点,建立以德阳地调主站为中心覆盖包括城区供电局五里堆、孟家、二重区域电网、绵竹供电局新市区域电网、什邡供电局云西区域电网、罗江供电局万安区域电网以及广汉供电局古城区域电网在内的地区区域电压无功控制系统。

参考文献

[1] 郭庆来,孙宏斌,张伯明,等. 江苏电网 AVC 主站系统的研究和实现 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 83—87.

[2] 郭庆来,孙宏斌,张伯明,等. 协调二级电压控制的研究 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 19—24.

[3] 唐茂林,庞晓艳,李旻,等. 计及梯级电站的省地一体化 AVC 系统研究及实现方案 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(6): 119—123.

[4] 王铁强,成海彦,等. 基于分层分区协调控制的河北南网 AVC 系统设计与实现 [J]. 电网技术, 2008, 12(32): 157—160.

[5] 孙宏斌,张伯明,郭庆来,等. 基于软分区的全局电压优化控制系统设计 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 16—20.

作者简介:

刘青丽 (1977),女,汉族,工程师,研究方向为电力系统调度运行;

尹 琦 (1971),女,汉族,高级工程师,研究方向为电力系统调度运行;

周 鹏 (1978),男,汉族,助理工程师,研究方向为电力系统控制及保护;

邓志森 (1978),男,汉族,工程师,研究方向为电力调度自动化。

(收稿日期: 2010—08—15)

火力发电厂冷却塔安装空气动力涡流调节装置的研究

熊 涛

(西南电力设计院, 四川 成都 610021)

摘 要:火力发电厂节能减排已经成为全社会关注的焦点。冷却塔安装空气动力涡流调节装置的技术,是火电厂节能减排的一项创新技术。详细介绍该技术的发展及其原理,以及其应用带来的社会和经济效益。

关键词:发电厂;冷却塔;空气动力涡流调节装置

Abstract With the energy conservation and emission reduction have become the social issue, the installation of aerodynamic eddy adjustment equipment turns into an innovative technology in power plant. The theory and the development of this technology are introduced in detail, and the social and economic benefits of this innovation are discussed.

Key words power plant; cooling tower; aerodynamic eddy adjustment equipment

中图分类号: TK284 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0035-01

白俄罗斯国家科学院发明的发电厂冷却塔空气动力涡流调节装置,另辟捷径,从提高冷却塔效率入手,降低循环水的温度,从而提高凝汽器真空,达到提高汽轮机组热效率的目的。根据白俄罗斯多座电站采用冷却塔空气动力涡流调节装置后的实测数据统计,改造后冷却塔出入口水温差(温降)增加了 1.3°C ,机组的单位发电煤耗,每千瓦时降低 $0.5\sim 1.0$ 克标准煤(有些极端情况,可降低更多)。

该技术适用于新建、扩建、原有发电机组改造等多种形态、多种参数发电厂的湿式逆流自然通风冷却塔改造项目。对新建的冷却塔,在不改变设计规程和技术参数的条件下,在入风口增设空气动力涡流调节装置,达到提高冷却塔效率的效果。

1 冷却塔空气动力涡流调节装置在中国发展概况

2001年,该技术介绍到中国,国内一些地区和机构陆续开始介绍该项目。当时由于中国的煤炭价格,相对国际市场价格较低。经测算,在中国使用该技术,投资回收的年限比较长,未被国内发电企业接受。

随着国内煤价的逐步升高,节能降耗的国家产业政策导向,国内部分发电企业开始对此技术表现出兴趣。据了解,2008年11月20日,国内第一台由白俄罗斯国家科学院进行模型实验,并提供技术设计的冷却塔空气动力涡流调节装置,在天津华能杨柳青热电有限责任公司(以下简称杨电)6号冷却塔上开始试

验安装,2009年1月5日正式投入。2009年10月,上海吴泾第二发电厂2号冷却塔(600 MW机组)安装空气动力涡流调节装置。

2 冷却塔空气动力涡流调节装置的原理

逆流式自然通风冷却塔是依靠塔内外的空气密度差产生压差,使空气源源不断地流进塔内,在与热水传热、传质过程中带走热量。在无自然风状态下,空气从进风口四周均匀进入,穿过雨区、填料层、除水器层,通过塔筒出口排出。冷却塔填料断面气流速度一般为 $1.0\sim 1.2\text{ m/s}$ 进风口风速一般在 3.0 m/s 左右。当有自然风时,原来的均匀进风会受到破坏,产生不均匀进风。随着自然风速的增大,这种不均匀性也相应增加。即在冷却塔迎面风风速增大的同时,二侧进风会受到侧风影响而减小。由于塔中间挡风板的存在,不会形成穿堂风,背风面一般受到的影响相对侧面较小。自然风对冷却塔的影响最终反应在出水温度的变化上,一般来说,自然风越大,冷却效率越低,冷却塔的出水温度越高。国外对多个冷却塔的研究表明,当自然风速小于 1.0 m/s 时,自然风对冷却效率的影响是很小的,可以忽略不计。但当自然风速超过 3.0 m/s 时,这种影响就变得很大,应采取相应的措施,如塔中间加挡风板等。国外多个电厂冷却塔环境风速与出塔水温的关系曲线见图1所示。

(下转第 64 页)

压与负荷电压之间的压差、频差、相角差及断路器的分、合闸时间,对快切装置的动作时间进行合理的整定,应尽量在厂用负荷较小时进行厂用电源的切换。

2)如果采用并联切换,切换时间越短越好,最好采用基于快切装置的自动并联切换方式,减少 2 次冲击。建议厂用电源采用并联切换方式,为避免切换过程中循环功率的问题,并联切换之前最好能分析核实切换过程中的循环功率,进行控制,使循环功率最小,提高厂用电源切换的可靠性。

厂用电源切换的快速性及可靠性对发电厂的安全稳定运行极其重要,尤其是事故工况下的厂用电源切换,对减少厂用负荷损失,缩小事故范围意义重大。不同的厂用电源切换方式各有利弊,应根据各发电厂

的实际运行状况及接线方式,合理选择厂用电源的切换方式。

参考文献

- [1] 李子健. 600 MW 机组 6 kV 厂用电切换问题分析及对策 [J]. 电力建设, 2009, 22(3): 119—121.
- [2] 陈悦. 厂用电 6 kV 快切装置动作分析与改进 [J]. 华北电力技术, 2008, 10(6): 39—42.
- [3] 阮俊豪. 厂用电快切装置改造 [J]. 华电技术, 2008, 30(12): 66—69.
- [4] 肖仕武. 发电厂不同厂用电环并操作问题 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 142—145.

(收稿日期: 2010—07—10)

(上接第 35 页)

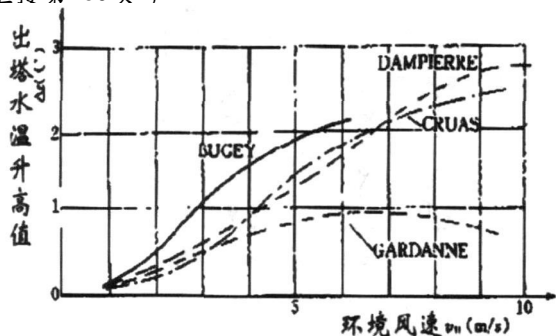


图 1 国外多个电厂冷却塔环境风速与出塔水温的关系曲线

冷却塔空气动力涡流调节装置即在逆流式自然通风冷却塔进风口周围每隔一定距离安装一道宽 6~7 m, 高度略低于进风口的导流栅墙(板)。由于导流板的存在,相当于冷却塔进风口外移了 6~7 m,也相当于把干扰区外移,使干扰区远离塔筒。同时由于导流栅墙(板)的整流作用,会有有效的改善大风对冷却塔侧面进风的影响,从而提高冷却塔的效率。采用空气动力涡流调节装置后,将发生以下变化:①水塔周边进风均匀度明显提高。②水塔周边进入水塔

5%~35%。④在冷却塔内部形成稳定的旋转上升气流,使空气较深地和均匀地穿透冷却水塔内部,减少了塔内的漩涡区。

3 经济效益

冷却塔出水温度降低,对发电厂经济效益的影响,主要表现在以下三个方面。

1)凝汽器背压降低,从而降低了汽机热耗;

对 600 MW 机组,每座冷却塔加装一套空气动力涡流调节装置,导向板采用现浇钢筋混凝土结构,总投资约 700 万元。冷却塔加装空气动力调节装置后,全年平均冷却水温降低约 1.5℃,折合每千瓦时降低标煤耗约 0.5 g 左右。

2)改善电厂辅助设备(发电机内冷水,机组油、空气、氢气冷却器、辅机轴承冷却系统等)的工作条件,提高辅机效率;

3)降低污染物排放,如灰渣、SO₂、NO_x 的排放,创造了社会效益及环保效益。

4 结 语

冷却塔空气动力涡流调节装置是一项新型的节能环保技术,符合国家倡导的节能减排政策。加快先进节能技术、产品开发和推广应用这也是国务院关于加强节能工作的重要指示。应该积极引进国外先进节能技术和管理经验,广泛与国际组织、有关国家和地区在节能领域的广泛合作。这也是加快中国节能减排的一项有效途径。

(收稿日期: 2010—06—22)

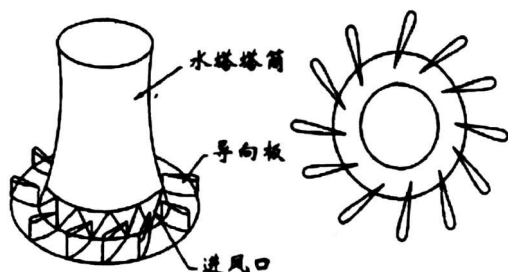


图 2 冷却塔空气动力涡流调节装置示意图

的空气(水平)区域扩大,一般超过了入风口高度,有的达到入风口高度的 2 倍以上。③水塔进风量提高

相间距离保护Ⅲ段在线路过负荷时的动作特性分析

刘高会¹, 王朝霞², 刘 敏³, 吴艳军¹, 师耀林¹, 王永峰¹

(1. 铜川供电局, 陕西 铜川 727031; 2. 安康供电局, 陕西 安康 725000; 3. 西安供电局, 陕西 西安 710032)

摘 要:结合不同原理构成的相间距离保护Ⅲ段在线路过负荷时是否会误动进行了分析, 并从继电保护的选择性方面对相间距离保护Ⅲ段的动作原理提出了要求及建议, 确保了继电保护整定计算的正确性和保护动作的选择性。

关键词:继电保护; 整定计算; 相间距离保护; 过负荷

Abstract It is analyzed whether the miss operation of interphase distance protection of stageⅢ will occur during line overload combining with different principles. The requirements and suggestions are proposed for the operating principle of interphase distance protection of stageⅢ in view of the selectivity of relay protection, which can guarantee the correctness of setting and calculation of relay protection and the selectivity of protection actions.

Key words relay protection; setting and calculation; interphase distance protection; overload

中图分类号: TM773 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003—6954(2010)05—0036—03

110 kV 线路的相间短路故障采用线路的相间距离保护来切除故障, 相间距离保护Ⅲ段的定值一般按照躲过线路的最大负荷电流进行整定, 随着双回线路、多回线路的并列运行及复杂的电网结构引起的运行方式多变, 相间距离保护Ⅲ段定值在计算时所采用的线路最大负荷电流有时很难确定, 在线路过负荷时相间距离保护Ⅲ段是否会误动是继电保护整定计算人员必须考虑的问题, 这里结合 110 kV 线路常见保护装置的動作原理, 对线路过负荷时相间距离保护Ⅲ段的動作特性进行了分析, 针对实际情况给出了解决方案。

1 相间距离保护Ⅲ段的整定

110 kV 电网继电保护一般采用远后备原则, 线路的相间距离Ⅲ段的定值整定应考虑与相邻线路、变压器的保护进行配合, 满足相邻线路、变压器的远后备灵敏度之外, 还需考虑躲过线路的最小负荷阻抗进行整定^[1]。最小负荷阻抗表示当母线电压处于电压波动允许范围内的最低值时, 线路上流过最大负荷电流时的负荷阻抗^[2]。最小负荷阻抗的计算如式(1), 按照躲过最小负荷阻抗整定的相间距离Ⅲ段的一次整定值^[3](以下所有的整定值均指一次整定值)见式(2)。

$$Z_{fh\ min} = \frac{0.9 \times U_e}{\sqrt{3} \times I_{fh\ max}} \tag{1}$$

$$Z_{dz\ Ⅲ} \leq K_k \times Z_{fh\ min} \tag{2}$$

式(1)、(2)中的 U_e 为额定电压, $I_{fh\ max}$ 为流过线路的最大负荷电流, K_k 为可靠系数, 按照《3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》中的相间距离保护Ⅲ段的整定原则, 要求取值不大于 0.7。图 1 中的双回线路西柳 1、2 保护采用 LH 变比为 600/5, 正常方式时两条线路并列运行带柳林变电站全站负荷, 最大负荷电流为 500 A。在系统事故情况下, 有可能通过西柳 1、2 线路向其它变电站输送负荷电流 400 A。因双回线的定值整定计算需要考虑单回线路运行的情况, 西柳 1、2 的相间距离保护Ⅲ段按照躲过 LH 允许的最大负荷电流 600 A 整定, 没有考虑在事故方式下且双回线路单回运行时的事故过负荷情况, 这种情况下单回线路的负荷电流将达到 900 A, 是相间距离保护Ⅲ段整定计算所采用的最大负荷电流的 1.5 倍。

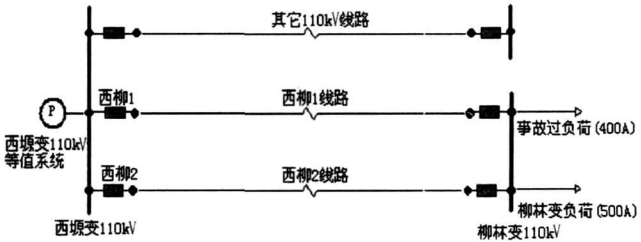


图 1 110 kV 线路示意图

2 相间距离保护Ⅲ段的動作情况分析

1) 采用方向阻抗继电器原理的相间距离保护Ⅲ

段的线路保护,主要有 RCS-941 系列、PRS-753 系列等保护装置,阻抗继电器动作特性见图 2。按照躲过线路最大负荷电流整定的相间距离Ⅲ段动作值为 $Z_{zd.Ⅲ}$,由此计算当负荷阻抗进入保护动作区时的临界动作值^[4],从陕西电力系统 110 kV 线路的实测参数可以看出,线路的正序阻抗角度一般在 $71^\circ \sim 79^\circ$ 之间,依据《电力系统电压和无功电力管理条例》中的规定,110 kV 及以上线路的负荷功率因数要达到 0.9 以上(对应的负荷功率因数角为 25.8°),因此设定方向阻抗继电器的动作灵敏角为 78° ,负荷的阻抗角为 26° 。由方向阻抗继电器的动作特性计算临界动作时的 Z_{fh} ,计算值见式(3),由计算结果可知在考虑系统电压的影响及满足继电保护可靠性要求的情况下,能够引起相间距离Ⅲ段误动作的最小负荷电流为 1.6 倍的整定计算时采用的最大负荷电流。因西柳 1、2 线路的相间距离Ⅲ段定值所采用的最大负荷电流为 600 A,因此保护所允许的最大负荷电流为 960 A,此时相间距离保护Ⅲ段不会误动作。

$$Z_{fh} = Z_{zd.Ⅲ} \times \cos(78^\circ - 26^\circ) = 0.616 Z_{zd.Ⅲ}$$

$$B \frac{1}{1.6} Z_{zd.Ⅲ} \quad (3)$$

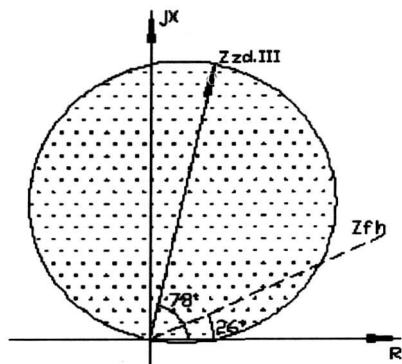


图 2 方向阻抗继电器动作特性示意图

2) 采用四边形阻抗继电器原理的相间距离保护Ⅲ段的线路保护,主要有 PSL620 等系列保护装置。如图 3 的四边形阻抗继电器为 PSL620D 线路保护的相间距离阻抗Ⅲ段的动作特性示意图^[5],动作范围为 F 线以上的四边形区域,四边形右侧边界线的角度与线路阻抗角相等。相间距离保护Ⅲ段的定值整定同式(2)。该装置的保护定值中需要整定距离保护电阻定值 R_{zd} ,来确定距离保护四边形特性的右边界,按照说明书的要求应可靠躲过本线路可能出现的最大负荷,并具有 1.5 倍以上的裕度,其整定值见式(4)。线路阻抗角同样设置为 78° ,负荷阻抗角设置

为 26° ,计算 Z_{fh} 与四边形右侧的交点处的电阻分量 R_{fh} 值,如式(5)所示。

$$R_{zd} = \frac{1}{1.5} \times Z_{fh} \cdot \sin \theta \quad (4)$$

$$R_{fh} = R_{zd} \times \left(1 + \frac{\sin 26^\circ \times \cos 78^\circ}{\sin 52^\circ}\right)$$

$$= 1.116 R_{zd} = \frac{1}{1.344} \times Z_{fh} \cdot \sin \theta \quad (5)$$

由式(5)可以看出,此时保护的最大允许电流只能达到相间距离Ⅲ段整定时所采用的最大负荷电流的 1.344 倍,西柳 1、2 线路的定值按照 600 A 整定时保护允许的最大负荷电流为 806 A,在事故过负荷时相间距离保护Ⅲ段会误动作。

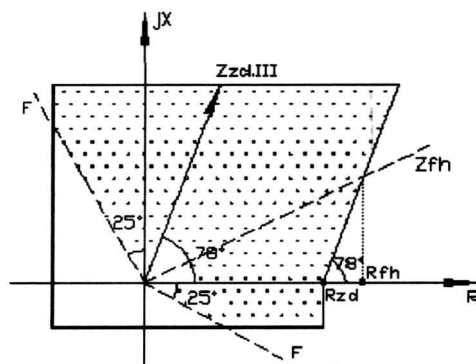


图 3 四边形阻抗继电器动作特性示意图

3 防范措施及方案

1) 采用方向阻抗继电器原理构成的相间距离保护Ⅲ段的保护装置,PRS-753 系列线路保护装置在线路过负荷时提出了一种解决思路^[6]。如果线路的实际负荷电流大于相间距离保护Ⅲ段计算所采用的最大负荷电流时,运行维护人员可以选择投入“负荷限制距离”定值,防止过负荷时相间距离保护Ⅲ段误动作。投入后的动作特性如图 4,图中阴影部分区域即为动作区域。图中标示的 R_y 即为“负荷限制电阻”定值, θ 为线路最大负荷时的负荷阻抗角。如果 θ 取值为 26° 时,计算见式(6),此时 R_y 等于 0.51 倍的 $Z_{fh} \sin \theta$, R_y 与 Z_{fh} 的连线形成负荷阻抗线,对负荷阻抗线下方的区域进行闭锁,防止过负荷时保护误动。同时认为负荷阻抗线的角度需要比负荷阻抗角稍大一些,以便躲过临界值。

$$R_y = \frac{\sin \theta}{\sin 60^\circ} \times Z_{fh} \cdot \sin \theta \quad (6)$$

2) 在线路的实际负荷电流大于相间距离保护Ⅲ

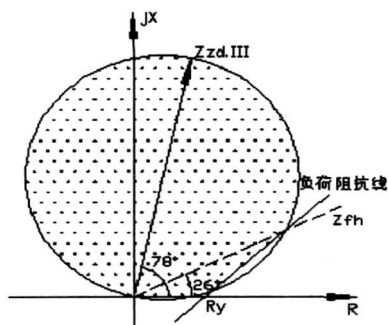


图 4 PRS-753D 的负荷限制方向阻抗继电器
动作特性示意图

段计算所采用的最大负荷电流时,考虑用相间距离保护Ⅲ段的测量阻抗角进行闭锁,因为线路在发生相间短路故障时,故障角一般在 70° 以上,而线路的负荷阻抗角一般为 26° ,考虑到一定的裕度,对测量阻抗角低于 30° 的相间距离保护Ⅲ段的阻抗继电器的动作区域进行闭锁,是一种值得尝试的方法^[7]。

3) 继电保护整定计算及运行维护工作,要熟悉不同厂家及不同产品的继电保护装置的动作原理及动作特性,能够从原理上进行分析,不同的保护装置其分析结果可能是不同的。

4) 以上从技术方面对线路过负荷时的相间距离保护Ⅲ段的动作原理提出了建议,在工作中要求继电保护整定计算人员必须熟悉各种事故预案及事故时

各条线路事故过负荷的具体情况,相间距离保护Ⅲ段的整定应可靠躲过事故过负荷时的负荷电流,这样相间距离保护Ⅲ段的保护范围会比只考虑正常最大负荷电流时的要小一些,对于 110 kV 保护远后备配置的原则来说,远后备的灵敏度会有所降低。

参考文献

- [1] DL/T 584-95, 3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程 [S]. 中国电力出版社, 2001.
- [2] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 崔家佩, 孟庆炎, 陈永芳, 等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1993.
- [4] 南京南瑞继保电气有限公司. RCS-943A 高压输电线路成套保护装置技术说明书 [C]. 2006.
- [5] 国电南京自动化股份有限公司. PSL 620 系列数字式线路保护装置技术说明书 [C]. 2004.
- [6] 深圳南瑞科技有限公司. PRS-753D 光纤分相纵差成套保护装置技术说明书 [C]. 2007.
- [7] 王梅义. 高压电网继电保护运行与设计 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.

作者简介:

刘高会 (1973), 男, 陕西富平人, 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: 2010-06-22)

(上接第 25 页)

范和统一电网的继电保护工作起到了极大的促进作用。并且该体系向全国推广的前景广泛, 该项目的进一步实施, 将带来巨大的经济效益和社会效益。

参考文献

- [1] 洪行旅, 郝文斌, 吴端华, 等. 基于集中式网络结构的继电保护定值管理系统总体设计 [J]. 继电器, 2009, 37 (9): 82-85, 96.
- [2] 吴晨曦, 盛四清, 杜振奎, 等. 地区电网继电保护整定计算智能系统的研究 [J]. 继电器, 2004, 32 (7): 35-38, 44.
- [3] 陈金富, 石东源, 段献忠. 电网继电保护整定计算原则自定义技术研究 [J]. 继电器, 2007 (Z1).
- [4] 朱浩骏, 蔡泽祥, 侯汝峰, 等. 面向对象的图像化地区电网继电保护整定软件研究 [J]. 电网技术, 2004, 28 (22): 20-25.
- [5] 葛耀中, 赵梦华, 彭 鹏, 等. 微机式自适应馈线保护的

研究和开发 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (3): 19-22.

- [6] 赖业宁, 韦 化, 文 杰, 等. 220~500 kV 电网继电保护整定计算专家系统 [J]. 继电器, 2001, 29 (3): 31-34.

作者简介:

杜凌翔 (1977), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统分析及电网运行管理等。

吴端华 (1964), 女, 本科, 工程师, 主要研究方向为电力系统分析及电网运行管理等。

何 东 (1972), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电力系统综合自动化等。

洪行旅 (1956), 男, 硕士, 副总工程师, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护及调度管理系统等。

郝文斌 (1976), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护、变电所综合自动化及调度管理系统等。

(收稿日期: 2010-03-02)

电网网络等值方法分析与讨论

常喜强¹, 周悦², 梁静³, 孙谊嫒¹, 姚秀萍¹

(1. 新疆电力公司 电力调度中心, 新疆 乌鲁木齐 830002;

2. 武汉市供电公司, 湖北 武汉 430000; 3. 新疆电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:在大区电网通过交流互联的趋势下, 电网规模日益增大, 电网理论计算分析数据量、数据规模海量增加, 数据误差的大量累积造成数据分析结果可能出现偏差, 为解决电网规模与计算时间、速度之间的矛盾, 减少数据误差, 计算误差带来的不利因素, 需对电网计算数据进行有效而实用的等值。针对新疆电网连入西北电网海量数据的增加, 为增加计算精度、缩短计算时间, 减少计算误差, 就网络等值化简方法进行了综述, 并在此基础上对即将与西北主网联网的新疆电网进行了等值, 并就等值前后的稳定计算进行了对比, 并就误差做了分析, 得到了相应结论。

关键词:电网; 网络等值; 新疆电网

Abstract: The interconnection of the large-area power grid has increased its scale. In order to solve the conflicts between the scale of the grid and the computing time, the effective and practical equivalence is the only solution. The grid equivalence methods are summarized. Based on the summarization, the equivalence of Xinjiang Power Grid which is about to interconnect with the Northwest Power Grid is carried out, and the results of stability calculation before and after the equivalence are compared. Then the error has been analyzed to obtain the corresponding conclusion.

Key words: power grid; network equivalence; Xinjiang Power Grid

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0039-05

0 引言

随着中国电网建设向着大机组、特高压、超远距离输电、大电网方向发展, 电网规模越来越庞大。特别是随着“三华”电网形成后。近年来, 尽管计算机内存容量有了飞速发展, 目前无法很好的解决电力系统计算中日益庞大的网络结构数据量庞大, 计算速度慢的矛盾, 但电网规模日益增大, 电网理论计算分析数据量、数据规模海量增加, 数据误差的大量累积造成数据分析结果可能出现偏差, 为解决电网规模与计算速度之间的矛盾, 减少数据误差、计算误差带来的不利因素, 于是就需要在计算前, 特别是在线计算这类对计算时间有严格要求的仿真计算前对实际电网进行等值简化, 将不需要详细研究的部分从系统中去除, 从而大幅降低求解问题的维数。在保证电网动态特性不变, 精度在一定范围内的情况下, 将电网规模减少, 减少数据规模误差, 缩短计算时间, 提高计算效率。

1 等值方法概述

在静态网络等值中, 常用的等值方法有 WARD 等值法以及 REI 等值法^[1, 2]。前者通过改进在等值后能有很好的有功和无功响应^[5], 非常适于实际应用^[3], 但是 WARD 等值及其改进等值法对于外网变化 (网络结果, 主要发电机节点等) 对内网的影响难以考虑, 导致难以反映实际电网运行情况^[5, 6]; REI 等值法的响应精度和稀疏性都不如 WARD 等值法, 并且具有固有的病态趋势不利于潮流收敛^[3]。

在动态等值中, 常用的等值方法有 3 种: 适应于离线计算的同调等值法^[7]和模态等值法^[8], 另外还有一种适应于在线计算的估计等值法。估计等值法基本是采用纯粹数学的方法进行, 其结果难以像同调等值法和模态等值一样具有清晰的物理概念, 但它计算速度快, 不需要外部系统详细数据, 适合作为在线计算的方法。在两种离线等值方法中, 同调等值法较模态等值法更适应于实际大型电力系统, 因而得到了更广泛的应用, 但由于其相关发电机聚合过程复杂,

因而会引入一定的拟合误差。

2 新疆电网数据等值方案

随着新疆电网与西北主网联网,新疆电网中出现了新的电压等级——750 kV。为了顺利开展新疆电网与西北电网联网计算分析,考虑到新疆电网与西北电网联网后,计算数据量大大增加,计算数值误差的增大,计算数据处理时间的增长,不利于安全稳定校核和电网主导特性的分析和研究,避免局部特性影响电网主导特性。

按照《电力系统安全稳定导则》、《国家电网公司安全稳定计算规定》中的有关网络数据等值的要求,开展了新疆电网数据等值的相关工作。以提高计算效率,减少数值计算误差及精度误差。

以同调等值法^[7]和模态等值法^[8]两种等值方法为基础,借鉴在线计算的估计等值法,将三者的优点有效结合,同时最大限度的避开此 3 种方法对有关条件的要求。充分考虑了工程实用性,在采用数学等值方法基础上,围绕电网运行实际特性,进行了修正。提出了新疆电网等值实用方案。

等值包括以下几个方面:电源等值、负荷等值、零序回路等值、无功补偿等值。

2.1 电源等值

针对不同的电源采取 3 种等值方法:直接与负荷抵消,等值为负荷,等值为电源,保留电源和负荷,如图 1 所示。

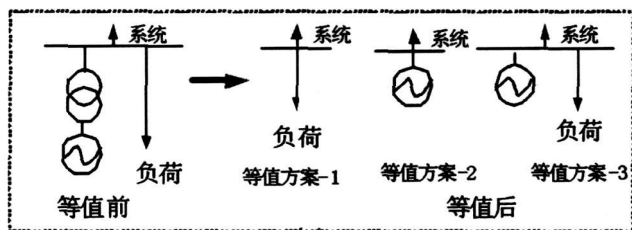


图 1 电源等值示意图

风电场等值,按照国家电网公司关于风电场接入的相关规定,将风电场按一定容量按照电力系统等值方法等值成若干台发电机组,并模拟仿真箱式变压器,以方便模拟和监视风电机组风电机组出口电压变化情况。

采用上述方法是综合考虑了发电机组在系统中的作用及稳定特性。

2.2 负荷等值

将负荷与补偿设备(低压电容、电抗器,高压电抗器)分别进行了相关的等值处理,考虑到负荷特性,低压电容、电抗器,高压电抗器的特性不同,进行了细化建模。

2.3 零序回路等值

在电力系统分析中,按照电网安全稳定导则要求,需进行单相瞬间故障进行校核分析,同时对于复杂故障如单相永久性故障也需在特定方式进行校核,同时对于非全相故障也需进行故障分析,这就牵涉到电网零序电网,即需要关注中性点接地方式和中性点接地网的等值。

在大多数省级电网中中低压网一般采取不接地系统。但是对于某些中压 110 kV 电网中,为保证零序保护的灵敏度,电网部分 110 kV 变电站接地。由于 35 kV 为不接地系统,故 110 kV 变电站仅 110 kV 侧接地。

新疆电网中地区电网基本为 220 kV 电网为核心,110 kV 电网为主干电网,大部分电源接入 110 kV 电网,110 kV 电网中部分变电站 110 kV 侧进行有效接地。因此 110 kV 等值时,需考虑零序电网的等值。

为分析等值方案,首先对 220 kV 变电站进行了研究和分析,220 kV 变电站中存在以下 3 种情况:高中压侧均接地,即 220 kV、110 kV 侧均接地;仅 220 kV 侧接地,110 kV 侧不接地;仅 110 kV 侧接地,220 kV 侧不接地。3 种情况在进行等值时需注意零序电网的变化,注意等值中的问题,存在不同的等值方案。

对于 110 kV 电网仅 110 kV 侧接地,35 kV、10 kV 侧不接地,为保证零序电网的完整性,对 110 kV 零序电网进行了等值和建模。保持原 110 kV 变电站主变压器中性点接地方式不变,增设中性点接地支路;设置和调整了相关的 R_0 , X_0 , R_0 , X_0 参数,如图 2。

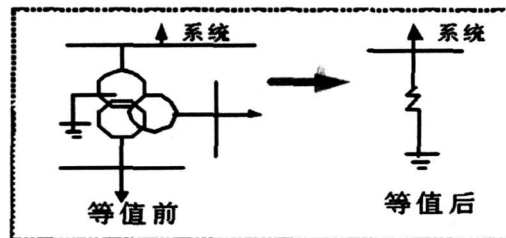


图 2 电源等值示意图

3 新疆电网网络等值

在对相关问题进行了研究和讨论分析后,对新疆

电网原电网中 110 kV 以下系统进行等值,其中简化如下。

- 1) 将接在 35 kV 及以下总容量在 15 MW 以下的电厂进行等效,采用上述四种电源峰值方法峰值;
- 2) 将 110 kV 变电站的主变压器、中低压负荷进行了等值,负荷挂在 110 kV 侧,去掉原主变压器支路,变电站低压电容、电抗器进行了等值;
- 3) 保持原 110 kV 变电站主变压器中性点接地方式不变,增设中性点接地支路 (设置了该支路正序阻抗、零序阻抗);
- 4) 负荷模型不变,40% 恒阻抗 +60% 电动机模型,调整了电动机定子电抗。

等值前后,新疆电网规模如表 1 所示。

表 1 等值前后新疆电网规模			
	等值前	等值后	减小百分比 /%
母线	4 287	2 770	35. 4
发电机	235	225	4. 3
负荷点	1 961	1 453	25. 9
交流线 (含接地支路)	2 646	2 480	6. 3
两绕组变压器	307	213	30. 6
三绕组变压器	651	171	73. 7

4 等值前后暂态稳定计算结果对比

通过对比多条线路发生单相瞬时、三相永久故障 (计算采用 PSASP), 系统等值前后曲线。发现各种故障后, PSASP 仿真得到的曲线都有一定偏差。以下 3 图列出 3 条典型曲线 (吐鲁番-金沙发生三相永久性故障时的功角曲线和线路有功功率和无功功率曲线)。

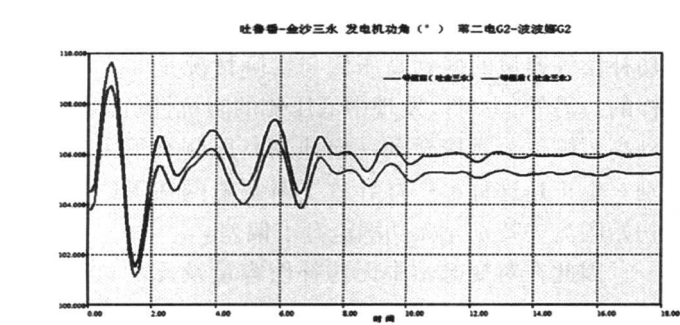


图 3 吐鲁番-金沙三相永久性故障发电机功角摆动

对比所有故障下等值前后曲线 (发电机功角、母线电压、线路有功、线路无功), 可以发现故障开始时, 图中等值前后两条曲线就有一定的偏差, 并且在该故障发生后基本保持不变; 另外对比线路传输的有功曲线和无功曲线, 可以发现各种故障时等值前后有

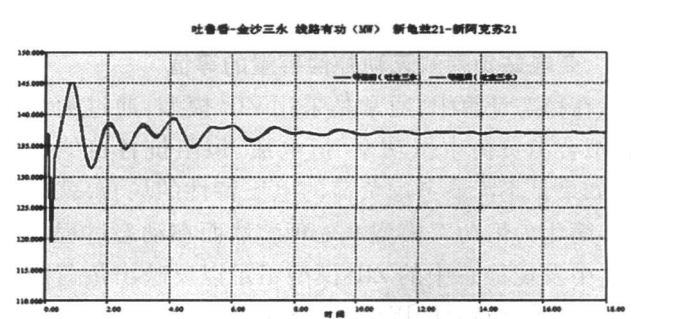


图 4 吐鲁番-金沙三相永久性故障线路有功摆动

图 5 吐鲁番-金沙三相永久性故障线路无功摆动

功潮流上的误差都比无功潮流上的误差小得多。说明等值后系统还是能非常好的描述整个系统的动态过程, 但是等值造成了初始潮流有了偏差, 并且这种偏差主要是由于等值的无功传输功率有偏差造成。

5 对于等值中各项简化的分析

5.1 电源 (小机) 的等值

针对新疆电网小电源较多的情况, 在等值过程中分别针对新疆电网小电源的情况、特性, 细化四种等值方法, 充分考虑了小电源在电网中的作用和特性, 如果等值中涉及的机组容量很小, 该区域电网整体或大部分成下网趋势, 考虑与负荷等值抵消为负荷, 如果等值中涉及的机组容量很小, 但相对与负荷较大。该区域电网整体或大部分成上网趋势, 为考虑发电机组的动态特性, 考虑与负荷等值抵消为发电机, 并对发电机进行等值处理。如果等值中涉及的机组容量与负荷均变化, 该区域电网上下网趋势均存在。考虑发电机与负荷并存。基于上述 3 种对小电源的等值, 获得较好效果, 这一点在仿真结果中得到了很好的验证。

此外由于新疆电网接入西北 750 kV 主网后, 小机所在系统在电网中所贡献的作用已大大减小, 其在电网中的调节能力有限, 因此在潮流中忽略或弱化小机的调压能力, 同时等值带来的误差在可以接受的范

