

★四川省一级期刊

• 万方数据数字化期刊群入网期刊

• 《中国学术期刊(光盘版)》入编期刊

• 《中国期刊全文数据库》收录期刊

• 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊

• 北极星中华期刊网入网期刊

• 中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊

• 中国农村电气化信息网

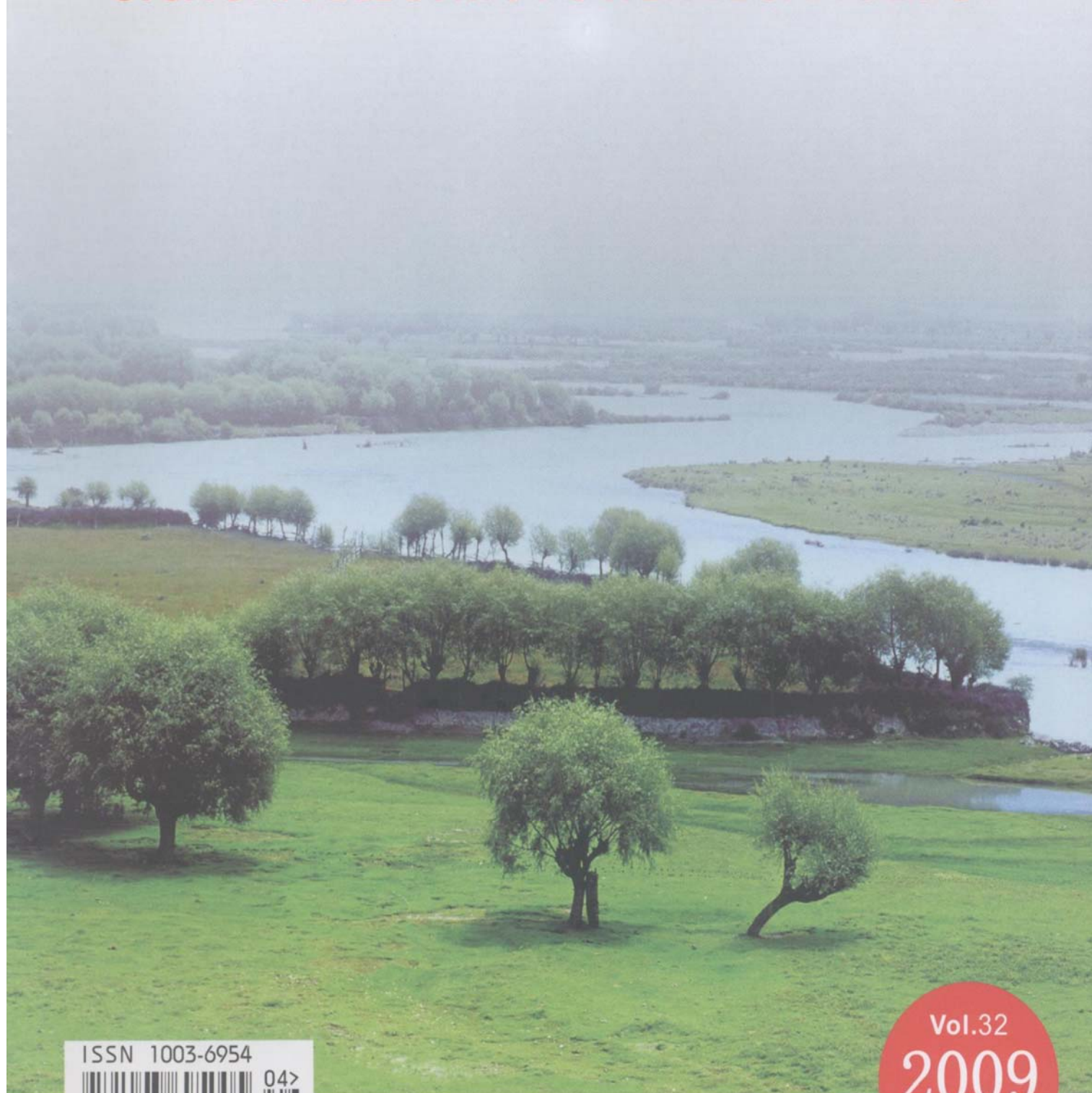
• 重庆维普中文科技期刊数据库

• 《超星数字图书馆》入网期刊

• 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录

四川電力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954



04>

9 771003 695005

四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

Vol.32

2009

No.2

《四川电力技术》 编辑委员会名单

主任委员 王 平

副主任委员 张晓明

刘俊勇

委 员

(按姓氏笔划为序)

方文弟 王 卓 白家棣

刘 勇 朱白桦 朱国俊

朱 康 邓亚军 邬小端

李建明 严 平 胡 灿

徐 波 唐茂林 谢 舫

甄 威 滕福生

秘 书 李世平

吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

刊号: ISSN1003-6954
CN51-1315/TM

2009年第32卷第2期(总199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:朱 康

副 主 编:谢 舫 吴小冬

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:cdscdljs@163.com

E-mail:wxdl_zss@sepc.com.cn

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册6.00元

[期刊基本参数] CN51-1315/TM*1978*

b*A4*96*24 P*¥6.00*8000*27*

2009-02

目 次

·基金项目·

微电网技术研究现状 国 海 苏建徽 张国荣(1)

基于模态法的电力系统电压稳定性研究 张少康 李兴源 徐梅梅(7)

供电企业安全性评价自动化管理系统的设计和实现

..... 潘守翥 雷 霞 余光亮等(11)

敏感负荷电压凹陷敏感度概率密度函数及应用

..... 李 皖 陈卫东 肖先勇(13)

一种自适应的低频减载方案的设计 巫 柯 李兴源 李青芸(17)

计及环境约束的机组组合二层规划方案研究

..... 蒲 实 刘俊勇 陈 烨等(19)

VDCOL参数整定的改进对多馈入直流输电系统暂态稳定性的影响研究

..... 杨大春 刘天琪 李兴源等(24)

复杂网络理论在电力系统中的运用与研究 肖 军 刘天琪(28)

·调度系统专栏·

数字化变电站继电保护可靠性措施研究 余 锐 熊小伏 于 军(33)

水情数据自动交换系统在水调工作中的应用 杜成锐 赵永龙(37)

阿坝牧区电网电压偏高分析 张 应(39)

四川电网220 kV及以上线路简化整定计算 杨向飞(41)

宜宾电网2008年夏季运行分析 刘 勤(44)

主副线带开关的分支箱结构优化配网结构 曾勇波 张 玻 杨 钧(48)

110 kV线路圆特性阻抗元件的相间距离II段保护整定分析

..... 陈旭锋 李旭涛(51)

基于继电保护信息管理系统的隐藏故障分析 王 伟 余 锐 熊小伏等(54)

基于复 Gaussian小波 SVM的短期负荷预测 郑永康 郝文斌 刘俊丽等(58)

一种应用于配电网合环操作的计算模型与方法

..... 陈 曦 曾勇波 叶 涛等(62)

防止带地方电源终端变电站全站失压的保护改造方案

..... 宋汉蓉 程 钢 尹 秦(66)

·特高压与输变电技术·

特高压换流站直流场管形母线选择 余 波 吴怡敏 陶俊培(69)

220 kV母线保护改造问题 何仕卿(73)

校核电流互感器动稳定和短时热电流的方法 李世平 蒋 平(75)

基于 MATLAB的跨平台电能质量分析软件研究

..... 刘宇航 黄 军 周 晋等(78)

YN₀Yd平衡变压器负序仿真分析 黄 军 魏 光 周 晋等(81)

·发电技术·

江油发电厂330 MW机组恢复发电关键技术方案研究

..... 杨 飞 杨树林(85)

发电厂电力拖动系统的节能研究 刘 琨 刘 念 冉 立等(88)

循环流化床灰控阀的维护 王永龙(92)

封面照片由曾逸农提供

CONTENTS

Research Status of Microgrid Technique.....	Guo Hai Su Jianhui Zhang Guorong(1)
Determination of Power System Voltage Stability Using Modal Analysis.....	Zhang Shaokang Li Xingyuan Xu Meimei(7)
Design and Realization of Automation Management System for Security Evaluation of Power Supply Utility	Pan Shoufei Lei Xia Yu Guangjiang etc (11)
Probability Density Function of Voltage Sag Sensitivity and Its Application.....	Li Wan Chen Weidong Xiao Xianrong(13)
A New Design of Adaptive Under Frequency Load Shedding Scheme	Wu Ke Li Xingyuan Li Qingyun(17)
Research on Bilevel Programming for Environmental Constrained Unit Commitment Optimization Problem	Pu Shi Liu Junyong Chen Ye etc (19)
Research on Influence of VDCOL Parameter Setting Improvement on Transient Stability of Multi- infeed HVDC Transmission System	Yang Dachun Liu Tianqi Li Xingyuan etc (24)
Application of Complex Network to Power System and Its Research.....	Xiao Jun Liu Tianqi(28)
Research on Reliability Measures for Relay Protection System of Digital Substation	Yu Rui Xiong Xiaofu Yu Jun(33)
Application of Automatic Hydrologic Data Exchange System to Water Regulation	Du Chengrui Zhao Yonglong(37)
Analysis on Higher Voltage of Power Grid in Pastoral Area of ABA.....	Zhang Ying(39)
Principle and Method of Simplified Setting Calculation for Transmission Line of 220 kV and above in Sichuan Power Grid	Yang Xiangfei(41)
Operation Analysis of Yibin Power Grid in Summer of 2008	Liu Qin(44)
Optimizing Structure of Distribution Network Using Branch-boxing Structure with Switch of Main and Auxiliary Lines	Zeng Yongbo Zhang Bo Yang Jun(48)
Setting Calculation and Analysis of Part III of Phase-to-Phase Distance Protection of Impedance Component with Circle Characteristics in 110 kV Line	Chen Xufeng Li Xuao(51)
Analysis of Hidden Failures Based on Relay Protection Information Management System.....	Wang Wei Yu Rui Xiong Xiaofu etc (54)
Short-Term Load Forecasting Based On Complex Gaussian Wavelet SVM	Zheng Yongkang Hao Wenbin Liu Junli etc (58)
Calculation Model and Method of Closed Loop Operation in Distribution Network	Chen Xi Zeng Yongbo Ye Tao etc (62)
Protection Reform Scheme for Avoiding Loss of Pressure in Terminal Substation with Local Electric Source	Song Hanrong Cheng Gang Ying Qin(66)
Tubular Bushar Selection in DC Field of UHVDC Converter Station	Yu Bo Wu Yinjin Tao Junpei(69)
Discussion on 220 kV Bus Protection Reform	He Shifeng(73)
Calibration Method for Dynamic-stability Current and Short-time Thermocurrent of Current Transformer	Li Shiping Jiang Ding(75)
Research on Cross-platform Power Quality Analysis Software Based on MATLAB.....	Liu Yuhang Huang Jun Zhou Jin etc (78)
Simulation Analysis of Negative Phase Sequence Current of YN- Δ Balance Transformer	Huang Jun Wei Guang Zhou Jin etc (81)
Study on Key Technical Measures of Power Generation Restoration for 330 MW Units of Jiangyou Power Plant.....	Yang Fei Yang Shulin(85)
Research on Energy Saving of Electric Power Drive System in Power Plant.....	Liu Kun Liu Nian Ran Li(88)
Maintenance of Cone Valve of CFB Boiler	Wang Yonglong(92)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2009 Vol.32 No.2

(Ser. No. 199)

Bi-monthly Started in 1978

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Test and Research Institute of Electrical Power

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

Address: Qingyanggong Chengdu, Sichuan, China

Postcode: 610072

微电网技术研究现状

国海^{1,2}; 苏建徽¹; 张国荣¹

(1 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2 安徽科技学院, 安徽 凤阳 233100)

摘 要: 首先阐释了微网的概念、结构及特点, 然后对当前美国、欧盟和日本等国的微网研究现状进行了介绍, 并介绍了微网运行方式, 最后着重探讨了现阶段微电网研究中的关键问题和相关研究现状。

关键词: 微网; DG; 分布式发电; 电网

Abstract: Firstly, the concept, the structure and the characteristics of microgrid are presented. Then, the present development of microgrid in the United States, Europe and Japan is introduced as well as the operation modes of microgrid. At last, the key problems and the research conditions related to microgrid are discussed emphatically.

Key words: microgrid; DG; distributed generation; power grid

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0001-06

1 微网的概况

1.1 微网产生的背景

随着国民经济的发展, 电力需求迅速增长, 电网规模不断扩大, 超大规模电力系统的弊端也日益凸现, 成本高, 运行难度大, 难以适应用户越来越高的安全和可靠性要求以及多样化的供电需求。尤其在近年来世界范围内接连发生几次大面积停电事故^[1], 2008 年年初中国南方冰灾还是在汶川震灾期间, 中国电网都发生了大面积的停电^[2], 电网的脆弱性充分暴露了出来。

分布式发电可以提供传统的电力系统无可比拟的可靠性和经济性, 具有污染少、可靠性高、能源利用效率高, 同时分布式电源位置灵活、分散的特点极好地适应了分散电力需求和资源分布, 延缓了输、配电网升级换代所需的巨额投资, 它与大电网互为备用也使供电可靠性得以改善^[3]。欧美等发达国家已开始广泛研究能源多样化的、高效和经济的分布式发电系统, 并取得了突破性进展^[4]。

尽管分布式电源优点突出, 但本身存在诸多问题, 如分布式电源单机接入成本高、控制困难等。另外, 为减小分布式电源对大电网的冲击, 大系统往往采取限制、隔离的方式来处置分布式电源, 当电力系统发生故障时, 分布式能源必须马上退出运行。这就大大限制了分布式能源的充分发挥, 也间接限制了

对新能源的利用^[5]。

为了降低 DG 带来的不利影响, 同时发挥 DG 积极的辅助作用, 一个较好的解决方法就是把 DG 和负荷一起作为配电电子系统——微网 (Microgrid)^[6~8]。

1.2 微网的概念

从 1999 年开始, 美国电力可靠性技术解决方案协会 (consortium for electric reliability technology solutions CERTS) 首次对微电网在可靠性、经济性及其对环境的影响等方面进行了研究。到 2002 年, CERTS 从结构、控制、经济等方面系统全面介绍了微网的概念^[6]: 微电网是一种由负荷和微型电源共同组成的系统, 它可同时提供电能和热量; 微电网内部的电源主要由电力电子器件负责能量的转换, 并提供必要的控制; 微电网相对于外部大电网表现为单一的受控单元, 并可同时满足用户对电能质量和供电安全等方面的要求。

1.3 微网的结构

微网的基本结构如图 1 所示, 微网中包含有多个 DG 和储能系统, 联合向负荷供电, 整个微网对外是一个整体, 通过断路器与上级电网相联。微网中 DG 可以是多种能源形式 (光电、风电、微型燃气轮机等), 还可以以热电联产 (combined heat and power CHP) 或冷热电联产 (combined cold heat and power CCHP) 形式存在, 就地向用户提供热能, 提高 DG 利用效率。

在图 1 中微网有 A、B、C 三条馈线, 其中 A、C 馈线中含有重要负荷, 安装有多个 DG, 馈线 B 为非重

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50777015)

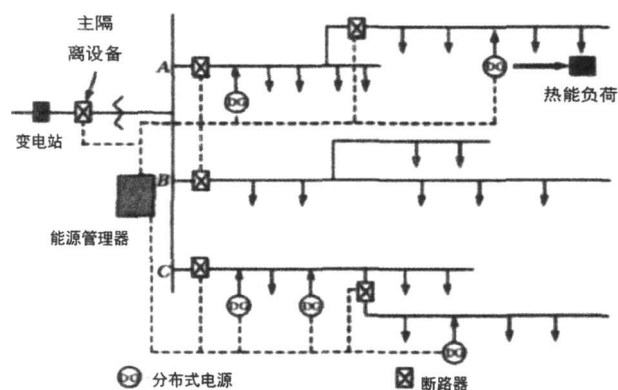


图 1 微网结构

要负荷，必要时可将其切断。馈线 A 中含有一个运行于 CHP 的 DG，同时向用户提供热能和电能。当外界大电网出现故障停电或有电力质量问题时，微网可以通过主断路器切断与外界联系，进入孤立运行状态。此时微网全部由 DG 供电，馈线 B 通过公共母线得到电能正常运行。如果系统需要，可以断开馈线 B 停止对非重要负荷供电。当故障解除之后，主断路器重新合上，微网重新恢复和主电网同步运行，保证系统平稳的恢复到并网运行状态。

1.4 微网的特点

通过微网的结构和定义可知，微网技术是新型电力电子技术和分布式发电、可再生能源发电技术和储能技术的有机结合。具有以下主要特点：

- (1) 微网提供了一个有效集成应用 DG 的方式，继承拥有了所有单独 DG 系统所具有的优点。
- (2) 微网作为一个独立的整体模块，不会对大电网产生不利影响，不需要对大电网的运行策略进行修改。
- (3) 微网可以以灵活的方式将 DG 接入或断开，即 DG 具有“即插即用”的能力。
- (4) 多个 DG 联网的微网增加了系统容量，并有相应的储能系统^[9]，使系统惯性增大，减弱电压波动和电压闪变现象，改善电能质量。
- (5) 微网在上级网络发生故障时可以孤立运行继续保障供电，提高供电可靠性^[10]。

2 微网的研究现状

2.1 美国的微电网研究

美国 CERTS 最早提出了微电网的概念^[6~8]，并且是众多微电网概念中最权威的一个。美国 CERTS 在文献 [6] 中对其微电网的主要思想及关键问题进

行了描述和总结，系统地概括了美国 CERTS 微电网的定义、结构、控制、保护及效益分析等一系列问题。

美国 CERTS 微电网的初步理论研究成果已在实验室微电网平台上得到了成功检验^[11,12]。2005 年 CERTS 微网的研究已经从仿真分析、实验研究阶段进入现场示范运行阶段。由美国北部电力系统承建的 Mad River 微电网是美国第一个微电网示范工程，用于检验微电网的建模和仿真方法、保护和控制策略以及经济效益等，并初步形成关于微电网的管理政策和法规等，为将来的微电网工程建立框架^[13]。

美国能源部还与通用电气共同资助了第二个“通用电气 (GE) 全球研究 (Global Research)”计划，GE 的目标是开发出一套微电网能量管理系统 (microgrid energy management MEM)，包括电气和热能的性能和成本优化控制，与公用电网的并网控制及对可再生能源间歇性发电的管理。

在美国还开展了许多研究，如加州能源委员会资助的分布式效能集成测试平台、美国国家可再生能源实验室所完成的对佛蒙特州微电网的安装和运行的检验，它们都促进了微电网的发展。

2.2 欧洲微电网的研究现状

欧洲各国对微电网的研究越来越重视，近几年来各国之间开展了许多合作和研讨。2005 年，欧洲提出“Smart Power Networks”概念^[14]。欧盟微电网项目 (European Commission Project Microgrids) 给出的定义是利用一次能源；使用微型电源，分为不可控、部分可控和全控三种，并可冷、热、电三联供；配有储能装置；使用电力电子装置进行能量调节^[14,15]。

欧盟第五框架计划 (5th Framework Program, FP5) 中，专门拨款 450 万欧元资助微电网研究计划。该项目已完成并取得了一些颇具启发意义的研究成果，如 DERs 的模型、可用于对逆变器控制的低压非对称微电网的静态和动态仿真工具、孤岛和互联的运行理念、基于代理的控制策略、本地黑启动策略、接地和保护的方案、可靠性的定量分析、实验室微电网平台的理论验证等。

欧盟第六框架计划 (6th Framework Program, FP6) 资助 850 万欧元。目前，这项计划正在进行中。欧洲所有的微电网研究计划都围绕着可靠性、可接入性、灵活性 3 个方面来考虑。电网的智能化、能量利用的多元化等将是欧洲未来电网的重要特点。

2.3 日本微电网研究

日本在国内能源日益紧缺、负荷日益增长的背景下,也展开了微电网研究,但其发展目标主要定位于能源供给多样化、减少污染、满足用户的个性化电力需求^[6]。日本专门成立了新能源与工业技术发展组织(NEDO)统一协调国内高校、企业与国家重点实验室对新能源及其应用的研究。NEDO在微电网研究方面已取得了很多成果^[17]。NEDO在2003年的“Regional Power Grid with Renewable Energy Resources Project”项目中,开始了3个微电网的试点项目^[18]。这3个测试平台的研究都着重于可再生能源和本地配电网之间的互联,分别在青森县、爱知和京都,可再生能源在3个地区微电网中都占有相当大的比重。目前日本在微电网示范工程的建设方面处于世界领先地位。

有日本学者提出了灵活可靠性和智能能量供给系统(flexible reliability and intelligent electrical energy delivery system, FRIENDS)^[19],利用FACTS元件快速灵活的控制性能实现对配电网能量结构的优化。

从各国对未来电网的发展战略和对微电网技术的研究与应用中可以看出,微电网的形成与发展绝不是对传统集中式、大规模电网的变革,而是代表着电力行业在服务、能源利用、环保等方面的一种提高与改善,是对大电网的有益补充。

3 微电网的运行方式

微电网系统有与外部电网并网和独立运行两种模式。当电网并网时,微电网内的负荷根据用户的情况从电网内部以及外部吸收能量。由于电压降落、故障、停电检修等原因造成外部电网连接中断,微电网需要从并网平滑过渡到独立运行状态。与外部电网隔离后,微电网进入独立运行模式。文献[20]通过微网实验系统运行证明:微网系统在合理的控制下可以实现并网运行和孤立运行,并可实现两种运行模式的平滑过渡。

3.1 并网运行

对微电网自身来说,并网运行方式是其正常工作方式之一。由于下列问题:在电网内部,由于某个发电单元故障、检修等原因退出运行或者负荷急剧增加,致使供电功率不足需要与外电网并联引进功率;或者由于在某种极限情况,在满足负荷和储能需求后,仍有功率富余,可与外电网并联向外送出能量。

并网运行时,微网和传统配电网类似,服从系统调度,可同时利用微网内DG发电和从大电网吸取电能,并能在自身电力充足时向大电网输送多余电能。

3.2 孤立运行

孤立运行的能力是微网最重要的特点。在由于母线电压降落、外部电网发生故障或并网联络线突然跳闸等造成外部电网连接中断,微电网需要平滑地从并网运行模式到独立运行模式。

文献[21~25]针对上述不同情况对微电网稳定的影响,需要分别通过采取不同的分析和建模方法加以研究。并通过软件仿真证明了微网在上级网络断电后可以成功进入孤立运行。文献[25]对微网孤立运行时,不同类型DG间相互干扰问题进行了研究,通过仿真,表明了储能设备对微网频率恢复的重要性。文献[26]研究了微网孤立运行时无功电容器优化配置问题,使用遗传算法实现了电容器布点和容量的最优化规划,对微网无功平衡和电压控制有着积极作用。

4 微网的关键技术

4.1 微网的控制

由微电网的结构和特点可见,微电网的运行离不开完善的稳定与控制系统。控制问题是微电网研究中的一个难点问题。其中主要原因在于微电网中的微电源数目过多,一个中心控制点对整个系统的快速反应和相应控制较难实现,一旦系统中某一控制元件故障或软件出错,很可能导致整个系统瘫痪。因此,微电网控制应该做到能够基于本地信息对电网中的事件做出自主反应。

4.1.1 基于电力电子技术的“即插即用”的控制^[27]

DG控制器基于本地信息进行操作,每个控制器可以按照预先设定的方式对负荷变化做出反应,不需要从其他DG获取通讯数据。这样就使每个DG系统拥有“即插即用”的能力^[28]。即插即用意味着一个DG不需对机组的控制和保护做任何更改就可以直接应用于微网之中,这种DG模块可以接入微网中任何需要它的地方。文献[29]提出一种控制方法允许DG的分散布局且不需要DG之间的高速通讯。

此类方法根据微电网要求,通过下垂特性曲线进行控制,将系统的不平衡功率动态分配给各机组承担,具有简单、可靠、易于实现的特点。但该方法没有

考虑系统电压与频率的恢复问题,因此,在微电网遭受严重扰动时,系统的频率质量可能无法保证。该方法仅适用于基于电力电子技术的微电源间的控制。

4.1.2 基于功率管理系统的控制^[30]

该方法采用不同控制模块对有功、无功分别进行控制,很好地满足了微电网多种控制的要求,尤其在调节功率平衡时,加入了频率恢复算法,能够很好地满足频率质量要求。另外,针对微电网中对无功的不同需求,功率管理系统采用了多种控制方法,从而大大增加了控制的灵活性并提高了控制性能。但与第一种方法类似,这种方法只讨论了基于电力电子技术的机组间的协调控制,未综合考虑它们与含调速器的常规发电机间的协调控制。文献[6、31]中对此类控制方法进行了详细介绍。

4.1.3 基于多代理技术的控制

该方法将传统电力系统中的多代理技术应用于微网控制中。代理的自治性、反应能力、自发行等特点,正好满足微网分散控制的需要。

文献[32、33]介绍了多代理系统技术在微网控制中的积极作用。基于 C/S 架构的多代理微网管理软件,使用客户端在 DG 机组、负荷、能量管理器实现了智能化分布控制,达到微网内 DG 之间负荷分配最优化和微网同主电网间能量交换的最优化。

但目前多代理技术在微网中的应用多集中于协调市场交易、对能量进行管理方面,尚未达到对微电网中的频率、电压等进行控制的层面。要使其在微网控制中发挥更大作用,仍需大量的研究工作,运用更加先进、智能的控制策略。

4.2 微网的保护

微电网的保护问题与传统电力系统的保护有很大区别,主要表现为:潮流的双向性和并网运行与独立运行两种工况下短路电流差异较大两方面。因此,如何保证保护的选择性、快速性、灵敏性与可靠性,是微电网保护研究的关键和难点。

文献[34]针对单相接地故障与线间故障给出了基于对称电流分量检测的保护策略,以零序、负序电流分量作为主保护的動作值,并结合传统的过电流保护,取得了良好的效果。文献[35]研制出微电网保护的硬件装置。

但由于微网的特点,发电机和负荷容量对保护的影响、不同类型发电机对保护的影响及微电网不同运行方式和结构对保护的影响等,都是微电网保护策略

研究中的关键问题,仍需大量的研究工作。

4.3 微网的经济性

微电网的经济效益是多方面的,其效益主要集中于能源的高效利用和环保以及个性化电能供给的安全、可靠、优质等方面。

4.3.1 经济性设计

美国 CERTS 提出的分布式电源用户侧模型(DER-CAM-distributed energy resource customer adoption model)是对微电网资源结构进行经济设计的重要工具^[36、37]。该模型将分布式发电的安装和运行成本等与电力部门的供电费用结构进行比较,可以为用户提供供电效果佳且成本低的分布式发电技术组合以及热电联产的技术配置决策。文献[38]将地理信息系统与 DER-CAM 模型结合起来,采用就近组合原则形成用户群,为实现良好的经济效益提供了现实基础。

4.3.2 微网运行的最优化

微网的经济最优化问题和大型电力系统有着很大不同, DG 可以以 CHP 形式同时供给电能和热能。另外,微网的独特设计可以提供比一般配电网更高的可靠性,满足对可靠性有特殊要求的用户需求,提高电力附加价值。

文献[39]根据微网经济的独特性,提出一种微网经济最优化的运行策略。文献[40]介绍了微网技术的应用,从中肯定了微网的市场竞争力。文献[41]使用序贯蒙特卡罗模拟法,提出了一种处理网络重构的算法,以得到最优化的微网配置,以期减小购买主电网电能的投资,并减小由于供电中断引起的损失。

文献[42]从电力市场的角度对微网并网运行管理作了研究探讨,从 DG 的控制策略和微网与大电网电能交换等方面论述了微网的管理和控制,以期实现运行的最优化。

文献[43]通过仿真计算,提出利用价格信号控制微网和电力市场运作的方法,并介绍了微网技术带来的经济性和环保方面的优点。文献[44]通过竞标的方法实现电源和电力负荷的双边联系,以此实现调整 DG 以适应电力需求。

尽管以上相关文献对微网的经济性和运行的最优化进行了相关的探讨,但随着微网的发展与成熟,如何将微电网对用户、电力部门及社会的效益全面量化,仍将需更深入的分析研究。

5 结 语

在能源日益紧缺的背景下,可再生能源、新能源的开发利用普遍受到重视,微网在提高供电可靠性、改善电能质量、节约能源与环保等方面的突出优点都决定了微网的研究具有现实意义和价值,也将是今后电力系统发展的重要课题。

参考文献

- [1] 胡学浩. 2003 年国外 (美加、意大利、瑞典和英国) 大停电事故经验及教训 [A][C]. 电力系统安全及其战略防御高级学术研讨会论文集.
- [2] 许洪阳. 通过冰灾和震灾看发展分布式电源和微电网的重要性——访电网规划专家田华 [J]. 电子技术, 2008, 8.
- [3] 李蓓, 李兴源. 分布式发电及其对配电网的影响 [J]. 国际电力, 2005, 9(3): 46—49.
- [4] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述 [J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71—75.
- [5] 梁才浩, 段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 53—56.
- [6] Lasseter R, Akhil A, Mamay C, et al. The CERTS Microgrid Concept [EB/OL]. [2008—10—18]. CERTS <http://certs.lbl.gov/pdf/50829.pdf>
- [7] Lasseter R H, Paigi P. Microgrid: A conceptual solution [C]// The 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Aachen, Germany, 2004.
- [8] Mamay C, Rubio F J, Siddiqui A S. Shape of the Microgrid [C]// 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, USA, 2001.
- [9] 程华, 徐政. 分布式发电中的储能技术 [J]. 高压电器, 2003, 39(3): 53—56.
- [10] 李峰, 李兴源, 郝巍. 不间断电力变电站中分布式电源接入系统研究 [J]. 继电器, 2007, 35(10): 13—19.
- [11] Stevens J. Development of sources and a testbed for CERTS microgrid testing [C]// 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Denver, USA, 2004.
- [12] Stevens J, Klapp D. CERTS microgrid system tests [J]. Power Engineering Society General Meeting, Tampa, 2007.
- [13] Klinger A. Northern power systems microgrid power network to address risk of power outages [EB/OL]. [2008—10—20]. <http://www.northernpower.com>.
- [14] European Commission. Strategic research agenda for Europe's Electricity Networks of the Future [EB/OL]. [2008—10—20]. http://www.smartgrids.eu/documents/sra/sra_finalversion.pdf
- [15] Sanchez M. Overview of microgrid research and development activities in the EU [C]. Montreal 2006—Symposium on Microgrids, 2006.
- [16] Tadai H, Goda M. Microgrid research at Mitsubishi [EB/OL]. [2008—10—20]. http://www.energy.ca.gov/pier/esi/documents/2005-06-17_symposium/GO-DA_2005-06-17.pdf
- [17] SATOSHI Morozumi. Overview of microgrid research and development activities in Japan [EB/OL]. [2008—11—02]. http://www.cceen.unsw.edu.au/content/userdocs/overview_of_microgrid_management_and_control_000.pdf
- [18] Tsuji K. FRIENDS in the context of microgrid research [EB/OL]. [2008—11—02]. http://der.lbl.gov/newsite/2005microgrids_files/presentation_pdfs/CERTS-Tsuji.pdf
- [19] KIICHIRO Tsuji. Friends in the context of microgrid research [EB/OL]. [2008—11—05]. http://der.lbl.gov/newsite/2005microgrids_files/presentation_pdfs/CERTS-Tsuji.pdf
- [20] Georgakis D, Papathanassiou S, Hatziaargyriou N, et al. Operation of a prototype microgrid system based on micro-sources equipped with fast-acting power electronics interfaces [C]// 2004 Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 35th Aachen, Germany, 2004.
- [21] Katiraei F, Iravani M R, Lehn P W. Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process [J]. IEEE Trans On Power Delivery, 2005, 20(1): 248—257.
- [22] Mendez L, Narvarte L, Marsinach A G, et al. Centralized stand alone PV system in microgrid in Morocco [C]// The 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, 2003.
- [23] Pecos Lopes J A, Moreira C L, Madureira A G, et al. Control strategies for microgrids emergency operation [C]// 2005 International Conference on Future Power Systems, 30th, Amsterdam, Netherlands, 2005.
- [24] Laaksonen H, Saari P, Komulainen R. Voltage and frequency control of inverter based weak LV network microgrid [C]// 2005 International Conference on Future Power Systems, 30th, Amsterdam, Netherlands, 2005.
- [25] Zoka Y, Sasaki H, Yamamoto N, et al. An interaction problem of distributed generators installed in a microgrid [A]// 2004 IEEE International Conference on Electric Utility

- Deregulation, Restructuring and Power Technologies Hong Kong, China, 2004.
- [26] Al-Askari S A, Ranade S J, Mitra J. Optimal allocation of shunt capacitors placed in a microgrid operating in the islanded mode[C]// Proceedings of the 37th Annual North American power symposium, Ames, USA, 2005.
- [27] PIAGIP, LASSETER R H. Autonomous control of micro grids//Proceedings of 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Jun 18—22, 2006, Montreal, Quebec, Canada, Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2006, 8—15.
- [28] Lasseter B. Role of distributed generation in reinforcing the critical electric power infrastructure [C]// 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, USA, 2001.
- [29] Stevens J. Development of sources and a testbed for CERTS microgrid testing[C]// 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Denver, USA, 2004.
- [30] KATRAEF, RAVANMR. Power management strategies for a micro grid with multiple distributed generation units IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1821—1831.
- [31] Lasseter R H. Microgrids[C]// 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, USA, 2002.
- [32] Dineas A, Hatziaargyriou N. A multiAgent system for microGrid operation[C]// Power Engineering Society General Meeting, Denver, USA, 2004.
- [33] Dineas A L, Hatziaargyriou N D. Operation of a multiagent system for microgrid control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1447—1455.
- [34] NIKKHAJOE H, LASSETERRH. Micro grid Fault Protection based on symmetrical and differential current components[EB/OL]. [2008—11—05]. <http://www.pserc.org/cgi-bin/pserc/getbig/publicatio/2007public/microgrid-protection-1.pdf>
- [35] KROPOSKI B. Microgrids—hardware testing and standards development[EB/OL]. [2008—11—06]. http://der.lbl.gov/new_site/2007microgrids_files/US-Kroposki.pdf
- [36] RUBIOFA, SIDDQUI C, MARNAY C, et al. CERTS customer adoption model[EB/OL]. [2008—11—06]. <http://eerts.lbl.gov/pdf/47772.pdf>
- [37] SIDDQUI A, MARNAY C, HAMACHIK, et al. Customer adoption of small—scale on—site power generation[EB/OL]. [2008—11—06]. http://der.lbl.gov/new_Site/pubs/IBNL_47896.pdf
- [38] EDWARDS J, MARNAY C, BARTHOLOMEW E, et al. Assessment of μ Grid distributed energy resource potential using DER—CAM and GIS[EB/OL]. [2008—11—08]. <http://rael.berkeley.edu/files/2002/EdwardsEtal-Micro-gridIBNL2002.pdf>
- [39] Hernandez—Aramburo C A, Green T C. Fuel consumption minimisation of a micro—grid[C]// Conference Record of the IEEE 39th IAS Annual Meeting, Seattle, USA, 2004.
- [40] Davis M W. Mini gas turbines and high speed generators a preferred choice for serving large commercial customers and microgrids II. Microgrids[C]// 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, USA, 2002.
- [41] Ghiani E, Mocci S, Pilo F. Optimal reconfiguration of distribution networks according to the microgrid paradigm [C]// 2005 International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, Netherlands, 2005.
- [42] Hatziaargyriou N D, Dineas A, Tsikalakis A G, et al. Management of microgrids in market environment [C]// 2005 International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, Netherlands, 2005.
- [43] Pudjianto D, Strbac G, van Overbeeke F, et al. Investigation of regulatory commercial, economic and environmental issues in micro Grids[C]// 2005 International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, Netherlands, 2005.
- [44] Alibhai Z, Gnanu W A, Kotak D B, et al. Distributed coordination of micro—grids using bilateral contracts[C]// 2004 IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics, Hague, Holland, 2004.

作者简介:

国海(1974—),男,黑龙江人,安徽科技学院讲师,合肥工业大学在职硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

(收稿日期:2009—01—20)

节约一张纸 节约一寸导线

基于模态法的电力系统电压稳定性研究

张少康, 李兴源, 徐梅梅

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 电压失稳是电力系统丧失稳定性的一个重要方面, 目前电网规模不断扩大, 电压敏感负荷不断增多, 电压失稳事故日益成为威胁电网安全的一个突出问题。使用准确有效的方法对电压稳定性进行分析非常重要。模态法可用于分析实际系统, 它从整个系统的层面给出与电压稳定性有关的信息和关于不稳定性机理的信息。针对 IEEE 30 机系统, 利用 MATLAB 进行仿真, 可以发现它能对电压稳定临界点得出准确的评估, 并准确地得出传输系统中临界稳定的节点和最脆弱的分支。这些结果证明了模态法在电压稳定方面的适用性。

关键词: 电压稳定; 模态法; 临界点

Abstract: Voltage instability takes a great part in power system instability. With the power system growing larger and larger, voltage instability within the power system has become a severe problem. The development and use of accurate methods to predict incipient voltage instability is crucial. The modal analysis can be used in actual system analysis and provide the related information of voltage stability regarding the whole system and the information of instability mechanism. Using practical test cases on the IEEE 30 bus system, it is shown that the modal analysis technique can provide an accurate estimation of the system proximity to the voltage stability limit and can consistently and correctly predict the critical buses in the system. These results clearly demonstrate the availability of modal analysis technique as applied to voltage stability analysis.

Key words: voltage stability; model analysis; critical buses

中图分类号: TM712 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0007-04

近几十年来, 电力系统向大电网、高电压和远距离输电发展, 虽然对提高经济效益、促进环境保护起到了重要作用, 但是也给电力系统的安全运行带来了新的问题, 电压失稳就是其中之一。近年来, 国内外电力系统多次发生电压崩溃事故^[1~2], 使得电压稳定问题的研究在世界范围内引起广泛关注^[3]。电力系统电压稳定性分析要解决以下问题: 判断系统在某一运行状态下, 电压是否稳定; 给出系统在当前运行点的稳定裕度, 也即当前运行点离电压不稳定的距离; 找出系统中电压稳定的薄弱节点、支路和区域。

在过去几十年中, 学者们注重对电压稳定分析方法的研究, 提出了多种静态、动态和中长期电压稳定性的分析方法^[4], 在电压稳定性的数学模型、系统中动态元件对电压稳定的影响、判别电压稳定性的指标、电压崩溃的预防和校正措施等方面都取得了一系列研究成果。但因电压稳定问题的复杂性, 在机理研究的深入、分析方法的完善以及对付电压崩溃的措施方面还有不少需要研究的问题^[5~6]。文章探讨了由 Gao Morrison 和 Kundur 提出来的针对潮流雅可比矩

阵的模态分析法^[7]。这种方法利用系统特征值对系统距离不稳定进行了度量, 确定了电网各元件在初始电压失稳时的参与作用 (关键负荷节点、分支和发电机)。利用 MATLAB 在 IEEE 30 机标准系统中进行了仿真以验证模态分析方法的准确性。

1 模态分析概述

模态分析技术是利用系统静态模型, 计算简化雅可比矩阵规定数目的最小特征值及其特征向量, 每一个特征值与电压/无功功率变化模式相关, 其大小提供了电压不稳定的相对量度。特征向量用来描述模态, 它提供关于网络元件和发电机在每一个模式中的参与程度和电压失稳机理的信息。它是从电压和无功的关系来分析电压稳定性的。对于给定的系统运行工况, 如果系统中每一个节点的电压幅值随着同一个节点的无功注入的增加而提高, 则系统是电压稳定的; 若系统中至少有一个节点的电压幅值随着同一节点的无功注入的增加而降低, 则系统是电压不稳定的。

特征值的幅值可以提供发生不稳定可能性的相

基金项目: 国家重点基础研究专项经费项目 (2004CB217901); 国家科技支撑计划项目 (2008BAA13B01); 国家电网公司项目

对度量。但因为问题的非线性,特征值不能提供一个绝对的量度。这一点类似于小扰动稳定分析中的阻尼系数,它表示阻尼的程度,但不是稳定裕度的绝对量度。如果要求得到电压不稳定的距离,逐步地加重系统负荷,直到它变为不稳定,并且对每个运行点都进行模态分析。模态分析的运用可帮助确定系统的稳定程度以及应该增加多少额外负荷或功率传输水平。当系统达到电压稳定临界点时,模态分析有助于确定电压稳定性临界区域以及每个模式有哪些元件参加。

2 模态分析的方法

2.1 简化雅可比矩阵

线性化的静态系统功率—电压方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: ΔP 为节点无功微增量变化; ΔQ 为节点电压角度微增量变化; $\Delta \theta$ 为节点电压幅值微增量变化; $J_{P\theta}$, J_{PV} , $J_{Q\theta}$ 和 J_{QV} 为潮流方程偏微分形成的雅可比矩阵的子阵。

令 $\Delta P=0$,则

$$\Delta Q = J_R \Delta U \quad (2)$$

其中 J_R 是简化雅可比矩阵:

$$J_R = [J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}] \quad (3)$$

对于式(1),由分块矩阵的 Schur 公式可知,若 $\|J_{P\theta}\| \neq 0$,则

$\|J\| = \|J_{P\theta}\| \cdot \|J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}\| = \|J_{P\theta}\| \cdot \|J_R\|$ 可见系统的雅可比矩阵 J 的奇异或是因 $J_{P\theta}$ 奇异或是因 J_R 奇异引起的。 $J_{P\theta}$ 的奇异对应的是系统的功角静态不稳定,而 J_R 的奇异对应的是系统的电压静态不稳定。换句话说,如果系统是功角静态稳定的,即 $J_{P\theta}$ 非奇异,那么雅可比矩阵的奇异一定是由于电压不稳定而忽略了第二项对电压稳定性的影响,这在正常运行情况下,所带来的误差是较小的,但当系统运行于重载情况下,接近稳定极限时,由于无功注入量变化引起的角度变化较大,这是第二项 $J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}$ 对于电压稳定性的影响就很显著。因而从采用的数学模型意义上比较,模态分析法较 dQ/dU 灵敏度法具有更高的精度。

2.2 电压不稳定模式

令

$$J_R = M \lambda N \quad (4)$$

其中: M 为 J_R 的右特征向量, λ 为 J_R 的特值矩阵,是对角阵, N 为 J_R 的左特征向量。

则

$$J_R^{-1} = M \lambda^{-1} N^T \quad (5)$$

无功和电压的增量变化是由等式(2)确定,代入等式(4),则有: $\Delta U = M \lambda^{-1} N^T \Delta Q$

或

$$\Delta U = \sum_i \frac{M_i N_i^T}{\lambda_i} \Delta Q \quad (6)$$

其中: M_i 是雅可比矩阵 J_R 的第 i 列右特征向量, N_i 是雅可比矩阵 J_R 的第 i 行左特征向量, λ_i 是雅可比矩阵 J_R 的第 i 个特征值。

每一个特征值 λ_i 及其右左特征向量 M_i , N_i 决定了无功—电压响应的第 i 个模式,若第 i 个模式的无功功率变化(节点 i 无功注入变化)为

$$\Delta Q_{mi} = K_i M_i \quad (7)$$

其中 K_i 是一个归一化参数,有

$$K_i^2 \sum_j M_{ji}^2 = 1 \quad (8)$$

式中: M_{ji} 是 M_i 的第 j 个元素。

则相应的第 i 个模态电压变化为

$$\Delta U_{mi} = \frac{1}{\lambda_i} \Delta Q_{mi} \quad (9)$$

每一个特征值的大小决定了相应模态电压的脆弱程度,提高接近电压不稳定的相对量度。特征值愈小,相应的模态电压愈脆弱。如果 $\lambda_i = 0$,则第 i 个模态电压将崩溃,因为模态无功功率的任何变化都将引起模态电压的无限变化。

如果雅可比矩阵 J_R 的所有特征值都是正的,则系统可以认为是电压稳定的。如果有一个特征值为负,则可认为系统是电压不稳定的。 J_R 零特征值意味着系统处在不稳定的边界。而且 J_R 的较小特征值决定了系统临近电压不稳定的程度。

2.3 节点参与作用

节点 K 对模式 i 的参与作用(参与因子)定义为

$$P_{Ki} = N_{Ki} M_{Ki} \quad (10)$$

节点参与因子表明:

(1) P_{Ki} 表示了节点 K 处第 i 个特征值对电压—无功灵敏度的作用。 P_{Ki} 值愈大, λ_i 在确定节点 K 处电压—无功灵敏度的贡献愈大。所以对于全部小的特征值(趋于不稳定),节点的参与因子可以确定接近电压不稳定的区域。

(2) 左、右特征向量都已规格化, 所以对于每个模式, 所有节点参与因子的总和等于 1.0。

(3) 对于给定的模式 i 节点参与因子的大小指示了在这个节点施加补救措施对稳定该模式的有效性。

(4) 一般有两种类型的模式: 一种模式只有很少量节点有大的参与因子, 所有其他节点的参与因子接近零, 则表明是非常局部的模式, 另一种模式是许多节点具有小但是类似的参与因子, 而其余的节点参与因子接近零, 这表明该模式不是局部的。

3 仿真分析

3.1 仿真方案和数据

为了证明模态分析方法的实用性, 用 MATLAB 对 IEEE 30 机系统进行了 3 次独立的实验, 分别针对 3 个不同稳定运行点 (分别用 A、B、C 来表示, 负荷依次加重) 进行计算, 结果在表 1 中给出。对每一个运行点, 都先得出简化雅可比矩阵的特征值以得到系统距失稳的距离量度。节点参与因子作为重要模态被得出以预测系统临界节点 (具有最小稳定裕度的节点)。为了证明得出的临界节点是正确的, 生成 $Q-V$ 曲线以观察和比较各系统节点的无功稳定裕度。

表 1 3 个运行点的五个最小系统特征值

运行点 A		运行点 B		运行点 C	
模式	特征值	模式	特征值	模式	特征值
16	0.509 8	16	0.464 4	17	0.065 9
17	1.038 9	17	0.980 0	18	0.570 6
18	1.795 1	18	1.658 1	19	0.779 7
21	3.612 3	21	3.458 6	22	2.614 7
22	4.079 4	22	3.931 2	23	3.182 0

系统接近不稳定时, 特征值的幅值降低。在运行点 C 最小的特征值为 0.065 9, 表明系统处在不稳定的边缘。表 2 给出了对于运行条件 C 的最小稳定模式 ($\lambda=0.0659$) 的几个有最大参与因子的节点。

表 2 运行点 C 处 6 个最大节点参与因子及其相应节点

节点号	参与因子
29	0.203 3
22	0.183 9
20	0.161 4
21	0.069 8
26	0.060 3
14	0.057 3

可以看出, 此时节点参与因子最大的几个节点为

29、22、20 节点, 它们是系统中较薄弱的节点。做出不同运行工况下节点 29、22、20 的 $Q-V$ 曲线 (运行点为 A 时曲线如图 1, 运行点为 B 时曲线如图 2)。

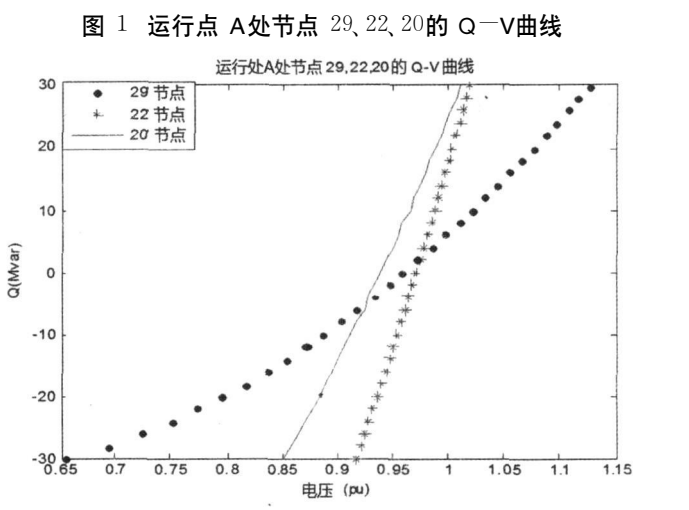
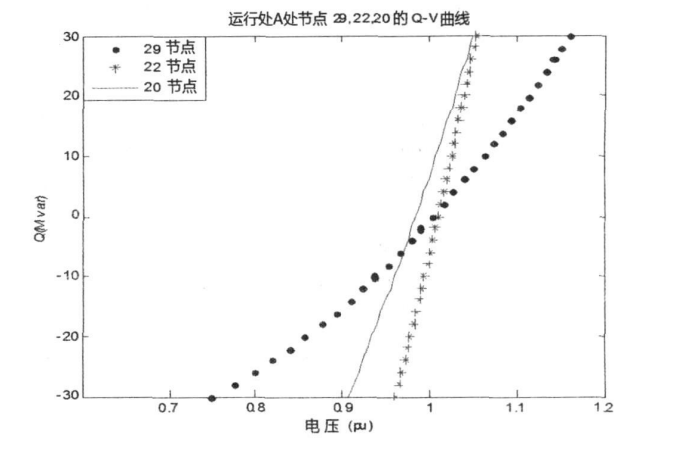


图 2 运行点 B 处节点 29、22、20 的 $Q-V$ 曲线

3.2 仿真结果分析

在运行点 A 处, 5 个系统最小特征值都大于 0, 说明系统是稳定的并且临界状态还不会到来。最小特征值是 0.509 8 相应的模式是 16。

B 运行点处的特征值仍然大于 0, 说明系统是稳定的。它的最小特征值减少到了 0.464 4 相应的模式依然是模式 16。

可以看出运行点 C 也是电压稳定的, 最小特征值为 0.065 9, 更趋近于 0, 对应的模式为模式 17。此时系统已接近不稳定。这个模式的节点参与因子被得出以预测系统薄弱节点和薄弱区域, 该模式对应的系统最薄弱节点为节点 29。通过 $Q-V$ 曲线可以看出, 模态法分析的结果是准确的。分析出的系统薄弱区域如下:

在 A 运行点, 所有特征值大于 0 且最小特征值为 0.509 8。B 运行点, 所有特征值仍然大于 0 而最

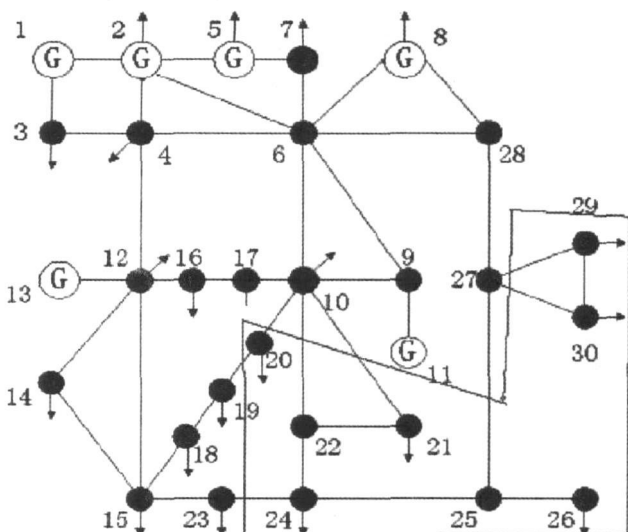


图 3 IEEE 30 机系统薄弱区域的确定

小特征值从 0.509 8 减至 0.464 4, 运行点 C 最小特征值降至 0.065 9, 更接近 0。这说明运行点 C 距电压稳定极限最近, 然后是 B 运行点, A 运行点是最稳定的。

4 结 论

利用模态分析方法对电力系统进行了分析, 确定出了系统的薄弱节点和薄弱区域, 并做出了薄弱节点处的 $Q-V$ 曲线。对于 30 节点系统, 只求出了其最小的几个特征值。对于一个有很多节点的大系统来说, 不实际也不要求解简化雅可比矩阵的所有特征值; 另外, 只计算其最小特征值也是不充分的, 因为通常和系统的不同部分相关的不只有一个弱的模式。与最小特征值相关的模式在系统负荷加重时, 可能不是最有问题的模式。求出 5—6 个最小的特征值来分析, 每次分析多于一个的最薄弱节点, 这样, 可以得到比较全面准确的信息。算例表明, 模态分析法是准确和可信的。

参考文献

- [1] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架: (一) 从孤立防线到综合防御 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 8—16.
- [2] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8·14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训 [J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8—12.
- [3] 戴剑锋, 王海超, 周双喜, 等. 基于负荷裕度随机特性的电压失稳概率问题研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 26—30.