围。

5.2 变电站负荷和无功补偿容量的等值

在稳态计算中,通常是采用 ZIP 模型,通过测量值,拟合出负荷中恒功率、恒电流、恒阻抗各自的比例,如果是不需要考虑负荷的电压特性的场合,就进一步简化为恒功率模型来处理。然而在动态过程的仿真中发现稳态中的 ZIP 模型不足以反映出负荷的动态电压响应特性,因此在动态仿真中又引入了更具有实际意义的电动机模型。由于针对主网的计算中负荷全部是成千上万个实际负荷在某条母线上的等效负荷,再加上实际负荷的随机性,在电网计算制定合理的负荷模型时只能通过统计拟合的办法来进行。另外,在将变电站中低压侧负荷等效到高压侧的过程中,由于变压器上的有功损耗非常小,简单时将中低压侧有功相加等效到高压侧的办法是可取的,但是由于变压器本身的无功消耗就非常大,用同样的办法来处理中低压侧无功则是不行的,需要对其认真分析和考虑。

通过仿真计算结果发现,特别是等值之后的网络无功分布较等值前有较大的误差,而引起这种变化的原因之一就是变电站无功补偿容量、无功负荷的等值,故需要对变电站无功负荷、无功补偿容量进行研究分析,以下对变电站无功补偿以及负荷等值进行分析说明。

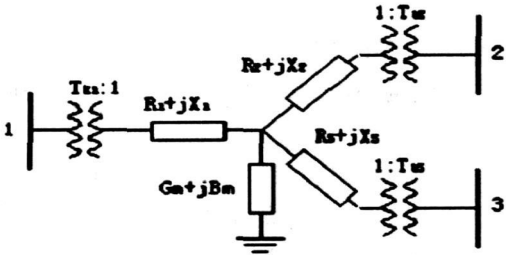


图 6 三绕组变压器等值电路图

对于上图所示三绕组变压器 (PSASP 中采用变压器模型,取中性点为标准变比侧,变压器对地支路接在中性点上),假设导纳为 b 的补偿电容接在变压器低压侧,中低压侧纯阻抗性质负荷分别为 y_{l2} 和 y_{l3} ,于是该变压器有如下方程。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1/T_{k1}^2 & y_2/T_{k2}^2 + y_{l2} & y_3/T_{k3}^2 + y_{l3} & y_1/T_{k1} \\ y_2/T_{k2}^2 + y_{l2} & b + y_3/T_{k3}^2 + y_{l3} & y_3/T_{k3}^2 & y_2/T_{k2} \\ y_3/T_{k3}^2 + y_{l3} & y_3/T_{k3}^2 & y_1 + y_2 + y_3 + y_m & y_3/T_{k3} \\ y_1/T_{k1} & y_2/T_{k2} & y_3/T_{k3} & y_1 + y_2 + y_3 + y_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $y_1 = \frac{1}{G_1 + j \cdot X_1}$, $y_2 = \frac{1}{G_2 + j \cdot X_2}$, $y_3 = \frac{1}{G_3 + j \cdot X_3}$,

$y_m = \frac{1}{G_m + j \cdot B_m}$ 。采用 WARD 等值对其进行化简,只保留高压侧母线。

$$I_1 = \left\{ \frac{y_1}{T_{k1}^2} \cdot \frac{\text{abs}\left(\frac{y_1}{T_{k1}^2}\right) \cdot (y_2 + y_{l2} \cdot T_{k2}^2) \cdot (y_3 + T_{k3}^2 \cdot (b + y_{l3}))}{K_1} \right\} \cdot U_1 + \left[\begin{matrix} \frac{y_1 \cdot y_2 \cdot T_{k2} \cdot (y_3 + T_{k3}^2 \cdot (b + y_{l3}))}{T_{k1} \cdot K_1} \\ \frac{y_1 \cdot y_3 \cdot T_{k3} \cdot (y_2 + y_{l2} \cdot T_{k2}^2)}{T_{k1} \cdot K_1} \\ \frac{y_1 \cdot (y_2 + y_{l2} \cdot T_{k2}^2) \cdot (y_3 + T_{k3}^2 \cdot (b + y_{l3}))}{T_{k1} \cdot K_1} \end{matrix} \right]^T \cdot \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,

$$K_1 = y_3 \cdot ((y_1 + y_m) \cdot (y_2 + y_{l2} \cdot T_{k2}^2) + y_2 \cdot y_{l2} \cdot T_{k2}^2) + y((y_1 + y_3 + y_m) \cdot y_2 + y_{l2} \cdot T_{k2}^2 \cdot (y_1 + y_2 + y_3 + y_m)) \cdot T_{k3}^2 \cdot (b + y_{l3}) \quad (3)$$

进一步的,如果假设这时中低压侧所带负荷全部是阻抗型负荷,即这时需要等值的网络是一个无源网络,这时可以去掉上式中后面与各侧注入电流相关的一项,并且忽略变压器激磁支路 (在实际的 PSASP 计算中也未考虑激磁支路),于是上式可以化为

$$I_1 = (y_{eq1} - y_{eq2}(b)) \cdot U_1 \quad (4)$$

其中, y_{eq1} 为与低压侧补偿容量无关的部分,为常量; $y_{eq2}(b)$ 为受低压侧补偿容量影响的部分。

$$y_{eq2}(b) = \frac{\text{abs}\left(\frac{y_1}{T_{k1}^2}\right) \cdot (y_2 + y_{l2} \cdot T_{k2}^2)^2 \cdot y_3^2}{(y_1 + y_3) \cdot y_2 + y_{l2} \cdot T_{k2}^2 \cdot (y_1 + y_2 + y_3)} \quad (5)$$

如果采用通常的直接将低压侧无功补偿等容量搬到高压侧,这时对应方程为,

$$I_1 = (y_{const} + b) \cdot U_1 \quad (6)$$

通过对比以上两式可知,显然简单的将低压侧无功补偿等容量的搬到高压侧与实际情况是非常不一样的。另外,也可以发现中低压侧的阻抗性负荷等值到高压侧也与直接合到一起挂到高压侧有很大的区别。也正是这种不一样导致了新疆电网在等值后的初始潮流中特别是无功潮流有了偏差。

因此在对变电站中无功补偿容量及无功负荷等值时,需要进行很好的处理以减少误差,最好严格的按照 WARD 或改进 WARD 等值法来进行,或者将其中之一进行量化等值,而另一种进行跟随修正等值。

本次新疆电网无功补偿容量、无功负荷等值时,为保证电网计算特性不变、最大限度的减少误差带来的影响,采用量化 + 跟随修正等值,由于采取负荷中的无功功率采取量化、无功补偿容量跟随修正量化等

值与无功补偿容量采取量化、负荷重的无功功率跟随修正量化等值不同,产生的误差也不相同,需要优化考虑,考虑到实际电网中无功补偿容量是已知部分,故采用先将无功补偿容量进行量化等值之后,在进行负荷的无功功率负荷进行跟随修正等值,方法简单可行,同时误差较小。采用此种方法等值之后,潮流计算及稳定计算的误差大大减少。

6 结 论

综述了网络等值方法,并将其应用到实际的系统中,针对新疆电网的实际情况,进一步优化了工程等值方法,并在应用中对比了等值前后的计算结果,并对误差进行了分析,并提出以下结论和建议。

1)进行电网稳定计算分析前,对电网进行等值时,应事先分析,综合考虑等值部分的情况,而采用不同的等值方法,以满足工程要求,不能一概而论,应将动态等值、静态等值综合考虑,将同调等值法和模态等值法,估计等值法有效结合,以不偏离电网动态等值为要求,必要时可不简化等值,但要试研究目的进行综合分析,避免局部特性过大或者过小。

2)在对系统电源进行等值时,需对要等值的小电源进行分类、研究、分析、细化等值方案,分类等值。

3)等值后系统还是能非常好的描述整个系统的动态过程,但是等值造成了初始潮流有了偏差,并且这种偏差主要是由于对无功的等值误差造成的。

4)对于负荷无功功率等值、低压无功补偿设备的等值需要认真分析,认真考虑,双变量的动态等值,不但关系到静态潮流、同时也关系到负荷的动态特

性。

5)对中性点接地变电站的等值需考虑零序回路的等值,以减少稳定计算时不对称故障的稳定特性的误差。

参考文献

[1] Tinney W F, Powell W L. The REI Approach to Power Network Equivalents. Proc of PICA Conference. 1977.

[2] 张伯明,陈寿孙,严正. 高等电力网络分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2007.

[3] 李健,李栋. 静态等值方法的综合分析与评价 [M]. 电气应用, 2006, 25(9): 97—101.

[4] 吴际舜. 电力系统安全分析 [M]. 上海:上海交通大学出版社, 1985.

[5] 刘绪斌,王良,闫有朋. 电力系统静态等值改进算法的研究 [J]. 华北电力计算, 2010(3): 1—5.

[6] 张海波,张伯明,王俏文,等. 不同外网等值模型对 EMS 应用效果的试验研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(3): 1—6.

[7] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2008.

[8] MA J, VALLE R J. Identification of Dynamic Equivalents Preserving the Internal Modes Ramirez. IEEE Power Tech Conference Proceedings. BER IN; Bologna. 2003: 415—419.

作者简介:

常喜强 (1976), 男, 高级工程师, 研究方向: 电网稳定与控制;

周悦 (1985), 男, 硕士研究生, 研究方向: 电网电压稳定和电网规划。

(收稿日期: 2010—06—08)

(上接第 18 页)

参考文献

[1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 2007.

[2] 魏明果. 实用小波分析 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 2005.

[3] Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets [M]. Philadelphia: Philadelphia City Press. 1992.

[4] 潘泉. 小波滤波方法及应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005.

[5] 谭剑,黄震,等. 基于小波变换的同杆并架双回路双端行波故障测距 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 51—55.

[6] 舒乃秋,胡芳,周静. 基于小波变换的含噪声行波信号奇异点检测 [J]. 电网技术, 2004, 10(28): 59—62.

[7] 吕艳萍,陈允平,刘珠明. 基于小波分析的超高压输电线路故障定位的研究 [J]. 中国电力, 2003, 36(2): 32—36.

[8] 吴军基,吴秋伟. 电力系统故障时刻提取的小波分析 [J]. 继电器, 2000, 28(12): 1—3.

[9] 覃剑,陈祥训. 基于小波变换技术的新型输电线路故障测距系统 [J]. 电网技术, 2003, 5(20): 45—47.

[10] 王先明,陶时伟,陶冶,蔡德礼. 小波变换奇异性在电力系统行波故障测距中的应用 [J]. 贵州工业大学学报, 2001, 3(30): 50—85.

(收稿日期: 2010—05—31)

电容式电流互感器额定电压下介质损耗试验分析

刘 超¹, 苏明虹², 何 松², 贾子鹏¹, 母红梅³

(1 河北省电力公司保定电业局, 河北 保定 071051;

2 四川省电力试验研究院, 四川 成都 610072; 3 广元电业局, 四川 广元 628000)

摘 要: 介质损耗测试是电容式电流互感器绝缘测试中十分重要的项目。但随着设备电压等级越来越高, 常规的 10 kV 介质损耗测试由于其电压与设备额定电压相差甚远, 其测试数据难以全面反映出电容式电流互感器的绝缘特性。为此提出电容式电流互感器在常规介质损耗测试中出现异常情况时, 追加进行额定电压下的介质损耗测试。以孙村 220 kV 变电站 201C 相和 211C 相两台电容式电流互感器为例, 介绍了其在额定电压下介质损耗测量的试验过程, 并结合试验数据对试验结果进行了相关的阐述和分析。

关键词: 电容式电流互感器 (TA); 额定电压; 介质损耗

Abstract: The dielectric loss test is a very important project in the insulation testing of capacitive current transformer. But along with higher and higher voltage class of the equipment, the voltage of conventional 10 kV dielectric loss test are far from the rated voltage of the equipment, so its test data can not reflect the insulation characteristics of capacitive current transformer comprehensively. Therefore, it is proposed that when there are abnormal phenomena in the convention dielectric loss test of capacitive current transformer, the dielectric loss test under the rated voltage will be carried out in addition. Taking two capacitive current transformers at 201 phase C and 211 phase C in 220 kV substation of Sun village for an example, the test process of dielectric loss measurement under the rated voltage is introduced, and the test results are described and analyzed based on test data.

Key words: capacitive current transformer; rated voltage; dielectric loss

中图分类号: TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0044-03

0 前 言

常规介质损耗测试属于预试项目, 在对 220 kV 变电站的 201C 相和 211C 相二台 220 kV TA 进行预试时发现, 其介质损耗有随温度升高而增长的现象。二台 TA 均为牡丹江互感器厂早期产品, 根据预试规程规定, 电容式设备的介质损耗不应随温度的变化而变化。常规介质损耗测试受 GARTON 效应影响比较严重。GARTON 效应是 M. Garton 教授发现在含有纸的绝缘介质 (或塑料以及油的混合介质) 中, 在较低电压下介质损耗正切值的变化可以比较高电压下的值高 1~10 倍。由于设备额定电压在 170 kV 以上, 10 kV 测试电压仅为额定电压的 6%, 受 GARTON 效应影响, 10 kV 下测试数据无法判断设备绝缘状况。为此, 作者对两台 TA 进行了其随电压变压的介质损耗试验, 以进一步了解其绝缘性能变化状况。

1 额定电压下介质损耗测试

1.1 孙村 201C 相

预试时, 对 201C 相进行测量, 其 10 kV 下介质损耗为 0.861% (30℃), 随后即对其进行了额定电压介质损耗的试验。

220 kV 级 TA 额定电压下的介质损耗试验应升压至 146 kV。在现场测试时, 由于 TA 两侧并联有断路器和隔离开关, 电源容量限制了电压的提升, 于是拆除了开关侧联线, 在电压升至 115 kV 时介质损耗值已升至 1.289%, 远远超过了试验规程中规定的介质损耗值不超过 ±0.3% 的标准, 此时试验电压已难以提升, 该 TA 在不同试验电压下的测试值如表 1 所示。

1.2 孙村 211C 相

预试时 10 kV 电压下 211C 相介质损耗为 0.916% (35℃), 已超过标准规定值 (0.8%)。鉴于

表 1 201C相 TA介质损耗值随试验电压变化情况

试验电压 /kV	10	24.6	36	52	64.3	75.3	86.3	110	115
$\tan\delta(30^{\circ}\text{C})$	0.861	0.895	1.07	1.172	1.176	1.188	1.194	1.286	1.289

表 2 211C相 TA介质损耗值随试验电压变化情况

试验电压 /kV	10	22	32	45	56	65	76
$\tan\delta(32^{\circ}\text{C})$	1.402	1.466	1.481	1.497	1.526	1.490	1.458

续表 2

试验电压 /kV	86	98	109	119	128	135	146
$\tan\delta(32^{\circ}\text{C})$	1.422	1.440	1.470	1.445	1.401	1.366	1.210

201C相测试时,断路器、隔离开关和其它杂散电容的影响,于是将 211C相 TA换下,在无电场干扰、无并联电容的情况下进行额定电压下介质损耗试验,结果如表 2所示。

2 额定电压下介质损耗测试结果分析

2.1 理论分析

介质损耗随试验电压的变化关系如图 1所示。

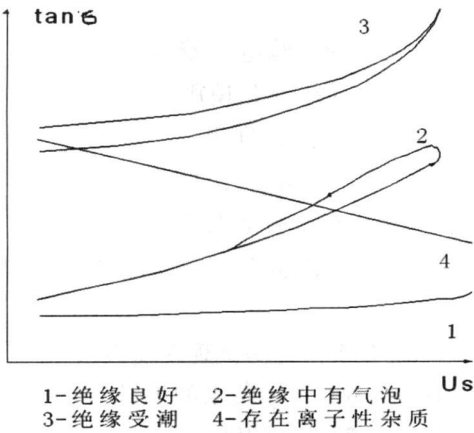


图 1 介质损耗随电压变化示意图

电容式电流互感器是油纸绝缘结构,纸是主要绝缘,油作为填充空隙使得组合绝缘性能大大提高。一般情况下,电压较低时介质的损耗仅有电导损耗和少量的极化损耗,处于较稳定状态,当电压升高到一定值时介质中产生游离放电,介质会急剧放电,损耗增加。图 1中所示曲线 1和 2是绝缘正常与存有气泡的对比曲线,可见如绝缘中有气泡,在较低电压下介质损耗值将有明显的增长,当电压下降时,放电随时间和电压的增加而增加,其介质损耗值可能会高于升压状态下的介质损耗值至放电结束。当绝缘受潮后,水的介电常数远远高于油和绝缘纸,使合成的介电常数增加,增加了设备的电容量,提高了整体有功分量,所以介质损耗在较低电压下开始升高,如曲线 3。随着电压升高,介质损耗继续增大,

降压时由于介质损耗增大使介质发热,损耗会高于升压时同试验电压下的介质损耗值。

曲线 4是油纸绝缘中存在杂质离子时介质损耗随试验电压变化的曲线。在工频交流试验电压下,测得的介质损耗包括电导损耗和带电粒子的空间电荷极化损耗(杂质离子和夹层绝缘结构引起的),由于杂质离子的存在使极化损耗远高于电导损耗,所以介质损耗比绝缘良好的介质损耗高。随电压的升高,损耗增大,同时,较高的损耗引起介质发热严重,加速介质的分子热运动,分子与离子碰撞的概率增大,阻碍离子的极化程度,使极化损耗下降,如果极化损耗的减小大于电导损耗的增大,则会使整体介质损耗呈现下降的趋势。

2.2 试验数据分析

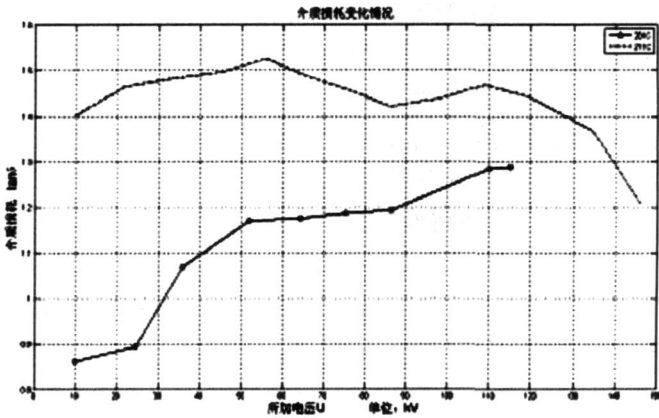


图 2 所测设备介质损耗随电压变化情况图

1)根据测得的数据,绘制曲线如图 2所示。由曲线分析 201C相是绝缘受潮或绝缘中存有气泡引起的,而 211C相是由离子性杂质引起的,但这两台设备的油色谱和微水试验均未超标,只是各气体含量较投运初期有所增长。两台设备为同一厂家、同型、同期产品,产生缺陷的时间和测试规律也相同,所以认为绝缘状况也应大致相同。认为其主要是设备制作过程有缺陷,干燥不彻底,内绝缘中留有少量水和设备中的离子性杂质引起的,而不是受潮。根据作者

试验经验判断,实际设备的绝缘状态是复杂的,可能有多种缺陷同时存在。曲线的表现不是单调上升和下降,可能会产生波动的现象,在对试验结果进行分析时应多方面考虑外界因素的影响。

2)211C相与 201C相测试结果有很大差异,考虑可能是以下原因引起的:201C相停运后,在设备架构上进行试验,电压升高的过程中只升到 115 kV,未能看到拐点,但并不代表不存在离子杂质,也有可能是电压升高产生的电导损耗大于极化损耗降低的值,使介质损耗与电压的关系曲线呈上升的趋势。

测试 211C相时,设备经过平放运回、静置 5 天,油的状态有很大改变。在运行中由于电场作用,杂质、水分附着在电容屏表面、屏间套管内壁,运输中油的扰动将附着在固体绝缘表面的离子杂质、游离碳悬浮,长时间静置沉积,大量溶胶聚集,试验时离子的空间电荷极化严重,使测得的介质损耗增大(由 0.916%增加到 1.402%)。由于 211C相共测试 14 个点,连续测试的时间较长,设备的发热使离子杂质的极化损耗降低,所以在加压的后程可以看到介质损耗明显下降。

3)离子性杂质使介质损耗随温度变化而变化。油纸电容型设备的主绝缘电容屏是一层密度高的绝缘纸和一层薄铝箔交替绕在芯子上的,一般为十层左右的电容屏。在制造干燥过程中,内层绝缘中的气泡和水分不易扩散到外面,如果设备出厂前干燥不彻底,则内层绝缘将残留大量气泡和水分。在投运初期这些杂质不会影响介质损耗的测量结果,但经过长期大负荷运行,设备将发热,分子的热运动使气泡和水分缓慢从内层析出。少量的气泡不致绝缘的损坏,但会在油中产生放电使油分离出气体、水、杂质,随着运行时间加长,积累效应使油中气体、水分增多。

水容易吸附离子性杂质,以溶胶的状态悬浮于油中。停电试验时,如果温度高,油和纸中溶解的水多,离子性杂质多处于悬浮态,空间电荷损耗严重,10 kV 试验电压下测得的介质损耗会很高;相反,温度低,形成的溶胶多(质量大),离子转向困难,降低空间电荷损耗,使测得的介质损耗相对较低。

这两台设备是该厂早期的电容式电流互感器,在

绝缘材料和生产、干燥工艺上可能有不完善的地方,而现在的干燥工艺比以前有较大提高,同时在铝箔上打孔,这样可以使水分顺利地向外扩散,提高干燥效果。

以上分析表明:根据介质损耗随电压变化的曲线,设备在不同电压下的介质损耗变化情况,可以判断设备内部缺陷存在的原因,为进一步提高设备的绝缘性能提供了真实的原始资料。额定电压下介质损耗试验对检出设备绝缘缺陷是非常有效的。

3 总 结

1)在进行额定电压介质损耗试验设备的选型时,试验设备能满足被试品电容量的要求,包括对现场试验时各种不利因素对试验设备容量的影响应考虑在内。

2)试验时应均匀分段加压,使绘制的曲线平滑,最好在试验时做回归曲线的测试,以验证是受潮或放电引起的绝缘缺陷。

3)由于本试验的试验电压较高,为排除高压引线对地杂散电容的影响,尽量使用短的屏蔽线。

4)理论分析是在设备理想状态下的结果,但实际的一次设备绝缘状态是复杂的,一台设备可能有多种缺陷同时存在,在对试验结果进行分析时应多方面考虑外界的影响因素,要同时兼顾设备内部的实际环境下进行综合分析。

5)额定电压介质损耗测试现在受设备的限制试验有一定的困难,随着设备技术的提升,考虑多采用额定电压介质损耗测试,可得到更加准确的设备绝缘性能数据。

参考资料

- [1] 工阎春雨,陈志勇,高骏.电流互感器现场高压介损测量[J].高压电器,2009,45(2):87—89.
- [2] 陈志勇,阎春雨.电流互感器高电压介质损耗因数的测量[J].河北电力技术,2005,24(5):33—34,51.
- [3] 常美生,郝立俊.电容式电压互感器和介损试验的分析[J].电力学报,2009,24(1):28—30,61.

(收稿日期:2010—06—10)

欢迎投稿

欢迎订阅

ABB 主变压器保护跳旁路开关出口回路的改进

沈彦, 林天佑
(温州电力局, 浙江 温州 325000)

摘要:就 500 kV 瓯海变电站 ABB 主变压器保护运行中遇到的由于跳闸出口回路设计所引起的保护选择性问题进行分 析, 并根据运行经验提出了加装出口回路切换开关与采集主变压器旁路闸刀分合状态这两种提高该保护选择性的 解决办法, 并根据现场实际情况分析比较了这两种方法的优劣。

关键词: ABB 主变压器保护; 改造; 选择性; 切换开关; 旁路闸刀

Abstract: A loop selectivity limitation in tripping outlet circuit of ABB main transformer protection which has been used in 500 kV Ouhai substation is analyzed. According to the experiences, two methods are proposed to enhance the selectivity of the protection. One method is adding the switch of tripping outlet circuit and the other is collecting the status of bypass isolators. Finally, the strong and weak points of these two methods are compared according to the actual situation.

Key words: ABB main transformer protection; reformation; selectivity; changeover switch; bypass isolator

中图分类号: TM772 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0047-03

0 前 言

变压器保护是保证电网稳定运行的重要设备, 要求其性能安全可靠, 能快速灵敏地切除故障。瑞典 ABB 公司生产的主变压器保护目前广泛应用于 500 kV 变电站, 在实际运行中存在不少问题, 现将 500 kV 瓯海变电站主变压器保护在运行中遇到的一些问题和解决办法提出, 希望以此来抛砖引玉。

1 改造前存在的主要问题

500 kV 瓯海变电站的 220 kV 系统采用双母双分段带旁路接线, 所以主变压器 220 kV 侧的倒闸操作涉及旁路开关代主变压器 220 kV 开关。500 kV 瓯海变电站三台主变压器均采用 ABB 的主变压器保护, 虽然保护型号不尽相同, 但 ABB 保护的跳闸出口回路设计基本一致, 均采用插头闭锁式回路。现举 500 kV 瓯海变电站 3 号主变压器为例, 其 220 kV 系统接线如图 1 所示。

220 kV 旁路开关正常在运行状态存在三种运行方式, 一是母线对旁母充电, 二是旁路代线路运行, 三是旁路代主变压器 220 kV 开关运行。ABB 主变压器保护电气量保护出口回路对跳开 220 kV 旁路开关

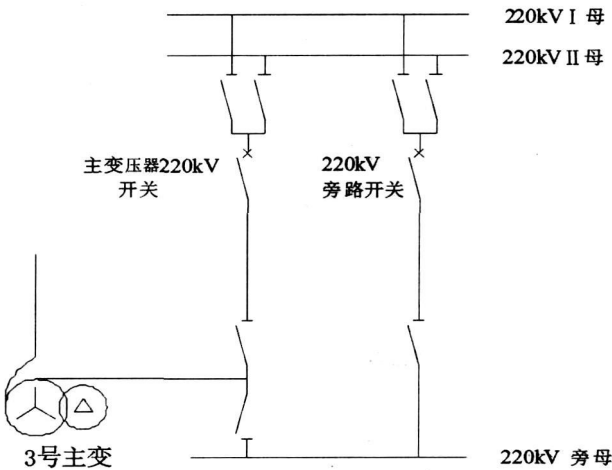


图 1 3 号主变压器 220 kV 侧接线

TC1 和 TC2 是通过保护屏上 U36. 131. 101. 7 ~ U36. 131. 101. 12 共 6 个插头来闭锁, 非电气量保护出口回路对跳开 220 kV 旁路开关 TC1 和 TC2 是通过保护屏上 U36. 101. 125. 9 ~ U36. 101. 125. 14 共 6 个插头来闭锁 (如图 2 所示)。正常情况下该 12 个插头均插入, 只在旁路开关代主变压器 220 kV 开关运行时拔出, 同时插入主变压器保护跳主变压器 220 kV 开关跳闸出口插头。主变压器的出口回路仅通过操作时运行人员手工插拔闭锁插头进行切换。ABB 保护的插头细小, 旁路开关和主变压器开关的出口插头均在一个插件上, 如果插头操作错误或漏插拔, 一旦主变压器保护动作, 即有可能在旁路开关对母线充

电或带线路开关时误跳开旁路开关,造成事故的扩大,丧失了主变压器保护的选择性。从设计上说目前的跳闸出口回路对操作人员的依赖性过大,保护的选择性极易因操作人员的疏忽而丧失。

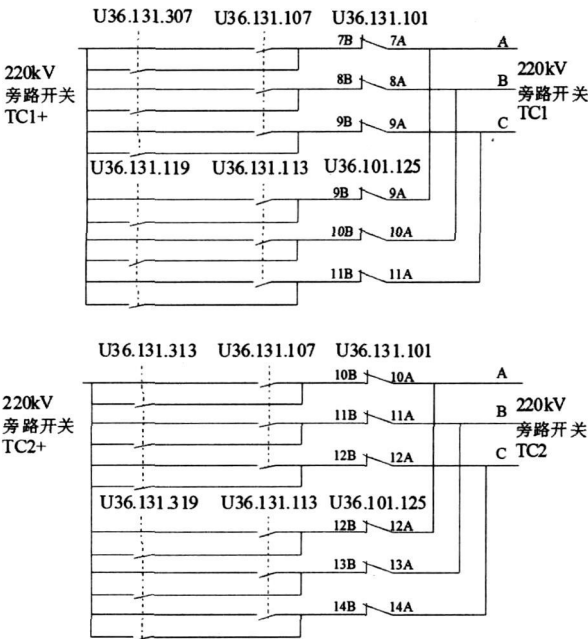


图 2 500 kV 瓯海变 3 号主变压器旁路开关跳闸出口回路

2 改造原则及主要思路

针对前面所述的问题,提出了以下几点改进措施。

2.1 增加操作切换开关

在图 2 所示回路中,一旦主变压器电气量保护动作, U36. 101. 307、U36. 131. 107、U36. 131. 313 继电器动作,如果对应的插口中没有插头,则旁路开关或主变压器开关跳闸回路接通,开关跳开。为增加主变压器保护的选择性,可在主变压器保护的旁路开关跳闸出口回路正电源侧加装操作三位置切换开关 SA,如图 3 所示。切换开关位置 1 对应 3 号主变压器 220 kV 开关正常运行状态,此时 3 号主变压器 220 kV 开关两路跳闸回路正电源开放,主变压器保护跳旁路开关回路正电源断开;切换开关位置 2 对应 3 号主变压器在旁路带操作过程中旁路开关与主变压器 220 kV 开关均合闸时状态,此时跳旁路开关与跳主变压器开关回路正电源均开放;切换开关位置 3 对应旁路开关代主变压器开关运行状态,此时主变压器保护跳旁路开关回路正电源开放,跳主变压器 220 kV 开关正电

源被闭锁。为便于检查操作的正确性,可增加监视灯 L1、L2。

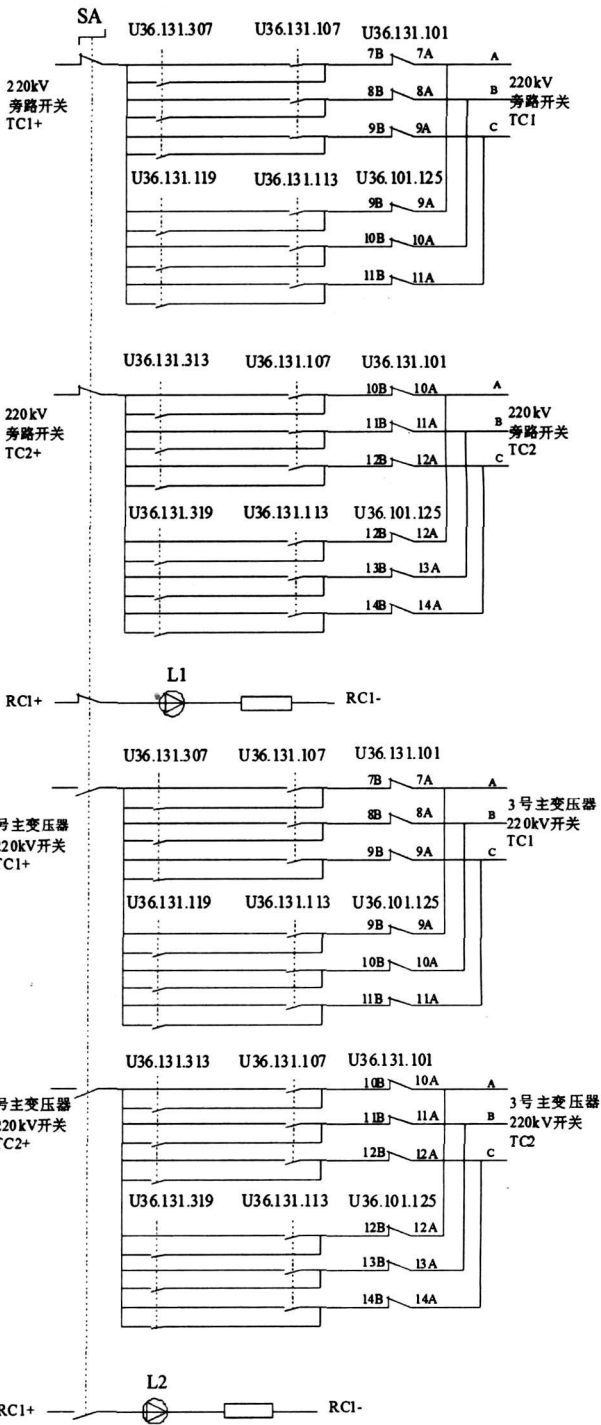


图 3 按方案 1 改造后的跳闸出口回路

2.2 引进主变压器 220 kV 旁路闸刀辅助接点

旁路开关代主变压器 220 kV 开关运行状态的显著特征是主变压器 220 kV 旁路闸刀合闸。在主变压器保护跳闸回路中引入主变压器 220 kV 旁路闸刀位置开关量 (如图 4) 即能保证主变压器保护的二次状态与一次状态对应。当执行“旁路开关代主变压器

220 kV 开关运行”操作任务时,操作完“合上 3 号主变压器 220 kV 旁路闸刀”后,主变压器 220 kV 旁路闸刀常开辅助接点闭合,常闭辅助接点断开,置位双位置中间继电器。使用中间继电器常开接点开放主

变压器保护跳 220 kV 旁路开关跳闸回路。同理,当拉开 3 号主变压器 220 kV 旁路闸刀后,主变压器 220 kV 旁路闸刀常开辅助接点断开,常闭辅助接点闭合,复位双位置中间继电器。使用中间继电器常开接点闭锁主变压器保护跳 220 kV 旁路开关跳闸回路。

3 两种方案的特点与比较

1)方案 1 增加了一个闭锁操作切换开关,其优点是:①改造工作量小,回路接线简单;②增加的监视灯使操作的正确与否更加直观,减少操作失误的可能性,方便运行人员巡视观察;③闭锁可靠,增强保护的选择性,减少保护误动作的概率。缺点是:保护的选择性仍旧依靠操作人员把关,无法彻底摆脱人为因素影响。

2)方案 2 引进了主变压器 220 kV 旁路闸刀位置开关量,其优点是:①主变压器保护的选择性由二次回路自动控制,杜绝了人为因素的影响;②引入主变压器旁路闸刀位置开关量,保证一二次回路状态一致。缺点是:①需增加中间继电器及引入主变压器旁路闸刀辅助接点,改造工作量较大;②对主变压器旁路闸刀辅助接点的依赖性较大,但通过使用双位置继电器可增强此方案的可靠性。

4 结 语

对于主变压器保护,其保护动作的选择性尤其重要。上述改进 ABB 主变压器保护跳旁路开关出口回路的方法,解决了目前 ABB 主变压器保护运行中的一些弊端,减少了主变压器保护动作误跳旁路开关的概率。

作者简介:

沈 彦 (1975),女,工程师,从事电气运行技术工作;
林天佑 (1984),男,助理工程师,从事电气运行技术工作。

(收稿日期: 2010—03—22)

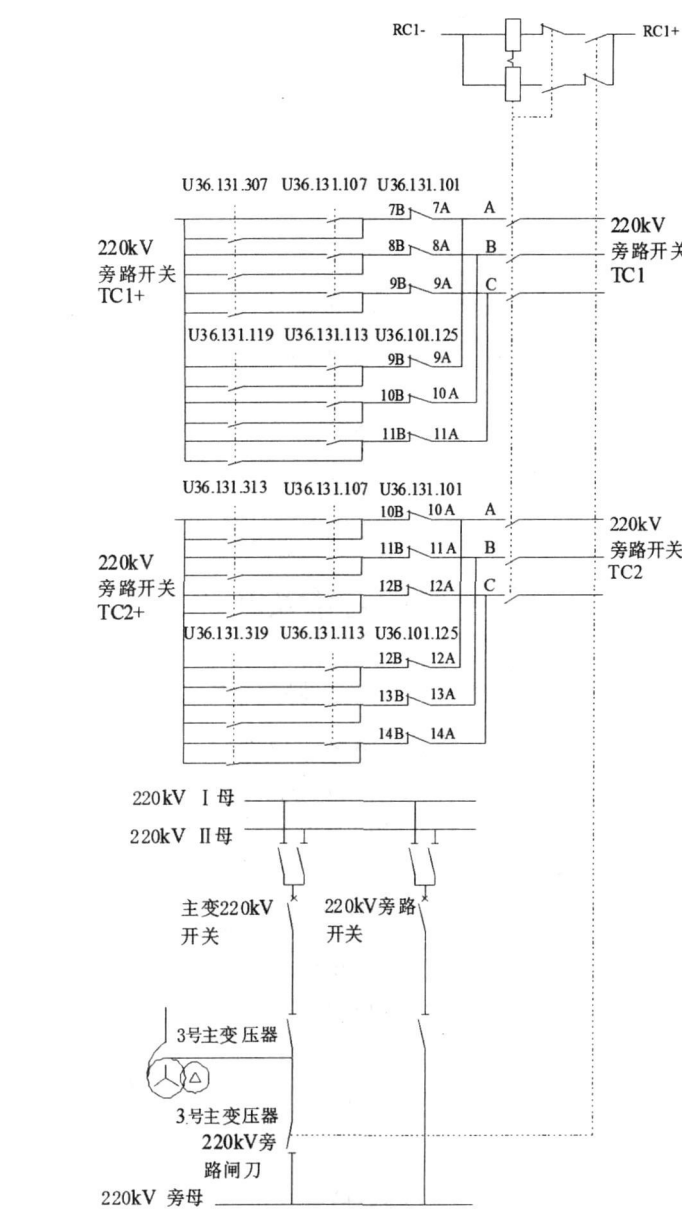


图 4 按方案 2 改造后的跳闸出口回路

中国电力行业实行低碳经济政策计划简述

哥本哈根会议上,中国承诺,到 2020 年单位 GDP 的二氧化碳排放将比 2005 年下降 40% ~ 45%。这一具有挑战性的目标,表明中国走“低碳”发展道路的的决心和信心。发改委人士表示,下一步发改委将把这个目标落实在地方与行业的发展规划中,并准备试行建立碳排放强度考核制度。

在这些特定的行业和地区,发改委人士表示,还可以探索利用市场手段减少温室气体排放,开展小范围的碳交易试点。目前看来,电力、石油、化工等行业入选的可能较大。因为这些行业的企业多是大型央企,从收益、利润来讲,是在整个集团内进行核算,集团内有效率较高的电厂,也有效率较低的,可通过集团内部的碳交易来推进节能、控制二氧化碳排放。在此基础上,发改委初步计划每年都发布一个报告,把这一年来中国应对所采取的政策措施和取得的成效进行系统介绍。

大型发电厂封闭母线绝缘低的解决办法

林 睿, 黄旭丹

(广东省电力设计研究院电控部, 广东 广州 510663)

摘 要:分析了如何解决目前大型发电厂封闭母线绝缘低的对策, 并从技术分析、经济比较等方面对 DMC 绝缘子和传统瓷绝缘子特性进行阐述, 并以国华盘山电厂 600 MW 机组为例, 说明了更换 DMC 绝缘子的实际情况。

关键词:封闭母线; DMC 绝缘子; 绝缘水平

Abstract: The solutions for improving the insulation level of enclosed bus are analyzed. The DMC insulators are compared with the traditional porcelain insulator as viewed from the technical analysis and economic comparison, and their characteristics are described. Taking 600 MW units of Guohua Panshan Power Plant for example, the actual situation of the replacement of DMC insulator is given.