- [4] 周双喜. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [5] Y. Mansour ed. Voltage stability of power systems: Concepts, analytical tools and industry experience. IEEE Publication 90TH0358—2—PWR, 1990.
- [6] Sekine Y, Ohtsuki H. Cascaded Voltage Collapse. IEEE Trans. On PWRs, 1990, 5(1).
- [7] P. Kundur ed. Voltage Stability Assessment Procedures and Guides. IEEE/PES Special Publication, 1998.
- [8] CIGRE Task Force 38.01.03. Planning Against Voltage Collapse. Electra, 1987(111): 55—75.
- [9] Charles Concordia. Voltage Instability: Definition and Concepts. Venice, Florida, 1987.
- [10] Carson W. Taylor. Power System Voltage Stability. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [11] P. Kundur. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [12] CIGRE Task Force 38.02.10. Modeling of Voltage Collapse Including Dynamic phenomena. Electra, 1993(147): 71—77.
- [13] Larchs W. R. Voltage Instability in Interconnected Power Systems: A Simulation Approach. IEEE Trans. On PWRs, 1992, 7(2).
- [14] D. M. DeMarco, S. R. Bergen. A Security Measure of Random Load Disturbances in Nonlinear System Models. IEEE Trans. On CAS, 1987, 34(12): 1546—1557.
- [15] 李兴源, 王秀英. 基于静态等值和奇异值分解的快速电压稳定性分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 1—5.
- [16] G. D. Vouras, P. W. Sauer, M. A. Pai. Relationships between voltage and angle stability of power systems. Electrical power & energy systems, 18(8): 493—500, 1996.
- [17] CIGRE Task Force 38.02.11. Indices predicting voltage collapse including dynamic phenomena. Electra, 1995(159): 135—147.
- [18] Reactive Power Reserve Work Group Technical Studies Subcommittee. Western Systems Coordinating Council Voltage Stability Criteria Undervoltage Load Shedding Strategy and Reactive Monitoring Methodology (Final Report). May 1998.

作者简介:

张少康 (1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

李兴源 (1945—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制在等。

徐梅梅 (1985—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2009—02—10)

供电企业安全性评价自动化管理系统的设计和实现

潘守翡¹, 雷 霞¹, 余光亮², 周 冲²

(1 西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039; 2 重庆市电力公司璧山供电局, 重庆 402760)

摘 要:结合目前实际的供电局安全性评价工作的运行情况以及存在的问题, 设计出一套供电企业安全性评价自动化管理系统。介绍了系统的网架结构、设计思路 and 关键模块。实践证明, 系统可以优化供电企业安全性评价的工作流程, 提高安评工作的效率。

关键词:安全性评价; 供电企业; 计算机网络; 自动化管理系统

Abstract: According to the present actual operation condition and the existing problems of security evaluation of the power supply utilities, a new automation management system for security evaluation of power supply utilities is designed. The network structure, the design ideas and the key modules of the system are introduced. It has been proved that the work flow of the security evaluation can be optimized and the efficiency can be improved on this system.

Key words: security evaluation; power supply utility; computer network; automation management system

中图分类号: TM732 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)02—0011—02

供电企业安全性评价能够分析本企业当前电力生产的安全状况, 预测危险性发展为事故的概率以及事故造成损失的严重程度, 全面地评价电力系统各部分的危险程度和安全管理状况, 真正落实“安全第一, 预防为主”方针, 使安全管理变事后处理为事先预测、预防, 改变了事后补救处理的传统管理方式^[1~3]。

在对用户进行客户需求分析调查的过程中发现, 目前中国供电企业在进行安全性评价工作的过程中仍然存在一些问题。

- 1) 基层工作人员对安全性评价工作的重视程度不够, 对评价标准和查评依据的掌握不够准确, 造成查评结果与实际偏差较大。
- 2) 大多数表格仍然采用手工填写的方法, 工作繁杂, 这就使得查评工作的查评周期较长, 查评效率较低。
- 3) 安全评价工作中的文档编辑标准、格式、内容不规范、不统一, 整理起来比较繁琐。

4) 安评工作管理部门无法了解掌握安全性评价工作的进度情况, 难以对评价工作进行控制和汇总。

为解决安全性评价工作中的诸多问题, 针对重庆市电力公司璧山县供电局目前的安全性评价工作的特点, 介绍了供电企业安全性评价自动化管理系统的设计和实现。

1 系统网络构架

系统设计采用 B/S (浏览器/服务器) 分布式架构^[4], 采用三层结构设计, 系统软件安装在服务器端, 用户可以通过浏览器访问服务器。这样的结构具有很强的灵活性, 有利于软件的版本更新和日常维护。其系统网络构架如图 1 所示。

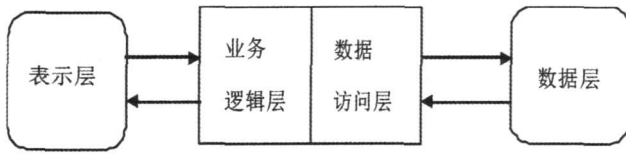


图 1 系统网络构架

系统主要由数据层、应用层和表示层组成, 具有较好的可扩展性。

- 1) 数据层主要用于存储业务数据。考虑到高效、快捷、安全等特点, 本系统采用 Microsoft SQL Server 2000 数据库管理系统。
- 2) 应用层由数据访问层和业务逻辑层组成, 其中数据访问层主要用来实现对数据库的访问, 建立业务对象与数据库关系之间的对应关系。而业务逻辑层主要利用数据库访问层的接口对业务逻辑进行封装, 对数据的有效性进行认证, 并实现系统的事务性和操作日志。

3) 表示层基于 ASP.NET 实现, 充分利用 DO-

NET对 c#的支持,在极大程度上提高了用户体验,增加系统的易用性^[5]。

2 系统设计思路

本系统建立在供电局内部局域网的平台上,最终实现供电局安全性评价的自动化管理,并能进行数据文件的传输及与其他应用的数据共享。系统开发时,要力求达到系统操作简单、查询灵活、使用方便。

2.1 建立后台数据库

根据安全性评价自动化管理系统各模块的功能,建立合理的数据表结构。其中包括:用户信息表、部门信息表、安评文档表、周期信息表、整改信息表、查评结果表以及根据《供电企业安全性评价标准》^[6]和《供电企业安全性评价查评依据》^[7]分别建立的查评标准表等。其中,主要数据表之间的关系如图 2 所示。

2.2 开发各管理子系统

利用 ASP.NET开发工具,建立安全性评价自动化管理系统的各子系统。

首先,建立为整个系统提供可扩展技术支撑的系统管理子系统。包括:信息发布子系统、表格下载子

系统、安评用户信息管理子系统和周期管理子系统等。

其次,根据供电局安全性评价工作的实际需要开发业务子系统:安评指标管理及任务分解子系统、自查评管理子系统、整改管理子系统和完成情况查询子系统等。

3 系统关键模块

针对目前实际的供电局安全性评价工作的存在的问题,本系统在以下功能模块中采取相应措施予以解决。

3.1 用户权限管理

供电企业安全性评价工作中,不同的岗位所负责的查评工作有所不同,系统根据用户安全性评价工作的实际需求,实现了基于角色的权限管理,通过对登录用户的权限判别,可赋予登录用户不同的职能。同时通过权限的设置,实现了供电公司复杂的流程管理。

3.2 查评指标管理

针对当前安评工作人员对评价标准掌握不够准确的问题,系统已将《供电企业安全性评价标准》和

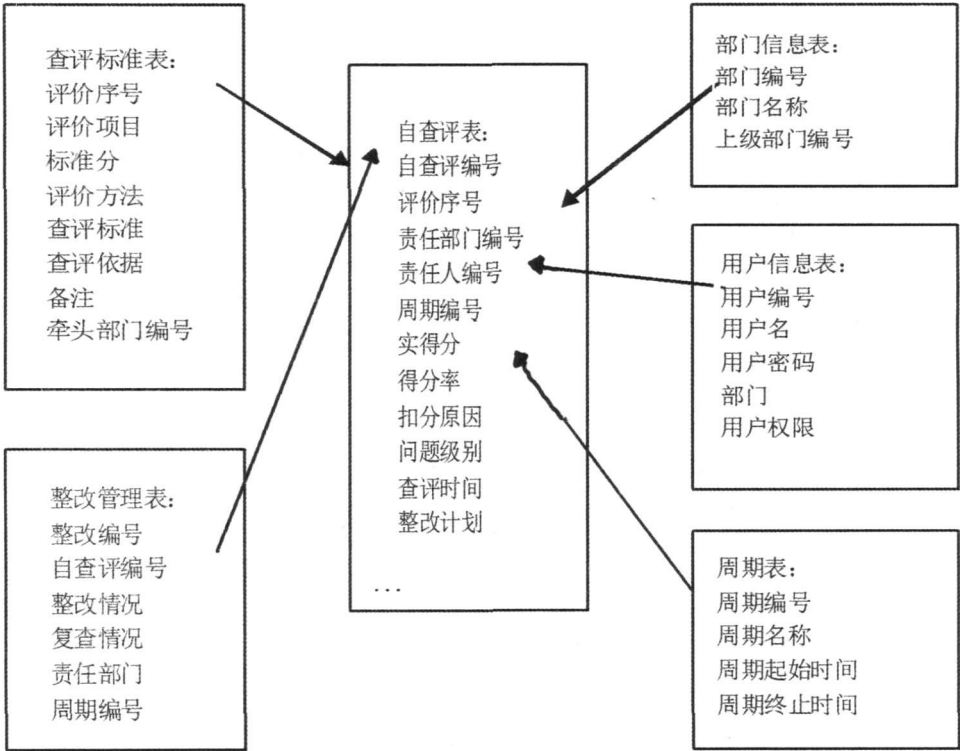


图 2 系统数据结构表

(下转第 36 页)

变电站的应用 [J]. 电力系统自动化, 2007, 33(1): 78—82

[2] IEC61850, 2002

[3] 徐大可, 赵建宁, 张爱祥. 电子式互感器在数字化变电站中的应用 [J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 78—82

[4] 高翔, 张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术 [J]. 电网技术, 2006, 30(23): 67—71.

[5] 樊唯钦. 数字化变电站的发展与应用 [J]. 电网技术, 2006, (30): 97—100.

[6] XIONG Xiaofu, YU Jun, LIU Xiaofang, etc Reliability of Substation Protection System Based on IEC61850. TRANSACTIONS OF TIANJIN UNIVERSITY. 2008, 14(2): 118—122.

[7] 张铭, 窦赫蕾, 常春藤. OPNET Modeler 与网络仿真

[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.

[8] T. S. Sidhu and Y. Yujie Modelling and Simulation for Performance Evaluation of IEC61850 — Based Substation Communication Systems[J]Power Delivery IEEE Transactions on, 2007, 22, 1482—1489.

[9] T. S. Sidhu and Y. Yujie IED modelling for IEC61850 based substation automation system performance simulation [C]. Power Engineering Society General Meeting 2006. IEEE, p. 7 pp

作者简介:

余 锐 (1976 —), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护和配电网自动化.

(收稿日期: 2008—12—03)

(上接第 12 页)

《供电企业安全性评价查评依据》置于后台数据库中, 并设置按条件查阅功能, 普通用户可以通过访问浏览器, 根据自身需要有选择性的查阅学习查评标准, 方便记忆。

同时, 系统还添加了安评管理部门根据自身的情况适当修改查评标准的功能。

3.3 自动生成报表

该功能主要用于解决查评工作中, 报表内容制定不够规范、格式不统一的问题。

根据《供电企业安全性评价标准》的要求, 系统提供了 6 种评价表的模板, 用户可根据自身需要, 在完成相应的查评工作后, 下载所需的表格。

3.4 完成情况查询

由于安全性评价的查评内容繁杂多样, 并且参与的部门和人员较多, 查评管理部门对安评工作难于驾驭, 为此, 本系统开发完成情况查询功能。

该功能可以实现安全性评价工作管理部门对安全性评价工作进行全面跟踪管理。其中包括查评工作的完成情况和整改工作的完成情况。利用此功能, 管理部门可以非常方便地查询到查评工作的状态, 并对相关部门进行催办、监督。

4 在璧山供电局的实践

安全性评价工作本身就是一个复杂的过程, 再加上受璧山县地形因素的影响, 璧山县供电局的电网构成复杂, 更加导致了璧山供电局安全性评价工作操作费时又费力。

目前, 供电企业安全性评价自动化管理系统已经在重庆市电力公司璧山县供电局试运行。系统安装在供电局内部局域网的服务器上, 各部门、车间可以通过访问浏览器传输、共享数据文件, 完全实现安全性评价的办公自动化, 在防范供电企业电力生产中可能存在事故及隐患, 消除各种不利因素等方面发挥了积极有效的作用, 充分提高了工作效率, 取得了良好的效果。

参考文献

[1] 黄祝成, 邓克. 网络技术在电力安全性评价中的应用 [J]. 电力安全技术, 2002, 4(12): 16—18, 26.

[2] 杨松, 肖辉旭, 郭志锋, 等. 电网调度系统安全性评价管理系统开发 [J]. 吉林电力, 2007, 35(1): 54—56.

[3] 沈国栋. 安全性评价对安全生产的促进作用 [J]. 电力安全技术, 2001, 6(3): 17—18.

[4] 于古胜, 李华敏, 胡成全. 基于 B/S 模式的电力安全性评价系统的设计和实现 [J]. 电讯技术, 2007, 47(6): 186—189.

[5] 周天雷. 基于 WEB 的电力安全性评价综合管理系统 [J]. 浙江电力, 2007, 18(3): 72—75.

[6] 国家电网公司. 供电企业安全性评价标准 [S]. 北京: 中国电力出版社. 2002.

[7] 张丽英. 供电企业安全性评价查评依据 [M]. 北京: 中国电力出版社. 2002.

作者简介:

潘守翡 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机技术在电力系统中的应用。

雷 霞 (1973—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为配电自动化和电力市场。

(收稿日期: 2009—02—15)

敏感负荷电压凹陷敏感度概率密度函数及应用

李 皖, 陈卫东, 肖先勇

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:提出了基于最佳平方逼近法来评估敏感负荷电压凹陷敏感度的新方法。该方法利用勒让德多项式来拟合敏感度参数的概率密度函数,采用累积求和方式评估敏感负荷凹陷敏感度。与传统方法比,本方法直接根据样本信息来推断概率分布模型,避免了主观假设方法的不足,使得评估结果更加合理、客观。通过对 4 种典型概率分布与相应的最佳平方逼近概率模型的逼近检验,结果表明所得到的逼近多项式有很好的拟合性能。利用该方法对 PC 机进行凹陷敏感度评估,结果证明了其正确性和有效性。

关键词:电压凹陷;敏感度;概率模型;概率密度函数;最佳平方逼近;应用

Abstract: A new method to assess the voltage sag sensitivity of sensitive equipment is proposed based on the best square approximation. The Legendre polynomials are used to fit the probability density function of voltage sag sensitivity, and the cumulative summation is adopted to assess the voltage sag sensitivity of sensitive equipment. Compared with the traditional probabilistic assessment methods, the probability distribution model is inferred directly by the sample information, avoiding the inadequacy of subjective hypothesis and making the assessment results more reasonable and objective. According to the approximation test for four typical probability distributions, the results show that the approximation polynomial has a good fitting performance. The correctness and effectiveness of the proposed method is validated with the assessment to the voltage sag sensitivity of PC.

Key words: voltage sag; sensitivity; probabilistic model; probability density function; best square approximation; application

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0013-04

近年来,随着计算机技术、电力电子技术等的迅速发展,各种敏感负荷在电力用户中大量采用^[1,2],这些负荷与电能质量之间的电磁兼容问题越来越突出^[3,4]。在各类电能质量扰动中,电压凹陷(voltage sag)是最严重的电能质量问题^[5,6]。计算机(PC)、可调速电机(ASD)、交流接触器(ACC)、可编程逻辑控制器(PLC)等对电压凹陷非常敏感^[7~9],在运行中常因凹陷引起故障或误动,造成巨大经济损失^[10,11]。准确评估电压凹陷对敏感设备的影响,对电力企业和电力用户的风险评估、技术改造等有重要意义。

不同类型、不同厂家生产的敏感负荷设备在不同运行环境、工况和不同电能质量扰动下的敏感特征不同,受供电系统和负荷本身的众多不确定因素影响。根据 IEEE 标准 IEEE 1346^[4],在电压幅值-持续时间平面上,敏感负荷的电压耐受曲线(Voltage tolerate curve VTC)存在于某不确定区域内。现有评估方法包括实测法^[7~11]、概率估计法等^[12~15]。实测法通过监测负荷供电点凹陷特征并与设备耐受水平(Voltage tolerate level VTL)比较确定负荷敏感度,该方法

把凹陷特征和负荷 VTL 均作确定量进行比较,原理简单,结果可靠,但需长时间监测和监测装置,在现实中尤其对规划中的电网和尚未接入电网的负荷就无能为力。概率估计法把 VTL 当作随机变量,根据经验假设其分布规律并利用大量样本数据进行参数估计,可定量评估和预测凹陷对敏感负荷的影响,在评估算法中考虑负荷 VTL 的不确定性,但实际中,对 VTL 的随机分布规律知之甚少,甚至与假设的分布完全不同,很难保证评估和预测结果的正确性。因此,如何根据实际样本准确判定 VTL 的随机分布规律和参数成了亟需解决的重要课题。

为了更客观地评估敏感负荷凹陷敏感度,下面根据实际样本确定负荷敏感度随机分布规律,以勒让德多项式为基函数,以样本数据的各阶矩为约束,提出一种基于最佳平方逼近的敏感度评估新方法,客观准确地确定 VTL 概率密度函数,通过累积求和评估负荷故障率。对 PC 机仿真并与现有 4 种概率评估法比较,结果证明,本方法的评估模型忠实于实际样本,克服了分布模型主观假设带来的不足,评估精度高,更符合实际,有一定工程应用价值。

基金项目:国家自然科学基金项目(50677041);四川省应用基础研究项目(2008JY0043-2)

1 敏感负荷 VTL的不确定性

敏感负荷的 VTL一般用电压耐受曲线 VTC 表示,实验表明,VTC曲线一般呈矩形^[16]。对不同元件类型、安装位置、功能等,VTC曲线存在不确定区域,如图 1。图 1中, U_{max} 、 U_{min} 、 T_{max} 、 T_{min} 表示凹陷幅值和持续时间上下限, A 为正常工作区域, E 为故障区域, B、C、D 为不确定区域。在电压凹陷发生在 B、C、D 区域内任一点敏感负荷的实际运行状态不确定。

典型敏感负荷的 VTL不确定性变化范围为^[15]:
PC 电压幅值 0.46~0.63 p.u 持续时间 40~205 ms
PLC 电压幅值 0.3~0.9 p.u 持续时间 20~400 ms;
ASD 电压幅值 0.59~0.71 p.u 持续时间 15~175 ms

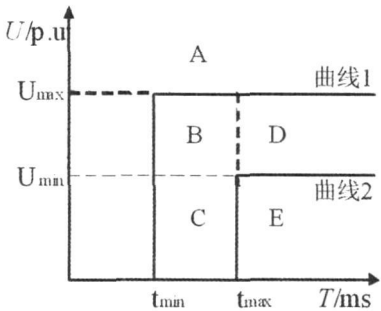


图 1 敏感负荷 VTC曲线不确定区域

2 最佳平方逼近模型与评估过程

2.1 最佳平方逼近模型

设 $f(x) \in C[a, b]$, $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_n(x)$ 为内积空间 $C[a, b]$ 内的线性无关系, $a_0, a_1, \dots, a_n$ 为任意实数。由最佳平方逼近原理可知,存在 $S^*(x)$ 满足 $\|f(x) - S^*(x)\|^2 = \min_{S \in C} \|f(x) - S(x)\|^2$ (1) 其中

$$S^*(x) = \sum_{i=0}^n a_i \varphi_i(x)$$
 (2)

为求 $S^*(x)$,等价于求以下多元函数的最小值:
 $I(a_0, a_1, \dots, a_n) = \int_a^b f(x) [\sum_{i=0}^n a_i \varphi_i(x) - f(x)]^2 dx$ (3)
由于 $I(a_0, a_1, \dots, a_n)$ 是 $a_0, a_1, \dots, a_n$ 的二次函数,由多元函数求极值的必要条件

$$\frac{dI}{da_k} = 0, (k = 0, 1, \dots, n)$$
 (4)

得:

$$\sum_{i=0}^n (\varphi_i(x), \varphi_k(x)) a_i = (f(x), \varphi_k(x))$$
 (5)
($k = 0, 1, \dots, n$)

该式为关于 $a_0, a_1, \dots, a_n$ 的线性方程组,称为法方程,其矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} (\varphi_0, \varphi_0) & (\varphi_0, \varphi_1) & \dots & (\varphi_0, \varphi_n) \\ (\varphi_1, \varphi_1) & (\varphi_1, \varphi_0) & \dots & (\varphi_1, \varphi_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\varphi_n, \varphi_0) & (\varphi_n, \varphi_1) & \dots & (\varphi_n, \varphi_n) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (f, \varphi_0) \\ (f, \varphi_1) \\ \vdots \\ (f, \varphi_n) \end{bmatrix}$$
 (6)

由于 $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_n(x)$ 线性无关,系数矩阵行列式不为零,方程组有唯一解,因此可求出系数 a_i 。但当 n 较大时,法方程可能病态。故以勒让德正交多项式作为基函数进行求解,其权函数 $\omega(x) = 1$:

$$\int_{-1}^1 P_j(x) P_k(x) dx = \begin{cases} 0, & j \neq k \\ \frac{2}{2k+1}, & j = k \end{cases}$$
 (7)

勒让德多项式推导:

$$\begin{aligned} P_0(x) &= 1 \\ P_1(x) &= x \\ &\dots \end{aligned}$$

$$P_{k+1}(x) = \frac{2k+1}{k+1} x P_k(x) - P_{k-1}(x), (k = 1, 2, \dots)$$
 (8)

根据正交多项式特性,方程组左系数矩阵除对角元素外均为 0,且:

$$(\varphi_k, \varphi_k) = (P_k, P_k) = \int_{-1}^1 P_k(x) P_k(x) dx = \frac{2}{2k+1}$$
 (9)

若敏感设备 VTL敏感特征参数 x_i (电压幅值、凹陷持续时间等)的分布区域为 $[a, b]$,类似于凹陷严重性指标,以敏感特征均值为中心点,可变换到 $[-1, 1]$ 。变换关系为 $y = \frac{2}{b-a} (x - \frac{b+a}{2})$,这样将敏感特征参数 x_i 变换为新的参数 y_i ,样本 $y_i \in [-1, 1]$,概率密度函数为 $f(y)$,其各阶矩为:

$$\mu_k = \int_{-1}^1 y^k f(y) dy = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^k$$
 (10)

由式 (5) 的右式得:

$$(f(x), \varphi_k(x)) = \int_a^b f(y) g_k(y) dy = \int_{-1}^1 f(y) P_k(y) dy$$
 (11)

其中 $P_k(y)$ 为一般多项式。

设 $P_k(y) = \sum_{i=0}^k \beta_{ki} y^i$,代入式 (11) 得:

$$\int_{-1}^1 P_k(y) f(y) dy = \sum_{i=0}^k \beta_{ki} \int_{-1}^1 y^i f(y) dy$$

$$=\sum_{i=0}^k \beta_{ki} \int_{-1}^1 f(y) dy = \sum_{i=0}^k \beta_{ki} \mu_k \quad (12)$$

由式 (9)和式 (12)求解方程组得：

$$a_k = \frac{(P_k, f)}{(P_k, P_k)} = \frac{\sum_{i=0}^k \beta_{ki} \mu_k}{2 / 2 k+1} \quad (13)$$

因此，正交多项式逼近表达式为：

$$f(y) \approx \hat{f}_k(y) = \sum_{i=1}^n a_k P_k(y) \quad (14)$$

将 $y = \frac{2}{b-a} [x - \frac{a+b}{2}]$ 代入式 (14), 可得敏感度参数 $(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 在原分布区间 $[a, b]$ 的概率密度函数 $f(x)$ 。用最佳平方逼近分别求凹陷持续时间和电压幅值的概率密度函数 $f_t(t)$, $f_u(u)$, 再由下式确定设备故障率。

$$p = \int_{T_{min}}^T f(t) dt \int_U^{U_{max}} f(u) du \quad (15)$$

2.2 随机评估过程

- 确定各类负荷 VTL 不确定区间 $(U_{max}, U_{min}, T_{max}, T_{min})$ 。
- 将 VTL 不确定区域内的样本点转换到 $[-1, 1]$ 区间。
- 对变换后的样本进行统计, 计算各阶矩。
- 用最佳平方逼近法确定 V, T 在 $[-1, 1]$ 区间的概率密度函数。
- 将所得概率密度函数还原到原分布区间 $[a, b]$ 。
- 根据式 (15) 评估负荷凹陷敏感度。

3 对典型分布概率密度函数的拟合

根据数理统计原理, 以样本矩为约束条件确定随机变量的概率密度函数。因为随机变量各阶矩体现了样本分布特性, 其中一阶矩即均值刻画随机变量的取值中心; 二阶矩或方差反映对样本均值的偏差; 三阶矩描述分布对称性; 四阶矩说明变量集中和分散程度。矩的阶数越高, 所包含的样本信息越多。

为验证拟合能力, 这里用 7 阶矩, 对 4 种典型分布 (正态、瑞利、威布尔、指数) 进行拟合。参数如表 1, 拟合结果如图 2~5。其中虚线为理论分布, 实线为本方法逼近曲线。由图可见拟合曲线与理论分布曲线几乎重合, 说明该方法有很好的拟合性能, 不需

事先假设随机变量的分布规律, 直接根据样本信息就可确定随机变量的概率分布函数, 且精度可达到满意程度。

4 实例仿真

表 1 典型概率分布的参数

分布函数	分布参数
正态	$\mu=2, \sigma=0.5$
瑞利	$\mu=0.6$
威布尔	$a=2, b=4$
指数	$\mu=1$

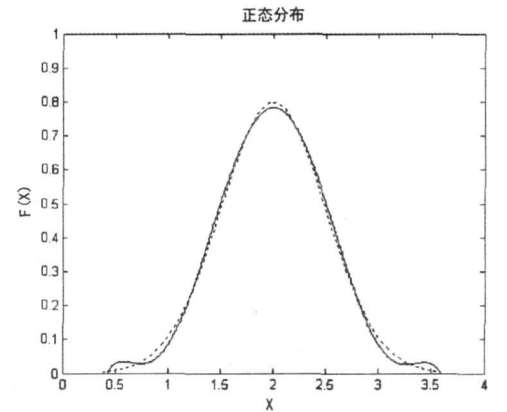


图 2 正态分布的逼近检验

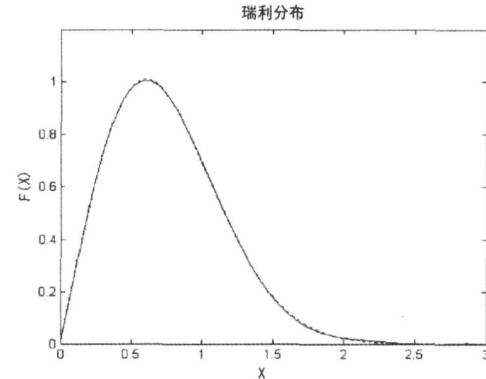


图 3 瑞利分布的逼近检验

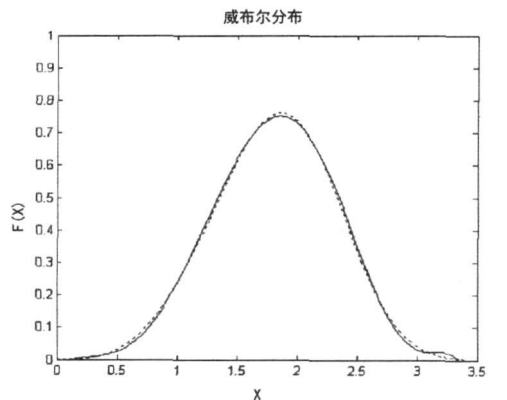


图 4 威布尔分布的逼近检验

表 2 评估结果比较

凹陷 T(ms) V(%)	仿真值 (%)	最佳平方逼近		方法 1		方法 2		方法 3		方法 4	
		故障率 (%)	误差 (%)	故障率 (%)	误差 (%)	故障率 (%)	误差 (%)	故障率 (%)	误差 (%)	故障率 (%)	误差 (%)
110, 50	42.00	41.47	1.27	35.55	15.35	44.88	6.86	35.42	15.68	51.29	22.11
120, 47	53.56	52.70	1.61	47.08	12.09	57.53	7.41	47.38	11.54	59.02	10.20
160, 52	66.22	66.87	0.99	59.40	10.31	70.34	6.25	54.41	17.83	62.87	5.05
170, 52	69.69	70.27	0.84	62.62	10.15	73.54	5.52	57.31	17.76	64.80	7.02
180, 58	35.88	35.32	1.54	23.40	34.80	27.27	24.00	19.34	46.11	42.62	18.78
180, 48	86.48	86.64	0.18	79.02	8.63	89.39	3.37	77.06	10.90	74.23	14.16
200, 51	80.09	80.48	0.49	72.84	9.05	83.86	4.71	68.34	14.67	71.67	10.52

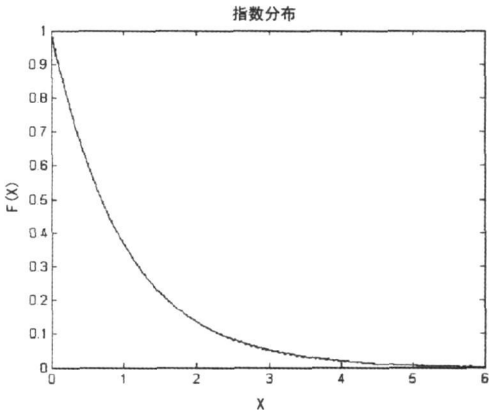


图 5 指数分布的逼近检验

以 PC 机为例, 由于实际样本缺乏, 通过蒙特卡罗随机产生 PC 机的敏感度样本, 以描述在不确定区域的随机性。蒙特卡罗仿真精度与仿真次数有关, 为达到一定的精度要求, 仿真次数应满足不等式:

$$N \geq \frac{4}{\epsilon^2}$$

(16)

式中, ϵ 为仿真结果相对误差, N 为仿真次数。当 $\epsilon = 0.05$ 时, N 取 1 600。

为说明方法, 用敏感特征参数服从包含正态、瑞利、威布尔、指数分布 (分别用方法 1~4 表示) 的混合分布模式, 通过蒙特卡罗随机产生样本, 用所提出的方法进行评估, 并与传统方法 1~4 进行对比。

用蒙特卡罗随机模拟 500 次产生 PC 机电压凹陷敏感特征参数, 分别用本方法和方法 1~4 进行 PC 机的电压凹陷敏感度评估, 所得 PC 机的故障率评估结果如表 2。

由表 2 可见, 不同评估方法对评估结果影响很大。本方法评估结果的最大误差为 1.61%, 方法 1~4 评估结果的最大误差分别为 34.80%、24.01%、46.11%、22.11%。通过蒙特卡罗随机模拟产生 PC 的电压凹陷持续时间与电压幅值分布规律未知的信息, 传统概率评估法中概率密度函数的选取基于主观假设, 其评估误差取决于假设的准确性, 而基于最佳平

方逼近的评估方法充分利用样本信息, 不需对概率分布规律作主观假设, 有效地避免了评估过程中主观假设的不足, 有效地提高了评估精度。

5 结 论

基于最佳平方逼近法的敏感负荷电压凹陷敏感度评估方法, 充分利用样本信息, 避免了主观假设, 能保证评估结果的客观性和合理性。通过直接利用样本信息的矩的信息判定其随机分布规律, 原理简单, 方法可靠, 并能达到满意的评估精度。本方法除用于 PC 机敏感度评估外, 还可以用于 PLC、ASD、ACC 等敏感负荷, 适用性强。

参考文献

[1] 韩英铎, 严干贵, 姜齐荣, 等. 信息电力和 FACTS & DFACTS 技术 [J]. 电力系统自动化, 2000, 20(19): 1—7.

[2] 程浩忠, 艾芊, 张志刚, 等. 电能质量 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[3] Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society. IEEE Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances [S]. 1995. IEEE Std 1250—1995.

[4] Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality. IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility With Electronic Process Equipment [S]. 1998. IEEE Std 1346—1998.

[5] 王希宝, 李元耀. 刘斌, 李建春, 肖先勇, 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.

[6] 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.

(下转第 47 页)

500 kV 叙府变电站主变将承担宜宾电网 $1/3 \sim 1/2$ 的负荷,如出现 500 kV 叙府变电站主变突然停电,将使宜宾电网出现大范围的限电,同时宜宾电网电压不能保持稳定。

2.4.2 220 kV 龚山线、孜平线任一线路停电

220 kV 龚山线和孜平线作为宜宾电网对外联系的主要联络线在任意一回线路停电后,将使宜宾、泸州电网断面稳定限额降低 100 MW,届时宜宾、泸州电网分别按 3:1 比例削减负荷。

2.4.3 区内电厂全停

黄桷庄及宜宾电厂作为宜宾电网重要电源点和电压支撑点,若发生全停事故,将会导致宜宾地区电压普遍低于 220 kV 以下,龙头、北荆坝地区电压最低到 206 kV,严重威胁系统安全。

3 结论及建议

(上接第 16 页)

[7] Djokic S Z, Desmet J, Vanalme G, et al. Sensitivity of personal computers to voltage sags and short interruptions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (1): 375—383.

[8] Djokic S Z, Stockman K, Milanovic J V, et al. Sensitivity of ac adjustable speed drivers to voltage sags and short interruptions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (1): 494—505.

[9] Djokic S Z, Milanovic J V, Kirschen D S. Sensitivity of ac coil contactors to voltage sag, short interruptions and undervoltage transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19 (3): 1299—1307.

[10] 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—37.

[11] 陈志强.敏感设备受电压暂降影响分析 [D]. 中国台湾国立中山大学硕士论文, 2005, 7.

[12] Milanovic J V, Gupta C P. Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags—part I: the methodology [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (2): 918—924.

[13] Milanovic J V, Gupta C P. Probabilistic assessment of fi-

综上所述,2008 年 500 kV 叙府变电站 2 号主变未投运和 220 kV 未形成环网前,宜宾电网供电能力将不能满足电网用电需求,正常及检修方式下均有断面过载和设备过载以及电压支撑不足的问题,电网将继续面临负荷控制。

鉴于目前电网存在问题,应加快建设 220 kV 城南站、豆坝站,220 kV 叙荆线,山孜线形成 220 kV 环网,以增强电网受电能力,解决电网供电能力不足问题。完善地区 110 kV 网络建设,改变电力输送受阻局面,同时重视地区电网无功平衡,防止发生电压崩溃。

作者简介:

刘 勤 (1968—),男,四川宜宾人,工程师,高级调度员,从事电网运行工作。

(收稿日期:2009—02—10)

nancial losses due to interruptions and voltage sags—part II: practical implementation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (2): 925—932.

[14] P. Pohjanheimo and M. Lehtonen. Equipment sensitivity to voltage sags—test results for contactors, PCs and gas discharge lamps [C]. Proceeding of 2002 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power Brazil 2002, pages 559—563.

[15] Gupta C P, Milanovic J V. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (2): 711—718.

[16] Chan—Nan Lu, Cheng—Chieh Shen. Estimation of Sensitive Equipment Disruptions Due to Voltage Sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22 (2): 1132—1137.

作者简介:

李 皖 (1987—),女,硕士研究生,研究方向:电能质量及其控制技术。

陈卫东 (1985—),男,硕士研究生,研究方向:电能质量及其控制技术。

肖先勇 (1968—),男,副教授,硕士生导师,长期从事电能质量及其控制的教学与研究。

(收稿日期:2008—12—18)

一种自适应的低频减载方案的设计

巫 柯, 李兴源, 李青芸

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 现行的低频减载方案都是事先制定好的, 没有充分考虑到实际系统的特征和拓扑结构, 也没有考虑到系统运行点已经具体故障的大小, 往往会造成过切或欠切现象, 因此很有必要设计出一种自适应的低频减载方案。提出了一种新的自适应的低频减载方案, 该方案基于对故障大小的估计和判断, 并根据故障大小的变化而改变。

关键词: 低频减载; 自适应; 频率滑差; 故障大小估算

Abstract: Currently the existing frequency load shedding plans are predetermined not taking the features and the topology of the actual system into account as well as the operating point and the magnitude of the disturbance. As a consequence under frequency load shedding (UFLS) very often disconnects more or less load than is required so there is a need for the development of an adaptive UFLS plan. A new adaptive UFLS plan based on the estimation of the magnitude of the disturbance is proposed.

Key words: under frequency load shedding (UFLS); self-adaptive; frequency slide difference; estimation of the magnitude of the disturbance

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0017-02

由于现代电网经济运行的需要, 系统备用容量偏低, 低频减载成为严守第三道防线^[1], 防止电力系统发生频率崩溃的低成本的紧急措施。当系统发生严重功率缺额时, 低频减载装置中的低频继电器向断路器发送断开信号, 通过断路器迅速断开相应数量的负荷, 使系统频率在不低于某一允许值的情况下, 达到有功功率的平衡, 防止事故的进一步扩大。

传统的低频减载采用“逐次逼近”式的方案, 这种方案预先估计系统的功率缺额, 在电力系统发生事故, 系统频率下降的过程中, 按照不同的频率整定值顺序切除负荷, 以达到稳定系统频率的目的。许多文献提到了传统 UFLS 方案的应用^[2~5]。但这种方法是根据系统最严重故障下的频率绝对值来整定, 虽然可以有效地阻止频率的下降, 但没有考虑到运行时的具体情况, 以及事故的不同等级, 往往会造成过切, 造成不必要的经济损失。并且减负荷装置必须等到频率降低到整定值以下才动作, 可能会错过最佳切除时间, 也会导致对继电器正确动作的依赖, 在伴随低电压等其他故障的时候, 继电器可能由于电压或电流低于正常工作值而被闭锁, 无法动作。

这里提出了一种新的自适应的低频减载方案, 该方案基于对故障大小的估计和判断, 可以根据故障大

小的变化而改变。

1 低频减载 (UFLS) 方案及原理

1.1 低频减载方案

现代电力系统通过建设大电站、大机组取得较高的发电经济效益的同时, 削弱了在大扰动下维持系统频率稳定性的能力, 极易发生恶性频率事故, 导致全系统的瓦解。北美和西欧等多处现代化电网的多次恶性频率事故所造成的重大经济损失更引起了各国电力系统运行与管理部门对电力系统频率稳定问题的普遍关注。

传统的低频减载是采用分级断开负荷功率并逐步修正的方法, 在电力系统发生事故, 系统频率下降的过程中, 按照不同频率整定值顺序切除负荷。也就是将接至低频减载装置的总功率分配在不同起动频率值来分批地切除, 以适应不同功率缺额的需要。这种方法只能反映系统功率缺额的大小, 并且带有一定的动作延时, 如果延时较长或出现较大功率缺额时, 就会影响抑制频率下降的效果^[6, 7, 8]。

随着计算机技术的高速发展, 出现了一些基于计算机在线应用的低频减载方法^[9]。

1) 用 $\frac{df}{dt}$ 的实时信息来判断是否应该加速切除负

基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助项目 (2004CB217907); 国家科技支撑计划项目 (2008BAA13B01)

荷或是应该进行闭锁。

2)自动识别频率“悬停”现象,并按各自的阶梯曲线逐步调节定值。这种方式具有动态调节定值的自适应能力和较高的安全性与可靠性。

1.2 低频减载方案整定的内容和要求

UFLS方案的整定包括对基本轮和特殊轮各轮频率定值、延时、功率切除量的确定。基本轮的任务就是在不过切的情况下尽快制止频率下降,尽可能地使频率恢复到接近正常频率。基本轮应快速动作,为了防止在系统振荡或电压急剧下降时误动作,一般可带0.2~0.5 s的时限。基本轮一般按频率等距分级,每级切负荷量分别确定;特殊轮的任务是在防止基本轮动作后,避免频率长时间悬停在某一不允许的较低值或防止频率缓慢降低,特殊轮经一定时延动作,使频率值尽快恢复至49.5~50 Hz。特殊轮通常按时间分级。

一个好的 UFLS方案应能满足下列要求^[10]。

- 1)在各种运行条件和过负荷条件下均能有效防止系统频率下降到危险点以下;
- 2)在较短时间内使频率恢复到正常值,不出现超调或悬停;
- 3)切除的总负荷尽可能小;
- 4)整个 UFLS方案的投资费用尽可能低。

1.3 UFLS工作原理

如图 1所示是一种典型的系统发生功率缺额,传统通用型低频减载装置实现按频率逐级减载(基本段和后备段),系统的频率变化轨迹图,此处暂不考虑按频率加速连切负荷的措施及其一些相关辅助判据。

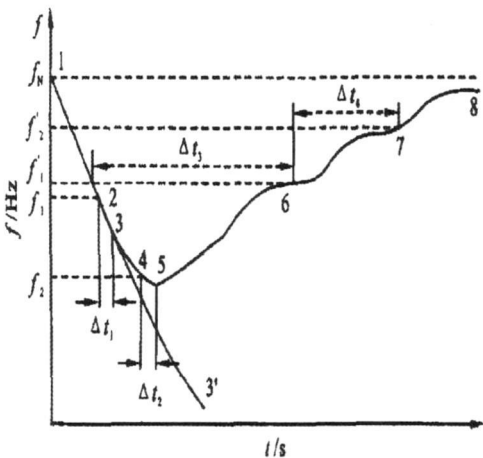


图 1 系统频率的变化过程图

如图 1所示,在故障发生前系统频率稳定在额定值 f_n ,假如在点 1系统发生了大量的有功缺额,系统频率将急剧下降。当频率下降到 f_1 时,第一轮低频继电器启动,延时 Δt_1 后,切除一部分负荷。如果功率缺额比较大,第一轮减载后,系统频率还会继续下降。考虑到第一轮减载的作用,系统频率按照 3—4的曲线下降,而不是按照 3—3'的轨迹下降。当频率下降到 f_2 时,第二轮低频继电器启动,延时 Δt_2 后,又切除一部分负荷。此时系统频率开始回升,但由于系统频率长时间悬浮于 f_1 之下,时间超过整定值 Δt_3 后,后备段减载第一轮;由于系统频率仍然低于后备段第二轮频率整定值 f_3 ,时间达到第二轮动作整定值后,动作后备段第二轮减载,之后系统频率慢慢恢复至正常工况。

然而,传统的 UFLS经常造成过切或者欠切,这将会对系统带来不必要的损害,所以,急切需要设计出一种自适应的 UFLS的方案。

2 自适应的 UFLS方法

根据文献 [11],写出某台发电机摆动方程,表述如下。

$$\Delta p = 2 \frac{df}{dt} \frac{H}{f_n} \tag{1}$$

其中, Δp 表示该台发电机的不平衡功率, $\frac{df}{dt}$ 表示频率 f 的变化率,即频率滑差, H 表示其惯性常数, f 表示其瞬时频率, f_n 表示其额定频率。

由式 (1)可知,对于整个系统来说,总的不平衡功率可表示为

$$\Delta P = \sum_{m=1}^N \Delta P_m = 2 \frac{dF}{dt} \frac{\sum_{m=1}^N H_m}{f_n} = 2\alpha \frac{dF}{dt} \tag{2}$$

其中,

$$F = \frac{\sum_{m=1}^N H_m f_n}{\sum_{m=1}^N H_m} \tag{3}$$

$$\alpha = \frac{\sum_{m=1}^N H_m}{f_n} \tag{4}$$

以上两个参数可以事先计算出来。

(下转第 72 页)

4 结束语

从上述分析情况来看,关于特高压换流站直流开关场母线的选择上,主要受地面合成电场强度和机械强度的影响,而机械强度可以通过调整支撑点的数量进行调节,而工作电流、离子电流密度以及地面磁场强度对直流场管母线的截面和距地高度不起决定性作用。

通过上述论述表面,对于 ± 800 kV、5 000~6 400

MW 的特高压直流输电工程,选择 $\Phi 250$ 管母线、距地面 15 m 左右就可满足要求,但直流场母线设计是一个复杂的工作,还需结合直流场 ± 800 kV 母线支柱绝缘子的特性,进行管母线截面和距地高度的进一步优化设计工作,最终确定直流场母线的截面和距地高度。

目前,云广特高压直流工程换流站直流场工程实施方案中,极母线选择 $\Phi 250$ 管母线,距地高度为 16 m 左右。

(收稿日期:2009-01-04)

(上接第 18 页)

在完成对各发电机的 f 和频率滑差 $\frac{df}{dt}$ 以及惯性常数的估算之后,未知量 ΔP 就能从式 (2) 中得到。进一步,可以得到要切除的负荷量:

$$\sum P_{LS} = \Delta P - K_L \Delta f_{\infty} \quad (5)$$

式中: $\sum P_{LS}$ 为总减负荷功率; ΔP 为系统总的不平衡功率; K_L 为负荷调节效应系数。

如果考虑到充分发挥系统旋转备用容量 (SR, spinning reserve capacity) 的作用,那么减负荷总量为:

$$\sum P_{LS} = \Delta P - K_L \Delta f_{\infty} - SR \quad (6)$$

3 小结

前面提出了一种新的自适应的低频减载方案,该方案基于对故障大小的估计和判断,并根据故障大小的变化而改变。该方案的准确性有赖于对 f 和频率滑差 $\frac{df}{dt}$ 的准确测量,这将是下一步所关注的问题。

参考文献

- [1] 方勇杰. 电力系统的自适应解列控制 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 41-44.
- [2] SMAHA, D. W. et al.: 'Coordination of load conservation with turbine underfrequency protection', IEEE Trans Power Appar Syst 1980, 99, pp 1137-1150.
- [3] PRASETIJO, D. et al.: 'A new load shedding scheme for limiting under-frequency', IEEE Trans Power Syst, 1994, 9, (3), pp 1371-1378.
- [4] HUANG, S. J., and HUANG, C. C.: 'An adaptive load shedding method with time-based design for isolated power

er systems', Electr Power Energy Syst, 2000, 22, (1), pp 51-58.

- [5] [苏] БЕЖКОБ Б. А. 电力系统过渡状态控制 [M]. 杨笑石, 张金镔, 译. 北京: 科学出版社, 1989.
- [6] P. Harrison: 'Restoring system stability by under frequency load shedding in circumstances of sudden supply deficiency. In: Proceedings of the IFAC Symposium on Automatic Control of Power Generation Distribution and Protection Pretoria (Republic of South Africa); 1980. 15-19.
- [7] Kalanishwamy K. A. et al.: 'Optimal Load Shedding Taking into Account of Voltage and Frequency Characteristics of Loads', IEEE Trans on PAS Vol 104, No 6, June 1985.
- [8] 高元楷, 王漪, 郑定海. 东北电力系统低频控制 [C]. 中国电机工程学会稳定控制装置研讨会资料, 湖北武汉, 1989.
- [9] 秦明亮. 在频率紧急控制装置中扩充 $\frac{df}{dt}$ 应用的探讨 [J]. 电网技术, 1998, (6): 39-41.
- [10] Delfino B, Massucco S, Morini A, Scalera P, Silvestro F.: 'Implementation and comparison of different under frequency load shedding schemes', Power Engineering Society Summer Meeting 2001, (1).
- [11] ANDERSON, P. M., and FOUAD, A. A.: 'Power system control and stability' (The Iowa Press Ames 1977).

作者简介:

巫 柯 (1983-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作;

李兴源 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作;

李青芸 (1982-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作。

(收稿日期:2009-01-09)

计及环境约束的机组组合二层规划方案研究

蒲 实, 刘俊勇, 陈 烨, 刘友波, 魏震波, 路志刚

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:就节能减排下的机组组合问题,通过一价格惩罚因子将传统的双目标优化问题转化为环境约束下的单目标优化问题,提出了求解该问题的二层规划方法。该方法基于二进制编码,通过一种改进蚁群算法选取上层机组的最优启停,并用二次规划处理下层负荷的优化分配。最后,通过 6 机系统在 24 小时内的算例仿真验证了该方案的可行性及有效性。

关键词:机组组合;环境约束;蚁群算法;二层规划

Abstract The common bi-objective model of the unit commitment problem considering both economic load dispatching and economic emission dispatching can be converted to a single objective optimization by adding a price penalty factor. A bilevel programming method is proposed to solve this environmental constrained problem. Based on a binary coding technique, the upper level optimization of unit status is handled by an improved ant colony algorithm, while the lower level optimization of load dispatching is handled by quadratic programming. Finally, the simulation results of 6-unit system with a scheduling time horizon of 24 hours demonstrate the feasibility and the effectiveness of the proposed method in solving the environmental constrained unit commitment problem.