Key words: enclosed bus; DMC insulator; insulation level

中图分类号: TM853 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0050-03

根据封闭母线结构, 母线箱只有普通的封闭作用, 对外界灰尘、潮气的进入并不能有效分隔, 目前大多数电厂中, 20 kV 封闭母线和 6 kV 封闭母线均使用传统的瓷绝缘子, 但由于瓷绝缘子表面易吸附潮气形成水膜及易吸附盐份和灰尘, 使爬电比距变小从而使电气绝缘下降, 易发生爬电闪络使绝缘破坏导致电气短路事故。

广东省某电厂地处沿海, 气候湿度大, 盐腐蚀较重, 封闭母线绝缘值降低明显 (特别是停电后设备温度下降), 已对安全生产构成明显影响。

2003 年 9 月 10 日, 该电厂 2 号机组厂用电第一次受电, 对 6 kV 备用电源 4 条分支封闭母线分别测绝缘, 绝缘值不合格均在 $2\text{ M}\Omega$ 以下 (最低合格值应在 $6\text{ M}\Omega$ 以上), 对受电构成影响, 后经集体分析讨论后受电。原因为封闭母线绝缘子受潮所致。

2004 年 3 月 18 日, 该电厂 2 号机组启动前对发电机一变压器 20 kV 系统测绝缘不合格, 仅为 $4\text{ M}\Omega$ (发电机连接封闭母线后最低合格值应在 $20\text{ M}\Omega$ 以上)。将发电机与封闭母线的 168 根软连接线全部拆开, 测发电机 $100\text{ M}\Omega$ 合格, 属于封闭母线绝缘子受潮所致。

由于绝缘子受潮造成的绝缘值降低可能掩盖真正的绝缘故障, 故上述对绝缘子受潮的判断存在着冒险性, 已对设备安全构成威胁。

1 提高母线绝缘的对策及其优缺点

根据以上实例分析可知, 6 kV 封闭母线绝缘低的直接原因是由于绝缘瓷瓶表面污秽并吸附潮气或凝露, 形成了电流泄漏通道而引起的。因此要解决这个问题必须保持瓷瓶表面的清洁或干燥, 或增强母线与瓷瓶间的绝缘层。

1.1 在封闭母线箱内安装加热带

该方案主要在封闭母线箱内从头至尾形成环形布置绝缘加热带, 在每次启动机组前提前 $2\sim 3\text{ d}$ 投入加热, 利用电阻丝发热对封闭母线进行干燥。施工相对简单、成本适中; 但需提前投入加热, 有时难以预料启机时间则投入加热的时间难以确定, 但由于封闭母线一般较长, 靠电伴热装置保持封闭母线内导体干燥度来提升封闭母线绝缘水平效果并不明显, 如加大电阻丝则会降低导体的绝缘水平, 甚者击穿封闭母线的绝缘。

1.2 母线表面包覆热缩材料

该方案主要在三相母线上包覆热缩绝缘材料, 在母线和瓷瓶间增加一个绝缘层, 从而提高封闭母线的绝缘。该方案不需耗能, 不需在启机前提前准备; 而缺点是改变了母线的固定、支持结构, 减弱了母线抗电动力性能, 有一定的安全隐患; 工程投资相对较大、成本较高, 且绝缘热缩材料对母线的散热会有

一定妨碍,在正常运行中母线的温升会增加;需将各段母线全部拆卸才能施工,因而施工作业量大,难度大,施工费用也高。

1.3 瓷瓶表面喷涂 RTV 涂料

RTV 涂料喷涂在瓷瓶上后,可防止瓷瓶上水膜的形成,减少凝露的产生。但 RTV 涂料使用数年后老化后需清理重新喷涂,且封闭母线内空间狭小,绝缘子安装密度大,喷涂及清理 RTV 涂料均很困难。

1.4 使用 DMC 绝缘子

1.4.1 DMC 绝缘子结构特点

DMC 全称为不饱和聚脂玻璃纤维增强团状模塑料,玻璃纤维长度为 8~13 mm,适用于模塑结构件、镶嵌件,具有机械强度高、电气性能优良、收缩率低、阻燃、耐电弧、高耐电起痕性、憎水性强、耐热等特性,制品可在 155℃ 情况下长期使用。主要有以下几种类型:4342(DMC-1)型主要用于高机械强度、高电气强度要求的电器、电机等电工产品的绝缘结构部件;4344(DMC-2)型用于对机械强度、电气强度要求较高的电器、电机等电工产品的绝缘结构部件;4332(DMC-3)型用于对机械强度、电气强度要求一般的电器、电机等电工产品的绝缘结构部件。封闭母线绝缘子均采用 4342(DMC-1)型材料。该 DMC 绝缘子抗盐蚀情况较好,试验中在一个桶内清水中加入大量食盐,将一个成品 DMC 绝缘子浸泡 20 d 以上,取出该绝缘子检查,该绝缘子表面擦拭后光洁平整无腐蚀。

1.4.2 使用 DMC 绝缘子后封闭母线绝缘性能的变化

爬电比距增加明显,针对瓷绝缘子结构缺点,DMC 绝缘子优化结构设计:20 kV 绝缘子去掉母线侧端部铝罩,由 DMC 材料一次成型,且裙片由瓷绝缘子的 9 片增至 13 片,由普通型改为防污型(大小伞

裙),增加了爬电比距;6 kV 绝缘子去掉母线下部铝夹件,由 DMC 材料一次成型,增加了爬电比距;爬电比距对比如下(20 kV 按 24 kV 考核、6 kV 按 7.2 kV 考核)。

技术协议要求:24 kV 绝缘子≥20 mm/kV
7.2 kV 绝缘子≥25 mm/kV
瓷绝缘子:595 mm/24 kV=24 mm/kV
200 mm/7.2 kV=27 mm/kV
DMC 绝缘子:700 mm/24 kV=29 mm/kV
280 mm/7.2 kV=38 mm/kV

以上结果表明,DMC 绝缘子和瓷绝缘子比较,20 kV DMC 绝缘子爬电比距增加 5 mm/kV,6 kV DMC 绝缘子爬电比距增加 11 mm/kV,在安装尺寸不变的情况下增加了绝缘水平。

瓷绝缘子与 DMC 绝缘子比较见表 1。

2 电厂更换 DMC 绝缘子使用情况

由于 DMC 绝缘子在结构性能上的优越性,该绝缘子已在多个电厂迅速推广及应用,从 2000 年至今已陆续有内蒙古达旗电厂 330 MW 机组、大唐盘山电厂 600 MW 机组、山东黄岛电厂 210 MW 机组等电厂封闭母线采用 DMC 绝缘子,现以天津蓟县国华盘山电厂为例介绍该绝缘子的使用情况。

国华盘山电厂封闭母线安装 2 台俄罗斯 500 MW 机组,发电机离相封闭母线电压 20 kV,厂用共箱封闭母线电压 6 kV,国华盘山电厂封闭母线地处于桥水库附近,气候较湿润,遇有阴天下雨,封闭母线绝缘值下降至不合格(天晴后则绝缘值逐渐恢复)。从 1995 年 6 月厂用电受电至 2003 年 10 月进行 DMC 绝缘子改造期间,对绝缘降低问题均未能有效解决。该厂为防止电气事故,只好将 2 台高压备用变压器长

表 1 瓷绝缘子与 DMC 绝缘子比较表

	瓷绝缘子	DMC 绝缘子
机械强度	表面易吸潮结露、集结盐份和灰尘,降低绝缘值 机械强度差,易破裂、涨裂、镶嵌件松脱	不易吸潮结露、不易集结盐份和灰尘,增强绝缘值 机械强度好、有塑性,避免破裂、涨裂
结构特点	结构特点使爬电比距低,绝缘水平低	取消端部金属件,用 DMC 原料一次模压成型,增大爬电比距,提高绝缘水平
是否采用涂料	可用 RTV 涂料增强绝缘,但喷涂及老化后清理困难	直接长期使用,无须涂料、电伴热等辅助措施增强绝缘
吸潮集尘性	易吸潮集尘,需定期清扫检查,有一定维护量	不易吸潮集尘,有自洁性,延长清扫检查周期
造价	造价低,厂家报价 20 kV 每个 220 元,6 kV 每个 75 元	造价较高,厂家报价 20 kV 每个 1500 元,6 kV 每个 430 元

表 2 DMC绝缘子更换前后的绝缘值

日期 (天气)	6 kV 厂用 OBL 分支对地绝缘 /MΩ		6 kV 厂用 OBM 分支对地绝缘 /MΩ	
	更换前	更换后	更换前	更换后
2003. 06. 09 阴雨	1. 5		1. 5	
2003. 11. 05 晴天		2 500		2 500
2003. 10. 10 阴雨	2. 5		2. 5	
2004. 04. 24 连阴雨 后		30		30
2003. 10. 11 阴雨	1. 3		1. 3	
2004. 05. 16 连阴雨 后		10		15

(注:在一般气候条件下测绝缘均在 1 000~2 500 MΩ 之间,上述绝缘值目前在阴雨天气下降较大的原因包括:绝缘子未全部更换完;俄罗斯 6 kV 封闭母线带换相节,该换相节包裹绝缘未处理;Y 型布置绝缘子端盖密封未全部处理好。)

期带电备用,既浪费了厂用电也未从根本上解决问题。从 2003 年下半年开始进行绝缘改造:用 DMC 绝缘子替换瓷绝缘子,从该厂电气运行测绝缘记录可进行 DMC 绝缘子更换前后的对比,见表 2。

从上述数据可看出,国华盘山电厂封闭母线共箱封闭母线更换 DMC 绝缘子后,即使在最差的阴雨天气测绝缘,绝缘值亦能大于合格值 6 MΩ 以上,未出现过不合格情况。盘山电厂封闭母线于 2004 年 4 月将 2 台高压备用厂用变压器由带电备用改为不带电备用,恢复为正常运行方式。盘山电厂封闭母线运行情况证明:封闭母线更换 DMC 绝缘子的改造是成功的。

3 结 语

经过上述论述,可认为:尽管 DMC 绝缘子比一般瓷瓶造价高,但绝缘子的造价在整个封闭母线的成本中所占的比重较小,但它所产生的效益却远远大于封闭母线成本的增加。故此,采用 DMC 绝缘子替换瓷

绝缘子解决封闭母线瓷绝缘子吸潮导致绝缘降低引发电气事故问题,是长期有效的、可行的实施方案,是能适用于南方尤其是海边电厂高潮湿度、高盐雾的气候特点。

参考文献

[1] 徐通训,徐喜佑. 电力设备防污闪技术 [M]. 能源部电力局, 1995.
[2] 水利电力部西北电力设计院编. 电力工程电气设计手册 (电气一次部分) [M]. 北京:中国电力出版社: 2008
[3] 孔庆东,等. 大电流母线的设计、制造及安装 [M]. 北京:水利电力出版社, 1988
[4] 吴励坚. 大电流母线的理论基础与设计 [M]. 北京:水利电力出版社, 1985.

作者简介:

林 睿 (1979), 女, 大学本科, 广东省电力设计研究院工程师, 大型火电、百万级核电工程主设人;
黄旭丹 (1977), 男, 大学本科, 广东省电力设计研究院 工程师, 大型火电、百万级核电工程主设人, 南方电网数字化变电站项目主要负责人。(收稿日期: 2010—06—09)

(上接第 22 页)
十分重要的意义。

参考文献

[1] 罗俊华,邱毓昌,杨黎明. 10 kV 及以上电力电缆运行故障统计分析 [J]. 高电压技术, 2003, 29(6): 14—16.
[2] 徐丙垠,李京,陈平,等. 现代行波测距技术及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62—65.
[3] 覃剑,陈祥训,郑建超. 行波在输电线上传播的色散研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 27—30.
[4] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 1998.
[5] 李俊,范春菊. 基于小波分析的电力电缆行波故障测距

[J]. 继电器, 2005, 33(14): 15—18.
[6] 何正友,钱清泉. 电力系统暂态信号的小波分析方法及其应用 (一)小波变换在电力系统暂态信号分析中的应用综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(4): 1—5.
[7] 王 征. 小波分析检测线缆故障的应用研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 155—157.

作者简介:

古树平 (1986), 男, 硕士, 主要从事电力系统故障暂态信号检测的研究;
陈奇志 (1970), 女, 副教授、高级工程师, 长期从事变电站自动化系统通信的研究;
谢 建 (1985), 男, 硕士, 主要从事现代信号处理技术的研究。(收稿日期: 2010—05—05)

两种国内外典型微机母线保护原理的比较

董世勇

(内江电业局变电运检中心, 四川 内江 641000)

摘 要: 母线保护快速、准确动作对电网的安全稳定运行至关重要, 是保证电网继电保护选择性的重要环节, 在保护电力设备安全方面的作用也不可忽视。对许继电气股份有限公司 WMH—800 型和美国通用电气公司 B90 型母线保护的原理进行了深层次的分析, 比较了两种保护中差动保护、TA 饱和、断路器失灵、母线区内外故障鉴别的异同。并提出了改进建议, 对进一步完善和发展中国的微机母线保护产品提供了依据。

关键词: 母线保护; TA 饱和; 死区; 断路器失灵; WMH—800; B90

Abstract: Rapid and accurate action of bus protection effects the safe and stable operation of power system. It is an important part to ensure the selectivity of bus protection and the protection of electric equipment. The working principles of two typical bus protection at home and abroad are comprehensively analyzed, which are WMH—80 (XJ Group Corporation) and B90 (GE). The similarities and differences of the two protections in some areas are analyzed, such as differential protection, TA saturation, breaker failure and the discrimination of inner and external fault. Some recommendations are proposed, which can provide a foundation for further development of bus protection products.

Key words: bus protection; TA saturation; dead zone; breaker failure; WMH—800; B90

中图分类号: TM773 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2010)05—0053—04

0 引 言

母线是电网的重要组成部分, 是发电、输配电中能量传输的枢纽。发电厂的发电机、变电站的变压器和输电线路等设备均通过母线相连接。由于母线上连接的电气设备众多, 母线一旦发生故障, 对电网的影响非常大, 甚至是毁灭性的。因此对不同电压等级母线配置相应的母线保护装置, 来准确迅速切除母线故障非常重要。但母线保护的拒动或误动同时也会给电力系统带来严重的危害。

国内外制造厂商相继推出的各种电压等级的微机母线保护, 国内的主要有 RCS—915、WMH—800^[1-2]、CSC—150 等系列母线保护产品。目前国内引进较多的母线保护是美国通用电气的 B90^[3]型母线保护装置。这几种母线保护装置^[4]的保护原理基本基于比率制动特性的电流瞬时值差动原理、复式比率差动原理等。但在制动电流选取、抗 TA 饱和、区内外故障判别、断路器失灵及死区故障上的处理方法不尽相同。目前的文献中几乎没有对此进行详细的分析。

下面以中国 WMH—800 和美国 B90 两种典型的母线保护产品为例, 对制动电流选取、抗 TA 饱和、区

内外故障判别、断路器失灵及死区故障等方面进行了深层次叙述, 分析了它们的优劣, 并提出改进建议, 为进一步完善和发展中国的母线保护产品提供了依据。

1 母线差动保护逻辑回路

母线保护^[5]的相电流差动保护原理简单清晰、接线简单, 在两端电流同步的情况下对内、外故障有较好的方向性, 而且不受系统振荡的影响, 在母线保护中发挥了巨大的作用。关于母线差动保护 WMH—800 与 B90 略有差异。

1.1 WMH—800 差动保护逻辑回路

WMH—800 母线差动保护逻辑回路如图 1 所示。其中, I_d 为母线差动电流; I_{d1} 为母线大差电流定值; K 为比例制动系数; I_1 为大差制动电流; I_{d1} 为 I 母差动电流; I_{d2} 为母线小差电流定值; I_2 为小差制动电流; U_{I1} 为 I 母电压启动元件。

其主要特点如下。

(1) 采用原理比较成熟的具有比率制动特性的差动保护原理, 设置大差及各段母线小差大差作为母线区故障的判别元件, 小差作为故障母线的选择元件。

(2) 区外故障时, 由于差动电流较小, 突变量起

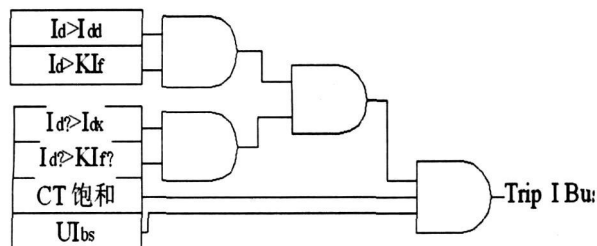


图 1 WMH—800 母线差动保护逻辑回路图

动元件以及稳态量起动元件都不会动作,并有专门的元件判断区内外故障,以保证区外故障不误动。

(3) 区内故障时,突变量起动元件以及稳态量起动元件均会动作,以保证故障被可靠切除。

(4) 采用瞬时值电流差动算法,保护动作速度快,可靠性高,抗干扰能力强,具有完善的抗 TA 饱和措施,确保母线区外故障 TA 饱和时装置不误动,而当发生区内故障或故障由区外转至区内时,保护可靠动作。

(5) 采用独立于差动保护复合电压元件作为差动保护的闭锁措施,保证装置的可靠运行。

1.2 B90 差动保护逻辑回路

B90 母线差动保护逻辑回路如图 2 所示。其中, I_d 为母线差动电流; I_f 为大差制动电流; I_{dmin} 为差动电流最小定值; I_{dmax} 为差动电流最大定值。

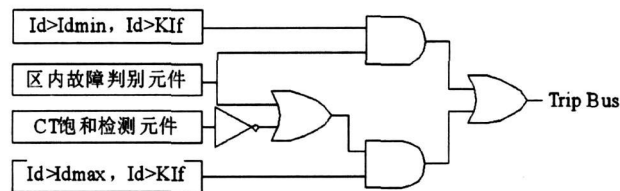


图 2 B90 母线差动保护逻辑回路图

其主要特点如下。

(1) 采用比率制动特性的母线差动保护,正常运行或区外故障时方向元件为零,TA 饱和检测元件为零,没有差动电流,以保证保护不误动(这时候保护动作判据就是比率制动式差动保护)。

(2) 区内故障时,方向元件为零,可靠开放差动元件,无论有没有饱和标志,保护装置都能可靠动作。

(3) 区外故障引起 TA 饱和时,方向元件为零,差动电流低定值不能动作,饱和检测元件为一,差动电流高定值不能动作,从而实现有效地闭锁保护装置可靠不动。

(4) 区外故障发展成为区内故障,区外故障,只有差动高定值有可能出口,如果转为区内,方向元件为零,开放低定值元件,保护可靠动作切除故障。

可以看出两种母线差动保护最显著的区别是: WMH—800 装设了电压闭锁元件,而 B90 没有相关的电压闭锁元件。笔者认为国内的母线差动保护灵活运用故障的基本特征即电流的增大和电压的降低,是比较好的作法,但也带来一系列问题如 TV 断线、高阻接地时电压元件的灵敏度等,如果 TV 断线处理得当,电压闭锁元件的整定值整定合理,WMH—800 的这种作法是优于 B90。

2 制动电流元件

WMH—800 主要采用电流标量和作为制动量,这样在母线区外故障时的制动量高,而区内故障时保护的灵敏度下降。

B90 采用电流最大幅值作为制动量,当母线区外故障时制动小,区内故障时保护灵敏度高,并且容易检测母线元件的 TA 饱和。

因此,两种保护中制动电流的选取方法各有利弊。

3 TA 饱和检测元件

在母线区外发生短路故障时,故障元件的电流互感器将流过很大的短路电流,尤其是变压器发生故障时,带有很大成分的直流分量和高次谐波,此时电流互感器的铁心很容易趋于饱和,励磁电流大大增加,二次电流则减小,使电流差动回路中流过很大的不平衡电流。电力系统曾多次发生在母线区外故障,由于电流互感器铁心饱和而发生母线保护误动作。饱和过程如图 3。

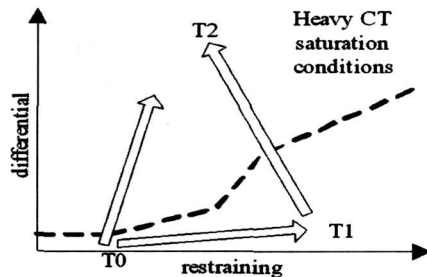


图 3 TA 饱和过程

可以看出,区外故障时,差动回路流过的不平衡电流很小(但不为零)。随着制动电流的增大,TA 饱和^[6-8],使差动回路中产生很大的不平衡电流,从而引起保护的误动作。

正常运行时候,保护标志清零,在区外故障时,先置饱和标志,闭锁保护,然后做以下判断。

(1)如果在一定时间内不满足差动电流起动条件,则清饱和标志位。

(2)如果此时满足差动电流条件,首先置深度饱和标志。

(3)只有在区外故障时才进行饱和判别,发现不是区内故障就马上置饱和标志。长时间饱和不返回则认为不是 TA 饱和,要清饱和标志。程序逻辑图如图 4 所示。

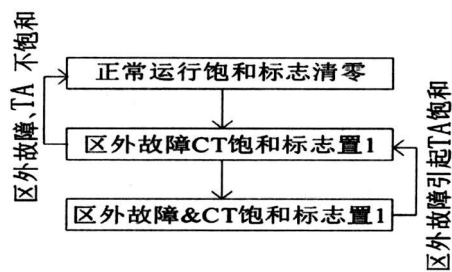


图 4 TA 饱和判别流程图

关于 TA 饱和检测, B90 和 WMH-800 母线保护的检测原理是基本一致的,首先判断故障的发生时刻,若此时差动保护不动即判为母线区外故障,闭锁差动保护一定时间,然后在展宽时间内判断 TA 是否饱和。如果饱和则继续闭锁差动,如果 TA 不饱和则则开放差动保护。利用波形识别法来开放差动保护以确保母线区外转区内故障时差动保护能可靠动作,其前提是这种区外故障转换成为区内故障的切除需要带有延时。

4 区内外故障判别元件

WMH-800 采用相电流突变量元件和电压闭锁元件,判别区内外故障,其逻辑如图 5。

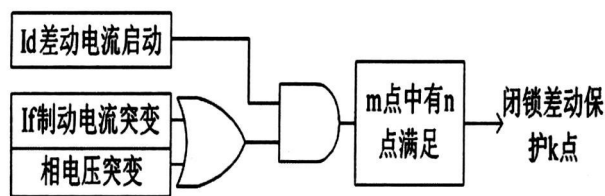


图 5 WMH-800 母线保护区内外故障判别元件逻辑

B90 的区内外故障判别元件的逻辑如下。

(1)选择最大贡献电流,其特点是电流幅值很大,有很大的突变量大于突变量门槛,大于制动电流乘以制动系数。

(2)检查贡献电流的相位和其他电流向量和的相位关系,区外故障,其他所有电流之和与故障线路电流反相,区内故障,其他所有电流之和与故障线路电流同相。如图 6 所示。

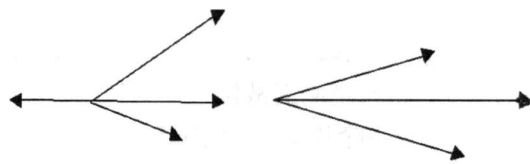


图 6 B90 母线保护区内外故障判别中电流方向

通过最大的相位差和极限值(厂家给定 90°)的比较,以辨别区内外故障,这是 WMH-800 所没有的。它可以比较清楚地辨别区内外故障,和差动电流构成了双重判据。在区外故障时,方向元件可靠不动作,避免了区外故障保护误动作。这种元件在系统发生振荡或两侧电源同步性较大时也具有一定的选择性。

5 断路器失灵及死区保护

WMH-800 配置的断路器失灵保护如图 7 所示。当装置识别到外部失灵启动触点以后,再判断一次该失灵元件的电流是否越限,经过一定延时后跳该元件所在母线上的所有元件。该失灵启动接点是由该元件的断路器跳位触点 TJ 和电流继电器触点 LJ 串联组成的。WMH-800 的失灵保护另外增加电流判别的目的是出于防失灵误动的考虑,但由此给定值整定部门增加了工作量,要整定每一个元件的断路器失灵电流定值。

当元件有跳闸命令发出后,通过检测断路器位置和电流判断,检查断路器失灵情况,当检测到断路器在跳位,每相都判断失灵起动,然后把判断结果传送给失灵保护箱,由其判断失灵保护是否出口,然后把判断结果传送给 ABC 三相各自出口跳闸,负责跳闸出口。逻辑回路如下。

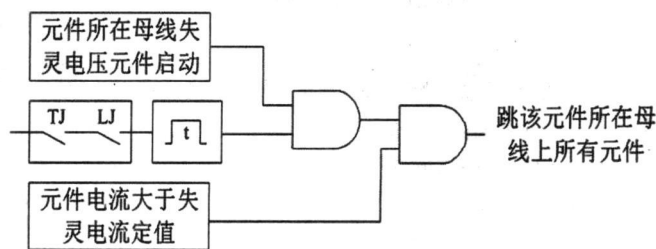


图 7 WMH-800 母线保护断路器失灵保护逻辑图

B90 母线保护有专门的断路器失灵保护,其原理

和 WMH—800 母线保护基本一致,即判断断路器跳位和电流。除此之外, B90 还针对元件 TA 安装位置配置了专门的死区保护即所谓末端故障保护。

当 TA 安装位置如图 8 所示时,断路器失灵及死区保护逻辑如下。

(1) 发生死区出故障时,属于母线区内故障,母线保护动作,断路器跳闸后故障没有切除,由线路保护或后备保护来切除故障(其性质和断路器失灵是相同的)。

(2) 当断路器处于跳位时,母线保护会自动缩小保护范围,即此电流互感器的电流不计入差动保护的差动电流计算,以避免母线保护误动作。

(3) 但是需要自动识别此电流互感器是否为母联互感器。

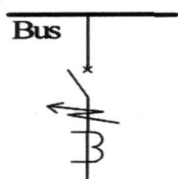


图 8 母线上元件 TA 安装在断路器外侧

当 TA 安装位置如图 9 所示时,断路器失灵及死区保护逻辑如下。

(1) 当发生死区处故障时,由线路保护动作跳闸,但是断路器跳开后,故障并没有切除。

(2) 检查到断路器处于分位时,自动扩大母线保护范围,此电流互感器电流不计入母线差动保护,以使死区处故障可靠切除。

(3) 这种情况同样适用于单电流互感器的母联断路器。

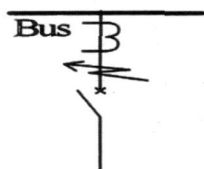


图 9 母线上元件 TA 安装在断路器内侧

有关失灵保护其基本思想国内外是相同的,但是国外有专门的断路器死区保护,而国内没有,可能一次系统的接线是有关联的,尤其是母线 TA 的接线,而且存在和其他保护配合的问题,如线路保护等。

6 结 语

通过对国内外两种典型的母线保护的对比与分析,认为 WMH—800 与 B90 这两套微机保护各有其特色和优势。由于两国电力系统结构及运行方式的不同,两种保护在原理和性能上有些差异,应该从实际情况出发,相互学习,取长补短,丰富、完善并开发出新的保护原理。通过对这两种保护详细地对比与分析,进一步加深了继电保护调试人员对微机母线保护原理的理解,开阔了眼界;同时也为进一步完善和研制新一代的母线保护装置奠定了基础。

参考文献

- [1] WMH—800 型微机母线保护装置说明书 [Z], 许继电气股份有限公司, 2003.
- [2] 周晓龙, 程天宝, 等. WMH—800 微机母线保护的整定计算原则及方法 [J], 继电器, 2003, 31(7): 77—80.
- [3] B90 母线差动继电器安装手册 [Z], GE Multilin, 2005.
- [4] 中华人民共和国国家标准.《继电保护和安全自动装置技术规程》, 国家技术监督局, 1993.
- [5] 王春生, 等. 母线保护 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [6] 李建新, 桂小军, 等. 一种适用于母差保护的 CT 饱和判据 [J], 继电器, 2000, 28(3): 44—45.
- [7] 曾次玲, 曾 勤. 母线保护及其整定计算若干问题讨论 [J], 湖南电力, 2008, 28(2): 41—45.
- [8] 程利军, 龙 翔, 杨奇逊. 基于采样值的 CT 饱和和检测方案的研究 [J], 继电器, 2000, 28(8): 19—21.

作者简介:

董世勇 (1980), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护。
(收稿日期: 2010—05—31)

国内电压等级最高、容量最大 SVC 系统投运成功

龙泉驿乡 500 kV 变电站 SVC 系统主要用于提高川电外送输电通道动态稳定能力, 建成后将有效的对四川电网的系统电压进行调节, 这对四川电网的安全稳定运行和川电外送战略的实施起到重要的保证作用。

龙泉驿 500 kV 变电站 SVC 系统试研院在调试工作遇上了不少的困难, 国内目前还没有能在安装现场对 SVC 功能和技术性能进行检验的仪器。SVC 性能试验是在 SVC 一次设备带电后, 利用系统电压对 SVC 控制系统的控制逻辑和触发角控制正确性进行检查。在一次设备带电条件下, 很难根据试验需要改变试验条件, 对 SVC 的功能和技术性能进行完整、全面的测试。

为解决 SVC 现场试验方法和手段问题, 试研院技术人员与中国电科院相关人员进行了深入技术交流, 对 SVC 系统进行了仿真与研究, 编写了详细的系统调试方案, 围绕 SVC 功能开展试验方法研究, 准备了试验所需要的专用仪器设备。

300 MW 机组冲车过程中振动大原因及对策

荆永昌,陈荣轩,袁 波,彰金宝,张国新
(三河发电有限责任公司,河北 三河 065201)

摘 要:通过机组历次启动数据分析、实际经验总结、检修过程中内部检查,分析出 4 号机冲车过程中振动大原因,采取一系列应对措施,解决了冲车过程中振动大问题,缩短了机组的启动时间,有效地保证了机组的寿命和性能。

关键词:振动;分析;原因;对策

Abstract The causes of the severe vibration in the process of impulsing on No. 4 unit are analyzed with the data analysis of previous starting, the summary of practical experiences and the internal inspection. The problems are solved after taking a series suitable measures, which reduces the time of starting-up and ensures the life and performance of the unit efficiently.