Key words: unit commitment; environmental constraint; ant colony optimization; bilevel programming

中图分类号: TM284 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0019-05

在电网供需平衡的变化过程中,常常需要起停机组以达到系统经济运行的要求。传统的机组组合问题就是在得知负荷预测值的情况下确定机组的最优组合方式,以实现整个系统费用的最小化。然而,随着环保问题重要性的日益提高,机组组合中应该增加考虑排污量约束。也就是将发电排污所产生的社会治污成本作为机组组合的第二个目标函数。目前,可以用于多目标优化问题的算法主要包括直接进行多目标求解以及将多目标通过加权转换为单目标求解两大类。对于考虑环境约束的双目标机组组合问题,文献[1]采用遗传算法直接得到 Pareto 解集,同时考虑到最后能用到实际系统中的只能是一个最优解,该文献还使用 Min-max 方法、边际收益方法以及加权平均法,从 Pareto 解集中选择出一个最优解作为最终结果;而文献[2]则使用了一个相对更为实用的双目标加权的方法得到一个单目标优化问题,然后使用混沌遗传算法求解。比较而言,前者虽能得到 Pareto 解集,但其实用性不强,因此,下面将使用双目标加权转换为单目标优化的方法来进行机组组合优化。

由于单目标的机组组合优化问题是一个复杂的非线性混合整数规划问题,很难找出理论上的最优

解,因此国内外很多学者一直在积极研究求解该问题的算法。机组组合通常被视为一个二层规划问题:上层处理机组的起停状态,下层处理机组的出力分配。由于机组出力算法的优劣对机组组合整体求解效果影响较小,目前的研究主要集中在上层问题的求解。当前用于机组组合优化的算法主要有优先表法^[3]、动态规划法^[4,5]、拉格朗日松弛法^[6~8]等确定性方法,以及遗传算法^[9~11]、粒子群算法^[12~14]、免疫算法^[15]、蚁群算法^[16,17]等随机启发式算法。从求解速度上来看,文献[3~8]所提出的各种算法能够很快地求解大规模的机组组合问题,但这类算法求得的通常都是初始解附近的某个局部最优解。文献[9~17]所提出的各种随机启发式算法则能很好地避免陷入局部最优的问题,虽然这类算法仍不能确保得到真正的全局最优解,但这类算法跳出局部最优的能力能让它们求得远优于传统的确定性算法的解。在这些随机算法中,蚁群算法为近期研究较多的算法之一。已有的研究表明,该算法能较好地求解组合优化问题,为此,这里将使用蚁群算法对加权之后得到的单目标优化问题进行求解。为提高算法性能,还将针对机组组合问题对蚁群算法进行改进,并通过算例仿真来验证本算法的有效性。

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2004CB217905)

1 数学模型

1.1 目标函数

考虑经济性的目标函数:

$$\min C = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [U_{it} C_{it}(P_{it}) + C_{STi,t} + C_{SDi,t}] \tag{1}$$

考虑环保性的目标函数:

$$\min E = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N U_{it} E_{it}(P_{it}) \tag{2}$$

式(1)、式(2)中, T 为计划周期内的总时段数; N 为机组台数; U_{it} 为机组 i 在时段 t 的状态, 0表示关机, 1表示开机; P_{it} 为机组 i 在时段 t 的出力; $C_{it}(P_{it})$ 和 $E_{it}(P_{it})$ 分别为机组 i 在时段 t 的运行费用和对应的排污量, $C_{STi,t}$ 和 $C_{SDi,t}$ 分别为机组 i 在时段 t 的启机费用和停机费用, 它们的表达式如下:

$$C_{it}(P_{it}) = a_i P_{it}^2 + b_i P_{it} + c_i \tag{3}$$

$$C_{STi,t} = \begin{cases} U_{it}(1-U_{i,t-1})C_{STi, \text{cold}}, & T_{i,t-1}^{\text{off}} \geq T_{STi, \text{cold}} \\ U_{it}(1-U_{i,t-1})C_{STi, \text{hot}}, & T_{i,t-1}^{\text{off}} < T_{STi, \text{cold}} \end{cases} \tag{4}$$

$$C_{SDi,t} = U_{i,t-1}(1-U_{it})C_{SDi} \tag{5}$$

$$E_{it}(P_{it}) = \alpha_i P_{it}^2 + \beta_i P_{it} + \gamma_i \tag{6}$$

其中, 运行费用和排污量均用机组出力的二次函数模拟, a_i 、 b_i 、 c_i 为机组 i 的运行费用参数, α_i 、 β_i 、 γ_i 为机组 i 的排污系数; $C_{STi, \text{cold}}$ 和 $C_{STi, \text{hot}}$ 分别为机组 i 的冷启动费用和热启动费用; $T_{i,t-1}^{\text{off}}$ 为机组 i 在时段 $t-1$ 的已停机时间; $T_{STi, \text{cold}}$ 为机组 i 的冷启动时间; C_{SDi} 为机组 i 的固定停机费用。

现引入发电排污的价格惩罚因子 λ (\$/lb), 可得到综合考虑经济性和环保性的目标函数:

$$\min F = C + \lambda E \tag{7}$$

即:

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [U_{it} F_{it}(P_{it}) + C_{STi,t} + C_{SDi,t}] \tag{8}$$

这里,

$$F_{it}(P_{it}) = \mu_i P_{it}^2 + \nu_i P_{it} + \omega_i \tag{9}$$

其中,

$$\begin{cases} \mu_i = a_i + \lambda \alpha_i \\ \nu_i = b_i + \lambda \beta_i \\ \omega_i = c_i + \lambda \gamma_i \end{cases} \tag{10}$$

1.2 约束条件

1) 负荷平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_{it} = P_{Dt} \tag{11}$$

其中, P_{Dt} 为第 t 个时段的负荷需求。这里, 假定有功网损固定, 且已计入负荷。

2) 机组出力上下限约束

$$U_{it} P_{i, \min} \leq P_{it} \leq U_{it} P_{i, \max} \tag{12}$$

其中, $P_{i, \min}$ 和 $P_{i, \max}$ 分别为机组 i 的最小出力和最大出力。

3) 旋转备用约束

$$\sum_{i=1}^N U_{it} P_{i, \max} \geq P_{Dt} + P_{Rt} \tag{13}$$

其中, P_{Rt} 为第 t 个时段的旋转备用容量。

4) 机组运行爬坡约束

$$\begin{cases} U_{it} P_{it} - U_{i,t-1} \leq R_{Ui}, & U_{it} = 1, U_{i,t-1} = 0 \\ U_{i,t-1} P_{i,t-1} - U_{it} P_{it} \leq R_{Di}, & U_{it} = 0, U_{i,t-1} = 1 \end{cases} \tag{14}$$

其中, R_{Ui} 、 R_{Di} 分别为机组 i 在一个运行时段的最大升、降出力值。

5) 机组启停爬坡约束

$$\begin{cases} U_{it} P_{it} \leq (1 - U_{i,t-1}) R_{STi}, & U_{it} = 1, U_{i,t-1} = 0 \\ U_{it} P_{it} \leq (1 - U_{i,t-1}) R_{SDi}, & U_{it} = 0, U_{i,t-1} = 1 \end{cases} \tag{15}$$

其中, R_{STi} 、 R_{SDi} 分别为机组 i 在启、停时段的最大升、降出力值。

6) 机组最小开、停机时间约束

$$\begin{cases} (T_{i,t-1}^{\text{on}} - T_{i, \min}^{\text{on}})(U_{i,t-1} - U_{it}) \geq 0 \\ (T_{i,t-1}^{\text{off}} - T_{i, \min}^{\text{off}})(U_{it} - U_{i,t-1}) \geq 0 \end{cases} \tag{16}$$

其中, $T_{i, \min}^{\text{on}}$ 和 $T_{i, \min}^{\text{off}}$ 分别为机组 i 的最小开机时间和最小停机时间; $T_{i,t-1}^{\text{on}}$ 和 $T_{i,t-1}^{\text{off}}$ 分别为机组 i 在时段 $t-1$ 的已开机时间和已停机时间, 它们的递推公式如下:

$$T_{it}^{\text{on}} = (T_{it}^{\text{on}} + 1)U_{it} \tag{17}$$

$$T_{it}^{\text{off}} = (T_{i,t-1}^{\text{off}} + 1)(1 - U_{it}) \tag{18}$$

2 算法介绍

机组组合问题可以转化为一个二层规划问题, 这里采用蚁群算法优化上层机组的启停状态, 同时用二次规划处理下层负荷的优化分配。

这里采用二进制的编码方法^[18], 即用 0 和 1 表示机组的启停状态, 对 N 台机组、 T 个时段的总共 $2 \times N \times T$ 个状态进行编码, 然后用 m 只蚂蚁挨个依次对编码后的二元状态网络进行遍历, 其过程可用图 1 表示。该过程等同于蚁群每前进一步就选择一个二进制数字并以此来生成一个二进制串的过程。这样,

• 21 •

表 1 机组参数

i	1	2	3	4	5	6
$P_{i\max}/\text{MW}$	200	80	50	35	30	40
$P_{i\min}/\text{MW}$	50	20	15	10	10	12
R_{Ui}/MW	50	20	13	9	8	10
R_{Di}/MW	50	20	13	9	8	10
R_{Si}/MW	105	45	30	20	20	25
R_{Sdi}/MW	100	40	25	18	15	20
$a_i \times 10^3$	3.75	17.5	62.5	8.34	25.0	25.0
b_i	2.00	1.70	1.00	3.25	3.00	3.00
c_i	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
α_i	0.012 6	0.020 0	0.027 0	0.029 1	0.029 0	0.027 1
$\beta_i \times 10^3$	-900.0	-100.0	-10.00	-5.000	-4.000	-5.500
γ_i	22 983	25 313	25 505	24 900	24 700	25 300
$C_{STi\text{ cool}}/\$$	176	187	113	267	180	113
$C_{STi\text{ hot}}/\$$	70	74	50	110	72	40
$C_{Sdi}/\$$	50	60	30	85	52	30
$T_{STi\text{ cool}}/\text{Hr}$	2	1	1	1	1	1
$T_{i\min}^{\text{on}}/\text{Hr}$	1	2	1	1	2	1
$T_{i\min}^{\text{off}}/\text{Hr}$	1	2	1	2	1	1

表 2 时段负荷需求

t	P_{Dt}/MW	t	P_{Dt}/MW	t	P_{Dt}/MW
1	166.0	9	192.0	17	246.0
2	196.0	10	161.0	18	241.0
3	229.0	11	147.0	19	236.0
4	267.0	12	160.0	20	225.0
5	283.4	13	170.0	21	204.0
6	272.0	14	185.0	22	182.0
7	246.0	15	208.0	23	161.0
8	213.0	16	232.0	24	131.0

表 3 机组初始开停机状态

机组编号	1	2	3	4	5	6
已开机时间 /Hr	0	0	2	3	0	2
已停机时间 /Hr	1	3	0	0	2	0

元,总排放为 2 443 kg。可以看出,随着惩罚系数的增加,也即对发电排污惩罚力度的加大,其发电排污量按递减规律变化;相反地,发电费用则会不断增加,这是由于经济性目标和环保性目标之间的相互竞争造成的。在实际方案的制定中,可根据社会认可的平均治污成本来确定价格惩罚系数的取值,从而求得确定目标下的机组优化出力,以期达到包括环保效益在内的社会利益的最大化;也可以根据对费用和排放的具体要求采用不同的惩罚系数来进行折衷选择。在没有得到治污成本标杆值或决策者偏好信息的情况下,不妨取 $\lambda=0.25$,这时优化得到的总费用为 89 733 元,总排放为 2 776 kg 对应的机组出力情况如表 5 所示,结合单独考虑发电费用的表 6 和单独考

虑环境排放的表 7 可以看出:在负荷较低的时段,开启的机组数都相对较少,能够达到减少机组运行的基本费用(即合并后的费用函数的常数项 ω_i)的目的。随着负荷的增加,机组的出力也随之增加,直到某一时刻,仅靠提升机组出力来满足负荷平衡会带来较大的费用增量时,一些已关停的机组会逐渐启动并投入运行,而当负荷降低到一定程度时,这些机组又会再次退出运行以降低基本费用。比较而言,由于第 5 台机组的煤耗特性、排污特性和启停机性能均较差,所以不论是在以上哪种方式下,该机组的优化结果都是全停。另外,由于第 4 台机的启停机费用明显高于其它机组,所以在必须要考虑启停机费用的表 5 和表 6 中,该机组没有任何启停操作,一直保持着初始的开机状态,从而避免了不必要的开停机损耗。就 3 种情况下的优化结果而言,按照单独考虑机组能耗的方式,发电费用固然最低,但此时的污染物排量却是最高;当单独采用环境排放作为优化的目标函数时,虽然满足了环保约束,但其经济性却大大降低;而显然,同时考虑经济性和环保性的机组组合优化的决策结果,达到了创造最大社会利益的目的。

表 4 指定惩罚系数下发电费用与排污量的优化结果比较

价格惩罚因子 λ	发电费用 (¥)	污染排放 (kg)
0	88 536	2 954
0.25	89 733	2 776
0.5	91 334	2 723
1	91 833	2 635
2	92 195	2 517
4	93 132	2 489
+inf	101 277	2 443

为了验证信息素初始化方法对算法性能的影响,这里对机组开、停机节点上的信息素初始值比例 n 选取不同的取值,分别运行算法 10 次。为便于比较,又不失一般性,不妨都取 $\lambda=1$ 的情况。这样, n 在不同取值下进行 100 次迭代后得到的目标函数的最优值和平均值便可列表统计,具体统计结果见表 8。从表中可以看出,当参数 n 取值在 3 附近时,优化效果最好,其多次计算的平均结果以及多次计算中的最优结果都要优于其余取值。这是因为该参数主要影响算法初始解的分布,而且还会进一步影响到最初多次迭代的解的分布。若该值过高,会导致开机的机组和时段增多,这显然会导致不必要的煤耗费用和污染物排放;相反,若该值过低,则生成可行解的概率将降低,算法优化的效率便随之下降。因此,选取适当的信息

素初始化方案可以有效提高算法的优化性能。

表 5 λ=0.25时的机组优化出力

时段	机组出力 (MW)					
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6
1	96.82	31.91	15.26	10.00	0	12.00
2	118.16	38.46	17.39	10.00	0	12.00
3	138.71	44.76	19.43	14.10	0	12.00
4	157.65	50.57	21.32	22.47	0	14.98
5	165.59	53.00	22.11	25.98	0	16.70
6	160.07	51.31	21.56	23.54	0	15.51
7	147.49	47.45	20.31	17.98	0	12.77
8	130.05	42.10	18.57	10.28	0	12.00
9	115.31	37.58	17.10	10.00	0	12.00
10	101.80	33.44	15.76	10.00	0	0
11	91.67	30.33	15.00	10.00	0	0
12	101.09	33.22	15.69	10.00	0	0
13	108.20	35.40	16.39	10.00	0	0
14	118.87	38.67	17.46	10.00	0	0
15	133.84	43.27	18.95	11.95	0	0
16	146.82	47.25	20.24	17.69	0	0
17	147.49	47.45	20.31	17.98	0	12.77
18	145.07	46.71	20.07	16.91	0	12.25
19	148.99	47.91	20.46	18.64	0	0
20	143.03	46.09	19.87	16.01	0	0
21	131.67	42.60	18.73	10.99	0	0
22	116.73	38.02	17.25	10.00	0	0
23	101.80	33.44	15.76	10.00	0	0
24	70.24	23.76	15.00	10.00	0	12.00

4 结 论

前面运用一种基于二进制编码的改进蚁群算法求解电力系统的机组优化组合问题,既兼顾了发电侧的负荷经济调度、环保要求,又综合考虑了机组的启停损耗、运行爬坡率和启停爬坡率的影响。算法采用了一种带有偏好的信息素初始化方法,从而既增加了获取可行解的概率,又减少了不必要的煤耗费用和污染物排放。在上层的机组组合部分,通过一动态更新的禁忌表来限制机组的开停机时间,同时用罚函数法对负荷平衡约束和旋转备用约束进行预处理,能有效引导算法获得较好的解和优化自身效率。仿真算例表明,该方法得到的结果是与罚因子的大小相适应的,能够满足实际系统对经济性和环保性的具体要求,是解决机组组合问题的有效方案。在此基础上,今后将进一步研究减少不可行解的产生及算法的停滞次数;计入有功网损和电网安全约束的机组组合方案;水电、风电等清洁能源的引入对调度的影响等。

表 6 单独考虑发电费用的机组优化出力

时段	机组出力 (MW)					
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6
1	99.18	29.82	15.00	10.00	0	12.00
2	123.54	35.04	15.41	10.00	0	12.00
3	149.44	40.59	16.97	10.00	0	12.00
4	179.26	46.98	18.76	10.00	0	12.00
5	191.29	49.56	19.48	11.07	0	12.00
6	183.18	47.83	18.99	10.00	0	12.00
7	162.78	43.45	17.77	10.00	0	12.00
8	146.30	39.92	16.78	10.00	0	0
9	129.82	36.39	15.79	10.00	0	0
10	104.94	31.06	15.00	10.00	0	0
11	93.41	28.59	15.00	10.00	0	0
12	104.12	30.88	15.00	10.00	0	0
13	112.35	32.65	15.00	10.00	0	0
14	124.33	35.21	15.46	10.00	0	0
15	132.96	37.06	15.98	10.00	0	12.00
16	151.79	41.10	17.11	10.00	0	12.00
17	172.20	45.47	18.33	10.00	0	0
18	168.27	44.63	18.10	10.00	0	0
19	164.35	43.79	17.86	10.00	0	0
20	155.72	41.94	17.34	10.00	0	0
21	139.24	38.41	16.35	10.00	0	0
22	121.97	34.71	15.32	10.00	0	0
23	104.94	31.06	15.00	10.00	0	0
24	80.24	25.76	15.00	10.00	0	0

表 7 单独考虑环境排放的机组优化出力

时段	机组出力 (MW)					
	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6
1	97.61	41.50	0	26.89	0	0
2	97.98	41.73	29.24	27.05	0	0
3	101.14	43.72	30.72	28.42	0	25.00
4	112.21	50.69	35.88	33.21	0	35.00
5	117.65	54.12	38.42	35.00	0	38.20
6	113.66	51.61	36.56	33.84	0	36.34
7	106.18	46.89	33.07	27.00	0	32.86
8	96.81	40.99	28.70	18.00	0	28.51
9	97.14	41.20	25.00	0	0	28.66
10	98.77	42.23	0	0	0	20.00
11	102.45	44.55	0	0	0	0
12	93.71	39.04	27.25	0	0	0
13	98.48	42.04	29.48	0	0	0
14	105.64	46.55	32.81	0	0	0
15	104.68	45.95	32.37	0	0	25.00
16	103.44	45.17	31.79	20.00	0	31.59
17	105.40	46.40	32.70	29.00	0	32.50
18	103.31	45.08	31.73	29.35	0	31.53
19	101.64	44.03	30.95	28.63	0	30.75
20	99.64	42.77	25.00	27.76	0	29.82
21	102.45	44.55	0	27.00	0	30.00
22	100.61	43.39	0	18.00	0	20.00
23	95.71	40.29	25.00	0	0	0
24	92.64	38.36	0	0	0	0

(下转第 84 页)

器。在理想情况下,当牵引变电所两臂负荷的电流大小相等,两臂(端口)电压等量垂直时,牵引负荷通过牵引变电所注入系统的负序电流为零。

参考文献

[1] 李群湛. 电气化铁道并联综合补偿及其应用 [M]. 北京:中国铁道出版社. 1993.

[2] 林海雪. 电压电流频率和电能质量国家标准应用手册 [S]. 北京:中国电力出版社. 2001.

[3] 刘光晔,周有庆,姚建刚. 新型平衡变压器的平衡条件及等值电路研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4):

84—88.

[4] 张丽艳,李群湛,余丹. 阻抗匹配平衡牵引变压器负序分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(6): 80—83.

[5] 简克良. 电力系统分析 [M]. 成都:西南交通大学出版社. 1992.

作者简介:

黄 军 (1983—),男,四川内江人,硕士研究生,研究方向为供电系统仿真与优化。

(收稿日期: 2008—12—15)

(上接第 23 页)

表 8 不同信息素初始化方案下的算法性能比较

n	1	2	3	4	5	8
最优值 /\$	19 115 19 002 19 036 19 100 19 001 19 337					
平均值 /\$	19 452 19 376 19 324 19 374 19 382 19 446					

参考文献

[1] Zio E, Barakli P, Pedroni N. Optimal power system generation scheduling by multi-objective genetic algorithms with preferences [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(2): 432—444.

[2] 王欣,秦斌,阳春华,等. 基于混沌遗传混合优化算法的短期负荷环境和经济调度 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 128—133.

[3] Senjyu T, Shimabukuro K, Uezato K, et al. A fast technique for unit commitment problem by extended priority list [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 882—888.

[4] Snyder W L, Powell H D, Rayburn J C. Dynamic programming approach to unit commitment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(2): 339—348.

[5] Hobbs W J, Hemon G, Wamer S, et al. An enhanced dynamic programming approach for unit commitment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(3): 1201—1205.

[6] Ongsakul W, Petcharak N. Transmission and ramp constrained unit commitment using enhanced adaptive Lagrangian relaxation [C]. Proceedings of IEEE Power Tech Russia, 2005: 1—8.

[7] 杨朋朋,韩学山. 基于改进拉格朗日乘子修正方法的逆序排序机组组合 [J]. 电网技术, 2006, 30(5): 40—45.

[8] 张利,赵建国,韩学山. 考虑网络安全约束的机组组合新算法 [J]. 电网技术, 2006, 30(21): 50—55.

[9] Damousis I G, Bakirtzis A G, Dokopoulos P S. A solution to the unit-commitment problem using integer-coded genetic

algorithm [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1165—1172.

[10] 杨俊杰,周建中,喻菁,等. 一种求解大规模机组组合问题的混合智能遗传算法 [J]. 电网技术, 2004, 28(19): 47—50.

[11] 孙力勇,张焰,蒋传文. 基于矩阵实数编码遗传算法求解大规模机组组合问题 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 82—87.

[12] Ting T O, Rao M V C, Loo C K. A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle swarm optimization [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1): 411—418.

[13] 胡家声,郭创新,曹一家. 一种适合于电力系统机组组合问题的混合粒子群优化算法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 24—28.

[14] 张力勇,张焰,蒋传文. 求解机组组合问题的嵌入贪婪搜索机制的改进粒子群优化算法 [J]. 电网技术, 2006, 30(13): 44—48.

[15] 李鹏飞,都洪基,郭亮,等. 基于免疫算法的火电厂机组优化组合 [J]. 继电器, 2007, 35(S1): 365—368.

[16] Simon S P, Padhy N P, Anand R S. An ant colony system approach for unit commitment problem [J]. Electrical Power and Energy System, 2006(28): 315—323.

[17] 王琨,刘青松. 蚁群算法在电力系统机组优化组合中的应用研究 [J]. 电力学报, 2005, 20(2): 112—115.

[18] 熊伟清,魏平. 二进制蚁群进化算法 [J]. 自动化学报, 2007, 33(3): 259—264.

[19] 陈烨. 用于连续函数优化的蚁群算法 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(6): 117—120.

作者简介:

蒲 实 (1982—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统优化运行。

(收稿日期: 2009—01—12)

VDCOL 参数整定的改进对多馈入直流输电系统暂态稳定性的影响研究

杨大春, 刘天琪, 李兴源, 阮仁俊

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:通过对多馈入直流输电模型的仿真,发现 VDCOL 的参数对多馈入直流输电的暂态稳定性有相当大的影响。通过改变 VDCOL 的参数值,可以使多馈入直流输电系统有不同的暂态特性。通过修正 VDCOL 的参数值,使原本暂态失稳的多馈入直流输电系统快速地恢复到了稳定状态。因此,研究各直流 VDCOL 控制单元的特性对于改进 MDC 的暂态稳定性具有重要意义。

关键词:暂态稳定;多馈入直流输电系统;直流输电系统控制;VDCOL;协调恢复

Abstract: By the multi-infeed HVDC transmission simulation model it is found that the parameters of VDCOL have a significant impact on the transient stability of multi-infeed HVDC transmission. By changing the parameters of VDCOL, multi-infeed HVDC transmission system can have different transient characteristics. By correcting the parameters of VDCOL, the transient instability of the original multi-infeed HVDC transmission system quickly returns to a steady state. Therefore, the study of the characteristics of the control unit (VDCOL) is of great significance to MDC.