Key words: vibration; analysis; causes; countermeasures

中图分类号: TK247 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003—6954(2010)05—0057—03

三河发电厂二期工程 3、4 号机组采用东方汽轮机厂生产的 C300/220—16.7/0.3/537/537 型亚临界蒸汽参数、一次再热、单轴、双排汽、采暖抽汽凝汽式机组。3 号机组于 2007 年 8 月 31 日 18:00、4 号机组于 2007 年 11 月 10 日 18:00 完成 168 h 试运行。机组高中压缸为合缸、双层结构,低压缸采用对称分流式双层缸结构。内缸外壁对应于第 2 极隔板处有一个定位环,其外缘的凹缘与外缸上相应位置的凸缘配合,确定内缸轴向位置,构成内缸相对与外缸的轴向膨胀死点。机组启动采用高、中压联合启动方式。机组启动状态根据高压内缸上半调节级后内壁金属温度 150℃ 为界,分为冷态启动和热态启动。

汽轮机辅助系统有高压缸预暖和夹层加热系统。高压缸预暖系统是在高排逆止门前的高排管道上设置有倒暖的管道及阀门,汽轮机冲转前高压旁路阀后的蒸汽通过倒暖阀进入高压缸,从高中压缸之间汽封、高压主汽管疏水和高压缸疏水排出,对高压缸进行预加热。内缸外壁第 5 级处设置隔热环,将内外缸夹层空间分为 2 个区域,夹层加热系统是来自主蒸汽的夹层加热蒸汽经过夹层加热联箱后,从高中压外缸下半部分的汽缸左右侧进入外缸和内缸之间的夹层即一区,蒸汽再通过隔板环外沿 5 mm 宽的环形间隙进入与高压排汽相通的二区,排汽进入高压排汽。

1 存在的问题

调试过程中共 13 次启动,停机 12 次,因振动大

停机 8 次。

表 1 历次冲车情况

次 数	时 间 /h	调 节 级 金 属 温 度 /℃	冲 车 是 否 成 功	原 因
1	17	232	否	1 070 r/min 时 2X、2Y、4X 振动大
2		221	是	
3	6	316	是	
4	38	126	否	1 200 冲 2 000 r/min 过程中 2X 振动大
5		144	否	924 r/min 时 2X、4X 振动大
6		154	否	1 010 r/min 2X 振动大
7		176	否	1 450 r/min 时 2X、1X 振动大
8		215	是	
9	17	330	是	1 200 冲 2 000 r/min 过程中 2X 振动大被迫降至 1 200 r/min 暖机,第二次冲 2 000 r/min 成功。
10	24	132	否	1 400 r/min 2 号瓦振动大
11		159	否	2X 方向振动大
12		205	是	一次冲车成功
13	5	248	是	一次冲车成功

1.1 冲车过程中振动大,启动时间长

振动大主要发生在 1 200 r/min 升速至 2 000 r/min 过程中,1、2、3、4 号瓦振动超限而被迫打闸停机。

1.2 启动时间长

因振动大停机后必须盘车 4 h 以上,启动时间延长,平均启动时间在 18 h。

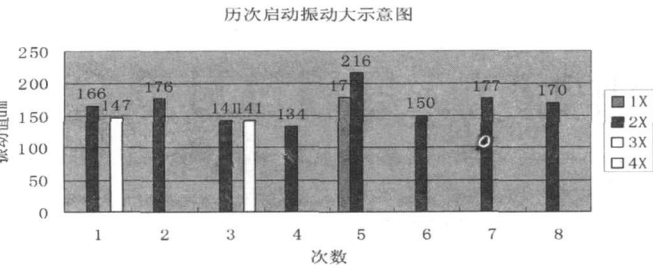


图 1 历次启动振动大示意图

2 原因分析及对策

2.1 高压缸预暖使用不当

2.1.1 原因分析

1) 冲车前没有将高压缸调节级温度加热到 150℃，其中 7 次停机有 5 次是这种情况。

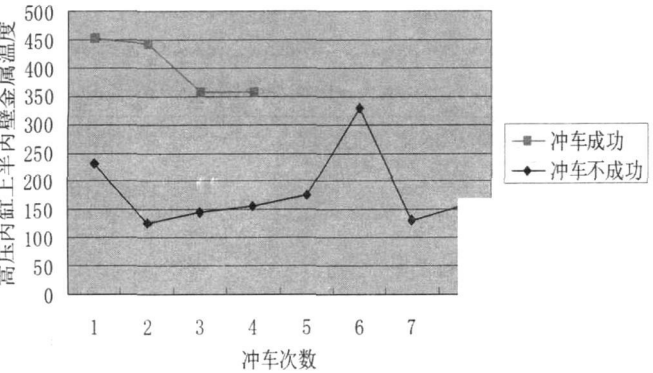


图 2 历次冲车高压内缸调节级温度

在缸温高时，冲车成功率高，在高压内缸上半内壁金属温度低于 150℃ 时，冲车成功率为零。

2) 高压内缸上半内壁金属温度到 150℃ 后没有维持足够的暖缸时间后再进行冲车。

调节级上缸内壁金属温度到 150℃ 只是代表高压内缸表面温度到达 150℃，缸体并没有被暖透，维持一定暖缸时间可使缸体表面与内部温差减小，从而减小金属内部热应力，使缸体得到均匀膨胀，保证在冲车过程中动静间隙不致消失引起振动。调试期间打闸闷缸 4 h 后再冲车的成功率高证明了这一点。

2.1.2 对策

1) 启动前盘车状态下预温暖机。暖缸蒸汽参数为 0.4~0.8 MPa、200~250℃，逐渐开启倒暖阀使暖缸蒸汽进入汽缸，保持调节级压力在 0.4~0.5 MPa，控制汽缸金属温升率不超过 50℃/h，汽缸各壁温差及胀差在允许范围内。

2) 维持高压缸预暖时间，保证高压缸预暖效果。

在高压内缸调节级处上半内壁金属温度升到 150℃ 时，应将倒暖阀前节流阀开 10%，维持如表 3 所示的倒暖时间。

表 2 高压缸预暖保持时间表

预暖前高内调节级上半内壁温度 /℃	20	40	60	80	100	110	120	130	140	150
暖缸时间 /h	3.6	3.3	3.3	3.2	2.7	2.4	2.3	1.8	1.5	1.0

2.2 内外缸温差大

2.2.1 原因分析

表 3 某次冲车时内外缸温差实际值与规定值比较

名称	实际值	规定值
1 000 r/min 时		
高压外缸下半内壁与高压内缸下半外壁间温差	为 104℃	<50℃
2 000 r/min 时		
高压外缸法兰上半左右法兰温差	为 96℃ 30℃	<10℃

表 4 冲车过程中缸温变化

	第一次 2 000 r/min	第二次 2 000 r/min
内外缸温差	96	44
冲车是否成功	否	是

96℃ 的温差远远超出标准 <50℃，冲车过程中发生振动大，第二次冲车该温差降低到 44℃ 时冲车成功。

汽轮机在启动、停机时，汽轮机的汽缸、转子是一个加热和冷却过程。启动时由于内缸膨胀较快受到热压应力，外缸膨胀较慢则受到热拉应力，而应力的与内外缸温差成正比，当内外缸温差过大时，汽缸金属应力超过材料的屈服应力极限，汽缸可能产生变形，动静间隙减小，磨损隔板汽封，同时隔板和叶轮还会偏离正常时所在的平面，转子转动时间隙减小，

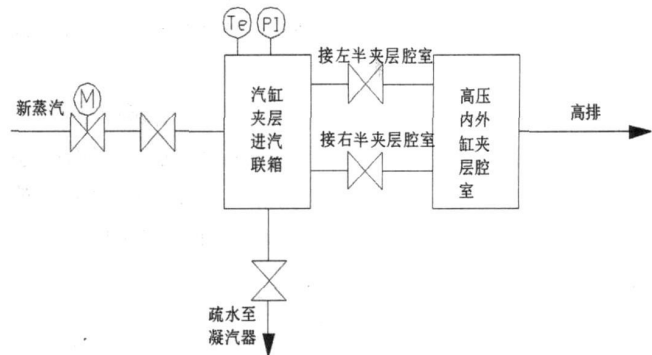


图 3 夹层加热系统示意图

结果往往与其他因素一起造成摩擦，造成振动超限。

2.2.2 对策

- 1) 夹层加热投入方法的改进
- 2) 夹层投入方法的改进

表 5 夹层投入方法的改进

名称	以前的方法	改进方法	备注
夹层加热联箱暖管	检查夹层进汽分门关闭, 打开夹层联箱疏水电动门、手动门, 打开夹层联箱进汽电动门, 稍开夹层联箱进汽手动门, 维持夹层联箱压力 0.1~0.2 MPa 进行暖管。	开夹层联箱疏水的同时开启两侧夹层加热分门, 利用凝汽器真空的抽吸作用使高压缸预暖蒸汽通过夹层进汽管道、联箱疏水管道进入凝汽器, 夹层中的疏水排入凝汽器。	利用倒暖蒸汽预暖夹层空间, 利用夹层联箱疏水门疏掉夹层空间内积水
夹层加热投入	关闭夹层加热联箱疏水电动门, 全开汽缸夹层左右分门, 夹层联箱进汽电动门, 调整夹层联箱进汽手动门, 根据高中压内缸外壁与外缸内壁温差及差胀变化趋势, 调整夹层进汽压力 0.98~4.9 MPa 最高不大于 6.5 MPa。		

3) 原方法效果不好的原因

在历次启机投夹层加热后效果并不明显, 在实际操作中并不能很快的缩小高压内缸外壁和高压外缸内壁温差, 同时对胀差影响也不大。分析其原因有 3 个。

(1) 夹层空间无法疏水。如图 1 所示为倒暖蒸汽投入后而夹层未投入前的缸温图, 高压外缸上半内

壁和高压内缸上半外壁温差仅为 13℃, 高压外缸下半内壁和高压内缸下半外壁温差为 61℃, 之所以相差这么大是因为夹层空间并没有设置疏水, 由倒暖蒸汽凝结而成的夹层空间内疏水无法排出。

(2) 传热效果不好。由于夹层空间无法疏水, 夹层通入蒸汽后, 蒸汽夹杂着水蒸汽, 使外缸内壁温度升高很慢, 直到汽缸和蒸汽管道内壁温度达到该压力下饱和温度时, 高压内缸外壁和高压外缸内壁温差才开始减小。而这需要相当长一段时间。

(3) 4 号机组 A 修中检查出夹层右侧分门门芯脱落, 就造成该侧蒸汽不流通, 加热效果不好。

3 取得的效果

1) 2008 年 10 月 29 日 4 号机组 C 修后机组冷态启动实现了一次冲车成功, 机组在临界转速最大轴振 2X 项 108 μm, 其余振动控制在 80 μm 以内。

2) 2009 年 3 月 27 日 4 号机组 A 修后冷态启动一次冲车成功, 最大振动发生在 1 614 r/min 如图 4 和图 5 所示。

3) 平均启动时间为 5.5 h 比调试期间减少了 12 h 极大地缩短了启动时间, 降低了启动成本, 使机组及早发电创造了巨大的经济效益。

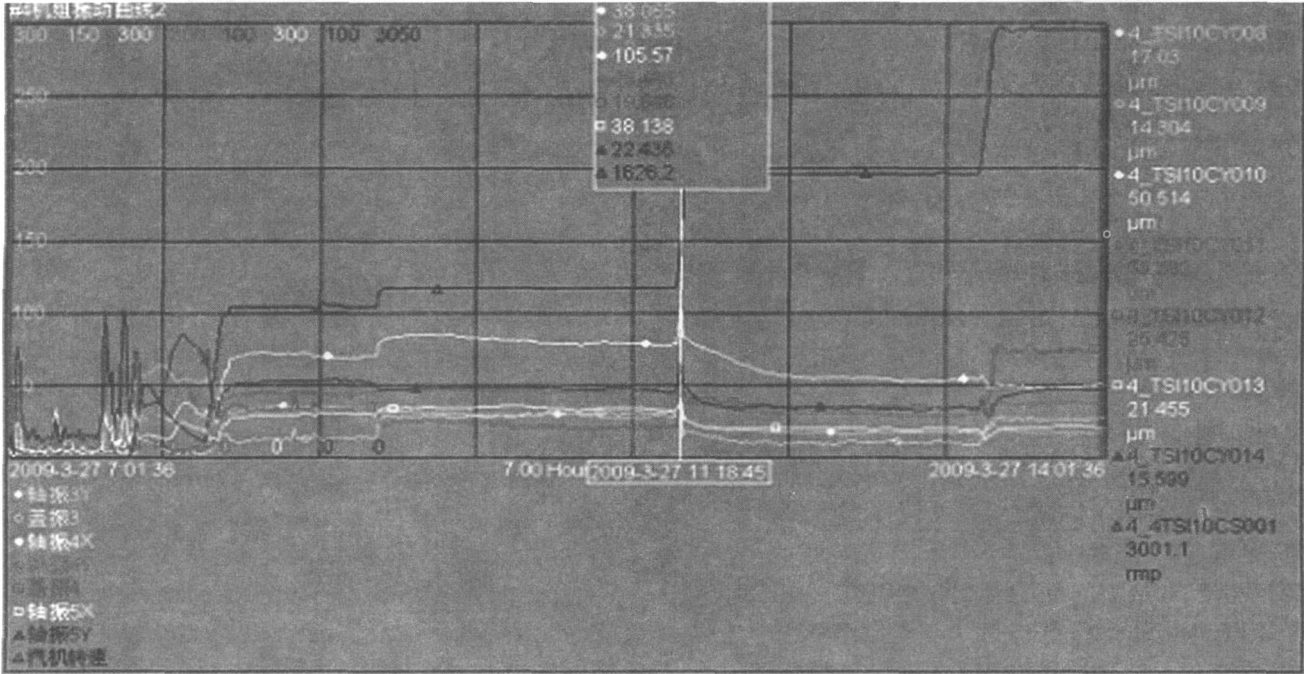


图 4 4 号机组 A 修后冷态启动 3、4、5 号瓦振动曲线图

(下转第 78 页)

- [2] 刘健, 杨文字, 余健明, 等. 一种基于改进最小生成树算法的配电网架优化规划 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 103—108.
- [3] 李靖霞, 鞠平. 配电网优化规划的基因算法 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(20): 12—14.
- [4] 陈根军, 李继洸, 王磊, 等. 基于 Tabu 搜索的配电网规划 [J]. 电力系统自动化, 2001, 4(10): 40—44.
- [5] 王成山, 王赛一. 基于空间 GIS 和 Tabu 搜索技术的城市中压配电网规划 [J]. 电网技术, 2004, 28(14): 68—73.
- [6] Han K H, Kim J H. Quantum - inspired Evolutionary Algorithm for a Class of Combinatorial Optimization [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(6): 580—593.
- [7] 张葛祥, 李娜, 金炜东, 等. 一种新量子遗传算法及其应

用 [J]. 电子学报, 2004, 32(3): 476—479.

- [8] 赵英杰, 王正志. 基于量子进化算法的 RNA 序列—结构比对 [J]. 生物化学与生物物理进展, 2009, 36(9): 1222—1228.
- [9] 陈章潮, 唐德光. 城市电网规划与改造 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 200—202.
- [10] 王凌. 量子进化算法研究进展 [J]. 控制与决策, 2008, 23(12): 1321—1326.

作者简介:

王 腾 (1987), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统规划。

王 倩 (1962), 女, 教授, 主要研究方向为电力调度综合自动化、分布式开放式 SCADA 系统、嵌入式工业测控系统。

(收稿日期: 2010—04—12)

(上接第 59 页)

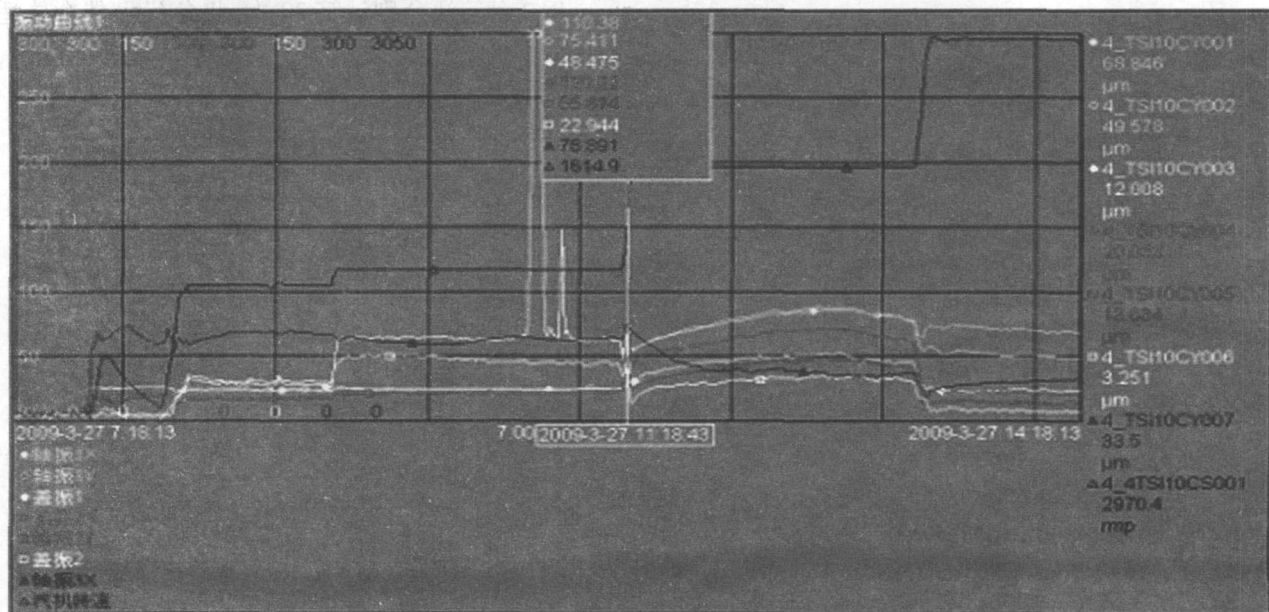


图 5 4 号机组 A 修后冷态启动 1、2、3 号瓦振动曲线图

4 建 议

1) 目前高压缸倒暖用汽从高排管道抽取, 只有在高压旁路开启后才能投入。高压缸预暖用蒸汽参数为 0.4~0.8 MPa, 200~250℃, 辅汽完全可以满足要求且可以利用邻机辅汽作为高压缸预暖汽源, 这样在锅炉点火前就可以进行高压缸预暖。建议将高压缸预暖用汽取自辅汽, 可缩短启动时间约 2 h 降低启动费用, 机组提前约 2 h 发电。

2) 暖机或升速过程中, 如果发生较大的振动, 应该立即打闸停机进行盘车直轴, 而不应该降速暖机。因为振动大最易导致动静部分摩擦、汽封磨损、转子弯曲, 转子一旦弯曲, 振动越来越大, 摩擦就越厉害。这样恶性循环易使转子产生永久性变形弯曲, 使设备严

重损坏。

3) 目前 CRT 缸温画面并没有各种温差值的显示, 各部温差需人工计算, 建议在画面中生成各部温差值便于监视和及时发现超限值。

参考文献

- [1] 彭金宝, 李振宁, 等. 300MW 机组集控运行规程 [Z]. 三河发电有限责任公司, 2007.
- [2] 杨树旺, 张新元, 等. 汽机设备说明书 [Z]. 三河发电有限责任公司, 2007.
- [3] 孙曰泰, 李贵春, 等. 三河电厂二期工程调试报告 [R]. 华北电力科学研究院, 2007.
- [4] 华东电业管理局. 汽轮机运行技术问答 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.

作者简介:

荆永昌 (1984), 男, 河南焦作人, 助理工程师, 从事发电厂集控运行工作。

(收稿日期: 2010—06—13)

大型发电厂厂用电源切换的再思考

张新伟¹, 晁 勤¹, 常喜强², 黄 净²

(1 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2 新疆电力调度通信中心, 乌鲁木齐 830002)

摘 要:保证厂用电源的安全可靠对大型发电厂安全稳定运行至关重要,厂用电的切换在发电厂的各种操作中也比较复杂,比较关键。结合某电厂的实际运行状况,对发电厂中普遍采用的厂用电电源快切方式进行了讨论,对其优缺点进行了深入分析,指出影响因素,提出了厂用电切换注意事项,以保证大型发电厂厂用电的成功切换,减少对厂用设备的损害。

关键词:厂用电源;切换;措施

Abstract The reliability of auxiliary power source is important to ensure the safe and stable operation of large-scale power plant its switchover is complicated and pivotal among various operations Based on the actual operating condition of a power plant the existing switchover schemes are discussed its advantages and disadvantages are analyzed the influencing factors are pointed out and the points for attention during switching over the auxiliary power source are put forward so as to ensure the successful switchover of auxiliary power source and reduce the harm on the equipment

Key words auxiliary power source; switchover; measures

中图分类号: TM621.5 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0060-05

随着电力工业的科技进步,大量新技术新产品得到了广泛的应用,其中大型发电机组的容量也越来越大。机组的安全稳定运行中至关重要的因素之一是保证厂用电的安全。大容量机组运行需要的厂用电也越来越大,厂用电安全性、可靠性要求也越来越高。因此,在各种情况下,厂用电的安全可靠切换问题也显得比较突出。发电厂采取各种措施保证厂用电的切换。目前发电厂采用的厂用电电源切换方式有并联切换和串联切换,这些切换方式各有特点,各有利弊。厂用负荷性质不同,不同的切换方式对厂用负荷的影响有差异。深入分析不同的厂用电电源切换方式的特点、影响因素,同时也针对不同性质的厂用负荷,进行了分析,提出相关的注意事项,具有一定的实际意义。

源接线如图 1 所示。

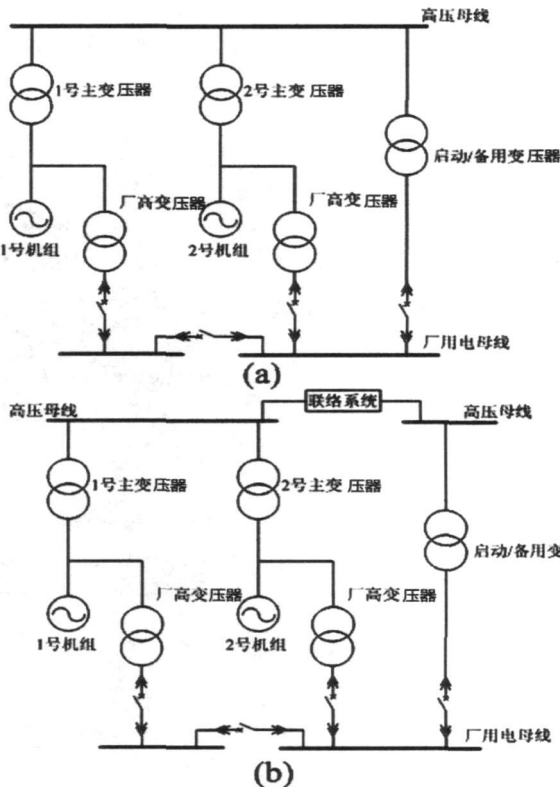


图 1 厂用电源接线示意图

机组正常运行时,常自身带厂用电,在机组开机或者停运时需要切换厂用电。由于考虑切换过程

表 1 厂用电源切换方式

方式名称	动作顺序	分类	时间	定义
串联切换	先断后合	延时切换	$\geq 1.5\text{s}$	当母线残压下跌至低电压继电器动作值时,各自投装置经延时先跳工作电源开关,再合备用电源开关。
		快速串联	$<1\text{s}$	快切装置先跳开工作电源,当检测到工作电源进线开关跳闸的反馈信号,同时检测到厂用负荷母线残压和备用电源电压之间的频差、相差和压差都满足切换条件时,投入备用电源。
并联切换	先合后断	手动并联	$\geq 30\text{s}$	手动并联切换是指运行人员手动操作先合备用电源开关,再断开工作电源开关。
		自动并联	$<1\text{s}$	快切装置先合备用电源开关,经一定延时自动跳开工作电源开关。

中短时形成电磁环网,综合考虑各种因素,目前大型火电厂厂用电源的切换多采用串联切换和并联切换,具体分类参见表 1。

2 串联切换方式的深入分析

2.1 延时切换方式

厂用电源采用延时切换方式对厂用负荷的影响主要有以下 3 个方面:①切换时间长。延时切换方式切换时间相对较长,对机炉热力系统的安全稳定运行非常不利。②冲击电流大。由于电动机负荷电压迅速降低,转速下降,备用电源再投入时,电动机自启动时间延长,冲击电流远大于额定电流,给启/备变压器造成较大危害。③可能造成故障范围的扩大。当厂用电母线故障时,厂用负荷母线电压快速降至动作值以下,当小于低电压继电器整定值时,备用电源投入,使厂用电母线又一次受到冲击,有可能引起故障范围的扩大。

厂用电源的延时切换时间主要取决于厂用电母线残压的衰减时间,厂用负荷中电动机负荷占有很大比例,切换过程中母线电压由于反馈电势的存在而衰减较慢。电动机负荷所占比例不同时的残压衰减曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出,厂用负荷中电动机负荷比例越大,残压衰减越慢。

2.2 快速串联切换方式

厂用电源的快速串联切换采用微机性的自动切换装置,动作可靠性高,抗干扰能力强,得到广泛的应用。采用该方式进行厂用电源切换,有 3 方面的问题需要注意。

1)切换时间并非越小越好。电源电压和电动机残压之间的夹角 θ 对应不同的差拍电压 ΔU ,备用电源投入时 ΔU 越大,对电动机负荷的冲击就越大。图 3 为切换时间分别为 0.22 s、0.35 s、0.7 s 时的冲击电流仿真曲线。

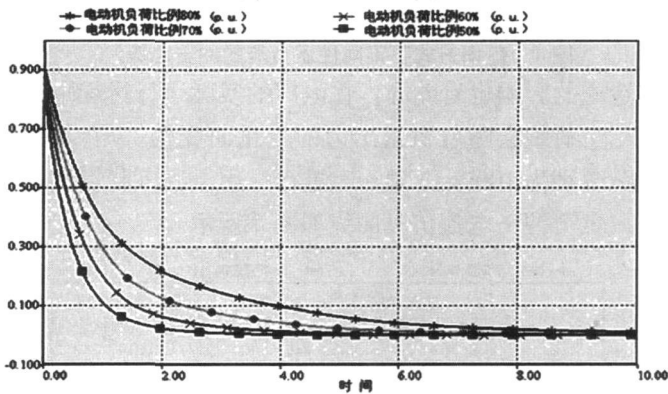


图 2 残压衰减曲线

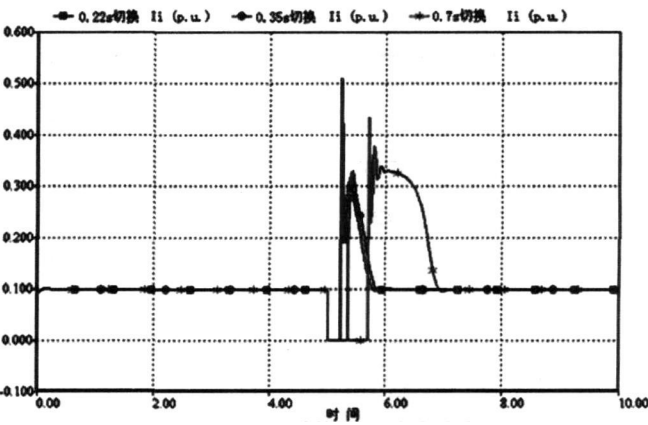


图 3 不同串切时间下的扰动电流

由图 3 可以看出,切换时间为 0.22 s、0.7 s 时冲击电流比 0.35 s 时要大。所以在用快速串联切换时,应综合考虑厂用负荷的残压特性及两电压间频差、压差、相角差,合理整定快切装置的动作时间,从而保证厂用电稳定运行。

2)厂用负荷的性质不同时,厂用电源的串联切换对厂用负荷造成的影响也不同。电动机负荷比例分别为 80%、50%、20% 时,厂用电源采用基于快切装置的串联切换,厂用负荷的冲击电流仿真图分别如图 4 所示。

由图 4 可以看出电动机负荷比例越小,厂用电源切换造成的冲击电流越小。

3)厂用负荷量不同时,厂用电源的串联切换对

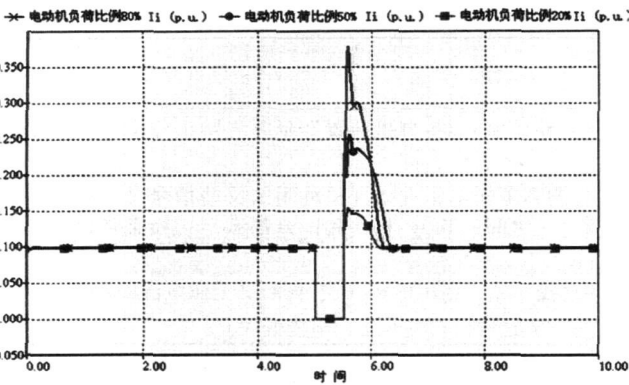


图 4 串切方式下不同性质负荷的冲击电流

其造成的影响也有差异。在电厂的实际运行过程中，厂用负荷量会随着机组出力的变化而变化。当厂用负荷分别为 100% 和 50% 时进行厂用电源串联切换，厂用负荷冲击电流仿真曲线如图 5 所示。

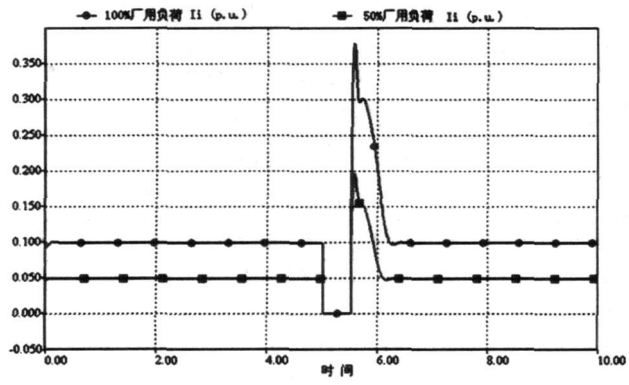


图 5 厂用负荷量不同时的冲击电流

由图 5 可以看出，厂用负荷越小时厂用电源切换造成的冲击电流就越小。

3 并联切换方式的深入分析

当厂用电源采用手动并联切换方式时，整个操作过程由人工手动完成，切换时间较长。相比之下，基于快切装置的自动并联切换用时较短。并联切换可以使厂用负荷在不失电的情况下进行工作电源与备用电源的切换，对负荷的扰动相对较小，但也存在一些问题。

3.1 并联切换方式存在的问题

1) 并联切换时存在高低压电磁环网。在电磁环网中，由于变压器、线路等电气元件参数匹配不合理，会在环网内产生循环功率 S_c ，具体表达式如下。

$$S_c = \frac{U_N \partial X_c}{Z_c^2} + j \frac{U_N \Delta U X_c}{Z_c^2}$$

其中， U_N 为合环点额定电压； Z_c 表示环网总阻

抗。由上述表达式可以看出，循环功率的大小主要取决于环网断口两侧电压相量差，两侧电压幅值差直接影响无功大小，两侧电压相位差直接影响有功大小。

机组正常运行时循环功率将会造成设备过载，危及厂用电安全。并联切换过程中如果系统发生故障，如主变压器低压侧跳闸，发电机输出功率不可能瞬变，其输出功率将通过启 / 备变压器向外输送，而启 / 备变压器容量一般远小于主变压器容量，所以有可能造成相关电力设备毁坏，扩大了事故范围，如图 6 所示。

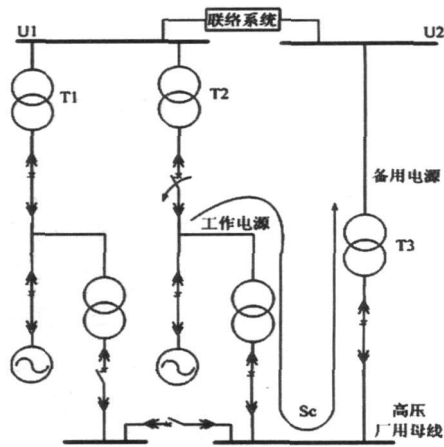


图 6 并切过程中功率流向示意图

2) 并联切换过程中如果发生相间短路，故障电流将大幅增加。

3) 并联切换时，投入备用电源，潮流会改变分布；退出工作电源，潮流又一次改变分布。所以厂用电源进行一次并联切换将会造成厂用负荷的两次扰动。

3.2 并切手动、自动切换的对比分析

由于手动、自动并联切换的切换时间不同，对厂用负荷的扰动情况也不同。厂用电源分别采用手动、自动并联切换时，厂用负荷的扰动电流如图 7 所示。

由图 7 可以看出，手动并联切换对厂用负荷有两次扰动，由于切换时间较长，增加了故障电流加倍的概率。相比之下，自动并联切换时间较短，仅对厂用负荷造成一次扰动，更有利于厂用电源的安全切换。

当厂用电源采用并联切换时应尽量缩短切换时间。针对切换过程中循环功率的问题，一方面可以通过调节变压器分接头和利用 FACTS 设备，如移相器等改变开口电压差的幅值和相位；另一方面，可以对接入环网的变压器和线路进行合理匹配来改变；当环网结构不能改变时，可以通过可控串补等柔性控制技

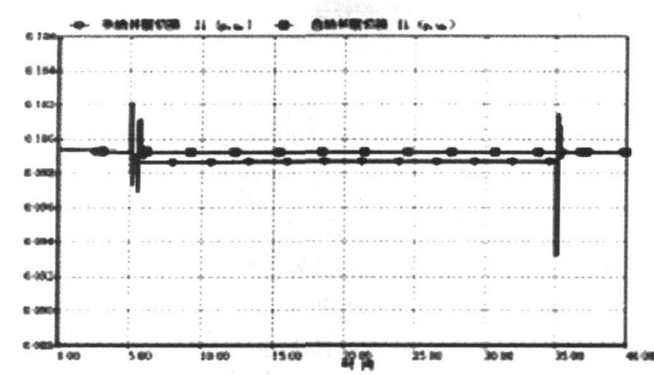


图 7 手动、自动并联切换下的扰动电流

术改善电网的运行参数控制功率环流。

4 快速串切、自动并切方式的对比分析

串联切换对厂用负荷造成冲击,引起电动机负荷的转速变化和扰动电流较大。并联切换不会中断厂用负荷的供电,切换工程中厂用负荷各电气量波动甚微,但其引起的循环功率会对电气设备造成一定影响,具体参见图 8、图 9。

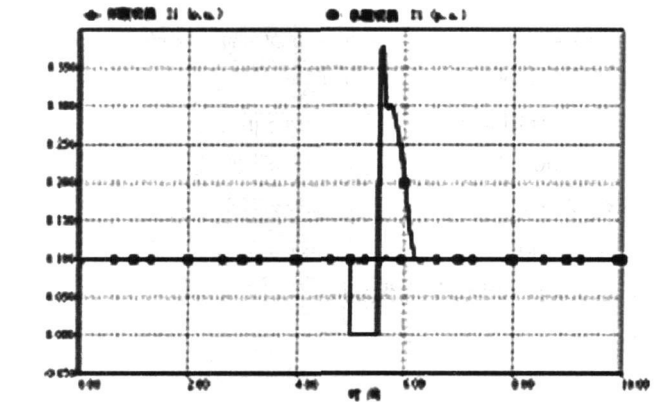


图 8 并切、串切方式下的扰动电流

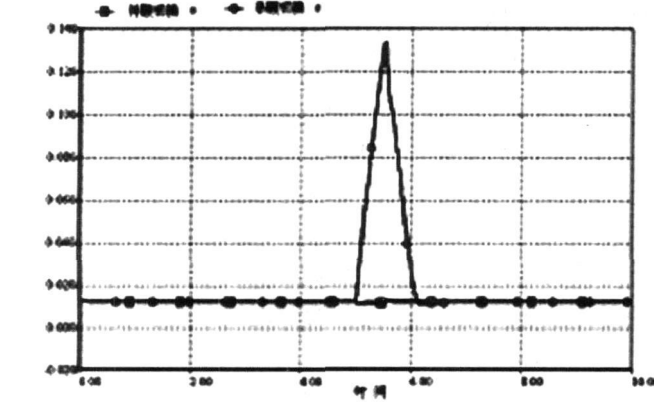


图 9 并切、串切方式下的电动机转差率

备注:上述计算采用厂用负荷中电动机负荷比例为 80%。

5 实例分析

新疆某电厂总装机容量 1 800 MVA,全厂 4 回 220 kV 出线,电厂拥有 6 台火力发电机组,其中 1~3 号机组接入 220 kV I 母线,4~6 号机组接入 220 kV II 母线;正常运行时各机组厂用电由本机厂高压变压器自带,高备变压器由主变压器中压侧引出,电气主接线简图如图 10 所示。

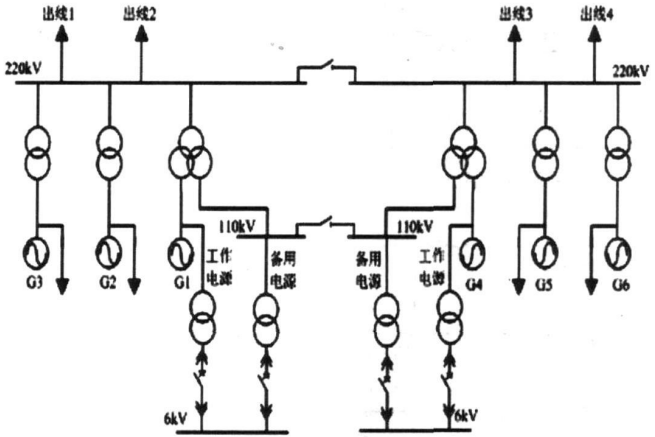


图 10 某电厂电气主接线简图

该厂 1 号机组所带的厂用负荷为 27. 21 MW,其中电动机负荷比例 78%,厂用电源分别采用延时切换、快速串联切换、手动并联切换、自动并联切换时厂用负荷大的扰动电流、电动机转差、功率波动及循环功率如表 2 所示。

表 2 不同切换方式下各电气量

切换方式	$i_{\max}$ /kA	$S_{\max}$	$P_{\text{fluctuate}}$ /MW	S_c /MW
延时切换	厂用负荷电压失稳 电动机无法自启动			无
快速串切	8. 04	0. 09	45. 52	
手动并切	2. 96	0. 01	6. 72	9. 24
自动并切	3. 36	0. 01	6. 72	9. 31

6 结 语

通过上述分析,厂用电源的 2 种切换方式各有利弊。采用串联切换方式、并联切换方式对厂用电源切换时需要注意以下问题。

1)如果采用串联切换,应注意综合考虑电源电

压与负荷电压之间的压差、频差、相角差及断路器的分、合闸时间,对快切装置的动作时间进行合理的整定,应尽量在厂用负荷较小时进行厂用电源的切换。

2)如果采用并联切换,切换时间越短越好,最好采用基于快切装置的自动并联切换方式,减少 2 次冲击。建议厂用电源采用并联切换方式,为避免切换过程中循环功率的问题,并联切换之前最好能分析核实切换过程中的循环功率,进行控制,使循环功率最小,提高厂用电源切换的可靠性。

厂用电源切换的快速性及可靠性对发电厂的安全稳定运行极其重要,尤其是事故工况下的厂用电源切换,对减少厂用负荷损失,缩小事故范围意义重大。不同的厂用电源切换方式各有利弊,应根据各发电厂

的实际运行状况及接线方式,合理选择厂用电源的切换方式。

参考文献

- [1] 李子健. 600 MW 机组 6 kV 厂用电切换问题分析及对策 [J]. 电力建设, 2009, 22(3): 119—121.
- [2] 陈悦. 厂用电 6 kV 快切装置动作分析与改进 [J]. 华北电力技术, 2008, 10(6): 39—42.
- [3] 阮俊豪. 厂用电快切装置改造 [J]. 华电技术, 2008, 30(12): 66—69.
- [4] 肖仕武. 发电厂不同厂用电环并操作问题 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 142—145.

(收稿日期: 2010—07—10)

(上接第 35 页)

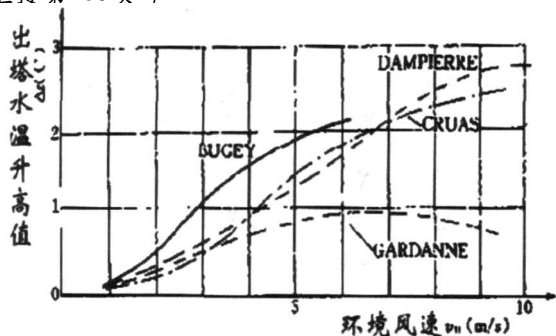


图 1 国外多个电厂冷却塔环境风速与出塔水温的关系曲线

冷却塔空气动力涡流调节装置即在逆流式自然通风冷却塔进风口周围每隔一定距离安装一道宽 6~7 m, 高度略低于进风口的导流栅墙(板)。由于导流板的存在,相当于冷却塔进风口外移了 6~7 m,也相当于把干扰区外移,使干扰区远离塔筒。同时由于导流栅墙(板)的整流作用,会有有效的改善大风对冷却塔侧面进风的影响,从而提高冷却塔的效率。采用空气动力涡流调节装置后,将发生以下变化:①水塔周边进风均匀度明显提高。②水塔周边进入水塔

5%~35%。④在冷却塔内部形成稳定的旋转上升气流,使空气较深地和均匀地穿透冷却水塔内部,减少了塔内的漩涡区。

3 经济效益

冷却塔出水温度降低,对发电厂经济效益的影响,主要表现在以下三个方面。

1)凝汽器背压降低,从而降低了汽机热耗;

对 600 MW 机组,每座冷却塔加装一套空气动力涡流调节装置,导向板采用现浇钢筋混凝土结构,总投资约 700 万元。冷却塔加装空气动力调节装置后,全年平均冷却水温降低约 1.5℃,折合每千瓦时降低标煤耗约 0.5 g 左右。

2)改善电厂辅助设备(发电机内冷水,机组油、空气、氢气冷却器、辅机轴承冷却系统等)的工作条件,提高辅机效率;

3)降低污染物排放,如灰渣、SO₂、NO_x 的排放,创造了社会效益及环保效益。

4 结 语

冷却塔空气动力涡流调节装置是一项新型的节能环保技术,符合国家倡导的节能减排政策。加快先进节能技术、产品开发和推广应用这也是国务院关于加强节能工作的重要指示。应该积极引进国外先进节能技术和管理经验,广泛与国际组织、有关国家和地区在节能领域的广泛合作。这也是加快中国节能减排的一项有效途径。

(收稿日期: 2010—06—22)

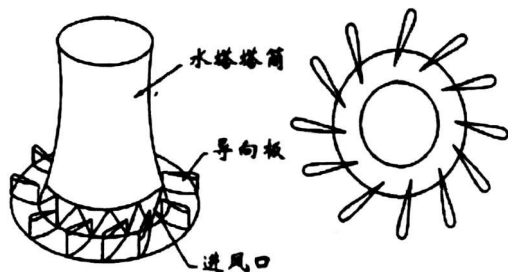


图 2 冷却塔空气动力涡流调节装置示意图

的空气(水平)区域扩大,一般超过了入风口高度,有的达到入风口高度的 2 倍以上。③水塔进风量提高

德宝直流四川电网安全稳定控制系统方案设计

吴 冲¹, 刘汉伟¹, 蔡 华²

(1 西南电力设计院, 四川 成都 610021; 2 德阳供电局, 四川 德阳 618000)

摘 要: 德阳—宝鸡 ± 500 kV 直流输电工程投运后, 给四川电网安全稳定运行带来新的挑战。为了保障交流特高压示范工程和四川电网的安全稳定运行, 在详细的潮流稳定计算基础上, 提出了合理的安控系统配置方案。重点讨论了安控系统方案设计的侧重点, 包括安控系统总体架构、提高系统可靠性和安全性的措施、多直流联合调制功能的实施以及安控系统自备自投的适应性等问题。

关键词: 高压直流输电; 特高压; 安全稳定控制系统; 多直流联合调制; 自备自投

Abstract: The commissioning of Deyang—Baoji ± 500 kV direct-current transmission project has challenged the safety of Sichuan power grid. To ensure the safe operation of UHV power transmission project and Sichuan power grid, a rational configuration scheme for security and stability control system is presented based on the flow and transient stability simulation. The emphases of the scheme design are discussed, including the general structure, the measures to improve the reliability and safety, the implementation of multi-HVDC power modulation and the coordination of stability control system, and automatic throw-in equipment of emergency power supply.

Key words: HVDC transmission; UHV; security and stability control system; multi-HVDC power modulation; automatic throw-in equipment of emergency power supply

中图分类号: TM712 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0065-04

0 引 言

为贯彻国家电力结构调整关于“水火互济”、“南北互补”的战略, 国家电网公司(简称国网公司)建设了德阳—宝鸡 ± 500 kV 直流输电工程(简称德宝直流工程), 额定输送功率为 3 000 MW。德宝直流工程建成后, 丰水期华中(四川)电网向西北电网送电, 枯水期从西北电网受电, 实现了能源跨区的优化配置, 对华中(四川)电网和西北电网的安全经济运行意义重大。

1 安控系统建设必要性

随着特高压、高压直流输电工程和特高压交流工程项目的陆续投产, 全国电网结构发生了显著变化: 德宝直流投产后, 华中电网与西北电网实现了多直流联网; 复龙—上海特高压直流投产后, 华中电网与华东电网实现了多直流联网; 特高压交流示范工程投产后, 华中电网与华北电网也实现了大功率交流联网。

目前特高压示范工程(长治—南阳—荆门)为单

回线单台变压器, 且大部分时间处于大功率送电模式下, 静稳极限较低。计算机仿真和电网实测数据表明, 华中电网发生大机组跳闸事件后, 损失的功率会按照接近 1:1 的比例转移到特高压示范工程线路上, 一旦线路潮流超过其静稳极限将导致特高压联络线的解列^[1]。

德宝直流工程投产后的电网稳定分析结果表明, 德宝直流接入电网以后, 对四川电网的暂态稳定水平没有太大影响; 但德宝直流闭锁或 500 kV 交流出线发生严重故障时, 会导致华中电网出现较大的功率缺额(枯期, 西北向华中送电)或功率富余(丰期, 华中向西北送电)。

若此时特高压示范线路处于大功率送电方式下, 特高压线路潮流可能出现较大波动并最终导致特高压线路解列。

根据电网运行经验, 直流工程在投运初期的故障率较高, 单极强迫停运平均 5~7 次/年, 双极强迫停运平均 0.5 次/年。而特高压示范工程目前在跨区电力支援、资源优化配置方面担负着重要作用, 保证其安全平稳运行具有重大意义。

因此, 为了保证电网的安全稳定运行, 按照电网

“三道防线”的思想对德宝直流工程投运后的电网稳定情况进行了分析,并据此提出了四川电网安控系统的配置方案^[2-3];在四川电网配置 1 套安全稳定控制系统(简称四川安控系统),通过切机/切负荷实现功率的就地平衡(四川电网网内平衡),避免潮流大范围转移。重点讨论了四川电网安控系统的主要设计要点。

2 安控系统设计要点

2.1 系统概述

为了适应德宝直流运行方式的需要,本工程配套的四川电网安控系统需要实现丰水期切机和枯水期切负荷的功能。

其中,切机子系统利用现有切机执行站,需要采取切机措施时,控制主站将切机命令发送至相关执行站,集中切除水电机组。

而切负荷由于量较大,为了分散切负荷控制风险、避免影响重要供用户和民生用电,考虑在四川电网 23 个 220 kV 变电站配置切负荷执行装置。

由于切负荷控制影响面大,对安控系统可靠性和安全性都有更高要求,主要介绍德宝直流工程安全稳定控制系统切负荷功能的设计。

2.2 系统结构及功能

目前国内大部分集中切负荷控制系统均采用分层分布方式,第一层为控制决策主站,第二层为若干控制子站,第三层为底层执行站,一般控制子站所控制的执行站不超过 10 个。

作为直流联网配套的安稳项目,本工程涉及的范围广、站点多,所需投资较高。为了节省投资,同时不影响系统功能,本工程第一次采用扁平式的稳控系统结构^[4],即,取消中间层控制子站,直接由控制决策主站控制执行站。为此,控制决策主站需要有非常强的数据处理能力和通信处理能力。

因此,本工程控制决策主站采用国网电力科学研究院新一代的 SCS-500 型稳控装置^[5]。该装置的主要特点在于平台容量大,处理速度快。SCS-500 型装置 1 块光通信板可以出 4 个独立光口,每个光口对应 1 台光电变换装置,每台光电变换装置能同时与 8 个方向通信,即,4 台装置可以与 32 个方向同时进行通信,能够满足本工程控制决策主站与 23 个切负荷执行站通信的要求。

为了减轻装置运行压力,将故障判别功能与切机/切负荷控制功能分别交由德阳换流站和谭家湾 500 kV 变实现。

1) 德阳换流站安全自动装置负责判别本地交直流系统运行工况和故障形态,根据离线策略表决策出切机/切负荷总量并发送到谭家湾变电站。同时,德阳换流站具备接收外部直流调制和闭锁直流命令的功能。

2) 谭家湾变电站安全自动装置的主要功能是接收切机/切负荷执行站上送的可切机/可切负荷量,实时更新控制策略表;接收德阳换流站发来的切机/切负荷总量时,根据策略表将控制总量分解到具体的执行站实施切机/切负荷控制。

德阳换流站稳控装置按双重化配置,并列运行,两套系统之间无信息交换,完全独立。谭家湾稳控装置按双重化配置,并列运行独立决策,互不影响;但在某些异常情况下(某套系统无法获取对应子站的信息时,会出现两套装置切机/切负荷策略表不一致),谭家湾变电站安控 A 套系统和 B 套系统需要相互交换信息以完成决策。A/B 两套系统通过柜间的直连光纤实现采集信息的交换。

2.3 提高可靠性和安全性的措施

安全自动装置可靠性和安全性的保障除了装置本身采用高性能的部件和集成技术以外,还包括经过长时间运行考验的交直流故障判据,以及软件防误措施,如谭家湾安全自动装置对于从德阳换流站发来的控制量进行有效范围的判别,把超有效范围的数据过滤掉,减少装置误动几率。

安全稳定控制作为跨区域的系统工程,站点之间的数据通信频繁、实时性要求高。因此,安全稳定控制系统的专用通道是保证整个系统可靠性和安全性的关键环节。

德阳换流站与谭家湾变电站之间的通信采用专用纤芯直连的方式,2 套装置分别走不同的光缆,减少了中间转换环节;谭家湾与执行站之间采用点对点、复用通信 2 M 口的方式,通道按不同路由的光纤环网电路组织通道,对不具备条件的通道进行了整改;承载安控业务的 SDH 通信设备采用双重化配置,单一 SDH 设备失效不会造成两路通道断开。

同时,稳控装置对通信内容进行了至少四种校验(CRC 校验、特殊编码识别等),并要求命令报文的连续多次确认。

2.4 基于事件触发的多直流联合调制

华中(四川)受电模式下,德宝直流非正常停运需要切除四川电网本地负荷。直流单极停运时,直流极控可以根据另一极运行工况,利用直流阀组的过流能力,自行采取提升功率措施,以减少负荷损失,避免安控装置动作^[6];而一旦双极停运,安控装置动作无法避免,且切负荷量较大。因此,如何减少切负荷量、将故障对四川电网的影响降到最低成为本工程的一大难题。

目前,华中电网有多条直流线路与华东电网和广东电网相连,这包括向家坝至上海 ± 800 kV 直流工程(额定送电容量 6 400 MW),三峡电站至上海 3 回 ± 500 kV 直流线路(单回额定送电容量 3 000 MW),三峡电站至广东 1 回 ± 500 kV 直流线路。枯期华中电网通过德宝直流受电的同时通过三峡直流送出线路向华东、广东电网送电。

由于直流系统换流阀触发角的快速可控性,通过调整触发角可以快速、平滑地调节直流输电功率^[7]。那德宝直流故障时能否实时调节三峡直流送出功率来实现华中电网自身的功率平衡,从而减少四川电网切负荷控制量呢?

计算分析结果表明,采用德宝直流闭锁事件驱动的三峡外送直流功率紧急调制的确可以大大降低四川电网的切负荷量^[8];德宝直流双极闭锁时,通过将三峡直流功率紧急回降 10%可以减少四川电网切负荷控制量的 58%。因此,本工程中优先考虑采用德宝直流闭锁事件驱动的三峡外送直流功率快速调制以减少四川电网切负荷量。

基于计算分析结果,设计基于德宝直流闭锁事件驱动的直流紧急调制逻辑如下:德阳换流站安控装置捕获到直流双极闭锁故障或交流出线故障后,根据离线策略表,优先将直流调制量发送到复龙换流站、龙泉换流站和宜都换流站的安全自动装置;相应站点安全自动装置接收到调制量后,采用空接点方式向各自的极控系统发送直流调制命令。

2.5 备自投的考虑

目前四川电网 110 kV 变电站普遍安装了备用电源自动投入设备(简称备自投);当 1 回 110 kV 进线故障掉电时,自动将作为备用电源的另 1 回 110 kV 进线投入,确保变电站不间断运行,提高供电可靠性^[9]。

本工程四川电网共有 23 个 220 kV 变电站配置

了切负荷执行装置,装置接收来自主站的命令并直接动作于本站 110 kV 出线开关跳闸。因此,不允许线路对侧 110 kV 变电站备自投装置动作投入备用电源,否则负荷无法实际切除。

为了适应安控系统的需要,往往要对备自投设备进行改造。目前较为普遍的做法有“增加闭锁备自投的远传装置”、“修改备自投起动判据”等方法。前者需要增加远传装置,将安控动作接点传送至 110 kV 变电站闭锁备自投,该方案直接可靠,但工程实施较复杂,依赖通道,费用较高;后者对备自投的软件进行修改,工作量大,可靠性降低。

本工程采用集中切负荷控制方式,所有切负荷控制策略在谭家湾安控主站完成。因此,考虑通过调整策略表的方式来解决安控系统切负荷与备自投的矛盾。

第一步,由电网调度部门梳理本工程所有进入切负荷控制序列的 110 kV 线路,确保其构成备自投关系的闭集合;

第二步,将有备自投关系的线路进行分组,如 A、B 线构成备自投则编入同一组;

第三步,在谭家湾装置的策略表中将同一组线路视为 1 回线,不论 2 回线的潮流方向如何,同时切除 2 回线。这样就确保了负荷的有效切除。

3 结 语

1)德宝直流四川电网安控系统结构采用 1 个主站对 25 个执行站的方式,其装置平台规模和处理能力在国内居于领先地位。经过数月的挂网运行,安控系统的可靠性和安全性得到检验,对今后其他工程具有一定的借鉴意义。

2)第一次在国内实现广域的多直流联合调制,不仅在本工程中实现四川电网切负荷控制的最优化,同时对今后多直流联合调制的工程应用打下了基础。

参考文献

- [1] 特高压试验示范工程投产后互联电网安全稳定控制措施配置方案研究[R]. 中国电力科学研究院, 2008.
- [2] DL 755—2001, 中华人民共和国电力行业标准电力系统安全稳定导则[S].
- [3] 德阳万寿桥换流站 2010 年接入系统安全稳定控制系统专题研究[R]. 西南电力设计院, 2009.

[4] 西北—华中直流联网工程四川电网安全稳定控制系统初步设计[R]. 西南电力设计院, 2009.

[5] 四川德阳换流站 SCS—500 分布式稳定控制装置功能说明书[R]. 南京南瑞电网安全稳定控制技术分公司, 2010.

[6] 浙江大学直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 中国电力出版社, 1985.

[7] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[8] 德宝直流与特高压交流试验示范工程运行控制策略研

究[R]. 中国电力科学研究院, 2009

[9] 四川电力系统 2010 年度运行方式[R]. 四川省电力公司

作者简介:

吴冲(1981), 男, 工程师, 从事安全自动装置和继电保护规划设计工作。

刘汉伟(1964), 男, 高级工程师, 从事安全自动装置和继电保护规划设计工作。

蔡华(1981), 男, 工程师, 从事继电保护管理和研究工作。

(收稿日期: 2010—07—10)

(上接第 3 页)

电压的不平衡度, 对抑制双回线路同时跳闸的作用十分显著, 在实际工程中, 一般采用逆相序排列。

计算结果表明, 导线采用“VⅣ”鼓型布置的 500 kV 双回路直线塔的电气性能满足规程规范的要求, 且较导线采用“Ⅲ”鼓型布置方式的铁塔电气性能更有优势。

4 在工程中的运用

2009 年, 四川电力设计公司承担宜宾—泸州 500 kV 同塔双回输电线路新建工程设计工作。该工程起于宜宾(叙府)500 kV 变电站, 止于泸州 500 kV 变电站, 线路全长约 $2\times 81\text{ km}$, 采用同塔双回架设方式, 途径四川省宜宾市和泸州市。根据该条输电线路走线区域经济较发达, 人口众多, 房屋多, 分布广等工程特点, 在该工程中采用导线“VⅣ”布置的鼓型直线塔, 属国内首次使用。

新型导线“VⅣ”布置的鼓型直线塔的应用较传统“Ⅲ”鼓型直线塔, 线路走廊平均宽度缩短了 3.05 m 。走廊宽度的缩短, 全线房屋拆迁减少 $13\,230\text{ m}^2$, 节约房屋拆迁面积 10.8% 。

按相同的使用条件, 用“Ⅲ”鼓型直线塔替换“VⅣ”鼓型塔, 全线直线塔耗钢量增加 300 t 增加塔材耗量 3.43% 。

绝缘子方面, “VⅣ”鼓型塔较“Ⅲ”鼓型塔增加 521 支合成绝缘子, 增加费用约 104.2 万元 。

综合考虑, “VⅣ”串在宜泸线中的使用, 共节约投资 754.5 万元 , 具有很好的经济效益和社会效益。

表 4 Ⅲ串和 VⅣ串在宜泸线经济技术比较表

比较项目	Ⅲ串	VⅣ串
平均走廊宽度 /m	31.37	28.32
房屋拆迁面积 /m ²	116 375	103 145
直线塔材耗量 /t	6 160	5 860
合成绝缘子(支)	875	1 396
综合费用(万元)	754.5	0

5 结 论

双回路直线塔采用“VⅣ”串挂线方式, 能节约输电线路走廊, 降低工程铁塔重量; 同时由于走廊宽度的缩短, 大大减小了房屋拆迁。通过在实际工程中的成功应用, 取得了显著的经济效益和社会效益, 具有广泛的推广价值。

参考文献

[1] 谢开, 刘永奇, 朱治中, 等. 面向未来的智能电网[J]. 中国电力, 2008, 41(6): 19—22.

[2] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 7—11.

[3] 余贻鑫. 面向 21 世纪的智能配电网[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2(6): 14—16.

[4] 陈建民, 周健, 蔡霖. 面向智能电网愿景的变电站二次技术需求分析[J]. 华东电力, 2008, 36(11): 37—38.

[5] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1—7.

作者简介:

田峻(1971), 男, 硕士, 工程师, 从事高压输电线路设计。

钟顺洪(1978), 男, 硕士, 工程师, 从事高压输电线路设计。

于学玉(1980), 男, 硕士, 工程师, 从事高压输电线路设计。

(收稿日期: 2010—05—18)

绵竹智能化配网系统的设计与实现

刘从洪, 邓晓林
(德阳电业局, 四川 德阳 618000)

摘 要:汉旺新城配网自动化项目涉及户外开关 35 台, 环网柜 9 台, 箱式变电站 63 台, 采用了 PCS-9002 配网自动化管理系统。配网自动化功能完成后, 实现了全网的配网监控、馈线自动化功能, 提高了汉旺新城配网自动化的运行水平和供电可靠性。

关键词:配网自动化; 可靠性; 馈线

Abstract: The distribution automation system of Han Wang involves 35 outdoor switches, 9 ring main units and 63 box transformer substations using the PCS-9002 Distribution Automation Management System. It has realized the function of distribution network monitoring and feeder automation of the whole network, which has greatly improved the operation level of distribution automation and the reliability of power supply in the newly-built Han Wang.

Key words: distribution automation; reliability; feeder

中图分类号: TM76 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0069-02

0 引 言

绵竹供电局 2010 年对汉旺新城进行了配网自动化的试点运行, 涉及户外开关 35 台, 环网柜 9 台, 箱式变电站 63 台, 采用 PCS-9002 配网自动化管理系统。配网自动化功能完成后, 将实现汉旺新城配网 SCADA 功能、馈线自动化功能、配电管理应用功能和基于地理信息系统的配网管理功能, 能够达到提高配电网供电可靠性, 改善供电质量的目的。

1 系统结构及通信设计

1.1 系统结构设计^[1]

汉旺新城配网自动化系统为二层结构。

第一层: 主站, 是整个配电自动化系统的监控管理中心, 主要负责汉旺新城所有 10 kV 的线路、设备及用户的运行监控和配电运行管理。

第二层: 配电终端, 是用于中低压电网的各种远方监测、控制单元的总称。包括柱上开关监控终端 FTU、环网柜监控 DTU、配电变压器监测终端 TTU 等。

第一层主站系统位于调度中心, 主站从各个终端获取配电网的实时信息, 从整体上对配电网进行监视和控制, 分析配电网的运行状态, 对整个配电网进

行有效的管理, 使整个配电系统处于最优的运行状态。还具有故障诊断、定位、隔离、恢复供电的功能, 实现变电站 10 kV 出线的馈线自动化。它是整个配电网监控和管理系统的核心。

第二层配电终端负责环网柜、柱上开关、箱式变压器和配电变压器监控, 具备故障监测、上报功能。

1.2 系统通信设计

配电自动化系统的通信系统按照网络分层结构进行设计, 根据不同的应用环境, 综合考虑各主要因素, 采取不同的通信介质和通信方式, 提供优化的配网通信服务。

这里论述的配网自动化系统工程的通信主要分为两个层次, 即: 主站—配电终端, 配电终端 (FTU 或 DTU) 既要实现 DA 功能, 同时对线路、开关、所内配电变压器等设备的运行状态进行实时监控。根据通信网络设计原则, 采用光纤以太环网作为通信主网架, 保证了数据传输的实时性和通信故障的自愈能力。

由于配电变压器远动终端 (TTU) 主要是对配电变压器的电压、电流、功率、电能量等数据进行统计分析, 保存历史数据, 为负荷管理提供真实直接的参考数据, 对通信的实时性相对配电终端 (FTU 或 DTU) 要低一些, 大部分数据只要定期召唤或抄读即可, 且配电变压器的数量是柱上开关的几倍, 地理分布点广

泛且不规则, 配电变压器台区的增加或改造相对频繁, 因此采用 GRPS /CDMA 通信^[2]。

2 主站设计

主站系统是整个智能配电自动化监控和管理系统的核心, 是基于 IEC 61970 和 IEC 61968 国际标准的新一代配网自动化管理系统, 主站系统不仅具备数据采集、报警、事件顺序记录、事故追忆、远方控制、计算、趋势曲线、历史数据存储和制表打印、事件记录等常规 SCADA 功能^[3], 还具有配电网络故障诊断、故障隔离、网络重组、线路动态着色等功能。整个系统主要包括配电网 SCADA 子系统、馈线自动化系统 (DA)、配电地理信息系统 (GIS) 和配电管理系统 (DM) 等内容。

2.1 配网主站硬件体系结构设计

主站系统采用多个交换机形成的分流 / 冗余的双网机制, 遵循 ISO /OSI 七层网络参考模型、TCP /IP、X25、PPP 等。服务器采用了支持 RISC 技术的 SUN 系列服务器, 工作站则采用了 DELL 系列 PC。主站采用了 LINUX、W indow NT 和 UNIX 多操作系统的混合平台, 主站服务器采用高实时性、高可靠性的 UNIX 操作系统, 前置服务器采用 W indows NT 系统以满足稳定性和可操作性, 所有工作站采用性能价格比高的 PC 机, 安装 Linux 系统, 其结构如图 1 所示。

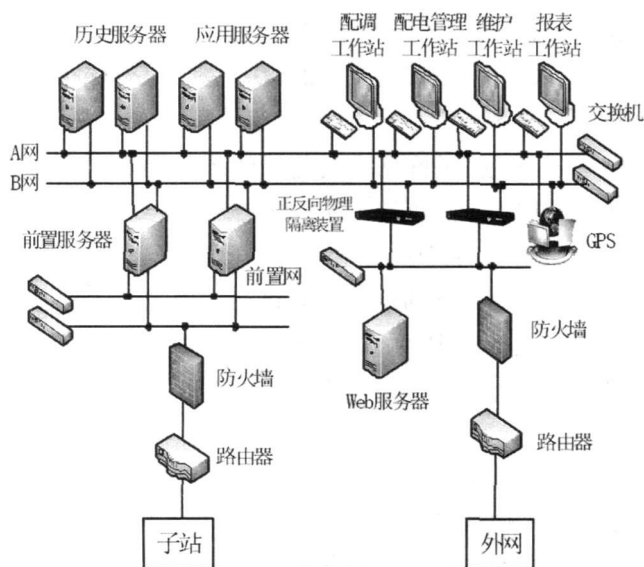


图 1 配网主站硬件体系结构示意图

此设计配网主站具有如下特点。

(1) 系统可靠性高, 系统的重要设备或设备的重

要部件均为冗余配置, 保证了整个系统功能的可靠性不受单个故障的影响。

(2) 系统具有良好开放性, 主站系统遵循国际标准, 满足开放性要求。全部选用通用的或者标准化的软硬件产品, 包括计算机产品、网络设备、操作系统、网络协议、商用数据库等均遵循国际标准和电力工业标准。

(3) 系统具有高度的安全性能, 主站系统构筑了坚固有效的专用防火墙和数据访问机制, 最大限度地阻止从外部对系统的非法侵入, 有效地防止以非正常的方式对系统软、硬件设置及各种数据进行访问、更改等操作。

2.2 馈线自动化 (DA) 功能

FTU 检测到配网一次故障, 提供实时故障信息给主站分析软件, 主站根据网络拓扑情况, 结合故障区域判断逻辑和 FTU 上送的故障信息, 对故障发生区域做出准确判断, 同时提出合理的负荷转移、非故障区域停电恢复策略, 提供两种方式完成自动化操作。

(1) 半自动模式: 主站将策略提供给在线监测主站调度人员参考, 由调度人员在主站远程遥控 10 kV 配电开关完成一系列控制, 最终完成故障区域判断、故障隔离、非故障区恢复供电一系列动作。

(2) 全自动方式: 由主站自动下发遥控令进行远程控制, 在自动操作同时实时监测当时系统及开关的状态, 每次开关操作都予以确认, 最终完成故障区域判断、故障隔离、非故障区恢复供电一系列动作。

以上两种操作都应具有详细的记录, 并记入数据库。详细过程如下。

① FTU 的故障处理: 柱上 FTU 采用 DSP 技术来满足高速故障检测要求, 实时分析采样电流和电压, 判断故障性质 (瞬时性故障和永久性故障)、故障类型, 完成故障录波、故障信息上报, 并执行主站的故障处理控制命令。柱上 FTU 在馈线自动化故障处理中充当检测故障及故障处理执行机构的角色。

② 主站的故障处理: 主站的故障处理主要有两大功能, 一是对 FTU 的故障参数管理, 二是实现故障定位、隔离和恢复供电。FTU 的各种整定值 (电流、电压、时间) 及其他运行参数, 均通过主站进行参数的维护。隔离完毕之后, 主站启动故障恢复程序, 分析网络的实时遥测、遥信, 提供恢复非故障区域的供电的建议方案, 并具有方案模拟预演的功能, 如潮流分

(下转第 84 页)

1985.

[4] 王小平,曹立明.遗传算法一理论、应用与软件实现 [M].西安:西安交通大学出版社,2002

作者简介:

吕后勇 (1982),男,硕士研究生,从事电力系统优化规划研究。

周步祥 (1965),男,博士,教授,从事电力系统调度自动化及计算机信息处理研究。

(收稿日期:2010—07—10)

(上接第 70 页)

析、操作开关、失电线路等。确定采纳方案后,可以通过手动遥控或批处理遥控实现方案的实施。

2.3 配电地理信息系统 (GIS)功能

配电地理信息系统 (GIS)包括图形功能,设备管理功能等。这些功能均是基于 ArcInfo平台基础上的地理信息系统上实现的。

(1)GIS图形功能 (AM)。此项功能是配网管理的基本功能,在 GIS背景基础上,可实现:

- 电子地图导入;
- 图形、图符编辑;
- 自动布置杆塔;
- 图形分层显示;
- 图形选择、漫游、缩放“鹰眼”功能;
- 图形定位:可以根据 GIS对象对 GIS图形进行图形定位;
- 图形信息的疏密效果协同矫正;
- 网络拓扑着色、供电电源分析、供电范围分析、停电范围分析;
- 图形测量:包括图形距离测量和面积测量;
- 图形打印:可以打印有地理背景的 GIS图。

供设备台帐的查询、统计和报表功能。

2.4 配电管理功能

配电工作管理子系统 (DM)是配网自动化系统的核心子系统,是配网自动化系统发挥配网调度管理自动化功能的重要组成部分。

配电工作管理子系统基于表单和工作流引擎驱动,其结构如图 2所示,与实时系统紧密相连,辅助电网调度计划人员完成各种纸张表单的审核处理过程,如设备检修申请单管理、调度计划管理等业务,将配网日常工作的大部分内容真正实现计算机管理,实现配电管理全过程的自动化,降低工作强度,提高工作质量。

3 结 论

该系统自 2010年 3月正式挂网投入运行以来,经过详细全面的系统测试,证明系统功能具有较高的可靠性,大大提高了绵竹地区汉旺新城的供电可靠性,在保证电压质量、降低电网网损起到了一定作用。汉旺新城配网自动化的投入运行,标志着四川电网配网自动化实用技术进入了一个新的阶段,为其他电力部门在实施同类型工程时,提供参考和借鉴作用。

参考文献

[1] 王海燕,曾江,等.国外配网自动化建设模式对我国配网建设的启示 [J].电力系统保护与控制,2009,37(11):125—129.

[2] 张荣坤 孙群中.现代通信技术 [M].北京:人民邮电出版社,2009.

[3] 王兴念,赵弈,等.配电自动化的实用设计 [J].电工技术,2004(7):30—33.

作者简介:

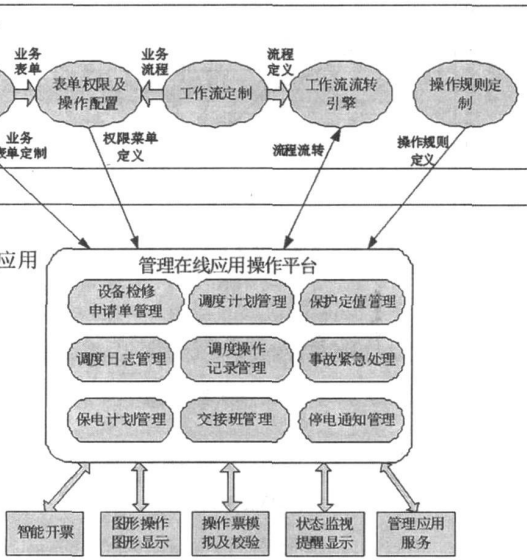
刘从洪 (1981),男,硕士,工程师,从事电网电力调度工作。

邓晓林 (1971),男,本科,工程师,从事电网电力调度工作。

(收稿日期:2010—05—19)

图 2 配电管理应用功能组成

(2)GIS设备管理 (FM),此项能够对配电设备,包括线路设备和变配电设备,进行管理和维护,并提



基于 NSGA II 的变电站电压无功控制方法

杨 坤¹, 魏小淤²

(1 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2 上海电力设计院, 上海 200025)

摘 要: 为了防止变压器分接头和电容器开关频繁动作, 通过一种设备状态诊断法建立了变电站电压无功多目标控制模型。该诊断方法根据控制设备连续动作时间间隔、已动作次数、电压无功越界持续时间分别引入惰性因子、比例因子和越限指标, 构成变电站电压无功多目标控制模型, 并结合 NSGA II 多目标进化算法进行求解。实例表明, 改进方法在保证电压无功质量的同时, 有效地解决了控制设备频繁动作问题, 具有很好的实用性和有效性。

关键词: NSGA II 算法; 设备状态诊断; 惰性因子; 比例因子

Abstract By evaluating the state of the equipment the voltage/reactive power multi-objective control model of the substation is established. The method introduces inertia factor proportionality factor and limit-exceeded indicator to construct multi-objective control model according to the time interval between equipment operations operation times and the time of voltage/reactive power exceeding limits. Model is solved by NSGA II (non-dominated sorting genetic algorithm). The examples verify that the method can handle the problems of equipment which operates frequently and ensure the power quality. It is a method with practicability and effectiveness.