Key words: transient stability; multi-infeed HVDC transmission system; control of HVDC transmission system; VDCOL; coordinated recovery

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0024-04

当直流电压或直流换流站附近交流母线电压大幅度降低时,若仍将直流功率(或电流)控制在额定值,则直流系统对其所处交流系统产生的大量无功需求可能会引发交流换相电压持续波动,甚至导致直流系统无法正常工作。为此,需在直流控制系统中引入依赖于电压的电流指令限制单元(VDCOL)^[1],以便对低电压时的直流电流指令加以限制。

在含有多馈入直流输电系统(MDC)^[2]的互联电网中,若各逆变站间的电气距离较近,则交直流系统之间、直流与直流系统之间的相互作用将很强。当某些交流故障发生时,可能会导致多个换流站交流母线电压大幅度降低,严重时有可能导致它们同时发生换相失败,直流功率难以顺利恢复。在这种情形下,VDCOL 控制合理与否将对各直流子系统的恢复乃至整个电网的稳定性产生巨大影响^[2]。另外,与对直流控制系统进行改造相比,对 VDCOL 进行改进通常只需付出很小代价便能对直流系统的恢复性能产生较好的效果。因此,对于 MDC 研究各直流 VDCOL 控制单元的特性具有重要意义。

文献[3]针对上述问题,提出了一种适用于多馈入直流输电系统协调恢复的 VDCOL 控制策略,其特

点是在各直流控制系统中综合应用不同类型的 VDCOL 控制,且对 VDCOL 的特性曲线进行了改进。并通过仿真发现,对于多馈入直流输电系统协调恢复的 VDCOL 控制策略,关键在于协调各条直流之间 VDCOL 的参数。

1 VDCOL

VDCOL(依赖于电压的电流指令限制)控制主要有 2 种基本类型,即依赖直流电压的 VDCOL(DC-VDCOL)和依赖交流电压的 VDCOL(AC-VDCOL)。目前,大多数直流工程均采用 DC-VDCOL 控制,该类型 VDCOL 可将直流电压的变化反映于直流电流指令,有效地减少直流故障后可能发生的换相失败。AC-VDCOL 是一种近年来才应用于实际直流工程的以提高交流系统性能的直流系统控制单元,它依赖实际检测到的交流换相电压来限制直流电流指令,能有效改善交流故障发生后换流站附近交流电压和直流功率的恢复。美国太平洋直流联络线便因采用了 AC-VDCOL 而有效地改善了美国西部系统稳定性^[4]。

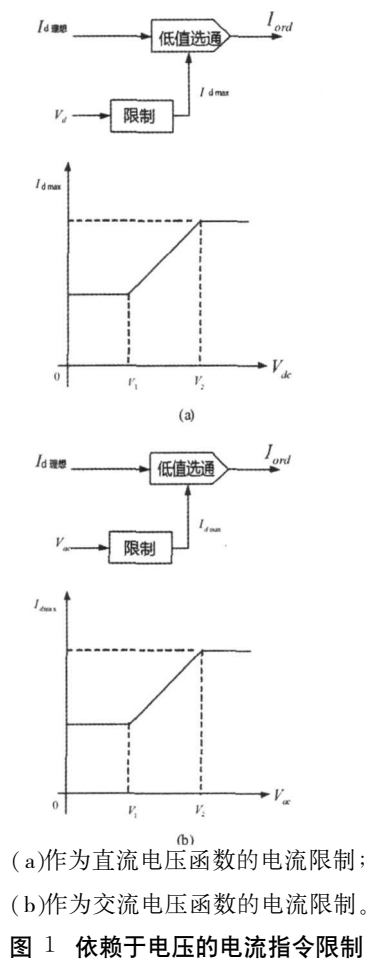
在低电压条件下,要想保持额定直流电流和额定

基金项目: 973 项目(2004CB217909);自然科学基金重大项目(50595412)

功率是不可期望或不可能的,其原因如下^[5]

(1)当一台换流器的电压降超过 30%时,和它相隔很远的换流器的无功需求将增加,这对交流系统可能有不利的影响。远端换流器的 α 或 β 必须更高以控制电流,因而引起无功功率的增加。系统电压水平的降低也会使滤波器和电容器所提供的无功功率明显减少,而通常换流器吸收的无功功率大部分由它们提供。

(2)当电压降低时,也会面临换相失败和电压不稳定的风险。这些和低电压条件下的运行状况有关的问题可通过引入“依赖与电压的电流指令限制”(VDCOL)来防止。当电压降低到预定值以下时,这个限制降低了最大容许直流电流。VDCOL 特性曲线可能是交流换相电压或直流电压的函数。图 1 示出了这两种类型的 VDCOL。



2 典型多馈入直流输电系统模型

由于交直流间存在复杂的相互作用,除了考虑交流电压及其相角和直流电流等因数外,还需考虑各直

流系统之间的相互作用对换相失败的影响;除所考虑的逆变侧自身参数影响外,还与其他逆变侧的影响有关。为了体现交直流之间的相互作用和多馈入直流输电的特点,现采用这样一个具有 2 条直流输电线路的交、直流输电系统为例进行研究,如图 2 所示^[6]。

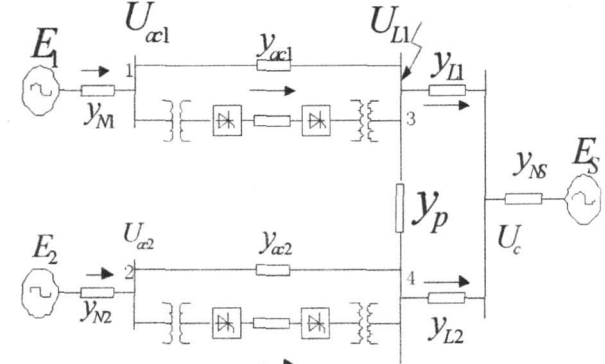


图 2 典型多馈入直流输电系统模型

在图 2 中,系统 E_1 通过一条交流线路和直流线路 1 给右边交流系统输送功率;系统 E_2 通过另一条交流线路和直流线路 2 给右边交流系统输送功率。2 条直流输电线路由 HVDC 标准模型组成^[7],逆变侧接于相邻的同侧,相邻交流换流母线用耦合阻抗连接,直流系统整流侧相互独立。整流侧采用定电流控制,逆变侧采用定熄弧角控制。

3 模型的故障仿真和分析

选择 Matlab/simulink 对图 2 所示模型进行建模和仿真。其中两条直流线路都选用 PSCAD/emtdc 中 CIGRE HVDC 的控制系统^[7]。在 Matlab 中建立的模型如图 3 所示。

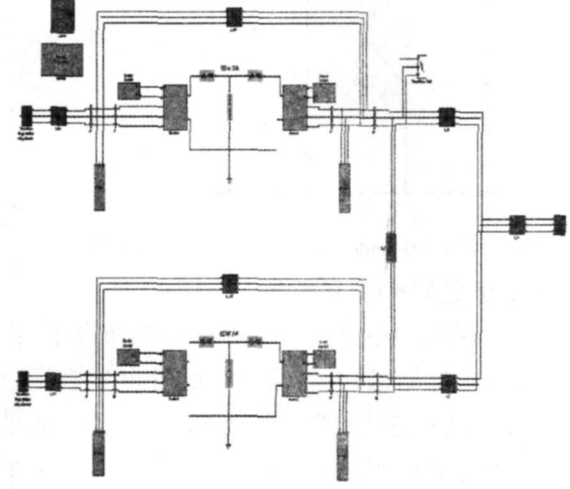


图 3 多馈入直流输电模型

假设直流线路 1 换流站逆变侧 (节点 3 处) 在 1 s 的时候发生 100 ms 三相瞬时短路故障, 以图 2 模型为例, 2 条直流输电系统在初始运行点处的运行参数如下。

该网络自身的导纳参数为: $y_{ac1}=0.0251\Omega^{-1}$, $y_{ac2}=0.01255\Omega^{-1}$, $y_{l1}=0.017575\Omega^{-1}$, $y_{l2}=0.02636\Omega^{-1}$, $y_p=0.0455\Omega^{-1}$ 。

2 条直流输电系统整流侧交流系统的等值导纳参数为: $y_{N1}=3.1152\Omega^{-1}$, $y_{N2}=3.1152\Omega^{-1}$ 。

2 条直流输电系统逆变侧交流系统的等值导纳参数为: $y_{NS}=2.94118\Omega^{-1}$ 。

2 条直流输电系统整流侧对应的交流系统的暂态等值电势参数为: $E_1=E_2=345\text{ kV}$ 。

2 条直流输电系统逆变侧对应的交流系统的暂态等值电势参数为: $E_s=340\text{ kV}$ 。

3.1 VDCOL 采用 PSCAD /emtdc 中 cigreHVDC 参数

PSCAD /emtdc 中 cigreHVDC 的 VDCOL 参数由图 4 可知。当直流电压下降到 0.9 pu 时, VDCOL 开始启动。随着直流电压 V_{dc} 的逐渐降低, VDCOL 控制的直流电流指令也逐渐降低。当 V_{dc} 降低到 0.4 pu 时, VDCOL 控制的直流电流指令输出最低值 $I_{d\max}=0.55\text{ pu}$ 。

图 5、图 6 为基于图 4 所示的 VDCOL 的多馈入直流输电系统仿真结果。由图 5 和图 6 可知, 当系统在 1 s 的时候发生 100 ms 三相瞬时短路故障后, 系统线路 1、2 都无法恢复正常功率输出。

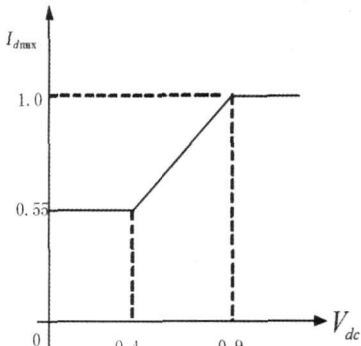
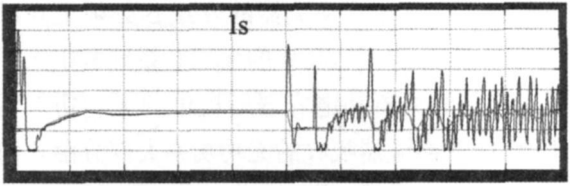


图 4 PSCAD /emtdc 中 cigreHVDC 的 VDCOL

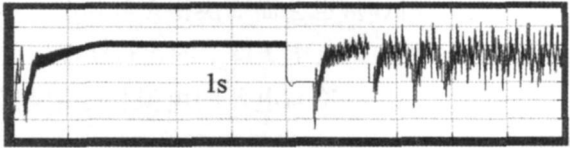
3.2 重新整定 VDCOL 的参数

文献 [8] 指出: 在交直流并联运行的情况下, 当交流系统发生扰动, 如果直流系统保持恒定直流功率, 将可能导致暂态功角失稳和暂态电压失稳。如果交直流传输能量相当, 则情况更为严重。通过文献 [7] 给出的结论, 可以认为上述仿真算例中出现的结果 (图 5、图 6) 是由于三相瞬时短路故障发生后, VD-

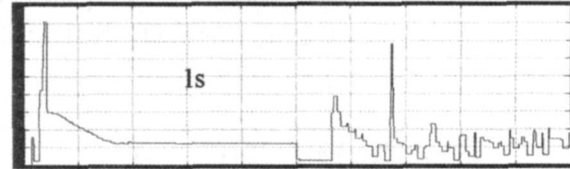
COL 控制直流电流的指令下降不及时导致的。所以通过重新整定 VDCOL 的参数, 再对上述多馈入直流输电系统进行仿真分析。



(a) 直流线路 1 逆变侧直流电流的仿真波形

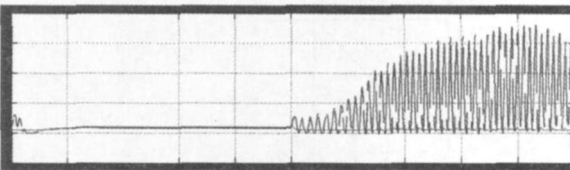


(b) 直流线路 1 逆变侧直流电压的仿真波形

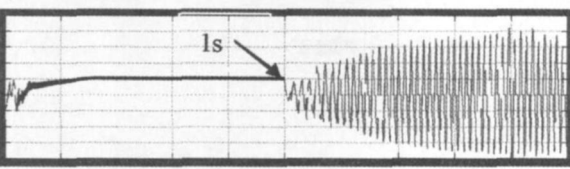


(c) 直流线路 1 逆变侧关断角 (Gamma) 的仿真波形

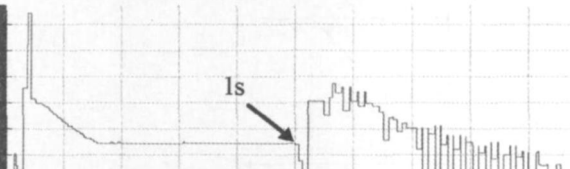
图 5 直流线路 1 的仿真波形



(a) 直流线路 2 逆变侧直流电流的仿真波形



(b) 直流线路 2 逆变侧直流电压的仿真波形



(c) 直流线路 2 逆变侧关断角 (Gamma) 的仿真波形

图 6 直流线路 2 的仿真波形

重新整定后的 VDCOL 如图 7 所示。为了使直流电流指令下降更为及时, 令降低到 0.6 pu 时, VDCOL 控制的直流电流指令输出最低值 $I_{d\max}=0.55\text{ pu}$ 。

图 8、图 9 为重新整定 VDCOL 后的系统仿真波形图。由图可知, 当系统在 1 s 的时候发生 100 ms 三相瞬时短路故障后 (即系统 1.1 s 时切除故障), 系统

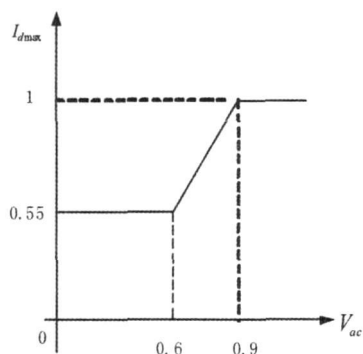
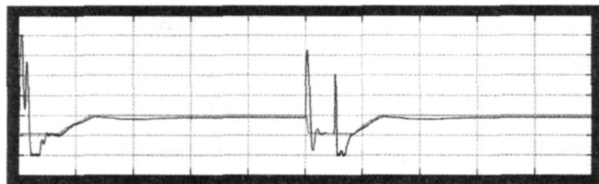
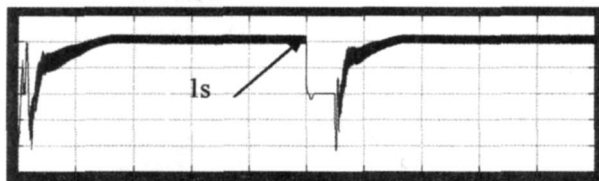


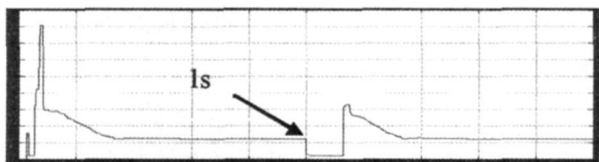
图 7 重新整定的 VDCOL



(a) 直流线路 1 逆变侧直流电流的仿真波形

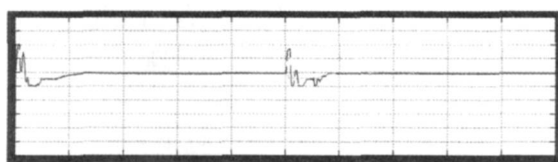


(b) 直流线路 1 逆变侧直流电压的仿真波形

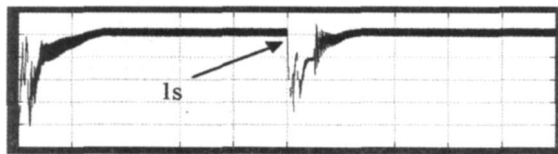


(c) 直流线路 1 逆变侧关断角 (Gamma) 的仿真波形

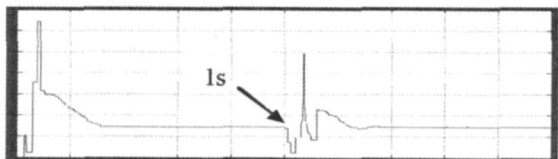
图 8 直流线路 1 的仿真波形



(a) 直流线路 2 逆变侧直流电流的仿真波形



(b) 直流线路 2 逆变侧直流电压的仿真波形



(c) 直流线路 2 逆变侧关断角 (Gamma) 的仿真波形

图 9 直流线路 2 的仿真波形

直流线路 1、2 在 1.2 s 时 (100 ms 的时间内) 基本恢复正常功率输出。

4 总 结

通过对上述多馈入直流输电模型的仿真,发现 VDCOL 的参数对多馈入直流输电的暂态稳定性有相当大的影响。通过改变 VDCOL 的参数值,可以使多馈入直流输电系统有不同的暂态特性。

文中所做的工作是通过手动调节 VDCOL 仿真分析其对多馈入直流输电系统的影响,没有涉及到 VDCOL 的在线调节控制。对于 VDCOL 的在线调节应该是以后研究的重点。

参考文献

- [1] KUNDUR P K. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill 1994.
- [2] SZECHTMAN M, PILOTTO LA S, PING WW, et al. The Behavior of Several HVDC Links Terminating in the Same Load Area[C]. CIGRE. Paris 1992.
- [3] 王珂, 杨卫东, 方勇杰. 有利于多馈入直流输电系统协调恢复的 VDCOL 控制策略研究 [J]. 江苏电机工程 [J]. 2007, 26(1): 1-4.
- [4] BUNCH R, KOSTEREV D. Design and Implementation of AC Voltage Dependent Current Order Limiter at Pacific HVDC Intertie [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2000, 15(1): 697-703.
- [5] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京出版社, 1998.
- [6] 何朝荣, 李兴源. 影响多馈入高压直流换相失败的耦合导纳研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 51-57.
- [7] 杨汾艳, 徐政. 直流输电系统典型暂态相应特性分析 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 45-52.
- [8] A. Hammad. "Stability and control of HVDC and AC transmissions in parallel" presented at the 1998 Winter IEEE PES Meeting Tampa FL, paper PE-517-PWRD-0-1-1998.

作者简介:

杨大春 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电的建模和仿真, 电力系统稳定与控制。

刘天琪 (1962-), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, IEEE 会员, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化。

李兴源 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电等研究。

阮仁俊 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 电力系统稳定与控制, 调度自动化。

(收稿日期: 2008-12-25)

复杂网络理论在电力系统中的运用与研究

肖 军, 刘天琪

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 自从小世界效应和无标度特性发现以来, 复杂网络的研究在过去几年得到了迅速发展, 其中复杂网络在电力系统中的运用也成为当前许多学者的研究焦点。文章对复杂网络理论与电力网络的共性进行了较为详细的叙述, 指出了复杂网络在电力系统中运用的结合点。介绍了与两者共性有关的复杂网络理论的特征参数。同时在电力系统大停电模型、临界自组织状态、电力系统线路脆弱性评估以及小世界模型四个方面详细综述了目前复杂网络在电力系统中的运用及进展。最后对复杂网络在电力系统研究中存在的问题和未来发展的趋势进行了总结和展望。

关键词: 复杂网络; 大停电模型; 临界自组织状态; 脆弱性; 小世界

Abstract: Since the small-world effect and scale-free properties have been found, the research of complex network has developed rapidly over the past few years and its use in the power system also becomes the research focus of many scholars. A detailed overview of the current complex network in power system and the progress of its application are discussed based on the blackout model of power system, the self-organized critical state, the vulnerability assessment of transmission lines, as well as the small-world model. Finally, the summarization and expectation of the existing problems of complex network in power system and the future development trends are given.

Key words: complex network; blackout model; self-organized critical state; vulnerability; small world

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0028-05

电网的大规模互联使电力系统成为了一个庞大的复杂网络系统。随着电力网络规模的逐渐扩大, 电力系统的局部故障可能迅速传播到大区域甚至整个电网。近年来, 国内外电力系统曾发生了多次连锁故障导致的大停电事故^[1,2], 这类事故造成了重大经济损失和社会影响, 引起人们对电网安全的高度关注, 促使人们理解和分析大停电和连锁故障传播机理。应用复杂系统理论的研究连锁故障的传播机理正越来越受到学术界的关注^[3~5]。因此, 需要系统从整个网络出发, 对电力系统的结构和连锁故障进行研究, 以保证电力系统的安全稳定运行。

自从 20 世纪 60 年代著名数学家 Erdos 和 Renyi 提出 ER 随机图模型后^[6], 复杂网络的研究一直受到科学和工程各个领域研究人员的广泛关注。复杂网络研究的内容主要包括: 网络的几何性质、网络的形成机制、网络演化的统计规律、网络上的模型性质以及网络的结构稳定性、网络的演化动力学机制等问题。从 20 世纪 70、80 年代开始, 复杂性问题的研究与非线性科学及其混沌动力学的复杂研究交错在一起, 在国际上形成了非线性科学与复杂性问题的研究热潮^[7]。而利用复杂网络理论来研究非线性复杂动

态网络的方法也已经渗透到众多学科之中。电力网是一个强非线性的大规模动态系统, 它可视为由电站、高压输电线等抽象而成的网络上的结点和连线, 通过不同连接方式组成的规模庞大的复杂网络。复杂网络理论为其提供了一个全新的视角和研究方法, 从复杂网络的角度来分析和研究电力网络, 有助于从整体上把握电力网络的复杂性和整个网络响应的动力学特性, 深入理解大停电模型和机理。

1 电力系统的复杂网络特性

1.1 电力网络的复杂性

电力系统是一个高维的强非线性复杂系统。“系统复杂性”是指“远离平衡态的巨大耗散系统中由于组成单元之间局部的非线性相互作用而自发地涌现出 (emerge) 的系统总体性质、结构与动力学行为”^[8]。“涌现”指的是由系统局部的相互作用所产生的系统总体的特征, 不同于子系统 (或局部组成单元) 的原有性质, 是复杂动力系统内部的基本特征与属性^[8,9]。

电力系统是一个典型的复杂系统, 其主要特征包括: (1) 电力系统具有大规模性和统计特性, 现在电

基金项目: 国家科技攻关计划 (JS20080113506594)

力系统的互联使电网成为了一个超大规模的网络,具有大量的节点和线路,其行为具有统计特性;(2)实际电网的线路连接具有稀疏性和复杂性。实际电网不是一个全局耦合结构的网络,它的连接数目通常为 $O(N)$ 。实际系统的连接结构的复杂性主要体现在网络的连接结构既非完全规则也非完全随机,但却具有内在的特征规律,即现在的研究表明大部分电网都具有的小世界特性;(3)电网节点的动力学行为具有复杂性,实际上每个节点都是发电机、电站及负荷点,故每个节点本身也是非线性系统(可以用离散的和连续微分方程描述),具有分岔和混沌等非线性动力学行为,故其节点具有动态行为复杂性;(4)电网具有时空复杂性,复杂电力网络在空间上体现出一个大规模的超大型网络,在时间上体现为一个高维的非线形复杂网络。

复杂电力网络时空演化中出现的复杂性,包括大停电连锁故障机理以及演化特征是迄今尚未解决的一类难题^[8]。然而传统的电力系统分析一直是建立在微分一代数方程理论的基础上,以时域仿真的形式对系统进行动态分析。时域仿真在深入分析电力系统连锁故障和大停电机理等系统动态行为方面却有明显的局限性,它基本不能揭示系统整体的动态行为特性。因此,运用复杂网络理论对电力系统的动态行为进行分析和研究可以很好地深入分析电力系统的连锁故障和大停电的机理。对大停电模型和连锁故障机理以及演化的研究主要需要分析电力系统大停电的本质,构造出合理的简化模型来分析连锁故障以及大停电的机理和全局性质。

1.2 电网的拓扑网络原则

要用复杂网络理论对电网进行分析,首先必须把电力网络化为拓扑网络模型。在电力系统中,通常采用如下的假设条件^[11]:(1)只考虑高压输电网(中国电网考虑 110 kV 以上,北美电网考虑 115 kV 以上),不考虑配电网和发电厂、变电站的主接线;(2)节点均为无差别节点,发电机、负荷及电站都作为节点,不考虑大地零点;(3)所有边均简化为无向无权边,不考虑输电线的各种特性参数和电压等级的不同;(4)合并同杆并架输电线,不计并联电容支路(消除自环和多重边),使模型成为简单图。这样,电网就成为一个具有 N 个节点和 K 条边的无权无向的稀疏连通图,包括 $n \times n$ 连接权矩阵 $\{E_{ij}\}$ 和 $n \times 1$ 权重矩阵 $\{W_i\}$ 。

1.3 电网与复杂网络共性的几个特征参数

(1) 特征路径长度 L : 在一个网络中节点 i 与节点 j 的最短距离 d_{ij} 被定义为连接这两个节点间的最短路径所包含的边数。对所有节点对的最短距离求平均值,即可得到该网络的特征路径长度 L 。

$$L = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}$$

(2) 聚类系数 C : 网络的聚类系数 C 是专门用来衡量网络节点集聚程度的一个重要参数。在网络中,每个节点的聚类系数可表示为

$$C_i = a_i / b_i$$

式中: a_i 为连接到顶点 i 的三角形的个数; b_i 为连接到顶点 i 的三元组的个数。整个网络的聚类系数定义为

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$$

(3) 节点度数 D : 节点的度数是指连接该节点的边数。

(4) 节点介数 BN : 节点的介数是指节点被网络中所有发电机节点与负荷节点之间最短路径经过的次数。

(5) 线路介数 BL : 线路的介数是指线路被网络中所有发电机节点与负荷节点之间最短路径经过的次数。

以上参数都能体现出电网与复杂网络的共性,研究清楚以上特征参数存在和变化的规律是电力系统复杂性研究的重要研究内容。研究电网存在的复杂性,以及特征参数的变化对大停电和连锁故障演化的影响,从而揭示电网的结构属性与连锁故障演化的关系^[12]。

2 复杂网络理论在电力系统的运用

2.1 连锁故障模型

通过对近年来国内外电网的事故统计数据进行分析可以发现,虽然事故发生的次数在下降,但其造成的影响却变得越来越严重。特别是某一元件开断引起的连锁故障常常造成电网大规模停电的严重后果,如 1996 年的美国西部电网大停电、2003 年的美加大停电、2003 年的英国伦敦大停电等^[13~16]。

学者提出了基于负荷转移的 CASCADE 模型^[17, 18],基于“近似”直流潮流和隐故障机理的隐故

障 (Hidden Failure) 模型^[19~22], 基于负荷切除和交流潮流的 Manchester 模型^[23~25]和基于直流最优潮流的 OPA 模型^[26~28]等各种模型来模拟电力系统连锁故障和大停电。其中, CASCADE 模型是一个抽象概率模型, 主要对连锁故障进行了一个理论化的解释; 隐故障模型基于近似直流潮流和隐故障机理, 可以有效模拟电力系统在发生故障后导致的系统连锁故障; Manchester 模型立足于电力系统交流模型, 利用切除负荷和解潮流方程来确定系统的运行方式, 从而模拟电力系统的连锁故障过程。

目前已有把无功、电压特性与连锁故障模型结合起来研究和考虑频率特性的连锁故障, 有基于直流、交流和最优潮流的 OPA 模型, 直流潮流只考虑有功对系统的影响, 交流和最优潮流的计算速度还需要改进。在连锁故障模型中如何考虑过电压、低电压以及励磁对设备的影响, 这些模型都只考虑了系统的静态稳定。

2.2 小世界模型

在对网络拓扑结构分析的过程中, Watts 等人于 1998 年提出了小世界 (Small-world) 网络模型^[29]。Watts 同时验证了美国西部电网是一个小世界网络^[30]。