Key words NSGA II algorithm; equipment state evaluation; inertia factor; proportionality factor

中图分类号: TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0071-04

电压是衡量电能质量的重要指标, 合理的无功分布可以保证电压质量并降低电网的有功损耗^[1]。变电站电压无功优化控制就是通过调节有载调压变压器的分接头和无功补偿设备以保证电压质量和降低有功损耗, 使电网经济运行。

不限制控制设备动作次数可以得到更好的电压无功控制效果, 但频繁动作将缩短设备的使用寿命, 增加设备投资。考虑到设备运行的经济性, 必须限制其动作次数。

目前针对变电站电压无功优化控制的方法较多, 其中最为经典的“九区图”^[2-4]及其系列方法; “十一区图”^[5]、“十三区图”^[6]、“十七区图”^[7-8], 已广泛应用于实际控制。文献[9-11]在传统“九区图”基础上, 引入无功模糊边界调节判据, 解决了“九区图”中部分区域调节振荡问题。文献[12-14]提出了一种根据操作动作矢量直接确定“五区图”动作边界的方法, 其控制精度、控制效果优于“九区图”控制策略。上述方法控制简单, 在电压变化平缓和负荷波动小的电网中可以取得较好的控制效果, 但当系统电压变化剧烈、负荷波动较大时, 设备会频繁动作。为了合理地分配设备动作次数, 文献[15-22]提出对一天负荷分类分段, 然后根据负荷的变化趋势实现对设备动

作的控制。此类方法很好地解决了设备频繁动作问题, 但其实现需要准确的负荷预测曲线甚至高压侧电压预测曲线, 负荷预测方法尽管很多, 但预测精度仍是研究人员关注的问题^[23]。

针对电压无功控制中设备频繁动作问题, 提出一种设备状态诊断方法来改进变电站电压无功控制。该方法将控制设备状态定义为可动作和不可动作 2 种, 根据其连续动作时间间隔、已动作次数、电压无功越界持续时间分别引入惰性因子、比例因子、越限指标, 判定设备所处状态, 并结合 NSGA II 多目标进化算法, 形成变电站电压无功多目标控制方法。该方法无需对负荷进行预测, 直接利用电压、负荷实时数据对变电站实施在线控制, 且算法简单, 易于程序实现。实例表明, 改进方法有效地限制了设备动作次数, 同时得到了较高的电压无功合格率, 具有较好实用性。

1 结合设备状态诊断的控制模型

将设备所处状态分为 2 种, 即可动作和不可动作状态, 可由惰性因子和比例因子确定。

1.1 惰性因子

变压器分接头动作后需要一段灭弧冷却时间, 若

在此时间内再次动作,触头将严重损坏,电容器开关也是如此。因此每台控制设备连续动作时间间隔必须大于 T_{min} , 小于此间隔不允许动作。同时,设备一天动作次数不能超过 N_{max} , 否则,会缩短其使用寿命,因此必须对动作次数加以限制。故引入惰性因子 μ_1 , 将动作次数平均分配于一天,并以设备连续两次动作间隔时间 T_{avg} 作为设备动作是否频繁的参考量,当连续两次动作间隔时间小于该值时,减缓设备动作。 μ_1 数学表达如下。

$$\mu_1 = \begin{cases} 0 & (t_{diff} \leq T_{min}) \\ \frac{1}{T_{avg} - T_{min}} (t_{diff} - T_{min}) & (T_{min} < t_{diff} < T_{avg}) \\ 1 & (t_{diff} \geq T_{avg}) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $T_{avg} = 86\,400 / N_{max}$ s t_{diff} 为本次计算时刻与设备最近一次动作时刻的差值。 μ_1 取值曲线见图 1。

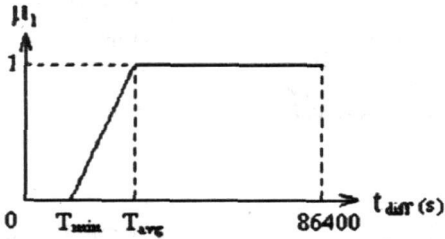


图 1 惰性因子曲线

1.2 比例因子

若控制设备在较短时间内发生了较多次动作,需要加以限制,否则,可能造成一段时间后动作次数耗尽。为此,引入比例因子 μ_2 , 将全天 86 400 s 分成 N_{max} (设备一天最大动作次数) 个连续时间区段,分别标记为 1、2... N_{max} 。若当前时刻所处区段编号 L 小于设备将动作次数 n_{next} , 表明在较短时间内占用了较多调节资源,应减缓设备动作,否则予以适当加速。 μ_2 的数学表达如下。

$$\mu_2 = \begin{cases} \frac{L}{n_{next}} & N_{max} \geq L \geq 1, N_{max} \geq n_{next} > 1 \\ 0 & n > N_{max} \end{cases} \quad (2)$$

其中, L 为当前时刻区段编号; n_{next} 表示为设备将动作次数。

μ_2 弥补了 μ_1 的不足, μ_1 着眼于设备连续两次动作时间间隔,是从局部时间角度来调节设备动作,而 μ_2 则从时间总体上对次数分配进行调整。

1.3 电压、无功越限指标

惰性因子和比例因子单纯从设备自身出发,未考虑变电站实时运行状态,可能导致电压无功越界后设

备无动作,调节严重滞后。为此,设计电压越界指标 μ_3 、无功越界指标 μ_4 。当电压无功较长时间越界时,加速设备动作以保证供电质量,同时避开短时扰动以防止不必要的动作。若设 t_v 为电压越界持续时间, t_q 为无功越界持续时间,为避开短时扰动,根据 IEEE 关于电磁现象和电能质量的分类^[24],短时电压变动范围为 3 s~1 min, 可设计数学表达如下。

$$\mu_3 = \begin{cases} 0, & t_v \leq 60 \\ t_v, & t_v > 60 \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_4 = \begin{cases} 0, & t_q \leq 60 \\ t_q, & t_q > 60 \end{cases} \quad (4)$$

1.4 数学模型

$$\begin{cases} \text{Min}(-\sum_{i=1}^{N_T} \mu_1^i, -\sum_{i=1}^{N_T} \mu_2^i, \mu_3, \mu_4) \\ s.t. \quad h = 0; g < 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, h 为潮流等式约束矩阵; g 为各节点不等式约束矩阵; N_T 为变电站变压器个数。

2 NSGA II算法

1.4 节的数学模型是一个多目标优化模型。考虑应用目前国际上广泛应用的求解多目标 Pareto 解集的 NSGA II 算法^[25]进行求解。其基本求解步骤:①生成初始种群 P_t ;②通过拥挤度选择 (crowding selection), 交叉, 变异操作从父代种群 P_t 中生成子代种群 Q_t ;③ P_t 和 Q_t 合成大的种群 R_t , 然后对整个种群 R_t 进行非支配解集排序;④当排序完成后,用 R_t 中排序靠前的非支配集的解填满新一代父代种群 P_{t+1} , 由于 R_t 的规模是 P_{t+1} 的 2 倍, R_t 中未使用的解将被直接删除掉;⑤对 P_{t+1} 中的元素进行拥挤度排序 (crowding-sort), 保留其中排序情况最好的解;若达到迭代次数则输出 P_{t+1} ; 否则, 转到步骤 2)。算法的流程

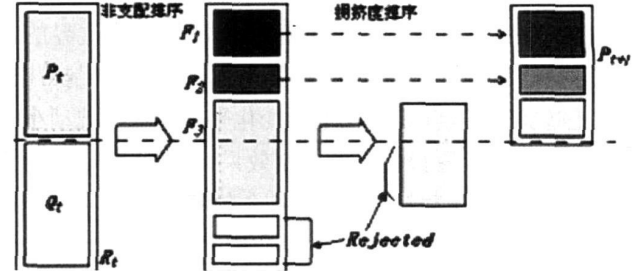


图 2 NSGA II 算法流程

3 算例及分析

采用改进方法对某市多座变电站进行了模拟计算,因篇幅所限仅列出其中一座变电站的情况。该变电站如图 3 所示。

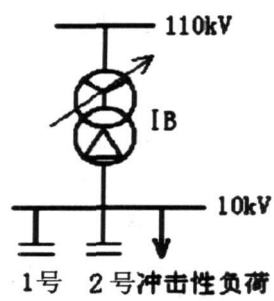
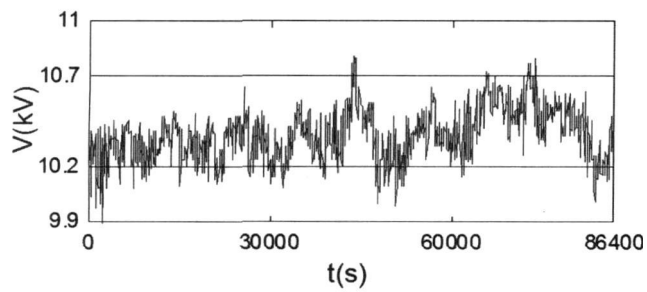
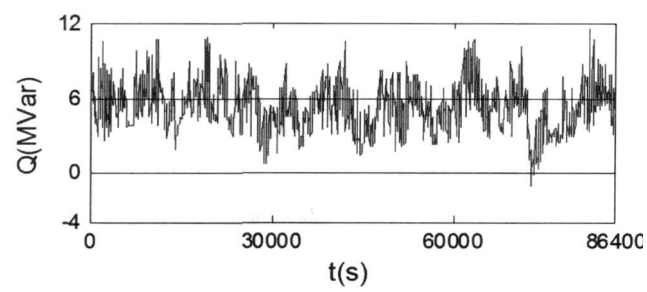


图 3 某变电站接线图



(a) 低压母线电压曲线



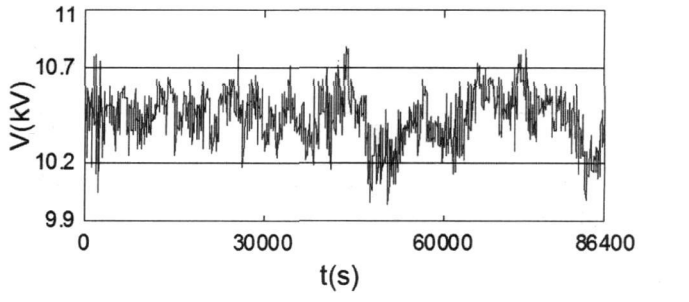
(b) 负荷无功曲线

图 4 实测电压无功曲线

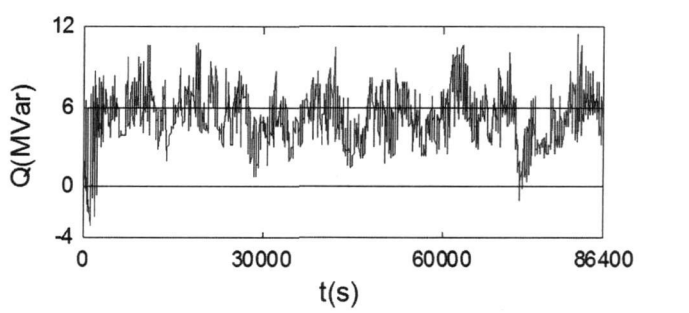
图中变压器变压比为 $110 \times (\pm 8 \times 1.25\%) \text{ kV} / 10.5 \text{ kV}$, 2 台电容器容量为 3 Mvar , 一天内规定分接头最大动作次数为 12、最小连续动作时间间隔为 3 min , 每台电容器开关最大动作次数为 6、最小连续动作时间间隔为 5 min 。一钢厂接于该站, 负荷呈冲击性, 波动频繁。实测低压母线电压曲线、负荷无功曲线见图 4(a)、(b), 采样周期为 6 s 。

设分接头一天最大动作次数为 12, 每台电容器最大动作次数为 6。变电站原控制系统优化电压曲线及无功曲线, 采用以上方法优化电压曲线及无功曲

线分别见图 5(a)、(b), 6(a)、(b)。表 1 列出了各项统计数据。

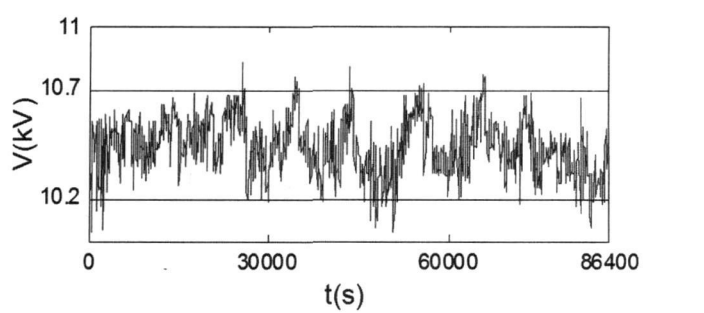


(a) 优化电压曲线

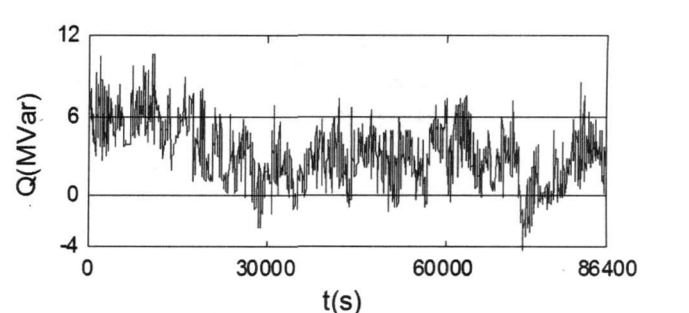


(b) 优化无功曲线

图 5 原系统优化曲线



(a) 优化电压曲线



(a) 优化电压曲线

图 6 所提方法优化曲线

由图 5、6、表 1 可知, 在限制设备动作次数时, 原控制方法耗费了全部的分接头和电容器动作次数, 电压合格率仅有 92.71% , 无功合格率为 65.43% 。采用所提方法后, 分接头动作 10 次, 每台电容器动作不

表 1 数据统计 2					
项目	电压合格 率 /%	无功合格 率 /%	变压器 动作次数	1 号电容器 动作次数	2 号电容器 动作次数
初始值	87.64	64.86	—	—	—
原方法	92.71	65.43	12	6	6
本文	94.21	78.20	10	4	3

超过 4 次,其电压合格率达到 94.21%,无功合格率达到 78.20%。说明在限制设备动作次数时,所提方法同样能保证电压无功合格率,减少设备动作次数。

4 结 语

提出了一种设备状态诊断法来改进变电站电压无功控制,结合 NSGA II 算法形成变电站多目标电压无功控制方法。

该方法不需负荷预测,直接利用实测数据进行优化计算,具有良好的实时性。

仿真结果表明,该方法以较少的设备动作次数达到了更好的电压无功合格率,说明该方法具有良好的实用性。

参考文献

[1] 刘天琪,邱晓燕.电力系统分析理论[M].北京:科学出版社,2005.

[2] 庄侃沁,李兴源.变电站电压无功控制策略和实现方式[J].电力系统自动化,2001,25(15):47—50.

[3] 苏泽光.变电站电压无功控制研究[J].电力系统自动化设备,2001,21(12):19—22.

[4] 严浩军.变电站电压无功综合控制策略的改进[J].电网技术,1997,21(10):47—49.

[5] 陈雪莹.基于十一区理论的变电站智能型无功补偿系统的研制[J].能源与环境,2006(2):74—76.

[6] 赵登福,司喆,等.新型变电站电压无功综合控制装置的研制[J].电网技术,2000,24(6):14—17.

[7] 沈曙明.变电站电压无功综合自动控制的实现与探讨[J].继电器,2000,28(11):60—62.

[8] 张永健.电网监控与调度自动化[M].北京:中国电力出版社,2007.

[9] 陈远华,秦荃华,杨晓红,等.基于模糊边界无功调节判据的电压无功综合控制[J].中国电力,2002,35(10):50—53.

[10] 阎振坤,厉吉文,李晓华.基于模糊边界和双九区图的变电站电压无功控制策略研究[J].继电器,2005,33(10):36—40.

[11] 张明军,厉吉文,董洁.模糊边界的电压无功调节判据

[J].电力自动化设备,2004,24(11):58—59.

[12] 蔡凯.电压无功综合控制装置控制原理的新讨论——由“九区图”到“五区图”[J].电力系统自动化,2004,28(19):91—95.

[13] 孙文生,张明军.五区图变电站电压无功控制原理研究[J].电力自动化设备,2005,25(12):39—62.

[14] 孙文生,张明军.关于“五区图”电压无功综合控制原理的再讨论[J].电力系统自动化,2005,29(23):69—75.

[15] Feng—Chang Lu, Yuan—Yih Hsu. Fuzzy Dynamic Programming Approach to Reactive Power/voltage Control in a Distribution Substation[J]. IEEE Trans on Power Systems 1995, 12(2): 681—688.

[16] Ruey—Hsun Liang, Yung—Shuen Wang. Fuzzy—based Reactive Power and Voltage Control in a Distribution System[J]. IEEE Trans on Power Systems 2003, 18(2): 610—618.

[17] T. Kumano, M. Takasaki. A Method to Identify the Optimal Voltage Control Structure of Electric Power Systems[J]. IEEE Power Engineering Society General Meeting Toronto, Canada 2003: 412—417.

[18] Z. H. Bi, Y. H. Song, et al. Integration of Algorithmic and Heuristic Techniques for Transition—optimised Voltage and Reactive Power Control[J]. Generation, Transmission and Distribution IEE Proceedings 2006, 153(2) 205—210.

[19] Hu Z, Wang X, Chen H, et al. Volt/var Control in Distribution Systems Using a Time—interval Based Approach[J]. 2003, 150(5): 548—554.

[20] 李林川,周崇泉,张全.基于功率和电压组合分段的变电站无功控制[J].高电压技术,2007,33(1):57—60.

[21] 熊小伏,王志勇.引入负荷预测的变电站电压无功控制[J].电力系统自动化,2003,27(13):58—60.

[22] 王秀丽,李正文,胡泽春.高压配电网无功/电压的日分段综合优化控制[J].电力系统自动化,2006,30(7):5—9.

[23] 康重庆,夏清,张伯明.电力系统负荷预测研究综述预发展方向的探讨[J].电力系统自动化,2004,28(17):1—11.

[24] 肖湘宁等.电能质量分析与控制[M].北京:中国电力出版社,2004.

[25] K. Deb, A. Pratap, S. Aganwal and T. Meyarivan. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA—II [J]. IEEE Trans On Evolutionary Computation 2002, 6(2): 182—197.

(收稿日期:2010—06—28)

基于量子进化算法的配电网架规划

王 腾,王 倩,张红涛,张洪源,郑 凯
(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘 要:详细介绍了应用量子进化算法进行配电网架规划的方法,采用单阶段子系统模型,以规划年综合费用最低为目标,以线路传输容量、电压降、配电网辐射状结构等为约束条件。通过对具体实例的仿真实验,验证了该方法的可行性和优越性。

关键词:配电网;网架规划;量子进化算法

Abstract The method of distribution network structure planning based on quantum - inspired evolutionary algorithm is introduced in detail. Using one - stage sub - system model, the optimal module takes the minimum annual comprehensive cost as its object, and takes the capacity and voltage drop of feeder and the radiation of distribution network as its restrictions. The feasibility and efficiency of the method are verified by the results of applying it to a sample system.

Key words distribution network; structure planning; quantum - inspired evolutionary algorithm

中图分类号: TM726 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0075-04

配电网网络规划问题是指在满足对用户供电和网络运行约束的前提下,寻求一组最优的决策变量(变电站位置和容量、馈线的路径和尺寸等),使投资、运行、检修、网损和可靠性损失费用之和最小^[1]。这里所研究的是配电网网络规划中的馈线路径优化规划问题,即配电网网架规划。配电网网架规划是一个离散的、非线性的、多约束的问题,近年来国内外学者做了大量的研究。文献[2]采用改进最小生成树算法进行配电网架规划,具有较高的计算效率,但是扩展规划仍需要根据人的经验有干预地进行;文献[3]利用辐射型配电网络每个负荷节点只有一个前继节点的特点,选取与负荷点相同数目的变量,避免了配网辐射状的检验,运用基因算法完成了网架优化;文献[4]详细探讨了 Tabu 搜索算法在配电网络规划中的应用,禁忌搜索算法用于大规模配电网规划时由于编码过长,通过禁忌表逐一移动线路,寻优效率不高,且禁忌表长度是根据经验确定的,规划结果随经验变动^[5]。

下面提出一种基于量子进化算法的配电网架规划方法。量子进化算法是一种以量子计算理论为基础的概率搜索算法,将量子计算与进化算法相结合,使用量子计算技术中的概念以提高进化算法编码的多样性,从而加快计算速度,保证优化的全局收敛性^[6]。给出了配电网架优化规划模型,详细阐明基于

量子进化算法的配电网架优化规划方法,最后通过对算例的仿真计算,验证了所提方法的有效性和优越性。

1 配电网架规划数学模型

根据规划时对负荷和配电系统的处理不同,将配电网规划模型分为单阶段子系统、单阶段全系统、多阶段子系统、多阶段全系统四类^[1]。这里采用单阶段子系统模型,假定规划水平年内负荷需求不变,在模型中不考虑负荷增长因素。配电网架规划以线路的规划年综合费用最低为目标,并服从变电站容量、馈线段容量、电压降落、辐射型网络结构等约束,其数学模型可表示为

$$\min f(x) = \sum_{k=1}^n C_{1k} T_k x_k + \sum_{k=1}^n C_{2k} T_k \tau_{\max} \Delta P_k \tag{1}$$

约束条件为

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \tag{2}$$

$$I_k \leq I_{\max} \tag{3}$$

辐射型约束;

连通性约束。

式(1)中 $f(x)$ 为年综合费用; k 为支路的编号; n 为待选线路总数; $C_{1k} = \gamma_k + \alpha_k$, γ_k 是投资回收率, α_k 是设备折旧维修费用率; T_k 是支路 k 的总投资费用; x_k 为优化变量,当待选线路 k 被选中时取 1,否则取 0; $\sum_{k=1}^n C_{1k} T_k x_k$ 为全部支路的年投资费用; C_{2k} 为电价;

$\tau_{\max}$ 是最大损耗时间; $\Delta P_k=(P^2+Q^2)Z_k/U^2$ 为支路 k 的有功损耗, Z_k 为支路阻抗, P 、 Q 为支路传输功率, U 为支路电压, P 、 Q 、 U 取支路同一侧的数值; $\sum_{k=1}^n C_{2k} \tau_{\max}$ ΔP_k 为全部支路的年运行费用; 式 (2) 为节点电压约束, $U_{\min}$ 为节点电压下限; $U_{\max}$ 为节点电压上限; 式 (3) 为支路电流约束, $I_{\max}$ 为支路 k 的最大允许电流。配电网必须遵守分层分区供电原则, 不应造成不同线路供电范围交叉和重叠, 并要求对所有的负荷点供电, 还应满足辐射状约束和连通性约束。在进行目标函数的计算过程中, 如果有违反约束条件的方案, 则为失败的规划方案。

2 基于量子进化算法的配电网架规划方法

量子进化算法是以量子计算理论为基础的概率搜索算法, 以量子比特 (Q -bit) 和量子叠加态 (superposition of states) 为基础, 将量子态的矢量表述引入染色体编码中, 以当前最优解的信息为引导, 用量子门 (Q -gate) 变换、量子交叉等算子优化种群, 使种群向着适应度高的方向进化。与传统进化算法相比, 量子进化算法能够在探索与开发之间取得平衡, 具有种群规模小、收敛速度较快、全局寻优能力强的特点^[7]。以年综合费用最低为目标函数, 基于量子进化算法的配电网架规划流程: ①输入线路阻抗、节电负荷等原始数据; ②初始化种群 $Q(t)$, 进化代数 $t=0$; ③对 $Q(t)$ 进行观测, 得到一组观测态 $P(t)$; ④将 $P(t)$ 代入辐射网判断子程序, 若非辐射网非连通则修复, 得到新的 $Q(t)$ 、 $P(t)$; ⑤将 $P(t)$ 代入潮流计算子程序, 计算潮流, 判断是否符合电压、电流约束, 对不符合约束个体赋予较大适应度; ⑥根据潮流计算结果, 对 $P(t)$ 中符合约束个体进行适应度评价, 选出最优解并保存; ⑦计算量子旋转角、量子门, 更新 $Q(t)$; ⑧执行量子交叉; ⑨判断迭代结束条件, 若满足则停止迭代输出结果, 否则令 $t=t+1$, 转至步骤 (3)。

以上流程中, 步骤 (2) 需对种群中每个个体进行染色体编码, 每一条待选线路对应染色体中的一位, 每个个体都包含全部待选线路的信息, 用量子位表示, 一个量子位的状态可由两个量子态的叠加表示为

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \tag{4}$$

式中, $|\psi\rangle$ 、 $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ 为量子位的状态; α 、 β 为复常数, 表示相应状态出现的概率, 它们满足 $|\alpha|^2 +$

$|\beta|^2=1$; $|\alpha|^2$ 、 $|\beta|^2$ 分别为量子位处于状态 0 和 1 的概率。每条待选线路由一个量子位表示, 若有 n 条待选线路, 则染色体编码为

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_k & \cdots & \alpha_n \\ \beta_1 & \beta_2 & \cdots & \beta_k & \cdots & \beta_n \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中, $|\alpha_k|^2 + |\beta_k|^2 = 1 (k=1, 2, \cdots, n)$ 。在初始时将所有 α_k 、 β_k 都设定为 $1/\sqrt{2}$ 。

步骤 (3) 中对 $Q(t)$ 进行观测的方法是: 对每一个量子位, 随机产生一个 $[0, 1]$ 随机数, 若该随机数小于 $|\alpha|^2$, 则 $P(t)$ 中的相应位取 0, 表示相应线路不被选中, 否则取 1, 表示相应线路被选中。这样, 就可得到一组二进制编码的观测态 $P(t)$ 。

步骤 (4) 对观测态 $P(t)$ 所表示网络结构的辐射状和连通性进行判断, 若不满足进行修复, 方法为将 $P(t)$ 中相应线路的二进制位取反, $Q(t)$ 中相应量子位 α_k 和 β_k 值互换。

步骤 (7) 中量子变换门采用量子旋转门, 每一位量子位 $[\alpha_k^{(t)}, \beta_k^{(t)}]^T$ 的更新公式为

$$\begin{bmatrix} \alpha_k^{(t+1)} \\ \beta_k^{(t+1)} \end{bmatrix} = G(\theta) \begin{bmatrix} \alpha_k^{(t)} \\ \beta_k^{(t)} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中, $G(\theta)$ 为量子旋转门。

$$G(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中, θ 为旋转角度, 其取值可查询表 1。

表 1 旋转角 θ 的查询表

x_k	$best_k$	$f(x_k) > f(best_k)$	θ			
			$\alpha_k \beta_k > 0$	$\alpha_k \beta_k < 0$	$\alpha_k = 0$	$\beta_k = 0$
0	0	True	0	0	0	0
0	0	False	0	0	0	0
0	1	True	$+\delta$	$-\delta$	0	$\pm\delta$
0	1	False	0	0	0	0
1	0	True	$-\delta$	$+\delta$	$\pm\delta$	0
1	0	False	0	0	0	0
1	1	True	$+\delta$	$-\delta$	$\pm\delta$	0
1	1	False	0	0	0	0

表 1 中 x_k 、 $best_k$ 分别为当前染色体和到目前为止搜索到的最优解的第 k 位, 均为观测态; $f(x)$ 为适应度函数; θ 为旋转角度; α_k 、 β_k 为当前染色体第 k 位量子位的概率幅; δ 为 θ 的大小, 其取值采用动态调整策略 $\delta=0.5\pi \exp(-t/t_{\max})^{[8]}$, $\pm\delta$ 指以相等的概率取 $+\delta$ 或 $-\delta$ 。

该量子门调整策略是将当前染色体观测值适应度 $f(x_k)$ 与当前最优解适应度 $f(best_k)$ 相比较, 如

果 $f(x_k) > f(best_k)$, 则调整相应位 $[\alpha_k^{(i)}, \beta_k^{(i)}]$, 使之向有利于 x_k 出现的方向进化; 否则, 使之向有利于 $best_k$ 出现的方向进化。

步骤 (8) 中量子交叉采用全干扰交叉, 使种群中的所有染色体均参与交叉, 信息充分组合交换, 提高搜索效率, 防止陷入局部最优, 具体方法是: 将种群中的所有个体随机排序; 取第一个个体的第一个基因作为新个体的第一个基因, 取第二个个体的第二个基因作为新个体的第二个基因, 循环往复, 直到新个体具有相同的基因数; 以此类推, 直到新的种群具有相同的规模。例如, 一个种群 $Q(t)$ 交叉前各个体为

$Q_1(t): A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 A_7;$
 $Q_2(t): B_1 B_2 B_3 B_4 B_5 B_6 B_7;$
 $Q_3(t): C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 C_6 C_7;$
 $Q_4(t): D_1 D_2 D_3 D_4 D_5 D_6 D_7;$
 $Q_5(t): E_1 E_2 E_3 E_4 E_5 E_6 E_7。$

交叉后为

$Q_1(t+1): A_1 B_2 C_3 D_4 E_5 A_6 B_7;$
 $Q_2(t+1): B_1 C_2 D_3 E_4 A_5 B_6 C_7;$
 $Q_3(t+1): C_1 D_2 E_3 A_4 B_5 C_6 D_7;$
 $Q_4(t+1): D_1 E_2 A_3 B_4 C_5 D_6 E_7;$
 $Q_5(t+1): E_1 A_2 B_3 C_4 D_5 E_6 A_7。$

3 算例分析

按照前面的模型, 分别用遗传算法和量子进化算法, 采用 Matlab 仿真, 对文献 [9] 中的配电网架规划算例进行测试。该配电网初始网为有 3 个节点、2 条支路的 10 kV 电网, 要扩展为 10 个节点 9 条支路的辐射型网络。网络结构如图 1 所示。

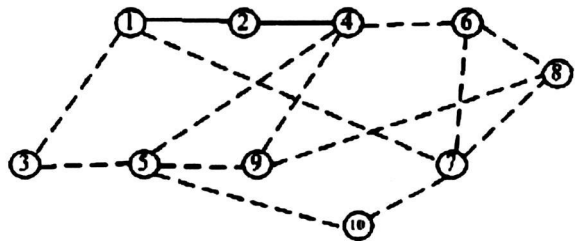


图 1 初始网架图

图 1 中节点 1 为变电站节点, 电压为 10.5 kV, 2 条实线表示已有线路, 14 条虚线表示待扩建线路, 用虚线表示。

取 $C_1 = 0.155$ 元 /kW·h, $C_2 = 0.5$ 元 /kW·h, $\tau_{max} = 3\,000$ h, 电压允许变化范围为 $\pm 7\%$, 系统基准容

量取为 $S_b = 10$ MVA, $U_b = 10$ kV, 最大进化代数为 100, 种群数为 10。经过仿真计算, 2 种算法得到满足约束条件的最优系统投建方案相同, 年综合费用均为 28.28 万元, 最优投建方案如图 2 所示, 虚线为需投建线路。

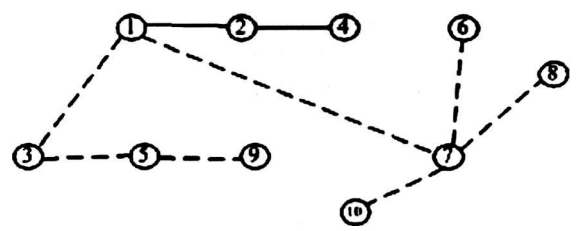


图 2 优化网架图

用 2 种算法分别计算 20 次, 将各代最佳个体适应度取平均值, 得到其最佳适应度平均收敛曲线图, 如图 3 所示。

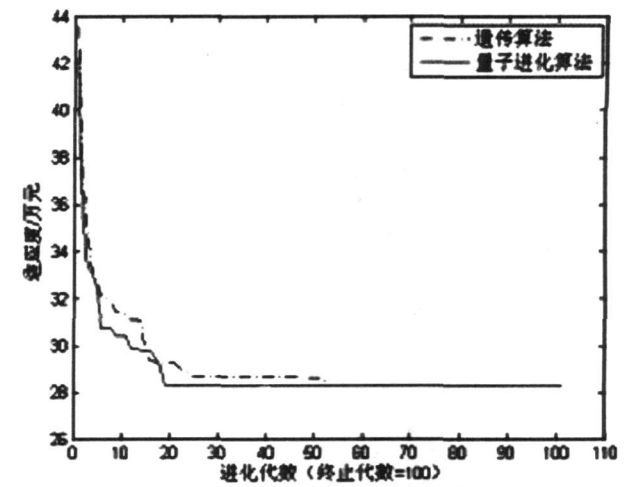


图 3 平均收敛曲线图

平均收敛代数, 遗传算法为 53 代, 量子进化算法为 19 代, 可见所用量子进化算法明显优于遗传算法, 计算速度大大提高。

4 结 语

前面详细介绍了应用量子进化算法进行配电网架规划的方法, 采用单阶段子系统模型, 以规划年综合费用最低为目标, 以线路容量、电压范围、辐射状结构等为约束条件。经过仿真验证, 所用方法在计算速度方面明显优于遗传算法, 该方法是有效的、可行的, 具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] 方兴, 郭志忠. 配电网规划研究述评 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 71-74.

- [2] 刘健, 杨文字, 余健明, 等. 一种基于改进最小生成树算法的配电网架优化规划 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 103—108.
- [3] 李靖霞, 鞠平. 配电网优化规划的基因算法 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(20): 12—14.
- [4] 陈根军, 李继洸, 王磊, 等. 基于 Tabu 搜索的配电网规划 [J]. 电力系统自动化, 2001, 4(10): 40—44.
- [5] 王成山, 王赛一. 基于空间 GIS 和 Tabu 搜索技术的城市中压配电网规划 [J]. 电网技术, 2004, 28(14): 68—73.
- [6] Han K H, Kim J H. Quantum - inspired Evolutionary Algorithm for a Class of Combinatorial Optimization [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(6): 580—593.
- [7] 张葛祥, 李娜, 金炜东, 等. 一种新量子遗传算法及其应

用 [J]. 电子学报, 2004, 32(3): 476—479.

- [8] 赵英杰, 王正志. 基于量子进化算法的 RNA 序列—结构比对 [J]. 生物化学与生物物理进展, 2009, 36(9): 1222—1228.
- [9] 陈章潮, 唐德光. 城市电网规划与改造 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 200—202.
- [10] 王凌. 量子进化算法研究进展 [J]. 控制与决策, 2008, 23(12): 1321—1326.

作者简介:

王 腾 (1987), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统规划。

王 倩 (1962), 女, 教授, 主要研究方向为电力调度综合自动化、分布式开放式 SCADA 系统、嵌入式工业测控系统。

(收稿日期: 2010—04—12)

(上接第 59 页)

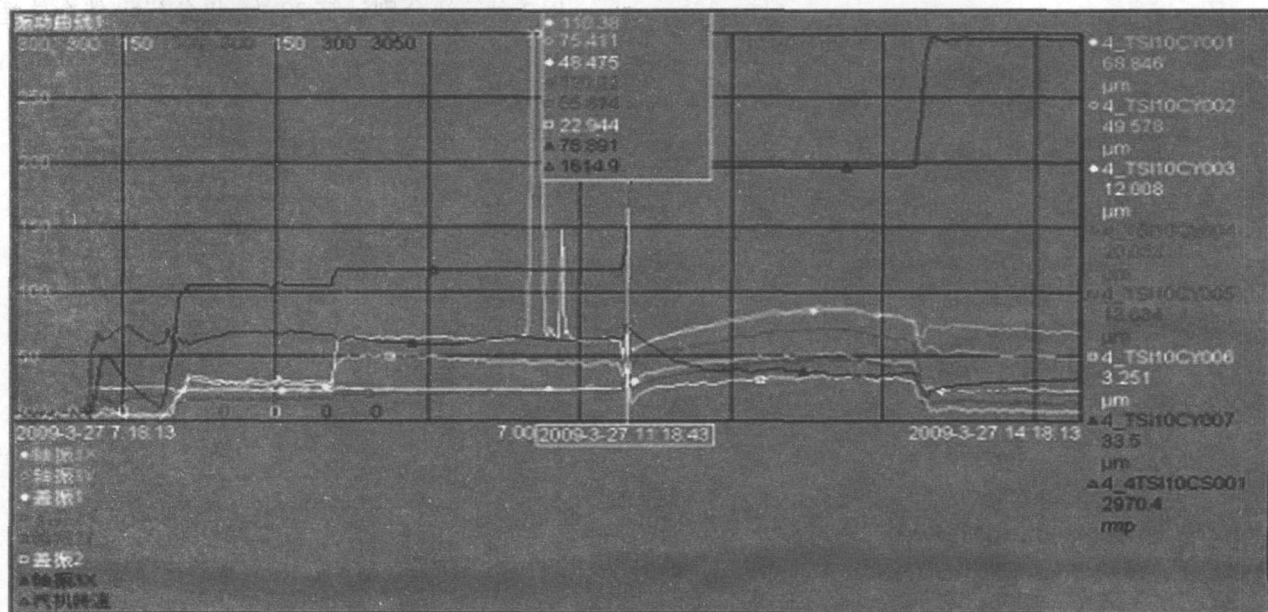


图 5 4 号机组 A 修后冷态启动 1、2、3 号瓦振动曲线图

4 建 议

1) 目前高压缸倒暖用汽从高排管道抽取, 只有在高压旁路开启后才能投入。高压缸预暖用蒸汽参数为 0.4~0.8 MPa, 200~250℃, 辅汽完全可以满足要求且可以利用邻机辅汽作为高压缸预暖汽源, 这样在锅炉点火前就可以进行高压缸预暖。建议将高压缸预暖用汽取自辅汽, 可缩短启动时间约 2 h 降低启动费用, 机组提前约 2 h 发电。

2) 暖机或升速过程中, 如果发生较大的振动, 应该立即打闸停机进行盘车直轴, 而不应该降速暖机。因为振动大最易导致动静部分摩擦、汽封磨损、转子弯曲, 转子一旦弯曲, 振动越来越大, 摩擦就越厉害。这样恶性循环易使转子产生永久性变形弯曲, 使设备严

重损坏。

3) 目前 CRT 缸温画面并没有各种温差值的显示, 各部温差需人工计算, 建议在画面中生成各部温差值便于监视和及时发现超限值。

参考文献

- [1] 彭金宝, 李振宁, 等. 300MW 机组集控运行规程 [Z]. 三河发电有限责任公司, 2007.
- [2] 杨树旺, 张新元, 等. 汽机设备说明书 [Z]. 三河发电有限责任公司, 2007.
- [3] 孙曰泰, 李贵春, 等. 三河电厂二期工程调试报告 [R]. 华北电力科学研究院, 2007.
- [4] 华东电业管理局. 汽轮机运行技术问答 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.

作者简介:

荆永昌 (1984), 男, 河南焦作人, 助理工程师, 从事发电厂集控运行工作。

(收稿日期: 2010—06—13)

基于 MST 和 IGA 的全局多目标电网优化

吕后勇¹, 周步祥²

(1. 湖南常德电业局, 湖南 常德 415000; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:在多电压等级电网优化规划中竭力寻求电网中某一负荷点或大用户预得到的最优供电方案,同时电网的安全性、经济性和可靠性基本要求均得到满足。这种电网优化思想不仅让用户得到优质服务,同时也从技术层面上解决了现代电力市场输配电的技术方案难题。基于三大基本要求,分别建立了电网投资及线损最少模型、电网节点短路电流平均最小模型、电网安全供电准则 N-1 模型。利用最小生成树思想构造电力网的 MST(最小生成树),利用 IGA(改进遗传算法)在全局目标函数中选取优化方案,最后得到了很好的实际应用效果。

关键词:最小生成树;电网优化;改进遗传算法

Abstract: Optimization in multi-voltage power grid planning efforts to seek a load points or large users to obtain the optimal power supply programs at the same time, the basic requirements of the network security, economy and reliability are met. This idea not only allows the users to get the availability of quality services, but also from a technical level meets the solution problems of power market transmission and distribution. Based on the three basic requirements, the least models of network investment and line loss, the average short-circuit current node and network security standards N-1 are established. The idea of minimum spanning tree is used to construct the minimum spanning tree (MST) of power grid, the improved genetic algorithm (IGA) is used to select the optimal programs in the objective function, and finally it has obtained the good effect in practical application.