小世界电网所特有的较小特征路径长度和较高聚类系数等特性, 对故障的传播起到推波助澜的作用。这是由于, 一般的聚类系数对应着故障传播的广度, 特征路径长度代表着故障传播的深度, 而特征路径越小, 故障在网络中传播的深度越大。小世界网络兼具大的深度和宽的广度, 所以传播的速度和影响范围大大高于相应的规则网络和随机网络。文献 [31] 提出了基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估综合算法, 重点解决了电网的拓扑分析和连锁故障模拟的问题, 在算法的实现和软件设计过程中, 充分考虑了电网拓扑模型的扩展性, 以及电网故障模式、脆弱性评估判据的可变通性等需求, 可适应算法的不断改进和完善。

目前已有学者把电网线路的权重特性和复杂网络理论联系起来, 即将线路阻抗作为线路的权重, 使网络成为了一个有权无向的网络, 这样更能体现出电网的小世界模型, 从而复杂网络的小世界的特性就能更好的运用在电力网络中。

2.3 线路的脆弱性评估

对电力系统的脆弱性分析一直建立在微分方程

理论的基础上, 即通过对系统中各元件建立详细数学模型, 以时域仿真的形式对系统进行动态分析。这种分析方法对故障模拟, 寻找系统薄弱环节起到了很好的作用。事实上, 电网本身的拓扑结构是电网所具有的内在、本质的特性, 一旦确定下来, 必然对电网的性能产生深刻的影响。文献 [32] 分析了北美电网拓扑结构所存在的脆弱性。文献 [33] 则对北美电网的连锁故障进行了建模和仿真, 表明北美电网存在着少部分的脆弱节点会导致大规模事故的发生。文献 [34] 从电网拓扑结构出发, 分析电网整体结构对连锁崩溃的影响, 指出介数和度数较高的联络节点在保证电网连通性的同时, 对故障的传播起着推波助澜的作用。

一旦能够辨识出电力系统的关键运行线路, 则着重注意关键线路的运行状态, 可以保证系统的安全稳定运行。目前主要通过网络拓扑结构, 通过计算线路的介数进行关键线路的辨识。文献 [35] 为快速评估线路故障对系统静态安全的影响, 基于复杂网络脆弱度理论, 构建了互补性脆弱度指标集和综合脆弱度指标, 进而提出一种输电线路脆弱度评估方法。该方法可从全局和局部、有功和无功两方面综合衡量输电线路的脆弱度。根据电力网络有功功率传输的特点构建了平均传输距离指标, 从全局的角度衡量输电线路故障对有功功率全网传输效率的影响; 其次, 提出了局部变化量指标, 从负荷节点和发电机节点的角度有效评估局部无功平衡受影响的程度。上述两类指标构成了互补性脆弱度指标集。对互补性指标集进行了归一化处理, 得到综合脆弱度指标。

目前, 学者主要从网络的拓扑结构提出线路的脆弱性指标, 而电力网络的特性不仅体现在网络的拓扑结构上, 而且电网的运行状态, 动态行为也是电力网络的主要特性。如何把实际电网的物理特性与复杂网络的特征结合, 以及如何有效的将网络拓扑和电网的运行行为状态两者联系起来作为线路脆弱性的评估是值得研究的内容。

2.4 临界自组织性

1987 年, 美国 Brookhaven 国家实验室的巴克等人提出了自组织临界性 (Self-Organized Criticality) 的概念^[36]来说明时空耗散动力系统的动力学行为。电力系统大停电是系统处于临界状态时, 在微小的扰动下触发连锁反应并导致灾变的过程现象。自组织临界性的概念可望成为用来揭示包括大停电现象在内的复杂电力系统整体行为特征的有效工具之一。

在自组织临界状态下,一个小事件会引发一个大事件乃至突变。自组织临界性概念的基本立场是,认为电力系统总是处于持续的非平衡状态,由于系统内部和外部诸多要素之间的相互作用,它们可以组织成为一种临界稳定的状态,即临界状态。

文献 [37] 将电力系统向临界状态演化的过程与沙堆模型的形成过程进行了类比:电力负荷的增长类似于沙堆模型中坠落的沙子,负荷增长到一定水平时会使电力系统进入临界状态,正如沙堆某处坡度过陡后沙粒发生滑坡、引起大小不等的雪崩一样,进入临界状态的电力系统在负荷继续增长的过程中一定会发生规模不等的停电事故。在物理学 (平衡统计力学) 中,临界点是系统行为或结构发生急剧变化的地方。对于电力系统而言,其临界点指大停电前的系统状态。文献 [38] 应用复杂系统理论,通过分析美国电网大停电事故的部分数据,深入探讨了电力系统大停电规模与频率之间的幂律关系以及大停电规模分布的分形分维特征,提出了大停电现象可以用自组织临界性的概念来加以解释的观点。结合 Hurst 指数,进一步说明了存在着对电力系统大停电进行预测的可能。文献 [39] 建立了基于交流潮流、考虑隐藏故障特性的连锁故障搜索算法,并利用该算法对华北电网进行了分析,得出了华北电网处于自组织临界状态的结论。分析了负载情况对系统发生连锁故障概率的影响,发现系统负载较均匀时发生连锁故障的概率将大大降低。

如果能够判断出系统运行正处于临界自组织状态,那么就可以采取措施加强该系统的安全稳定运行。然而目前没有具体的指标和系统的方法来判断电力系统的临界自组织状态,基于复杂网络的临界状态,是利用连锁故障模型判断系统停电规模和停电频率的关系,一旦其成幂律分布,则系统正处于临界自组织状态。但是这种方法需要大量的统计数据,仿真时间长,抽样次数多,只适合于离线判断系统的自组织临界状态。能否减少判断自组织临界状态的时间,快速而有效的判断出系统的临界自组织状态,并分析在这种状态下系统的运行轨迹,是目前研究的重点。

3 结论与展望

虽然复杂网络理论在过去几年的发展和进步确实富有成果和惊人的,在电力系统中的运用也被广泛

的研究,但在电网中的研究还处于起步阶段,在未来在该领域还有很多值得研究的。在这里提出几个需要进一步研究的方向。

(1) 复杂网络理论应该和实际的电力系统更加紧密的结合起来,电力系统中很多物理特征没有在复杂网络理论中明确,准确的反映出来。

(2) 尽管研究人员已经在许多实际电网中发现一些统计模式和规律,但没有建立系统性的方法识别网络结构,无法准确判断上述参数。

(3) 电网应该找到更好的模型描述更加复杂的系统和网络结构,然而目前却只有小世界模型被广泛接受和运用。

(4) 随着电力系统规模的扩大,更需要加快网络之间的数据和信息的交换,优化模型,尽量减少时滞。

参考文献

- [1] 印永华,郭剑波,赵建军,等. 美加“8·14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训 [J]. 电网技术, 2003, 27 (10): 8—12.
- [2] 甘德强,胡江溢,韩祯祥. 2003 年国际若干停电事故思考 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (3): 1—5.
- [3] Dobson I, Carreras B A, Lynch V E, et al. Complex systems analysis of series of blackouts, cascading failure, criticality, and self-organization [C]// 9th Bulk Power System Dynamics and Control—VI Cortina d'Ampezzo, Italy, 2004. 438—451.
- [4] Benjamin A, Carreras, David E, Newman, Ian Dobson, et al. Evidence for self-organized criticality in a time series of electric power system blackouts [J]. IEEE Trans Circuits and System, 2004, 51 (9): 1733—1740.
- [5] Dobson I, Carreras B A, Lynch V E, et al. An initial model for complex dynamics in electric power system blackouts [C]// Proceedings of 34th Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, Hawaii, January 2001, 710—718.
- [6] Penrose A, Rényi. On the evolution of random graphs [J]. Publ Math Inst Hung Acad Sci 1960.
- [7] 方娜清,汪小帆,刘增荣. 略论复杂性和非线性复杂网络系统的研究 [J]. 科技导报, 2004, (2): 9—12, 64.
- [8] 曹一家,刘美君,丁理杰,陈晓刚,孙可,王绍部. 大电网安全性评估的系统复杂性理论研究 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 1 (19): 1—7.
- [9] 成思危. 复杂科学与系统工程 [J]. 管理科学学报 1999, 2 (2): 1—7.
- [10] 张嗣瀛. 复杂系统与复杂性科学简介 [J]. 青岛大学学报, 2001, 16 (4): 25—29.

- [11] 孟仲伟, 奋宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 21—24.
- [12] 陈海波, 刘梦欣, 王杰. 复杂网络理论在电力网络中的应用与研究 [J]. 华东电力, 2007, 5(35): 1—6.
- [13] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8·14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训 [J]. 电网技术, 2003, 27(10): 1—5.
- [14] 刘永奇, 谢开. 从调度角度分析 8·14 美加大停电 [J]. 电网技术, 2004, 28(8): 15—20, 50.
- [15] 唐葆生. 伦敦南部地区大停电及其教训 [J]. 电网技术, 2003, 27(11): 1—5, 12.
- [16] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示 [J]. 电网技术, 2003, 27(9): 3—6.
- [17] Dobson I, Carreras BA, Newman DE. A loading dependent model of probabilistic cascading failure. *Probability in the Engineering and Informational Sciences* 2005, 19(1): 15—32.
- [18] Dobson I, BACarreras V, Lynch, et al. Complex systems analysis of series of blackouts: cascading failure, criticality, and self-organization. *Bulk Power System Dynamic sand Control—VI*, August 22—27, 2004, Cortina d'Ampezzo, Italy.
- [19] Phadeke A, G Thorp J⁵. ExPose hidden failures to Prevent cascading outages. *IEEE Computer Application in power* 1996, 9(3): 20—23.
- [20] Bae K, James S Thorp. A stochastic study of hidden failure in Power system Protection. *Decision Support Systems* 1999, (24): 259—268.
- [21] Chen J, Thorp JS, Dobson I. Cascading dynamic and mitigation assessment in Power system disturbances via hidden failure model. *Interactional Journal Electrical Power and Energy Systems* 2005, 27(4): 318—326.
- [22] 李生虎, 丁明, 王敏, 等. 考虑故障不确定性和保护动作性能的电网连锁故障模式搜索 [J]. 电网技术, 2004, 28(13): 27—31.
- [23] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 1—6.
- [24] Rios M, A Kirsehen DS, Jayaweera D, et al. Value of security: modeling time dependent Phenomena and weather conditions. *IEEE Trans. Power Systems* 2002, 17(3): 543—548.
- [25] Kirsehen D, S Jayaweera D, Nedie D P, et al. A Probabilistic indicator of system stress. *IEEE Trans. Power Systems* 2004, 19(3): 1650—1657.
- [26] Dobson I, Carreras B A, Lynch V E, et al. An initial model for complex dynamics in Electric Power system blackouts. *Proceedings of the 34th Annual Hawaii Antinational Conference System Sciences Maui Hawaii* Jan. 3—6, 2001: 710—718.
- [27] B A Carreras VE, Lynch ML, Saehtjen, et al. Modeling blackout dynamic in Power Transmission networks with simple structure. *34th Hawaii International Conference on System Sciences Maui Hawaii* Jan. 2001.
- [28] B A Carreras VE, Lynch I, Dobson, et al. Dynamics, criticality and self-organization in A mode for blackouts in Power transmission systems. *35th Hawaii International Conference Systems Sciences Maui Hawaii* Jan. 2002.
- [29] Watts D, J Strogatz SH. Collective Dynamics of “Small world” Networks. *Nature* 1998, 393(4): 440—442.
- [30] Watts D, J Small worlds—The Dynamics of Networks Between Ordered Randomness. Princeton (NJ): Press 1998.
- [31] 丁明, 韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估算法 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 7—10, 40.
- [32] Reka Albert, Istvan Albert, Gray L, Nakamado. Structural vulnerability of the North American power grid [J]. *Phys. Rev. E* 2004, 69, 025103.
- [33] Reka Kinney, Paolo Cincitti, Reka Albert, et al. Modeling cascading failures in the North American power grid [J]. *Eur. Phys. J. B* 2005, (46): 101—107.
- [34] 丁明, 韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(增刊): 118—122.
- [35] 倪向萍, 梅生伟, 张雪敏. 基于复杂网络理论的输电线路脆弱度评估方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 1—5.
- [36] Bak P, Chen K. Self-organized criticality [J]. *Scientific American* 1991, 264(1): 26—33.
- [37] Dobson I, Carreras B A, Lynch V E, et al. An initial model for complex dynamics in electric power system blackouts [C]. *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences Maui Hawaii* 2001, (2): 710—718.
- [38] 曹一家, 江全元, 丁理杰. 电力系统大停电的自组织临界现象 [J]. 电网技术, 2005, 29(15): 1—5.
- [39] 易俊, 周孝信, 肖逾男. 用连锁故障搜索算法判别系统的自组织临界状态 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 1—5.

作者简介:

肖军 (1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为人工智能及复杂网络在电力系统中的运用。

刘天琪 (1962—), 女, 博导, 教授, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化。

(收稿日期: 2008—12—15)

数字化变电站继电保护可靠性措施研究

余 锐¹,熊小伏²,于 军²

(1. 四川电力公司调度中心,四川 成都 610041; 2. 重庆大学电气工程学院,重庆 400030)

摘 要:基于 IEC 61850 协议的数字化变电站实现了整个变电站内信息共享。基于此,继电保护系统的可靠性指标应有新的提高。从提高数字化变电站保护系统可靠性出发提出了两种保护装置故障的后备措施:SBPU—Shared Back-up Protection Unit(用于解决保护单元失效)和 SB—Software Back-up (用于解决互感器失效)。并进一步通过信息流仿真,得到后备可靠性方案的投切时间。结果表明,所提两种方案均具有可行性。

关键词:数字化变电站;可靠性;信息流仿真;投切时间;可行性。

Abstract Digital substation based on IEC 61850 takes information sharing into account within the whole substation. Hereupon, the reliability index of relay protection system should be upgraded. Two backup measures are proposed for the fault of protective devices: SBPU—Shared Back-up Protection Unit(used to solve the invalidation of protection unit) and SB—Software Back-up (used to solve the invalidation of current and voltage transformers). And then, the switching time of backup reliability scheme can be obtained through information flow simulation. The result shows that both of these two proposed schemes are feasible.

Key words digital substation; reliability; information flow simulation; switching time; feasibility

中图分类号: TM762 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003—6954(2009)02—0033—04

IEC 61850 标准的颁布和光电/电子式互感器的工程应用为数字化变电站的实现奠定了基础^[1~3]。与目前广泛采用的微机保护和变电站综合自动化系统相比,数字化变电站具有更为独特的优势^[4,5]。其中站内数据和信息的共享能够获取变电站内部每一部分的信息,每一设备的运行状况。因此,如何利用信息共享开发保护系统的新型功能^[6]成为当前继电保护领域的一大挑战。

数字化变电站的安全运行依托信息网络。新型保护装置及数字互感器的可靠性还处于不断完善阶段。如何预防数字化变电站中的设备失效,确保达到较综合自动化系统更高的可靠性是数字化变电站技术成败的关键。因此必须研究数字化变电站的可靠性措施。

基于信息共享,从提高数字化变电站保护系统可靠性出发提出了两种新可靠性方案,即 SBPU—Shared Back-up Protection Unit(用于解决保护单元失效)和 SB—Software Back-up (用于解决互感器失效),并进一步通过信息仿真,得到两种可靠性方案的投切时间。结果表明,所提两种方案均具有可行性。

通常继电保护系统保护单元失效均会导致停电检修,一次系统故障状态下的失效则会导致电网事故扩大。基于信息共享,则提出采用共享后备单元实现保护装置失效的后备。

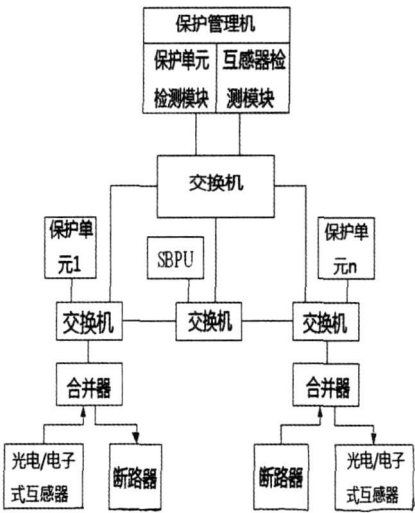


图 1 可靠性方案结构图

图 1 表示了采用公共后备保护单元的系统结构图。其中保护单元 1 到保护单元 n 是变电站配置的保护单元,SBPU 是共享后备保护单元。

当各保护单元工作正常时,SBPU 并不采集数据。当某保护单元例如保护 1 工作异常或失效时,由

1 针对保护单元失效的可靠性措施

保护管理机检测到该单元异常时启动共享备用保护单元,并下载失效对象间隔的保护定值,此时备用保护单元可启动采集该间隔的数据,自动承担失效单元的保护功能,从而做到在线不停电的保护功能恢复。此方案的信号流程设计如图 2 所示(图中,DS 表示检测信号;ASS 表示激活 SBPU 信号;AMS 表示告知过程层设备信息流换向信号;DLS 为保护定值下载信号;MS 为测量信号)。

- 这一方案的优点在于:
- 1)不必对每个保护装置采用双重化配置即可实现保护装置的冗余,提高保护系统可靠性,特别适合于中低压电网未采用双重化配置的情况;
 - 2)保护装置失效时,不必马上停电检修处理,适用于无人值守变电站。
 - 3)将各间隔的数据送往备用单元无需电缆连接,仅采用光纤传输数字信号,实现备用容易、成本低。

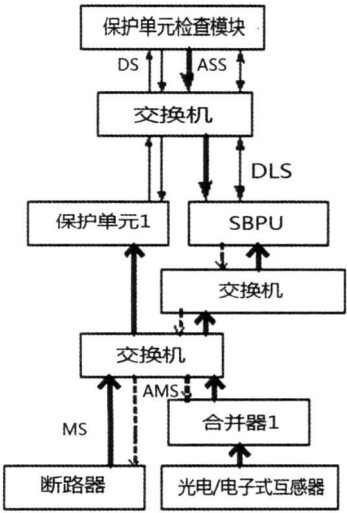


图 2 SBPU 方案信号流切换

2 数字互感器失效的可靠性措施

数字化互感器是数字化变电站的主要特征,但电子 光电式数字互感器集成了多个电子模块,且工作在恶劣的电磁环境下,失效的概率有所增加。因此,提出采用信息冗余的软后备方案解决数字互感器失效的互感器后备方案(SB)。

以如图 3 所示的网络为例,根据克希霍夫电流定律:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \tag{1}$$

式中: i_1 为支路 L1 的电流; i_2 为支路 L2 的电流; i_3 为

支路 L3 的电流。因此,任一回路的电流可通过其他回路的电流计算而得。这意味着当某一回路的互感器失效时,可用其他回路的电流来间接获取失效回路的电流。

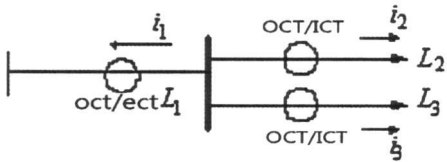


图 3 系统网络结构图

图 4 是假设回路 2 互感器失效该回路数据由其他回路获取的信号流程图。

当间隔 2 的保护单元检测到相应的互感器异常或失效时,该间隔的保护单元可向间隔 1 合并器和间隔 3 合并器申请传送线路 L1 和 L3 的电流,通过网络获得相关回路的电流采样值后用于代替 L2 的电流。此时保护单元 2 仍然间接获得了 L2 回路的电流数据,通过数据分析处理仍然维持对 L2 回路的保护功能。

由上可见,这种后备方式无须添加硬件设备,仅通过软件功能的调用和信号传递方向的改变即可实现后备功能。

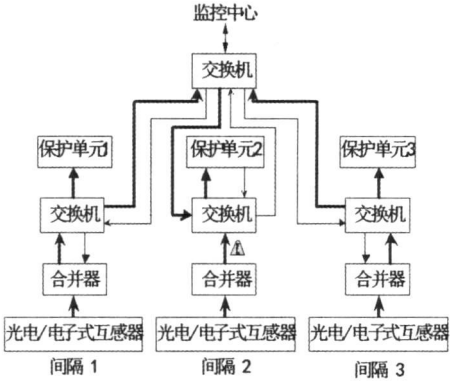


图 4 SB 方案信号流程图

3 两种可靠性方案的信息流仿真

基于信息共享的新型可靠性方案实现了保护系统冗余的低成本。但是,后备功能应用的关键在于备用功能的投切时间是否满足快速性要求。极端情况下,在一次系统故障同时保护装置也失效时,启动后备功能的延时希望能控制在 10 ms 之内。

延时时间包含两部分:设备内部信息的处理时间和信息的网络传输时间。由于设备内部信息的处理

时间可以通过软件的优化设计进行准确的控制,因此将对网络信息传输时间的仿真作为重点。

设文中方案应用的变电站结构:网络节点为 26、星型拓扑结构、100 Mbps 以太网。以 112 字节的数据包作为传输报文大小。通过 OPNET 仿真^[7~9],结果如下。

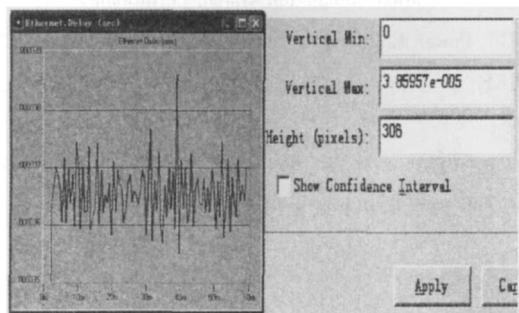


图 5 仿真时延

图 5 表示单组报文的网络最大时延为 0.038 6 ms

以 SBPU 方案为例,图 6 所示为其切换信号模型。图中,①为失效保护单元应答保护管理机检测信号;②、③实现了 SBPU 的激活;④、⑤实现 SBPU 通过网络从保护管理机下载失效单元的保护定值;⑥、⑦、⑧实现了 SBPU 与失效保护单元所在间隔合并器的联接。由此可见,方案的备用投切时延需要 8 个 GOOSE 报文的有效传输。依据图 5 所示的最大网络延迟 0.038 6 ms 可得,整个的备用投切信息传输时延为 $8 \times 0.038\ 6 = 0.308\ \text{ms}$ 相对于启动延时的希望值来讲,完全可以接受。因此,SBPU 方案具有可行性。

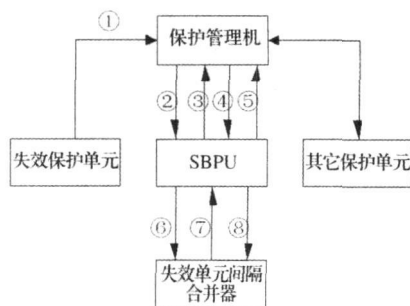


图 6 SBPU 方案切换的信号流模型

根据 SB 的工作原理分析方案 SB 的信息传输时延。假定间隔 1 合并器失效,则方案投切的信息流程如图 7 所示。图中,实线信号表示保护单元 1 向其相关合并器发布申请信号命令;非实线信号表示保护单元 1 与合并器建立关联。可以认为,各合并器与保护单元 1 之间的信息流同步进行,因此整个方案的信息

传输时延为 $3 \times 0.038\ 6 = 0.115\ \text{ms}$ 可见,此方案具有可行性。

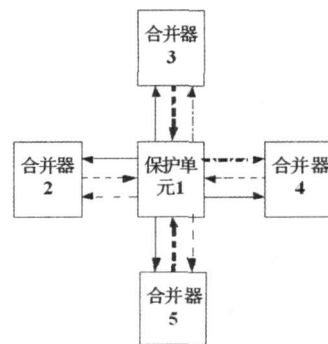


图 7 SB 方案切换的信号流

4 结 论

根据基于数字化变电站保护自动系统结构,利用其在信息共享、数据传输方便的特点,提出了解决保护装置失效和互感器失效的两种技术方案。并进一步通过 OPNET 仿真分析了两种方案投切所需要的时间,主要结论如下。

1)对于保护装置的失效,可采用共享备用保护单元的方案。其优点在于在提供备份的同时最大限度地减少了备份数量,简化了系统结构,提高了系统可靠性;

2)对于光电/电子式互感器失效导致的信号回路中断或异常,可利用一次系统接线满足基本电流定律约束的原理,通过网络实时从相关回路调取数据,间接计算失效回路电流的方法实现备用的方案;这一方案不增加硬件设备,但仍可维持保护功能,是一种有效的“软备用”方式。

3)通过 OPNET 网络仿真,得到较为逼近实际物理网络传输中的传输时延。并且结合两种方案的工作原理,计算出了两种方案的投切时间。结果表明,两种方案均具有可行性。

但是,基于信息共享的两种可靠性方案实现的前提在于保护装置的失效诊断和互感器的状态诊断。而目前,保护装置的失效诊断是一个颇为复杂的问题,目前尚无成熟的解决方案;同样,光学/电子互感器的状态诊断也处于真空阶段。因此,保护系统装置的状态诊断还需要更进一步的研究。

参考文献

[1] 李九虎,郑玉平,古世东,等.电子式互感器在数字化

变电站的应用 [J]. 电力系统自动化, 2007, 33(1): 78—82

[2] IEC61850, 2002

[3] 徐大可, 赵建宁, 张爱祥. 电子式互感器在数字化变电站中的应用 [J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 78—82

[4] 高翔, 张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术 [J]. 电网技术, 2006, 30(23): 67—71.

[5] 樊唯钦. 数字化变电站的发展与应用 [J]. 电网技术, 2006, (30): 97—100.

[6] XIONG Xiaofu, YU Jun, LIU Xiaofang, etc Reliability of Substation Protection System Based on IEC61850. TRANSACTIONS OF TIANJIN UNIVERSITY. 2008, 14(2): 118—122.

[7] 张铭, 窦赫蕾, 常春藤. OPNET Modeler 与网络仿真

[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.

[8] T. S. Sidhu and Y. Yujie Modelling and Simulation for Performance Evaluation of IEC61850 — Based Substation Communication Systems[J]Power Delivery IEEE Transactions on, 2007, 22, 1482—1489.