Key words: minimum spanning trees; power grid optimization; improved genetic algorithm

中图分类号: TM714 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0079-06

0 引 言

目前关于大型电网优化规划的研究中,要么只单研究高压电网中的某一电压等级优化问题,比如站址选择优化或电网等级序列优化,要么只单研究中低压配电网中的某一问题,比如停电损失成本最小或线损最小,要么就针对输配电网提出一种优化规划思想,比如分层分区电网优化等,但其缺乏操作可行性。在总结上述优点与不足后,基于大型电网优化规划需满足的安全、经济、可靠三大基本要求,也即电网生产运行基本要求,提出应用最小生成树(MST)结合改进遗传算法(IGA)进行多目标电网优化规划,并取得了很好的实际效果^[1]。

1 基于最小生成树的优化数学模型

电网中包含了众多节点和线路,还包含了一些重要的运行参数。下面用集合的思想将它们描述出来,

便于在后面方便运用。

$$S=\{S_1, S_2\cdots S_n\}; N=\{N_1, N_2\cdots N_n\};$$

$$P_L=\{P_{L1}, P_{L2}\cdots P_{Ln}\}$$

$$B=\{B_1, B_2\cdots B_n\}; H=\{H_1, H_2\cdots H_n\};$$

$$W=\{W_1, W_2\cdots W_n\}$$

$$L=\{L_1, L_2\cdots L_n\}; P=\{P_1, P_2\cdots P_n\};$$

$$Q=\{Q_1, Q_2\cdots Q_n\}$$

$$U=\{U_1, U_2\cdots U_n\}; P_1=\{P_{11}, P_{12}\cdots P_{1n}\};$$

$$I_k=\{I_{k1}, I_{k2}\cdots I_{kn}\}$$

电源集合: S包含了电网中从不同电压等级线路将电能输送到变电站的电厂;

节点集合: N包含了 10 kV 配变节点、35 kV 节点 C_{n1}、110 kV 节点 C_{n2}、220 kV 节点 C_{n3}、500 kV 节点 C_{n4};

负荷集合: P_L包含了电网中的负荷点或大用户。负荷点由负荷预测结果决定负荷分布及其大小;

支路集合: B包含了电网中已有线路及所有可能待建线路;

支路回数集合: H包含了具体的任意两节点之间

线路的回路数,通常取 0、1、2 数值;

权重集合: W 包含了各支路侧重于某一优化目的的权重数值序列;

长度集合: L 包含了各支路的长度;

潮流集合: $P、Q$ 包含了各支路有功、无功潮流数值;

电压集合: U 包含了各节点电压幅值;

线损集合: P_l 包含了各支路的线损数值;

短路电流集合: I_k 包含了各节点的短路电流数值。

优化目标函数为

$$f = \sum_{i=1}^{N_b} W_i L_i H_i + P_r T \sum_{i=1}^{N_b} k_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} r_i \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i I_{k_i} \quad (2)$$

$$f = \sum_{i=1}^N W_i H_i (P_i - P_{\max}) + K \quad (3)$$

$$\min f = \lambda_1 f + \lambda_2 f + \lambda_3 f \quad (4)$$

经济性目标函数 f 表示按投资权重偏向线路投资费用和线损费用之和, k_i 为修正系数, 节点 ij 之间存在支路取 1 否则取 0, P_r 为线损单价 (万元 /kWh), T 为运行小时数; 安全性目标函数 f 表示按节点权重偏向各节点平均短路电流水平之和; $N-1$ 可靠性目标函数 f 表示按 $N-1$ 校验时支路过负荷之和, K 为一较大正数值。全局优化目标函数 f 表示综合电网安全、经济、可靠性要求下的综合目标函数。其中 $\lambda_1、\lambda_2$ 和 λ_3 为反映电网投资运营经济性、可靠性和安全短路电流水平偏好的权重, 且 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ 。这里考虑到电网安全第一、经济第二和可靠性第三的原则, 分别取 $\lambda_1 = 0.5、\lambda_2 = 0.1、\lambda_3 = 0.4$ 。另外选取 2 种权重系数作对比方案, 即 $\lambda_1 = 0.5、\lambda_2 = 0.2、\lambda_3 = 0.3$ 和 $\lambda_1 = 0.3、\lambda_2 = 0.1、\lambda_3 = 0.6$ 。

2 基于 IGA 的电网网架优化算法^[2,3]

2.1 编码方法

将原始节点及支路庞大的网络化简并对节点编号, 然后把每个支路看成一个基因, 全网络的支路选建状态为一个染色体, 染色体段的长度为编码支路中的支路数目。通过改变电力网网架结构来达到优化的目的, 故在编码方式上抛弃传统对所有支路采用二进制编码, 即编码中的“1”表示某支路闭合, “0”表示某支路断开的办法。而是采用十进制编码方式, 染色体长度等于可选建支路数 (38) 和已有支路数 (8) 的

和, 染色体长度为 46。十进制编码方式缩短了染色体长度, 节省了繁殖操作时间。由于基因值本身就是支路数, 不用再去编码解码, 也提高了计算速度。

2.2 种群规模

这里的基因个数就是简化系统中的编码可待建支路的个数, 一组基因一起构成染色体, 每个染色体都代表一种网络拓扑结构。不同的染色体一起构成种群。采用的种群规模数等于电力网中待建支路的个数 (38)。

2.3 适应度函数

由于优化的综合目标函数是极小值函数, 而遗传算法的适应度函数是最极大值函数。为了解决这个问题, 构造出遗传算法的适应度函数如下。

$$F(x) = \frac{1}{f(x)} \quad (5)$$

式中, $f(x)$ 为电力网网架全局优化综合优化目标函数。

2.4 遗传算子

常用选择的方法有比例选择法、最优保存法、随机联赛选择法等, 其中最易使用容易被理解的是比例选择法。这种方法是利用各个个体适应度函数值在整个适应度函数值的比例的概率来决定其后代的遗传可能性。上一代中某一个体被选中的概率用公式可以表示为

$$P_{si} = \frac{F_i}{\sum_{p=1}^N F_p} \quad (6)$$

其中, P_{si} 为个体 i 被选中遗传到下一代的概率; F_i 为个体 i 的适应度函数值; N 为群体中的个体数目。

在基因交叉和变异操作过程中使用自适应的遗传算子操作, 根据个体适应度值由大到小的排列顺序的变化而变化的基因交叉率和变异率。采用的基因交叉率和变异率计算公式分别为

$$P_c = \begin{cases} P_{cl} \frac{P_{d1} - P_{d2}}{\frac{P_{\max}}{2}} \left(\frac{P_{\max}}{2} - X(g) + 1 \right) & X(g) \leq \frac{P_{\max}}{2} \\ P_c = P_{cl} & X(g) > \frac{P_{\max}}{2} \end{cases} \quad (7)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} \frac{P_{m1} - P_{m2}}{\frac{P_{\max}}{2}} \left(\frac{P_{\max}}{2} - X(g) + 1 \right) & X(g) \leq \frac{P_{\max}}{2} \\ P_m = P_{m1} & X(g) > \frac{P_{\max}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

式中 P_{op} 为种群规模数; P_{c2} 和 P_{m1} 分别为对应于种群中最小适应度值的个体交叉率和变异率; P_{c1} 和 P_{m2} 分别为对应于种群中最大适应度值的个体交叉率和变异率; $X(g)$ 为个体 g 在种群中所对应的序号值。根据文献 [4], 操作中宜取 $P_{c1}=0.9$, $P_{c2}=0.6$, $P_{m1}=0.1$, $P_{m2}=0.01$ 。

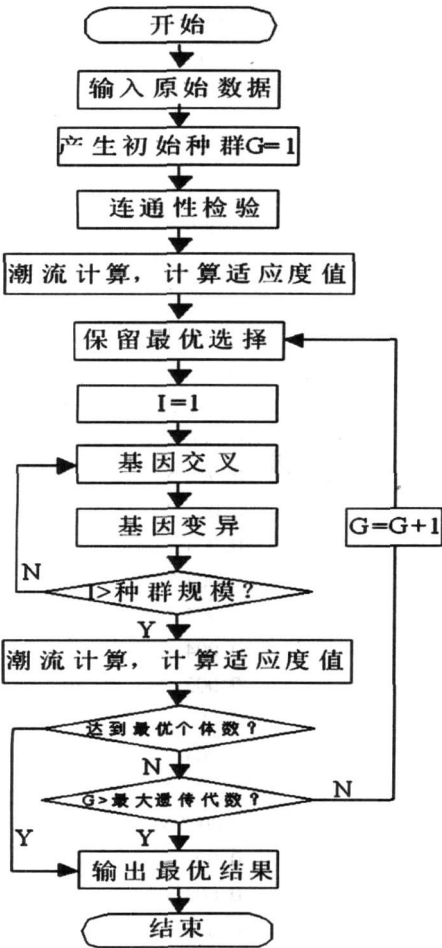


图 1 优化流程图

全局电力网网架优化流程图见 图 1。

3 算例分析

应用规划中的一个实例去验证所述改进遗传算法的正确性和合理性。现状年电力网网架包含 2 座 500 kV 站、2 座 220 kV 站、5 座 110 kV 站; 电力平衡后规划目标年电力网网架包含 2 座 500 kV 站、7 座 220 kV 站、16 座 110 kV 站和 3 座 35 kV 站。再将系统各电压等级归一化处理后, 系统总共 28 个节点、58 条线路 (含双回线路), 待选建线路数 50 条。图 2 中总共 46 条支路, 除去已有 8 条支路, 最后得到待选支路数 38 条。表 1 包含已有支路和待建支路全体的编号。

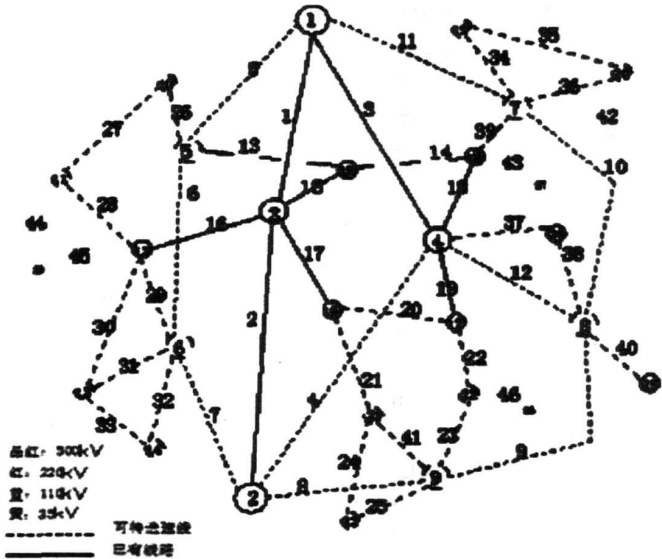


图 2 待优化电力网架图

3.1 计算方法及参数

采用 Matlab 遗传算法工具箱及其潮流计算程

表 1 待优化电力网支路线路编号表

支路号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
待选建线路数	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0
支路号	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
待选建线路	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
支路号	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	—	—
待选建线路	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	2	2	—	—

表 2 已知节点参数 (单位: 万 kW)

节点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
发电机出力	25	30	0	0	8	6	0	4	0	0	1	0.5	0	0.4	0
负荷	0	0	0	0	3	2	3	4	2	5	4	3	5	4	5
节点号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
发电机出力	0	0	0	2	0	0	0	1	2	1	0	0	0	—	—
负荷	5	4	4	5	3	3	3	4	5	5	0.5	0.4	0.4	—	—

表 3 已知支路参数 (单位: 万 kW、万 kVA、km)

支路	首末节点	传输容量	原有线路	可选建条数	长度	电阻 / Ω	电抗 / Ω
1	1—3	25	1	0	80	0.009 6	0.052 2
2	2—3	25	1	0	120	0.014 4	0.078 3
3	1—4	25	1	0	90	0.010 8	0.058 8
4	2—4	25	0	1	100	0.012 0	0.065 3
5	1—5	25	0	2	65	0.007 8	0.042 4
6	5—6	25	0	2	65	0.007 8	0.042 4
7	2—6	25	0	2	55	0.006 6	0.035 9
8	2—9	25	0	2	50	0.006 0	0.032 6
9	8—9	25	0	2	55	0.006 6	0.035 9
10	7—8	25	0	2	60	0.007 2	0.039 2
11	1—7	25	0	2	65	0.007 8	0.042 4
12	4—8	25	0	1	55	0.006 6	0.035 9
13	5—15	12	0	1	45	0.006 5	0.037 2
14	15—18	12	0	1	50	0.007 2	0.041 3
15	3—15	12	1	0	40	0.005 8	0.033 1
16	3—12	12	1	0	45	0.006 5	0.037 2
17	3—16	12	1	0	45	0.006 5	0.037 2
18	4—18	12	1	0	45	0.006 5	0.037 2
19	4—17	12	1	0	45	0.006 5	0.037 2
20	16—17	12	0	1	45	0.006 5	0.037 2
21	16—21	12	0	1	40	0.005 8	0.033 1
22	17—22	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
23	22—9	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
24	21—23	12	0	1	35	0.005 1	0.028 9
25	23—9	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
26	5—10	12	0	1	25	0.003 6	0.020 7
27	11—10	12	0	1	35	0.005 1	0.028 9
28	11—12	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
29	6—12	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
30	13—12	12	0	1	40	0.005 8	0.033 1
31	13—6	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
32	14—6	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
33	14—13	12	0	1	25	0.003 6	0.020 7
34	19—7	12	0	2	30	0.004 3	0.024 8
35	19—20	12	0	1	45	0.006 5	0.037 2
36	7—20	12	0	2	30	0.004 3	0.024 8
37	4—24	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
38	8—24	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
39	7—18	12	0	1	20	0.002 9	0.016 5
40	8—25	12	0	2	20	0.002 9	0.016 5
41	9—21	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
42	20—27	6	0	1	30	0.005 0	0.029 8
43	18—27	6	0	2	20	0.003 3	0.019 8
44	11—28	6	0	1	25	0.004 1	0.024 8
45	12—28	6	0	2	30	0.005 0	0.029 8
46	22—26	6	0	2	16	0.002 6	0.015 9

序。运行环境为 Lenovo vista 2G内存@ CPU酷睿双核处理器 2×1.67。该电力系统基准电压为 220 kV, 基准容量为 100 MVA。最优个体最少保持代数 N为 10,最大遗传代数 G取 300。

3.2 计算结果分析

3.2.1 所提方法的计算结果

由表 4 可以得出,在 3 组确定权重系数下,每一确定权重系数下均有一个最优方案。在 3 个最优方案之间对比,方案 1 与方案 2 在经济性不变的条件下,方案 2 提高了可靠性从而提升了节点短路电流安全性,增加了新建线路数;方案 1 与方案 3 在可靠性不变的条件下,方案 3 减少了新建线路数,节约了投资费用即提升了经济性,从而大大牺牲了节点短路电流水平的安全性。

表 4 三方案计算结果对比表					
优化	新建	全局目标 f	经济性 f	可靠性 f	短路电流 f
方案 1	38	18.92	35.04	8.60	1.35
方案 2	44	18.96	35.04	5.52	1.71
方案 3	30	15.01	25.56	8.60	2.55

3.2.2 计算实时间比较

表 5 三方案计算时间对比表			
算法种类		二进制编码 (s)	十进制编码 (s)
方案 1	遗传算法	560	/
	改进遗传算法	380	200
方案 2	遗传算法	590	/
	改进遗传算法	420	230
方案 3	遗传算法	523	/
	改进遗传算法	358	189

采用改进遗传算法计算比遗传算法计算时间约少三分之一,而十进制编码比二进制编码计算时间节省了近一半。

3.2.3 收敛性比较

对改进遗传算法及遗传算法进行了收敛性的比较,优化对象为全局优化目标函数 f 结束准则为连续 10 代最优解无变化或者迭代次数大于 300 则结束迭代。如图 3、图 4、图 5 所示,改进遗传算法各代的解均优于遗传算法,并且经过几次迭代后即迅速收敛,从而更早搜索到最优解,三方案在第 130 代附近搜索到最优解;而遗传算法收敛速度慢,经过一段时间的迭代后,在最优解附近收敛速度下降,在第 200 代搜索到最优解。因此,无论是收敛速度还是搜索到的最优解,改进遗传算法均优于遗传算法。

4 结 语

算例取自龙泉驿区 500 kV 及以下电网优化规划实例,利用所介绍的电力网架优化方法,得出了在不同权重系数下的最优方案,最后分析了相应的计算结果。电力网架优化规划成果已经应用于该规划区域电力生产计划,同时也印证了该文优化算法的可行性。

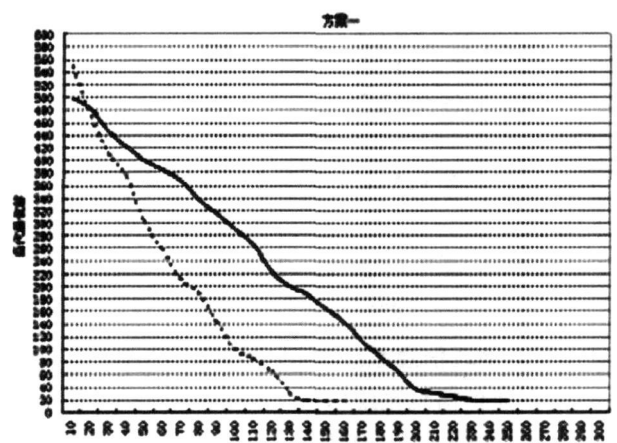


图 3 方案 1 收敛性比较图

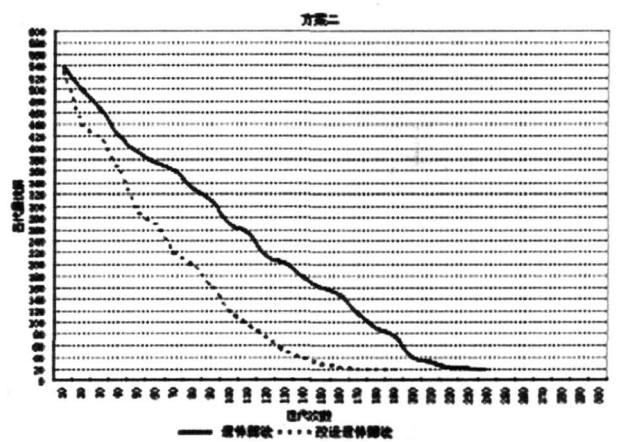


图 4 方案 2 收敛性比较图

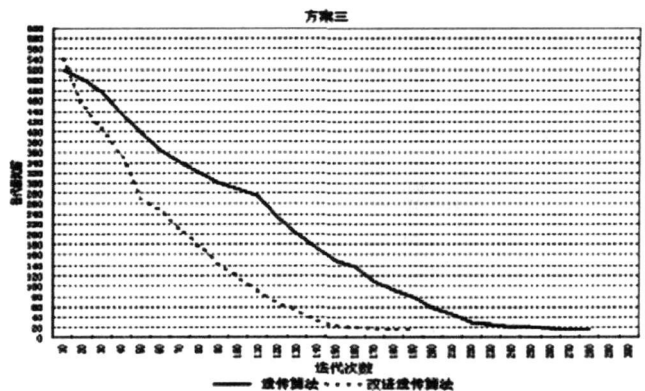


图 5 方案 3 收敛性比较图

参考文献

- [1] 王同文,许文格,管霖.电力网的网架结构优化规划方法[J].继电器,2005,33(21):63-69.
- [2] 李敏强,寇纪淞,林丹,等.遗传算法的基本理论与应用[M].北京:科学出版社,2002.
- [3] Goldbe DE. Genetic Algorithm in Search Optimization and Roaching Leaming[M]. Addison Wesley Company Inc.

1985.

[4] 王小平, 曹立明. 遗传算法一理论、应用与软件实现 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002

作者简介:

吕后勇 (1982), 男, 硕士研究生, 从事电力系统优化规划研究。

周步祥 (1965), 男, 博士, 教授, 从事电力系统调度自动化及计算机信息处理研究。

(收稿日期: 2010—07—10)

(上接第 70 页)

析、操作开关、失电线路等。确定采纳方案后, 可以通过手动遥控或批处理遥控实现方案的实施。

2.3 配电地理信息系统 (GIS) 功能

配电地理信息系统 (GIS) 包括图形功能, 设备管理功能等。这些功能均是基于 ArcInfo 平台基础上的地理信息系统上实现的。

(1) GIS 图形功能 (AM)。此项功能是配网管理的基本功能, 在 GIS 背景基础上, 可实现:

- 电子地图导入;
- 图形、图符编辑;
- 自动布置杆塔;
- 图形分层显示;
- 图形选择、漫游、缩放“鹰眼”功能;
- 图形定位: 可以根据 GIS 对象对 GIS 图形进行图形定位;
- 图形信息的疏密效果协同矫正;
- 网络拓扑着色、供电电源分析、供电范围分析、停电范围分析;
- 图形测量: 包括图形距离测量和面积测量;
- 图形打印: 可以打印有地理背景的 GIS 图。

供设备台帐的查询、统计和报表功能。

2.4 配电管理功能

配电工作管理子系统 (DM) 是配网自动化系统的核心子系统, 是配网自动化系统发挥配网调度管理自动化功能的重要组成部分。

配电工作管理子系统基于表单和工作流引擎驱动, 其结构如图 2 所示, 与实时系统紧密相连, 辅助电网调度计划人员完成各种纸张表单的审核处理过程, 如设备检修申请单管理、调度计划管理等业务, 将配调日常工作的大部分内容真正实现计算机管理, 实现配电管理全过程的自动化, 降低工作强度, 提高工作质量。

3 结 论

该系统自 2010 年 3 月正式挂网投入运行以来, 经过详细全面的系统测试, 证明系统功能具有较高的可靠性, 大大提高了绵竹地区汉旺新城的供电可靠性, 在保证电压质量、降低电网网损起到了一定作用。汉旺新城配网自动化的投入运行, 标志着四川电网配网自动化实用技术进入了一个新的阶段, 为其他电力部门在实施同类型工程时, 提供参考和借鉴作用。

参考文献

[1] 王海燕, 曾江, 等. 国外配网自动化建设模式对我国配网建设的启示 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (11): 125—129.

[2] 张荣坤 孙群中. 现代通信技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.

[3] 王兴念, 赵弈, 等. 配电自动化的实用设计 [J]. 电工技术, 2004 (7): 30—33.

作者简介:

刘从洪 (1981), 男, 硕士, 工程师, 从事电网电力调度工作。

邓晓林 (1971), 男, 本科, 工程师, 从事电网电力调度工作。

(收稿日期: 2010—05—19)

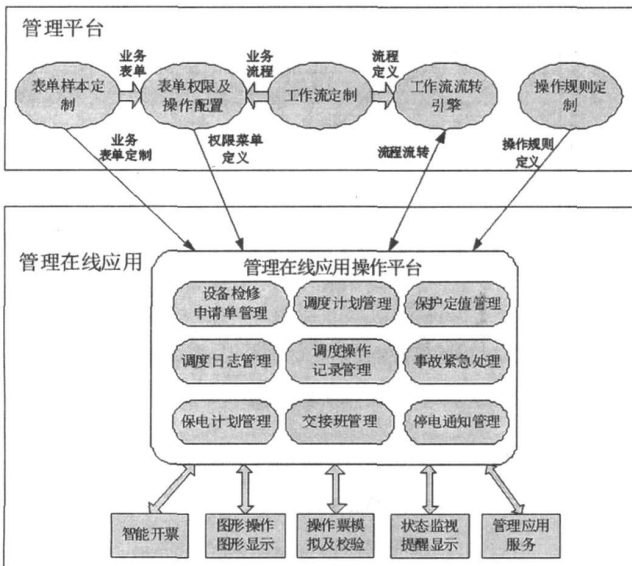


图 2 配电管理应用功能组成

(2) GIS 设备管理 (FM)。此项能够对配电设备, 包括线路设备和变配电设备, 进行管理和维护, 并提

德阳电网 AVC 系统省地协调控制的实现

刘青丽¹, 尹琦¹, 周鹏², 邓志森¹

(1 德阳电业局, 四川 德阳 618000; 2 许继电气股份有限公司直流输电系统部, 河南 许昌 461000)

摘 要:介绍了德阳地调 AVC 子站系统与四川电网省调 AVC 主站系统之间的相互协调控制以实现省地一体化 AVC 系统的闭环运行, 分析了省地协调控制中应考虑的问题, 总结了德阳 AVC 系统省地协调的特点, 对其他地区建设 AVC 系统省地协调控制具有一定借鉴作用。

关键词:自动电压控制; 省地协调; 电网; 功率因数

Abstract: The coordinated control between AVC (automatic voltage control) sub-station system of Deyang and AVC main station system of Sichuan power grid is introduced in order to achieve the closed-loop operation of AVC system. The problems that should be taken into account in the coordinated control are analyzed and the characteristics of the coordinated control in Deyang AVC system are summarized, which gives a reference for other areas to construct AVC control system.

Key words: automatic voltage control (AVC); coordinated control between province and region; power grid; power factor

中图分类号: TM734 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0085-04

0 引言

德阳电网 AVC 在投入省调协调控制之前, 四川省网 AVC 和德阳电网 AVC 都只是分别对各自对应的部分电网进行优化计算控制, 各自的最优解不一定是全网的最优解, 并且省网侧不能有效利用德阳电网的无功补偿量, 德阳电网在优化计算中作为电源点的 220 kV 母线电压也只能是固定值。

在德阳电网 AVC 投入省调协调控制之后, 虽然四川省网 AVC 和德阳电网 AVC 仍只是分别对各自对应的部分电网进行优化计算, 但通过双方下发和上传协调量, 不仅实现了全网的最优控制, 并且省网侧可以通过下发协调量将德阳电网的无功补偿量作为无功源, 德阳电网可以通过上传协调量使作为电源点的 220 kV 母线电压达到期望值。

2009 年 10 月, 德阳地区新市区域电网、万安区域电网和古城区域电网的 AVC 系统建成, 并已实现和四川省调 AVC 主站之间的协调控制, 为有效提高德阳电网电压控制水平、降低网损、提高电压稳定裕度提供了可靠的保证。

1 德阳 AVC 系统省地协调控制

1.1 四川电网无功电压控制系统介绍

四川电网无功电压控制系统采用基于电网全局无功电压优化计算, 集安全性和经济性于一体的全网协调的模式。该系统具有适合四川电网运行特点的基于最优潮流计算和在线软分区的三级电压优化控制结构, 采用集中决策、分级协调、分区控制的无功电压优化控制模式, 综合考虑电网安全约束条件, 在线优化计算, 提出合理电压校正和无功优化策略, 从而实现全网自动无功电压优化控制, 全面提升无功电压控制管理水平, 实现网、省、地调以及厂站之间的协调控制, 大幅度提高四川电网的安全、经济、优质运行水平。

1.2 德阳电网 AVC 子站系统结构

德阳电网 AVC 子站系统 (以下统称德阳电网 AVC 子站, 如图 1) 按照集中决策、分级协调、分区控制的协调控制模式, 由地调 AVC 系统、县调 AVC 系统和相关通信通道组成, 是省地一体化 AVC 系统的组成部分, 其控制范围是从 220 kV 变电站向下延伸的辐射电网。

当德阳地、县调 AVC 系统通信正常时, 地、县调 AVC 系统均采用地调控制模式。县调 AVC 系统接受地调 AVC 系统发出的控制命令, 并将其发送至 SCADA 系统, 完成电力设备的闭环控制。

若地调 AVC 系统运行异常或者德阳地、县调 AVC 系统通信出现中断时, AVC 系统自动转入县调

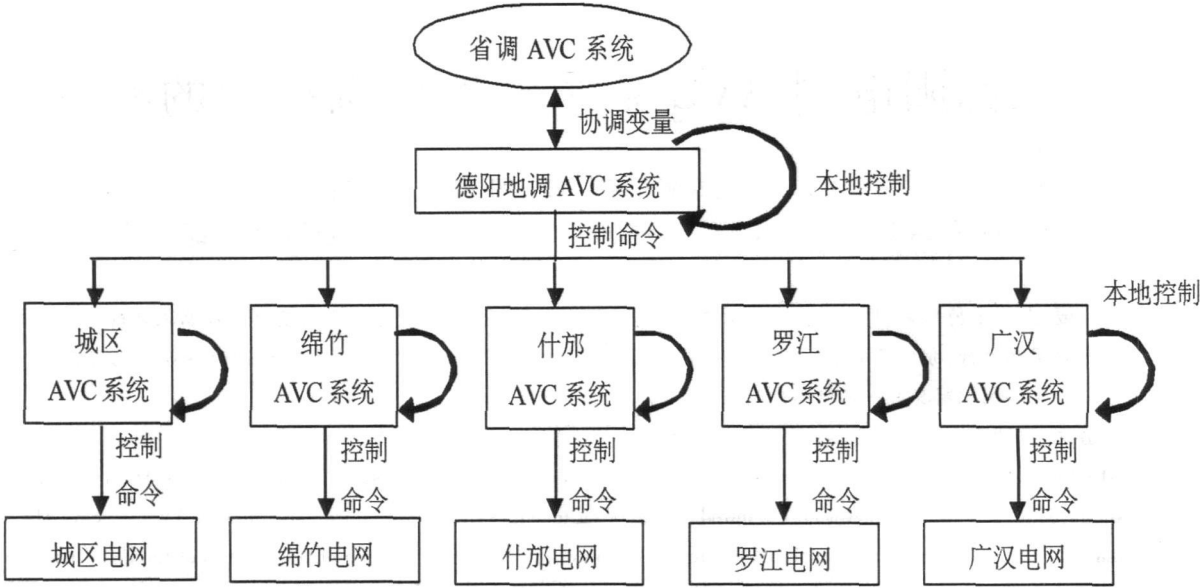


图 1 德阳电网 AVC 子站结构

控制模式。县调 AVC 系统根据本地电网的实时数据和网络参数,进行本地区的电压和无功的优化计算,将控制命令发送至 SCADA 系统。在故障情况下,地调 AVC 系统将控制权转换至县调 AVC 系统,这样在最大程度上保证了系统的安全、稳定。当地调 AVC 系统恢复正常后,各个县调 AVC 系统自动转入地调控制模式,并发送本地数据库中的上传数据至地调数据库。

为实现德阳区域电网以及整个四川电网的电压和无功安全、经济运行,德阳电网 AVC 子站还应接收省调 AVC 主站的协调变量。一旦省调 AVC 主站和德阳电网 AVC 子站通信中断,或者省调 AVC 主站因异常而退出运行,德阳电网 AVC 子站自动转入本地控制模式,并执行本地设置的关口功率约束。

1.3 省地协调电压控制方式

四川省电网 AVC 系统对德阳 AVC 系统的控制方式(如图 2):在省网侧将德阳电业局各 AVC 可控关口等值为对应的可控对象,德阳 AVC 系统向省网 AVC 系统实时传送德阳 AVC 系统的实时运行工况,省网 AVC 根据各关口的控制参数及全网需求计算并下发关口调节命令,德阳 AVC 系统根据下发的命令对德阳电网进行计算控制。此外,德阳 AVC 可上传 220 kV 母线电压期望调节量,省网 AVC 按照期望调节量进行调节。

1.4 省地调之间的数据通信

省、地调之间通过电力调度数据网进行通信,利用 TASE2.0 规约进行数据交换。为完成省调三级电

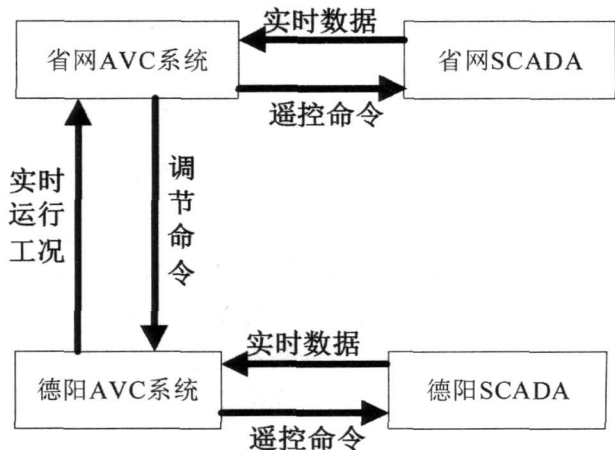


图 2 德阳电网省地一体化的电压控制模式

压优化协调控制,德阳 AVC 系统向省网 AVC 系统实时传送德阳 AVC 系统的实时运行工况(如表 1),包括 220 kV 变电站低压侧无功补偿可有效投切容量、以及该站供电范围内的所有可有效投切无功补偿容量上传省调;另外,还包括诸多辅助信息需要上传省调。

地调在上传该量前应完成预校核,确保该无功容量的可靠使用。同时,地调应将该变压器供电范围内的所有可投切无功容量上传至省调 AVC,即从该 220 kV 变压器向下辐射的所有地区电网的可正向增加(可投)和可负向增加(可退)的无功容量(对于电抗器按照容量为负的电容处理)。地调在上传无功量时,应考虑投切次数、时间间隔等多个约束条件。

关口功率因数目标值,以各个 220 kV 变电站主变压器为单位,进行计算控制并给出控制策略,对该

表 1 与 AVC 有关的上传信息表

序号	名 称	数 量
1	可用状态 (地调)	1 可用, 0 不可用
2	远方状态 (地调)	1 控, 0 不控
3	是否可控 (对应到关口)	1 控, 0 不控
4	关内可增无功 (对应到关口)	220 kV 站内的无功 (Mvar 保留小数点后两位小数)
5	关内可减无功 (对应到关口)	(Mvar 保留小数点后两位小数)
6	关内紧急可增无功 (对应到关口)	220 kV 站内的无功 (Mvar 保留小数点后两位小数)
7	关内紧急可减无功 (对应到关口)	(Mvar 保留小数点后两位小数)
8	关外可增无功 (对应到关口)	关口对应的全网 (Mvar 保留小数点后两位小数)
9	关外可减无功 (对应到关口)	(Mvar 保留小数点后两位小数)
10	关外紧急可增无功 (对应到关口)	(Mvar 保留小数点后两位小数)
11	关外紧急可减无功 (对应到关口)	(Mvar 保留小数点后两位小数)
12	期望电压上或下调量 (对应到关口)	(kV, 保留小数点后两位小数)

变电站低压侧无功补偿设备、主变压器分接头、该站供电范围内的所有无功补偿设备以及地调调度电厂无功出力进行协调优化控制,实现省调主站与德阳电网 AVC 子站之间的分级协调控制。

省网 AVC 根据各关口的控制参数及全网需求计算并下发关口调节命令 (如表 2)。德阳电网 AVC 系统根据省调三级电压控制所给出的关口功率因数目标值,以各个 220 kV 变电站主变压器为单位,进行计算控制并给出控制策略,对该变电站低压侧无功补偿设备、主变压器分接头、该站供电范围内的所有无功补偿设备以及地调调度电厂无功出力进行协调优化控制,实现省调主站与德阳电网 AVC 子站之间的分级协调控制。

2 省地协调控制中应考虑的问题

2.1 上传无功容量求取

上传容量的求取采用以式 (1)为目标函数的粒子群优化算法进行计算。

$$F = \min \left\{ \frac{1}{\Delta Q_{gk}} + \sum_{i=0}^N \left(\frac{\Delta V_i}{V_{\max} - V_{\min}} \right)^2 \right\} \tag{1}$$

$$\Delta Q_{gk} = \begin{cases} Q_{\text{initial}} - Q_{\text{now}} & (\text{当 } Q_{\text{initial}} > Q_{\text{now}} \text{ 时}) \\ 0 & (\text{当 } Q_{\text{initial}} \leq Q_{\text{now}} \text{ 时}) \end{cases} \tag{2}$$

$$\Delta Q_{gk} = \begin{cases} Q_{\text{now}} - Q_{\text{initial}} & (\text{当 } Q_{\text{now}} > Q_{\text{initial}} \text{ 时}) \\ 0 & (\text{当 } Q_{\text{now}} \leq Q_{\text{initial}} \text{ 时}) \end{cases} \tag{3}$$

其中 ΔQ_{gk} 为关口无功改变量,其值在求可投无功时按式 (2)确定,在求可切无功时按式 (3)确定; Q_{now} 为本次迭代中关口无功; Q_{initial} 为初始关口无功; N 为母线总数; ΔV_i 为母线电压越界量, $V_{\max}$ 和 $V_{\min}$ 分别为母线的上限、下限,其值在求正常容量时为本地

正常运行曲线范围,在求紧急容量时为安全运行的最大范围。

2.2 省调命令的使用

德阳地调在接收到省调下发的功率因数后,采用与本地计算同样的粒子群优化算法,只是使用下发的关口功率因数约束代替本地设置的关口功率约束。

这里的目标函数是实现网络运营成本和管理成本的最小化,同时也包括 PQ 的电压节点和变电站关口功率因数的惩罚项。采用的目标函数为

$$F = \min \left\{ P_{\text{loss}} + \lambda_1 \sum \left(\frac{\Delta V_i}{V_{\max} - V_{\min}} \right)^2 + \lambda_2 \sum \left(\frac{\Delta Q_i}{Q_{\max} - Q_{\min}} \right)^2 + C_T \Delta X_T + C_c \Delta X_c \right\} \tag{4}$$

式中, P_{loss} 为实际功率损耗; λ_1 、 λ_2 分别为违反电压约束和变电站关口功率因数约束的惩罚系数; ΔV_i 为母线电压越界量 (式 5), ΔQ_i 为变电站关口无功功率越界量 (式 6)。

$$\Delta V_i = \begin{cases} V_i - V_{\max} & \Delta V_i > V_{\max} \\ 0 & V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \\ V_{\min} - V_i & V_i \leq V_{\min} \end{cases} \tag{5}$$

$$\Delta Q_i = \begin{cases} Q_i - Q_{\max} & \Delta Q_i > Q_{\max} \\ 0 & Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max} \\ Q_{\min} - Q_i & Q_i \leq Q_{\min} \end{cases} \tag{6}$$

$V_{\min}$ 和 $V_{\max}$ 分别为节点电压 V_i 的下限、上限。 $Q_{\min}$ 和 $Q_{\max}$ 分别为变电站关口功率因数 $\cos\varphi$ 的上限、下限对应的无功最小值、最大值。在德阳 AVC 子站采用省地协调控制时,功率因数 $\cos\varphi$ 的下限、上限采用省调下发协调变量;在德阳 AVC 子站转入本地控制时,功率因数 $\cos\varphi$ 的下限、上限采用本地设置的

表 2 与 AVC 有关的下传命令与信息表

序号	名称	数量
1	刷新时刻 (地调)	整数 (从该日零点开始计时的整分钟数)
2	协调控制优先级 (对应到关口)	1 强制, 0 正常
3	功率因数设定值上限 (对应到关口)	
4	功率因数设定值下限 (对应到关口)	

关口功率约束。

C_T 和 C_C 分别为变压器抽头的调节代价和补偿电容器投切的调节代价; $\Delta X_T, \Delta X_C$ 分别为变压器抽头档位变化量和补偿电容器投切组数变化量。

2.3 松弛省级约束

省网模式是基于 220 kV 网络建立的, 此时各个 220 kV 变电站所辐射供电的 110 kV 及其以下电压等级的电网被等效加载。由于这种不完全模式, 省调 AVC 主站所下发的功率因数约束值存在省级的最优化和地区的可行性之间的矛盾。协调此矛盾可采用以下的方法解决 (如图 3)。

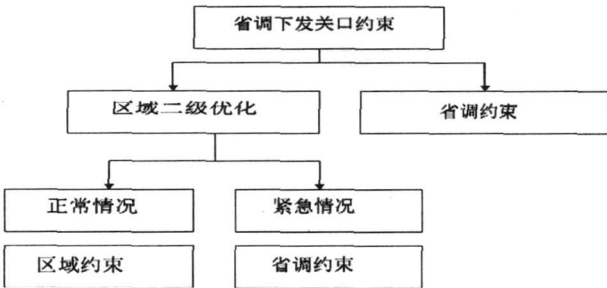


图 3 省地 AVC 系统协调控制

如果功率因数约束是可行的, 地调 AVC 系统使用省调约束进行计算。当功率因数约束是不可行的, 如果按照此约束将导致变电站电压超限, 此时功率因数的约束则取决于省级 AVC 系统给出的优先标志。如果优先标志表明系统处于正常情况, 区域 AVC 系统放弃省网约束, 而采用基于松弛约束策略的地区约束进行计算。如果优先级标志表明紧急情况, 各区域 AVC 系统根据省网约束限制进行优化计算, 此时为确保系统电压而不考虑地区的稳定和电压合格率。

3 德阳 AVC 系统省地协调的特点

3.1 协调模式

德阳 AVC 系统在省地协调的基础上, 将协调优先级分为正常和紧急 2 种模式。正常模式下, 德阳 AVC 系统在优先保证德阳地区电网电压水平的基础上参与省地协调, 该模式是基于正常运行中电压优先原则考虑的; 紧急模式下德阳 AVC 系统放宽本地电

压限值严格保证按照省调下发功率因数范围进行控制。该模式是基于紧急情况下无功补偿优先的原则考虑的。

3.2 无功容量

采用智能优化算法进行省地协调容量计算, 使上传的无功容量可以最大程度上发挥关口无功调节能力。为保证上传无功容量的准确性, 上传的无功容量不是直接根据电容器容量得来, 而是折算到关口的无功补偿变化量。

3.3 功率修正

由于省网与德阳地区电网是通过无功进行协调控制, 因此支路功率特别是关口功率的潮流计算值与实际值的误差必须足够小, 否则可能达不到控制要求, 甚至会出现反向错误控制。基于此问题, 德阳 AVC 系统在省地协调中专门增加了功率修正功能: 首先通过潮流计算得到支路功率偏差, 然后在优化计算中对预计值进行修正, 从而保证计算结果更准确, 在效果上更能满足省调命令要求。

3.4 安全措施

省地协调控制是实时在线控制, 通信是否正常运行影响着协调是否合理。因此德阳 AVC 系统实施如下安全措施。

(1) 若德阳 AVC 系统检测到与省网 AVC 通道中断, 德阳 AVC 自动转入本地控制, 重新投入省地协调需调度命令人工投入。

(2) 若德阳 AVC 系统某关口自由调度员人工投入省地协调起连续 32 min 没有收到省调 AVC 下发命令, 则该关口自动退出省地协调。

(3) 若德阳 AVC 系统某关口最近一次收到的省调命令是 32 min 以前的, 则该关口自动退出省地协调。

(4) 若德阳 AVC 系统某关口连续三次收到的命令明显异常, 则该关口自动退出省地协调。

4 结 语

(下转第 92 页)

Trans PowerDel, 2006, 21(2): 935—932

[17] Gámez JC, Morcos M. M. Voltage Sag and Recovery Time in Repetitive Events[J]. IEEE Trans PowerDel 2002, 17(4): 1037—1043.

[18] 张志刚,殷科生. 基于负荷敏感性及能量损失的电压凹陷的评价[J]. 西北电力技术, 2005(4): 1—2, 18.

[19] 李光荣,代红才. 定量评价电压凹陷引起的用户损失[J]. 江西电力, 2006, 30(4): 37—39.

[20] S. A. Yin, C. N. Lu, Edwin Liu, Y. C. Huang and C. Y. Huang. Assessment of Interruption Cost to High-tech Industry in Taiwan [C]. Proceedings of the IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta, GA, USA, 2001.

(收稿日期: 2010—08—15)

(上接第 34 页)
技术经济效益。

参考文献

[1] 萨师煊. 数据库系统概论 [M]. 高等教育出版社, 2000.

[2] 郑耀东. ASP. NET 2. 0 编程指南 [M]. 人民邮电出版社. 2007.

[3] 张杰. 基于 Web 的工作流管理系统的设计与实现 [J]. 电脑编程技巧与维护, 2009, 22(1): 56—58.

[4] 石邵郡,林小村,文杰,等. 电力系统继电保护配置及定值管理系统 [J]. 电网技术, 1996, 20(8): 26—29.

[5] 谢熹,吕飞鹏,雷云川,等. 基于工作流的继电保护定值管理系统 [J]. 电网技术, 2006, 30(16): 64—69.

[6] 彭晓兰,刘沛,程时杰,等. 一个实用的继电保护运行与管理专家系统 [J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(6):

421—426.

作者简介:

周建群 (1969), 女, 工程师, 大学本科, 从事电力系统调度运行工作;

吕 华 (1980), 男, 工程师, 大学本科, 从事电力系统自动化专业工作;

李志文 (1978), 男, 工程师, 硕士, 从事电力系统继电保护专业工作;

杜俊红 (1975), 女, 工程师, 硕士, 从事电力系统继电保护专业工作。

胡亚平 (1986), 男, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护研究。

吕飞鹏 (1968), 男, 博士, 教授, 从事电力系统继电保护研究。

李运坤 (1987), 男, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护研究。

(收稿日期: 2010—05—12)

(上接第 88 页)

AVC 系统是保证电网安全、经济、优质运行并作为电网安全稳定预防性控制措施的重要技术手段。省、地调之间的协调控制的实现为有效提高德阳电网电压控制水平、降低网损、提高电压稳定裕度提供了可靠的保证。

因此, 下一步德阳电业局将根据德阳地区电网电压无功控制的特点, 建立以德阳地调主站为中心覆盖包括城区供电局五里堆、孟家、二重区域电网、绵竹供电局新市区域电网、什邡供电局云西区域电网、罗江供电局万安区域电网以及广汉供电局古城区域电网在内的地区区域电压无功控制系统。

参考文献

[1] 郭庆来,孙宏斌,张伯明,等. 江苏电网 AVC 主站系统的研究和实现 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 83—87.

[2] 郭庆来,孙宏斌,张伯明,等. 协调二级电压控制的研究 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 19—24.

[3] 唐茂林,庞晓艳,李旻,等. 计及梯级电站的省地一体化 AVC 系统研究及实现方案 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(6): 119—123.

[4] 王铁强,成海彦,等. 基于分层分区协调控制的河北南网 AVC 系统设计与实现 [J]. 电网技术, 2008, 12(32): 157—160.

[5] 孙宏斌,张伯明,郭庆来,等. 基于软分区的全局电压优化控制系统设计 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 16—20.

作者简介:

刘青丽 (1977), 女, 汉族, 工程师, 研究方向为电力系统调度运行;

尹 琦 (1971), 女, 汉族, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度运行;

周 鹏 (1978), 男, 汉族, 助理工程师, 研究方向为电力系统控制及保护;

邓志森 (1978), 男, 汉族, 工程师, 研究方向为电力调度自动化。

(收稿日期: 2010—08—15)

基于电压凹陷敏感度不确定性和能量损失的敏感负荷电压凹陷经济损失评估

李 浩, 刘春芳

(四川省电力公司遂宁公司, 四川 遂宁 629000)

摘 要:高科技产业等敏感负荷对电压凹陷特别敏感, 单个设备故障可能导致整个生产线停运, 由此造成极大的经济损失。敏感负荷对电压凹陷的耐受能力存在一定的不确定性。在现有电压凹陷敏感度概率评估方法的基础上, 建立敏感负荷电压凹陷敏感度随机估计模型; 基于能量损失理论, 定量地评估敏感负荷电压凹陷经济损失。算例分析给出了由计算机控制的高科技产业由于电压凹陷造成的经济损失。

关键词:电压凹陷; 敏感度不确定性; 能量损失; 敏感负荷

Abstract: Sensitive load is very sensitive to voltage sag. The failure of single equipment can cause the outage of the entire production line, thus causing great economic losses. The voltage tolerant curve of sensitive load has the uncertainty. The stochastic estimation model for the equipment which is sensitive to voltage sag is established based on probability assessment method for the voltage sag sensitivity. Based on the energy-loss theory, the financial losses due to voltage sag are evaluated quantitatively. Simulation results show the economic losses caused by voltage sag in high-tech industry controlled by computers.

Key words: voltage sag; sensitivity uncertainty; energy loss; sensitive equipment

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0089-04

0 引 言

随着高技术产业的飞速发展, 众多基于 PC 机、微处理器、微电子等的敏感负荷并入公用电网, 因电能质量, 尤其是动态电能质量问题产生的影响已成为国内外广泛关注的热点问题。敏感负荷对电压凹陷 (sags)、电压骤升 (swell)、短时中断 (interruption) 等非常敏感, 单个设备或元件的故障可能导致整个生产线产品报废, 由此造成极大的经济损失。

国内外对短时电能质量的研究主要集中在检测、分类与识别、补偿与控制^[1-8]。文献 [9-11] 对计算机 (PC)、交流调速器 (ASD)、交流接触器 (AC contactor ACC) 等负荷分别进行了实验研究, 得出各类负荷对不同扰动、敏感度的测试结果。文献 [12-16] 分析了敏感负荷对电压凹陷敏感度的不确定性。文献 [18-20] 定量地分析了短时电压扰动对用户的影响, 然而, 并没有考虑到电压凹陷扰动的随机性。这里用概率密度函数来描述电压凹陷扰动对敏感负荷影响的随机性, 并进行电压凹陷扰动的频次计算; 通过用户能量损失对敏感负荷电压凹陷经济损失进行

评估。仿真分析定量地评价了电压凹陷对由计算机控制的高科技产业造成的经济损失, 为电压凹陷扰动的控制、治理奠定了一定的理论基础。

1 敏感负荷电压凹陷敏感度随机模型

敏感负荷主要有可编程逻辑控制器 (PLC)、工控计算机 (PC)、可调速逻辑控制器 (ASD) 等。这些敏感负荷对电压凹陷十分敏感, 对电压凹陷的承受能力存在不确定性。试验表明 PLC、PC、ASD 的电压耐受曲线 (voltage-tolerance curve) 一般呈现矩形。不同类型敏感负荷对电压凹陷的敏感程度不同。负荷的电压耐受曲线存在不确定区域如图 1。

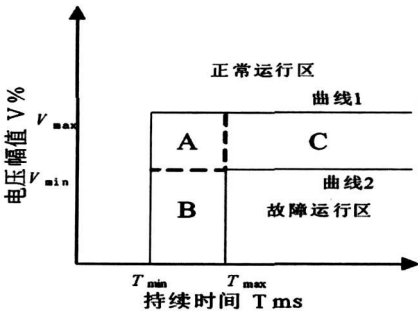


图 1 负荷电压耐受曲线的不确定性区域

文献 [12] 分析了元件电压耐受曲线的不确定性。图 1 中曲线 1 与曲线 2 之间 ($V_{min} < V < V_{max}$, $T_{min} < T < T_{max}$) 元件对电压凹陷敏感度存在不确定性, 该区域可划分为 A、B、C 三个子区域。假设 $f_x(T)$ 、 $f_y(V)$ 为 B、C 区内随机变量 T 、 V 的概率密度函数, 则 A 区联合的概率密度函数为 $f_{xy}(T, V) = f_x(T) f_y(V) (V_{min} < V < V_{max}, T_{min} < T < T_{max})$ 。并用概率分布函数来描述不同电压凹陷造成敏感设备故障概率。

$$P_{XY}(V, T) = \int_{V_{min}}^{V_{max}} f_y(V) dv \quad (1)$$

电压凹陷发生在 B 区使敏感设备故障概率为

$$P_{XY}(V, T) = \int_{T_{min}}^{T_{max}} f_x(T) dt \quad (2)$$

电压凹陷发生在 C 区使敏感设备故障概率

$$P_{XY}(V, T) = \int_{T_{min}}^{T_{max}} \int_{V_{min}}^{V_{max}} f_{xy}(T, V) dt dv \quad (3)$$

电压凹陷发生在 A 区使敏感设备故障概率: 用不同的概率密度函数来描述元件电压耐受曲线的随机性, 并用概率分布函数来描述不同电压凹陷对敏感元件造成故障的概率。

2 基于敏感负荷电压凹陷敏感度不确定性与能量损失的负荷电压凹陷经济损失评估

2.1 基于电压凹陷敏感度不确定性的电压凹陷扰动频次评估

不同电压凹陷使敏感负荷发生的故障概率不同, 首先根据第 2 章节给出的方法得出特定电压凹陷造成敏感设备故障的概率从而得出一年内电压凹陷扰动的频次。

$$ENT(T, V) = P_{XY}(V, T) N(T, V) \quad (4)$$

$ENT(T, V)$ 为一年内特定电压凹陷扰动使设备发生故障的次数; $P_{XY}(V, T)$ 为特定电压凹陷造成敏感设备故障概率; $N(T, V)$ 为一年内该类电压凹陷总的扰动数量。

2.2 基于能量损失的敏感负荷电压凹陷扰动经济损失评估

现代高科技企业, 大多都是由计算机等敏感设备组成的工业控制体系。这些设备对电压凹陷十分敏感, 每次电压凹陷都可能使设备停运, 造成整个生产线的停产。并在一定的时间内才能恢复生产, 造成一

定的能量损失。结合敏感设备电压凹陷敏感度不确定性和能量损失理论对敏感负荷电压凹陷经济损失进行评估, 评估模型如下。

$$EL = RT \times D_i \quad (5)$$

$$TCIC = EL \times f(EL) \times ENT(T, V) \quad (6)$$

D_i 为敏感负荷的平均用电负荷 $\text{kW} \cdot \text{h}$;

RT 为敏感负荷停电恢复时间 (recovery time) h ;

EL 为敏感负荷的能量损失 (energy loss) kW ;

$f(EL)$ 为敏感负荷损失函数, 元 / kW ;

$ENT(T, V)$ 为一年内特定电压凹陷扰动使设备发生故障的次数;

$TCIC$ 为敏感负荷电压凹陷造成的损失, 元。

3 算例分析

以 24 h 不间断供电企业工控计算机故障为例, 定量评估敏感负荷电压凹陷经济损失。对于工控计算机其不确定区域的变化范围为电压幅值 46% ~ 63%, 持续时间 40 ~ 205 ms^[12], 工控计算机的电压耐受曲线选择为正态分布, 联合概率密度函数如图 2 所示, 并用概率分布函数得出不同电压凹陷造成工控计算机故障的概率见表 1。小型工业选取用电负荷为 28.1 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ^[19], 故障恢复时间选取为 6 h, 能量损失函数取为 324 元 / kW ^[20], 并假设每种类型的电压凹陷每年发生 5 次。则每年由于不同电压凹陷造成的敏感负荷经济损失见表 2。

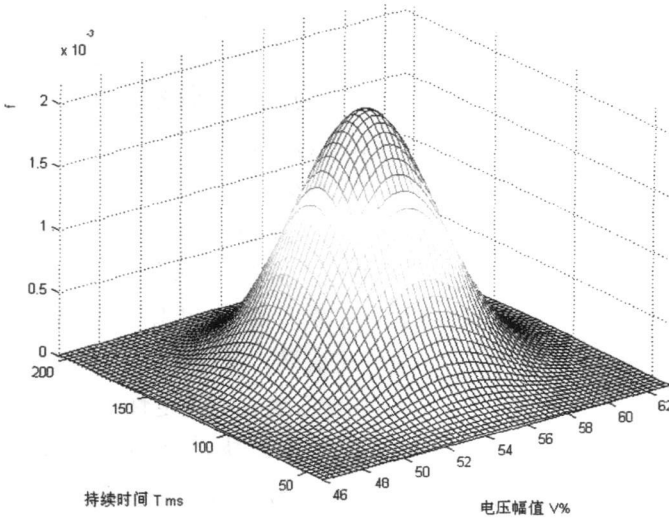


图 2 PC 机电压耐受曲线在 A 区域的概率表达
由表 2 可以看出电压凹陷对高敏感负荷的影响非常的严重, 每年造成的经济损失巨大。对于高敏感

表 1 电压凹陷发生在 A 区 PC 电压凹陷敏感度

$\begin{matrix} T / \\ \text{ms} \end{matrix} \quad \begin{matrix} V / \% \end{matrix}$	59	57	55	53	50	47
80	0.059 5	0.056 7	0.131 7	0.216 7	0.291 4	0.307 2
130	0.131 0	0.124 3	0.287 9	0.472 9	0.635 7	0.669 7
150	0.170 7	0.162 3	0.376 1	0.617 6	0.830 4	0.874 7
170	0.188 4	0.179 1	0.414 8	0.681 3	0.916	0.964 9
180	0.192 0	0.182 2	0.422 0	0.692 9	0.931 6	0.981 4
200	0.194 3	0.184 1	0.426 3	0.700 2	0.941 2	0.991 6

表 2 不同凹陷敏感负荷经济损失评估结果 (元)

$\begin{matrix} T / \\ \text{ms} \end{matrix} \quad \begin{matrix} V / \% \end{matrix}$	59	57	55	53	50	47
80	16 251	15 486	35 971	59 187	79 590	83 906
130	35 780	33 950	78 634	129 164	173 630	182 917
150	46 623	44 329	102 724	168 686	226 809	238 909
170	51 458	48 917	113 295	186 084	250 189	263 545
180	52 441	49 764	115 261	189 253	254 450	268 052
200	53 069	50 283	116 436	191 247	257 072	270 838

的企业有必要加强监测和治理。

5 结 论

首先分析了敏感负荷对电压凹陷扰动的不确定性,基于能量损失理论得出敏感负荷电压凹陷经济损失,最后通过仿真定量的分析不同种类电压凹陷对由计算机控制的高科技产业造成的经济损失。评估结果表明,每年由于凹陷造成的敏感负荷的经济损失是巨大的,为电压凹陷的检测、控制和治理提供了一定的理论基础。

参考文献

[1] 刘守亮,肖先勇,杨洪耕. 基于 S 变换模时频矩阵相似度的短时电能质量扰动分类 [J]. 电网技术, 2006, 30(5): 67—71.

[2] 罗卫华,孙云莲. 独立分量分析法在电能质量监测与分析中的应用 [J]. 电网技术, 2006, 30(15): 81—84, 89.

[3] 凌玲,徐政. 基于数学形态学的动态电能质量扰动的检测与分类方法 [J]. 电网技术, 2006, 30(5): 62—66.

[4] 王宾,潘贞存,徐文远. 配电系统电压跌落幅值估算分析 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 29—34.

[5] 李妍,段余平,邱军,等. 环网配电网电压暂降分析的临界比距法 [J]. 电网技术, 2006, 30(11): 51—55.

[6] 王宾,潘贞存,董新洲. 电压跌落的配电线路全线速切治理方案 [J]. 电网技术, 2006, 30(21): 84—88.

[7] 王成,肖先勇. 基于控制延迟补偿的混合有源滤波器的研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(7): 59—63.

[8] 赵剑锋,王浔,潘诗锋. 用电设备电能质量敏感度测试系统研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 32—36.

[9] S Z Djokic J Desmet G Vaname et al Sensitivity of Personal Computers to Voltage Sags Short Interruptions [J]. IEEE Trans PowerDel, 2005, 20(1): 375—383.

[10] S Z Djokic K Stockman J V Milanovic et al Sensitivity of AC Adjustable Speed Drives to Voltage Sags Short Interruptions and Under-voltage Transients [J]. IEEE Trans PowerDel 2005, 20(1): 494—505.

[11] S Z Djokic J V Milanovic D S Kirschen Sensitivity of AC Coil Contactors to Voltage Sags Short Interruptions and Undervoltage Transients [J]. IEEE Trans PowerDel 2004, 19(3): 1229—1307.

[12] 肖先勇,王希宝,薛丽丽,等. 敏感负荷电压凹陷敏感度的随机估计方法 [J]. 电网技术, 2007, 31(22): 30—33.

[13] 王希宝,李元耀,刘斌,等. 电压凹陷引起的过程控制系统故障评估方法的研究 [J]. 四川电力技术, 2007, 30(4): 5—8, 48.

[14] 肖先勇,王希宝,季广辉. 基于箱形图和矩估计的敏感元件电压凹陷敏感度评估 [J]. 电网技术, 2008, 32(17): 64—68.

[15] J V Milanovic and C P Gupta Probabilistic Assessment of Financial Losses Caused by Interruptions and Voltage Sags Part I: The methodology [J]. IEEE Trans PowerDel, 2006, 21(2): 918—924.

[16] J V Milanovic and C P Gupta Probabilistic Assessment of Financial Losses due to Interruptions and Voltage Sags Part II: Practical Implementation [J]. IEEE

Trans PowerDel, 2006, 21(2): 935—932

[17] Gámez JC, Morcos M M. Voltage Sag and Recovery Time in Repetitive Events[J]. IEEE Trans PowerDel 2002, 17(4): 1037—1043.

[18] 张志刚,殷科生. 基于负荷敏感性及能量损失的电压凹陷的评价[J]. 西北电力技术, 2005(4): 1—2, 18.

[19] 李光荣,代红才. 定量评价电压凹陷引起的用户损失[J]. 江西电力, 2006, 30(4): 37—39.

[20] S A Yin, C N Lu, Edwin Liu, Y C Huang and C Y Huang Assessment of Interruption Cost to High-tech Industry in Taiwan [C]. Proceedings of the IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta, GA, USA, 2001.

(收稿日期: 2010—08—15)

(上接第 34 页)
技术经济效益。

参考文献

[1] 萨师煊. 数据库系统概论 [M]. 高等教育出版社, 2000.

[2] 郑耀东. ASP.NET 2.0 编程指南 [M]. 人民邮电出版社. 2007.

[3] 张杰. 基于 Web 的工作流管理系统的设计与实现 [J]. 电脑编程技巧与维护, 2009, 22(1): 56—58.

[4] 石邵郡,林小村,文杰,等. 电力系统继电保护配置及定值管理系统 [J]. 电网技术, 1996, 20(8): 26—29.

[5] 谢熹,吕飞鹏,雷云川,等. 基于工作流的继电保护定值管理系统 [J]. 电网技术, 2006, 30(16): 64—69.

[6] 彭晓兰,刘沛,程时杰,等. 一个实用的继电保护运行与管理专家系统 [J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(6):

421—426.

作者简介:

周建群 (1969),女,工程师,大学本科,从事电力系统调度运行工作;

吕 华 (1980),男,工程师,大学本科,从事电力系统自动化专业工作;

李志文 (1978),男,工程师,硕士,从事电力系统继电保护专业工作;

杜俊红 (1975),女,工程师,硕士,从事电力系统继电保护专业工作。

胡亚平 (1986),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护研究。

吕飞鹏 (1968),男,博士,教授,从事电力系统继电保护研究。

李运坤 (1987),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护研究。

(收稿日期: 2010—05—12)

(上接第 88 页)

AVC 系统是保证电网安全、经济、优质运行并作为电网安全稳定预防性控制措施的重要技术手段。省、地调之间的协调控制的实现为有效提高德阳电网电压控制水平、降低网损、提高电压稳定裕度提供了可靠的保证。

因此,下一步德阳电业局将根据德阳地区电网电压无功控制的特点,建立以德阳地调主站为中心覆盖包括城区供电局五里堆、孟家、二重区域电网、绵竹供电局新市区域电网、什邡供电局云西区域电网、罗江供电局万安区域电网以及广汉供电局古城区域电网在内的地区区域电压无功控制系统。

参考文献

[1] 郭庆来,孙宏斌,张伯明,等. 江苏电网 AVC 主站系统的研究和实现 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 83—87.

[2] 郭庆来,孙宏斌,张伯明,等. 协调二级电压控制的研究 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 19—24.

[3] 唐茂林,庞晓艳,李旻,等. 计及梯级电站的省地一体化 AVC 系统研究及实现方案 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(6): 119—123.

[4] 王铁强,成海彦,等. 基于分层分区协调控制的河北南网 AVC 系统设计与实现 [J]. 电网技术, 2008, 12(32): 157—160.

[5] 孙宏斌,张伯明,郭庆来,等. 基于软分区的全局电压优化控制系统设计 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 16—20.

作者简介:

刘青丽 (1977),女,汉族,工程师,研究方向为电力系统调度运行;

尹 琦 (1971),女,汉族,高级工程师,研究方向为电力系统调度运行;

周 鹏 (1978),男,汉族,助理工程师,研究方向为电力系统控制及保护;

邓志森 (1978),男,汉族,工程师,研究方向为电力调度自动化。

(收稿日期: 2010—08—15)

关于气体纯度对色谱仪影响的认识

赵海峰, 刘贞超, 赵燕梅, 窦海妮
(二滩水力发电厂, 四川 攀枝花 617000)

摘 要:通过对二滩水电厂 GC-14B 气相色谱仪调试过程中出现的故障进行分析, 并及时处理, 阐述了气体纯度对气相色谱仪的影响, 为同类设备出现类似故障提供参考。

关键词: GC-14B 气相色谱仪; 火焰电离探测器; 气体纯度

Abstract: The failures occurring in the commissioning process of GC-14B gas chromatograph in Ertan Hydropower Station are analyzed and then they all have been treated well in time. The impact of gas purity on gas chromatograph is introduced which can provide a reference for the similar equipment.

Key words: GC-14B gas chromatograph; flame ionization detector (FID); gas purity

中图分类号: TH833 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0093-03

二滩水电厂使用的两台 GC-14B 气相色谱仪(主机系日本岛津生产)近期进行了一次维护调试。

整个调试过程为常规维护:更新“N₂、H₂ 自动延时关闭装置”;两台“H₂ 发生器”干燥管更换硅胶;1 号 GC-14B 更换 01 柱;2 号 GC-14B 更换 502 柱、转化柱;更新转换炉温控仪。更新项目完毕后,按顺序向仪器通 N₂ 和 H₂ 燃气,将 GC-14B 色谱仪主机开启,仪器升温,待温度稳定后,通入空气,当各气路气体压力正常后,即进行“点火”操作。此后仪器出现未预料到的异常,FID 检测器输出值极大,将衰减器(信号缓冲器)档位旋至“256”档,调节基流补偿至最大也不能使记录仪指针置“零”位(测试 FID 输出值电位达 1 000 mV),即出现本底值极大的情况。

观察各仪器载气、H₂ 燃气压力,相关温度值都系正常值。两台 GC-14B 色谱仪都出现本底值极大的状况,在此状态下,仪器是不能进行正常的色谱分析工作。为了查明问题的症结,就此进行如下剖析。

1 仪器原理简介

GC-14B 系统结构如图 1 所示。
GC-14B 色谱仪各气路如图 2 所示。

2 原因查找及分析

2.1 排除新换 01 柱、502 柱、转化柱的影响

新更换的色谱柱和转化柱是提前进行装柱并进行了充分老化,而且验证色谱柱和转化柱分别满足实验要求。将换下来的旧色谱柱和转化柱重新换上,并检查其密封性,经过活化,在同样的试验条件下开机,仪器仍然出现同样的状况,可以认为新色谱柱、新转化柱本身是没问题的。

2.2 载气的影响

两台仪器同时出现 FID 收集极本底值较高的情况,说明可能是气路出现了问题而导致燃烧室内燃烧

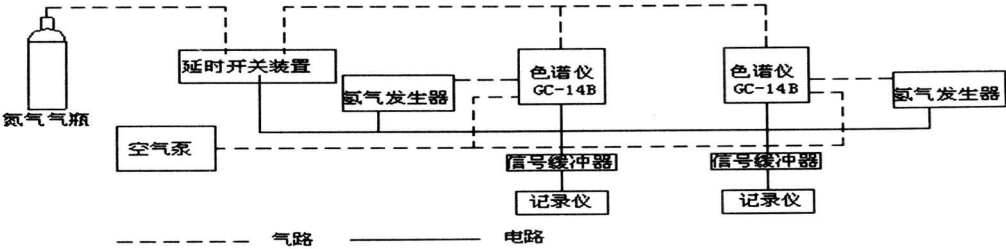


图 1 GC-14B 色谱仪各装置连接示意图

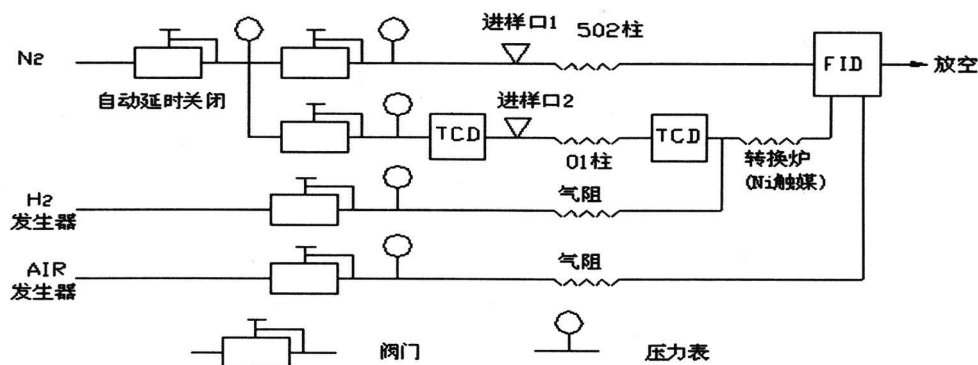


图 2 GC-14B 色谱仪气路示意图

不理想。经过检查后,证明各气路均连接正确,无漏气现象,发现氮气钢瓶中瓶压为 1 MPa,经减压阀后输出压力为 0.5 MPa。色谱仪所用的氮气应满足气瓶瓶压大于 3 MPa,纯度为 99.998%,杂质含量(体积分数):氢 $<1 \times 10^{-6}$,氧 $<1 \times 10^{-6}$,氩 $<10 \times 10^{-6}$,二氧化碳 $<1 \times 10^{-6}$,水 $<5 \times 10^{-6}$,甲烷 $<1 \times 10^{-6}$ 。当瓶压过低时,瓶内气体水分较重,造成 502 色谱柱、01 色谱柱受潮,柱效降低,甚至失效;同时载气中水分过高,会导致 FID 燃烧室中温度有所降低(不能达到理想温度),燃烧状况较差,离子定向运动减弱,使 FID 检测器的灵敏度下降。

鉴于上述情况,将此氮气瓶更换成新购买的氮气瓶(其内部压力 >12.5 MPa)。

2.3 氢燃气的影响

氢燃气的纯度对燃烧室环境有着重要影响,对于作为燃气的氢气,纯度至少为 99.995%,杂质含量(体积分数):氮 $<1 \times 10^{-6}$,氧 $<5 \times 10^{-6}$,二氧化碳 $<1 \times 10^{-6}$,水 $<5 \times 10^{-6}$,总烃 $<1 \times 10^{-6}$,其中有机杂质会使 FID 收集极基流激增,噪声加大,本底值大增,使得色谱仪不能进行微量分析。

经分析,两台 H₂ 发生器干燥管中更换的硅胶均取自玻璃干燥器内,主要用于干燥其他化学试剂,因而干燥管中的硅胶很可能被“化学试剂”污染。当 H₂ 发生器所产生的氢气流经“干燥管”时被硅胶污染,含极性物质,当气体再进入转化柱中,将转化柱中的镍触媒污染(即中毒),流经转化柱的气体仍带有极性物质,这些物质被带入了 FID 燃烧室中。仪器“点火”促使燃烧室核心“离子室”构成高温环境,这些物质在这里被极化(即发射极与收集极之间加有极化电压),形成离子流定向运动,大大提高了 FID 本底值。此时调节基流补偿电位至最大也不能抵消

其本底值,从而 FID 就无法正常工作。

3 问题的处理

(1) 将两台氢气发生器干燥管中的硅胶全部更换成新硅胶。

(2) 转化炉重新更换镍触媒并进行活化约 6 h。

(3) 对于同样受到污染的 01 柱和 502 柱重新进行活化,打开 GC-14B 色谱仪的加热器,将 502 柱色谱柱尾端放开(与检测器断开)后提高柱温至 110℃,活化试验 5 h。

在检查各气路连接良好和各电路接触完好后,重新打开气路,色谱仪开机,稳定后,调节双笔记录仪,指针能够正常指零。用万用表检查 FID 信号,输出电压属于正常范围。

4 结 论

载气、燃气纯度对色谱仪性能影响很大,特别是氢燃气的纯度对 FID 检测器本底值影响极大。为保证载气和 H₂ 燃气的纯度,在气相色谱仪的日常维护中应注意以下环节:①观察 N₂ 载气瓶中压力的变化,当气瓶压力 <3 MPa 时,应及时更换 N₂ 气瓶(压力满足要求的)。② H₂ 发生器的干燥硅胶应专用化,不得使用与其它化学试剂接触过的硅胶。这样可以提高色谱仪灵敏度,延长色谱柱、气路控制部件及整台仪器的寿命。

参考文献

- [1] 《电力用油、气标准汇编》委员会,等.《电力用油、气标准汇编》[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [2] 庞增义.选择气相色谱仪使用气体纯度的原则[J].分析仪器,2002(4):36-38. (收稿日期:2010-10-07)