[9] T. S. Sidhu and Y. Yujie IED modelling for IEC61850 based substation automation system performance simulation [C]. Power Engineering Society General Meeting 2006. IEEE, p. 7 pp

作者简介:

余 锐 (1976 —), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护和配电网自动化.

(收稿日期: 2008—12—03)

(上接第 12 页)

《供电企业安全性评价查评依据》置于后台数据库中, 并设置按条件查阅功能, 普通用户可以通过访问浏览器, 根据自身需要有选择性的查阅学习查评标准, 方便记忆。

同时, 系统还添加了安评管理部门根据自身的情况适当修改查评标准的功能。

3.3 自动生成报表

该功能主要用于解决查评工作中, 报表内容制定不够规范、格式不统一的问题。

根据《供电企业安全性评价标准》的要求, 系统提供了 6 种评价表的模板, 用户可根据自身需要, 在完成相应的查评工作后, 下载所需的表格。

3.4 完成情况查询

由于安全性评价的查评内容繁杂多样, 并且参与的部门和人员较多, 查评管理部门对安评工作难于驾驭, 为此, 本系统开发完成情况查询功能。

该功能可以实现安全性评价工作管理部门对安全性评价工作进行全面跟踪管理。其中包括查评工作的完成情况和整改工作的完成情况。利用此功能, 管理部门可以非常方便地查询到查评工作的状态, 并对相关部门进行催办、监督。

4 在璧山供电局的实践

安全性评价工作本身就是一个复杂的过程, 再加上受璧山县地形因素的影响, 璧山县供电局的电网构成复杂, 更加导致了璧山供电局安全性评价工作操作费时又费力。

目前, 供电企业安全性评价自动化管理系统已经在重庆市电力公司璧山县供电局试运行。系统安装在供电局内部局域网的服务器上, 各部门、车间可以通过访问浏览器传输、共享数据文件, 完全实现安全性评价的办公自动化, 在防范供电企业电力生产中可能存在事故及隐患, 消除各种不利因素等方面发挥了积极有效的作用, 充分提高了工作效率, 取得了良好的效果。

参考文献

[1] 黄祝成, 邓克. 网络技术在电力安全性评价中的应用 [J]. 电力安全技术, 2002, 4(12): 16—18, 26.

[2] 杨松, 肖辉旭, 郭志锋, 等. 电网调度系统安全性评价管理系统开发 [J]. 吉林电力, 2007, 35(1): 54—56.

[3] 沈国栋. 安全性评价对安全生产的促进作用 [J]. 电力安全技术, 2001, 6(3): 17—18.

[4] 于古胜, 李华敏, 胡成全. 基于 B/S 模式的电力安全性评价系统的设计和实现 [J]. 电讯技术, 2007, 47(6): 186—189.

[5] 周天雷. 基于 WEB 的电力安全性评价综合管理系统 [J]. 浙江电力, 2007, 18(3): 72—75.

[6] 国家电网公司. 供电企业安全性评价标准 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

[7] 张丽英. 供电企业安全性评价查评依据 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

作者简介:

潘守翡 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机技术在电力系统中的应用。

雷 霞 (1973—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为配电自动化和电力市场。

(收稿日期: 2009—02—15)

水情数据自动交换系统在水调工作中的应用

杜成锐, 赵永龙

(四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要:结合四川电网水调管理实际情况, 开发了水情数据自动交换系统作为水调业务开展的一个工作平台。本系统和水调自动化系统形成互补作用, 在充分利用水能资源, 保证电网安全经济运行发挥了较大作用。

关键词:水电站; 水情数据; 数据通信;

Abstract: Combined with the actual management of reservoir operation of Sichuan Power Grid, the development of automatic hydrological data exchange system is carried out as a working platform of reservoir operation. Reservoir operation of this system and the formation of automation systems complement each other, and it has played a great role in making full use of water resources and ensuring safe and economic operation.

Key words: hydroelectric station; hydrologic data; data communication

中图分类号: TP391 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)02—0037—02

四川电网直调水电比重大, 水电装机容量占全网总装机容量约 60%, 现直调水电厂达 100 多个, 装机 100 MW 以下水电厂就有 60 多个, 且还在快速增长。随着电网水电厂的不断增加, 水调工作愈来愈复杂与繁琐, 而准确地掌握水电厂水情信息是水电调度的基础工作, 对于充分利用水能资源, 保证电网安全经济运行, 取得电网最大经济效益和社会效益有着重要意义。

1 技术背景

四川省调直调水电厂, 大多数位于山区流域及其支流上, 通讯和技术条件较差, 电厂到省调的调度数据专网通道建设相当困难, 且投资较大, 对中小型电厂来说资金压力较大, 故难以通过水调自动化系统采集这些中小型水电水情信息。现水调自动化系统主要接入了装机容量 100 MW 及以上的水电厂和流域集控中心, 而装机 100 MW 以下的众多水电厂及部分装机 100 MW 以上还未接入水调自动化系统电厂, 如何准确及时收集、整理全网水情信息, 统筹安排发电计划, 减少弃水, 最大限度利用水利资源, 一直是一项繁杂的工作。多年来一直通过传真、电子邮件和电话形式报送, 水调人员每日耗费大量精力收集整理各电厂报表, 工作效率低, 且不利于数据整合, 随着电厂数目的增多, 已无法满足实际工作要求。鉴于四川电网水情信息收集、整理工作的繁杂性和水调自动化系统的局限性, 经规划论证, 专门开发了基于多级数据交

换平台的水情数据自动交换系统, 作为水调业务开展的一个工作平台。

2 系统方案

2.1 结构设计

水情数据自动交换系统采用了目前先进的 Internet/Intranet 信息传输处理技术和全新的网络应用设计思想, 构筑了灵活高效的分布式计算体系。系统通过数据交互平台技术将数据库、应用程序、Web 等相互连接成一个整体, 并建立事件触发机制, 使各应用软件协调工作。系统采用标准 C++、JSP、Ajax 技术开发实现, 不受限于特定的操作系统。

系统根据用户已有的计算机硬件以及数据分布等资源情况进行搭建, 采用配置 Windows NT/2000 操作系统的微机服务器, 安装本系统的应用服务程序, 装有 Microsoft Internet Information Services (IIS) Web 服务软件以及 SQL Server 7.0 以上商用数据库。系统总体结构如图 1 所示。

在该系统中, 获取水情系统的网络拓扑数据是一个重点, 其数据包括日水情数据、周水情数据和月水情数据等信息。在本系统中采用提供 FTP 服务、手工上传、自动加载等方式, 水情系统主动上传水情数据到本系统服务器中后, 由本系统提供的软件进行处理。数据存在综合数据平台的数据库中, 其他数据存储在本系统运行所在服务器的数据库中。借助于数

据交互平台的功能,水情数据自动交换程序能方便地实现数据处理,并开发成基于 Web 服务的应用功能,用户可以在任意一台客户机上实现上传/下载数据的功能。电厂用户只需安装 Microsoft IE 5.0 及以上浏览器软件,配置一个 Modem 和一门电话,采用拨号的方式登录本系统,经过身份验证后,即可进入各自数据报送界面进行数据填报。

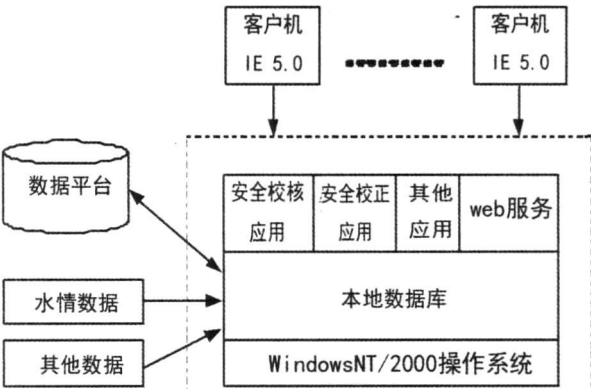


图 1 系统总体结构

2.2 主要功能

水情数据自动交换系统主要利用已经建设的省地一体多级数据交换平台,采用互联网、GPRS、拨号等多种接入手段接入数据交换平台,利用数据交换平台进行水情数据读取和报送。交换的数据主要有电厂日水情数据、周水情数据和月水情数据等。日水情数据包括水位、入库流量、出库流量、发电流量、弃水流量、降雨量、最大最小出力、弃水电量、计划发电量、实际发电量、当前坝前水位、预计今日及明日入库流量、明日最大最小可调出力、建议明日发电量等数据。周水情数据主要包括下周坝前水位控制要求、最大最小下泄流量要求等数据。月水情数据主要对月度水情进行汇总,包括月平均入库流量、发电流量、弃水流量等数据。该系统数据流程如图 2。

此系统与水调自动化系统 Web 浏览信息整合,

使调度生产中关注的全网水电运行基本信息能够通过本系统自动汇总并形成各种统计报表,为发电计划和电网调度决策提供及时、科学的依据。此系统数据库可通过 Excel VBA 开发程序方便的进行数据读取和查询,形成水电运行日报表、水电运行月报表和水电运行统计报表,且能够快速方便的对单站或多站进行数据查询分析统计。

本系统软件功能主要包括以下几部分:水情数据接口、数据交互平台、应用服务程序、查错程序、Web 页面程序。

水情数据接口:自动检测已经上传的数据或者文件,负责对水情系统上传的水情数据文件进行处理;

数据交互平台:实现各应用间的数据交换及对数据库数据的访问;

应用服务程序:实现系统主要的应用功能,如数据自动查错、上传、汇总等功能;

Web 页面程序:为人机交互的接口,提供用户界面功能。

2.3 主要技术特点

(1)先进性:把握最新的电子计算机技术、网络通信技术、数据库技术和软件工程管理模式的发 展方向,采用先进、成熟的体系结构,选择先进的软件和硬件技术构造系统的支撑平台和运行环境,保证投资的有效性和延续性。

(2)实用性:充分考虑本系统不仅是省调专业人员使用,而且主要是众多电厂人员进行数据上传,各类使用人员的能力和 专业结构差距较大等,系统做到易学易用、操作简单,突出各项系统功能的实用性,人机界面友好,可操作性强。

(3)可扩展性:保证系统平台、应用平台和应用软件不仅满足现在的要求,而且随着电厂的增加,可以方便地扩展业务,具有二次开发功能,满足用户对系统自动扩充需求。

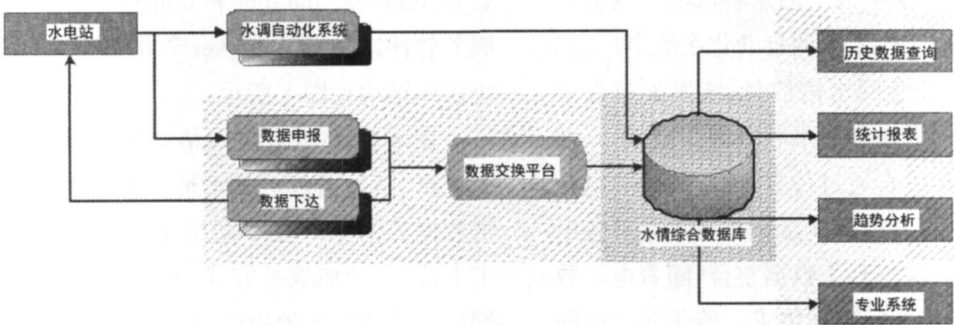


图 2 系统数据流程图

(下转第 53 页)

②由几何原理可知,

$|OL| + |OT| > |OB| > 0$ (5)

③ $\angle \beta < 90^\circ$, 推出

$0 < \cos(90^\circ - \theta) < \cos(\beta - \theta)$ (6)

④由式 (5)、式 (6), 可得出

$\frac{|OL| + |OT|}{\cos(90^\circ - \theta)} > \frac{|OB|}{\cos(\beta - \theta)}$ (7)

⑤由式 (4)、式 (7), 可得出

$Z_3 \geqslant K \ln \frac{|OL| + |OT|}{\cos(90^\circ - \theta)} > K \ln \frac{|OB|}{\cos(\beta - \theta)}$ (8)

式 (8) 中, $|OL|$ 为线路正序阻抗 Z_L , $|OT|$ 为变压器正序阻抗 Z_{Tmax} , θ 为线路正序阻抗角, 均为已知参数。因此可将式 (3) 简化为

$Z_3 \geqslant K \ln \frac{|OL| + |OT|}{\cos(90^\circ - \theta)} = K \ln \frac{Z_L + Z_{Tmax}}{\cos(90^\circ - \theta)}$ (9)

由式 (7) 可知, 式 (9) 确定相间距离 III 段整定值 Z_3 的下限, 实际灵敏系数略大于 $K \ln$ 。

5 结 语

按式 (2)、式 (9), 可以分别得出终端变电站圆特性相间距离 III 段整定值的上限和下限, 确定其整定取

值范围。在圆特性相间距离 III 段保护作线路末端变压器远后备的整定计算过程中, 由于线路与变压器的正序阻抗角不同, 引入了矢量求和运算, 致使手工整定计算繁琐, 针对圆特性阻抗元件的特点, 推导出了—种简化的整定方法。通过该简化整定方法计算的相间距离 III 段整定值 Z_3 的下限, 其实际灵敏度略大于计算灵敏度 $K \ln$, 符合规程, 满足运行要求。

经运行验证, 该简化整定方法准确、简单, 对圆特性阻抗元件的相间距离 III 段整定, 具有较强的通用性和实用性。

参考文献

[1] 南京南瑞继保电气有限公司. LFP-941A (B、D、J、S) 型输电线路成套保护装置技术说明书.
[2] DL/T 584-95, 3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程 [s].
[3] GB/T 14285-2006, 继电保护和安全自动装置技术规程 [s].

作者简介:

陈旭锋 (1980—), 男, 助理工程师, 从事电网继电保护整定计算和运行管理工作。
李旭涛 (1971—), 男, 工程师, 从事电网运行方式和继电保护管理工作。

(收稿日期: 2009-02-10)

(上接第 38 页)

(4) 可靠性: 系统每日接收数据量较大, 且数据要保持长久存储, 系统必须要有较高可靠性。本系统采用了高可用性技术, 保证系统能长期稳定的不间断运行, 采用稳定先进的操作系统、数据库、网络协议和中间件等系统软件平台, 在网络、主机、数据库或应用系统出现问题时, 能及时快速地恢复, 保证系统的稳定性。

3 系统实施效果

本系统从 2006 年 6 月投入运行以来, 改善了未接入水调自动化系统水电厂和电网水情信息采集、传输和交换的手段, 和水调自动化系统形成互为补充作用, 能够准确及时的收集、整理各中小型发电厂水情信息, 为水库调度人员及时了解水电厂运行情况及实时水、雨情提供了技术保障, 为调度决策提供了及时、科学的依据, 在水电调度中发挥了重要作用。

通过水情数据自动交换系统不但有利于节约水情收集整理时间, 而且便于历史数据查询, 可方便快速的对历史水情数据进行分析查询, 提高了水情预测精度, 为水电电力电量平衡计算提供了依据。

4 结 语

随着四川大量水电相继投产和节能调度的实施, 及时掌握各水电厂水情信息和准确预测来水是水调的一项重要工作。水情数据自动交换系统较好的解决了四川中小型电厂的水情信息上报工作, 在水电的优化调度, 充分利用水能资源, 保证电网安全经济运行发挥了较大作用。本系统设备配置少、投资低、操作简单、实时性强, 目前在全国各网省调中属首个采用, 具有独创性和技术先进性, 对推进水调管理工作有一定的示范作用, 有较广的应用前景。

(收稿日期: 2008-12-03)

阿坝牧区电网电压偏高分析

张 应

(四川省电力公司阿坝公司, 四川 阿坝 623003)

摘 要:对阿坝州牧区存在的电网电压偏高情况作了调研分析,指出了无电抗器吸收无功、输电线路较长、输送功率小等是造成电网电压偏高的主要原因,为治理和改善电网无功平衡,提高电压合格率,提出了相应的对策和措施,并建议加快输电网络改造,保证安全供电。

关键词:电压;输电线路;电抗器

Abstract: The situation about the higher voltage in the power grid of pastoral area of ABa Prefecture is investigated and analyzed. The main reasons are pointed out that is there is no reactor to absorb reactive power, the transmission lines are longer and the transmitted power is lower. The corresponding countermeasures and measures are proposed to improve reactive power balance and to raise the passing rate of voltage. It is also suggested to speed up the transformation of transmission network in order to ensure the security of electricity supply.

Key words: voltage; transmission line; reactor

中图分类号: TM732 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)02—0039—02

一直以来,阿坝州牧区存在电网电压偏高的现象,电压合格率较州内其他地区低。由于网架结构、输电线路长度、负荷较轻等因数的影响,阿坝州牧区高电压现象明显,尤其是在红房子电站机组停运,牧区各县孤网运行期间。2008年 9 月 18 日 6 时 30 分时至 10 月 25 日 22 时 28 分时,红房子电站机组全停后,牧区电网内电压偏高,详见表 1。

表 1 牧区孤网运行期间电压表							单位 /kV
时间 (月、日、时)	9. 18 20: 00	9. 20 8: 00	9. 25 12: 00	9. 30 21: 00	10. 05 15: 00	10. 15 23: 00	
三家寨变电站	118	118. 1	117. 2	118. 6	115. 3	114	
马塘变电站	125	125. 8	125. 1	125	121. 6	126	
龙日坝变电站	126. 8	127	127	127	126. 8	127	
安曲变电站	126. 8	127	127	127	126. 8	127	

1 阿坝牧区电网概况

阿坝牧区电网主要由 5 座 110 kV 变电站、2 座水电站、若干个小水电站组成。主要向马尔康、红原、阿坝供电,由于主要是城乡居民生活用电,用电负荷不高。网络接线详见图 1。牧区电网内输电线路较长,详见表 2。网内未装设电抗器。

牧区电网正常运行方式由红房子电站向牧区电网供电,由于该电站装机容量大(3×30 MW),且机组进相能力较好。牧区电网内电压偏高,处在系统末

端的龙日坝、安曲变电站电压偏高达到 123 kV 左右。最末端的阿坝变电站孤网运行。并网运行后电压将达到 126 kV 左右。

但在红房子电站停止发电期间,由三家寨站向龙日坝、安曲站供电。阿坝站孤网运行。由于输电线路产生无功无法吸收,使电压最高可达 127 kV。严重超出合格范围,对电网、设备造成较大安全隐患。

表 2 牧区电网输电线路参数表			
序号	线路名称	导线型号	长度 (km)
1	110 kV 叶子线	LGJ—185	10. 8
2	110 kV 红马线	LGJ—240	77. 51
3	110 kV 马寨线	LGJ—240	53. 38
4	110 kV 马龙线	LGJ—150	63
5	110 kV 坝安线	LGJ—150	25
6	110 kV 安阿线	LGJ—120	70. 74

2 牧区电网电压偏高原因分析

1)输电线路的无功损耗 ΔQ_L 由两部分组成,即线路串联电抗中的无功功率损耗 ΔQ_{LX} 与线路电容的充电功率 ΔQ_b 组成,表示式为

$$\begin{aligned}\Delta Q_L &= \Delta Q_{LX} + \Delta Q_b = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} X_L - \frac{B}{2} (U_1^2 + U_2^2) \\ &= \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} X_L - \frac{B}{2} (U_1^2 + U_2^2)\end{aligned}$$

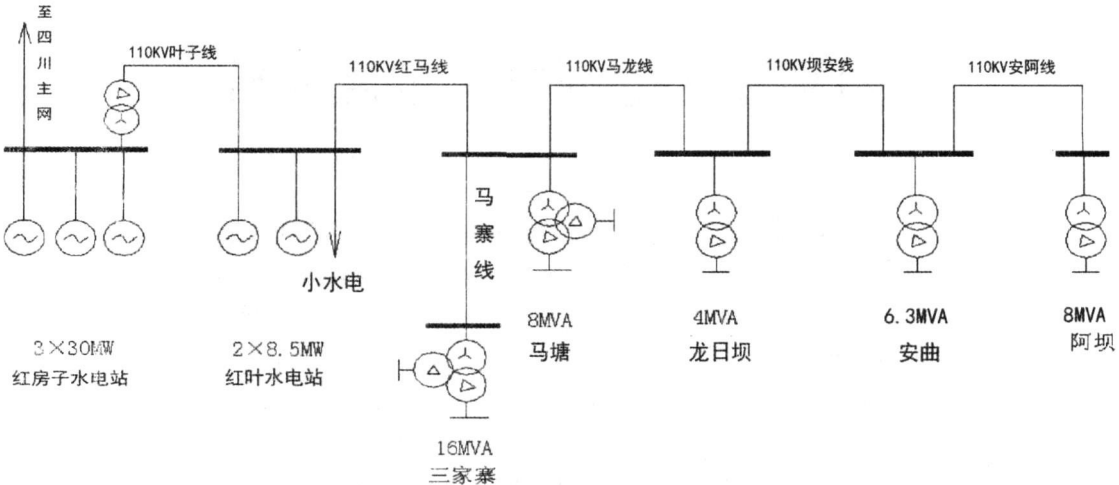


图 1 阿坝牧区电网接线示意图

由上式可见,当传输功率较大时, ΔQ_{LX} 大于 ΔQ_B ,线路消耗无功功率;当传输功率较小时, ΔQ_{LX} 小于 ΔQ_B ,线路相当于无功电源。

输电线路的电纳 B 可以表示为

$$B=bL$$

由上式可见电纳与输电线路的长度成正比关系。可见输电线路越长,线路输送功率低于线路的自然功率,线路就向系统倒送无功,引起电压超出正常范围。电网网架结构薄弱是电压偏高的最基本原因。

2)三家寨下面的小水电带电网运行期间,地方小水电机组无进相能力,不利于无功调节。只能依靠大用户调节,调节手段单一,效果不明显且不具备连续性。

3)牧区电网负荷是冷负荷性质,冬季和夏季的用电负荷差距很大。夏季,取暖负荷小,小水电站有水发电,一般下网负荷在 2 000~4 000 kW,深夜时候还向系统倒送;冬季,取暖负荷上升,河水结冰,小水电无法发电,全靠大网支撑,负荷在 20~35 MW。负荷较夏天明显上升。

4)农网改造资金不足,电网建成投运后未得到改善(未加装电抗器);牧区负荷增长幅度不大,电网

建设步伐缓慢,在运行方式上无法灵活变化。

3 牧区电网电压偏高解决措施及建议

1)加装电抗器。电抗器是长距离输电线路的常用补偿设备,用以补偿输电线路对地电容所产生的充电功率,以抑制工频过电压。电抗器的容量根据线路长度和过电压限制水平选择,其补偿度(电抗器容量与线路充电功率之比)一般不低于 60。

2)加快电网网络建设,彻底改善牧区电网单线串联供电。改善电网结构,灵活电网运行方式。从电网发展上消除高电压的威胁。

3)大力发展旅游产业,增大用电负荷。

参考文献

[1] 孟祥萍,高嫵.电力系统分析[M].高等教育出版社,2004.
[2] 何仰赞,温增银.电力系统分析·第三版[M].华中科技大学出版社,2002.

(收稿日期:2008—12—03)

欧盟委员会提出要大力发展风电

欧盟委员会提出要大力发展风电 欧盟委员会提出要为实现到 2020 年可再生能源利用占总能源利用的 20% 的目标铺平道路。因此要大力发展风电建设。欧盟委员会还提出了一个稳定而灵活的欧盟风电发展框架,以使其成员国通过有效的国家支持体系保持对其可再生能源政策的控制,同时保障各成员国在完成或超过其过渡期目标后对其原有指标进行边界交换,这也是维持投资者信心和鼓励绿色电力可持续投资的关键因素。

该风电发展框架引入自愿交易机制,有利于维持风电市场稳定及各成员国发展目标的实现。目前欧盟的可再生能源比例是 15%。该提议对目前过繁的管理程序和风电上网及其解决措施进行了探讨,如可再生能源优先上网政策和简化管理程序等。

四川电网 220 kV 及以上线路简化整定计算

杨向飞

(四川省电力公司调度中心, 四川 成都 610041)

摘 要:随着四川电网的逐步强大和继电保护技术的不断进步,简化线路保护的整定计算是切实可行的。提出了高压线路保护的简化整定计算原则和方法,采用这些原则和方法,既保证了整定值的正确、科学和合理,又能够提高整定计算工作的效率。

关键词:继电保护;整定计算;输电线路

Abstract: With the gradual development of extra-high voltage power grid and the advancement of relay protection technology, the setting calculation of protections of transmission line can be simplified. Some rules and methods for simplifying the setting calculation of HV transmission line protections are proposed. Using these setting calculation rules and methods can enhance the performance of setting value and the efficiency of setting calculation process.

Key words: relay protection; setting calculation; transmission line

中图分类号: TM733 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)02—0041—03

继电保护是保证电网安全稳定运行三道防线中的第一道防线,是防止电力设备损坏和电网事故扩大的重要手段。而继电保护整定计算则是保证继电保护装置正确动作的基础,只有正确、合理的定值,才能适应电网网络结构的变化,才能满足继电保护选择性和灵敏性的要求,保证电网安全稳定经济运行。

1 简化整定计算的必要性

实现继电保护选择性的手段,是在已经配置的继电保护装置的基础上,进行合理的动作值整定。整定原则是,愈靠近故障点的保护装置的动作灵敏度愈大,动作时间愈短,两者缺一不可。这看似简单的整定原则,在复杂网络情况下,由于运行情况多变,实现起来颇不容易,它既为电网运行方式所左右,又受配置的继电保护装置制约。

而随着电网的迅速发展,新工程大量投产,出现许多平行线路、短线路以及环网,使得高压线路后备保护的整定计算日益繁琐和复杂,逐级配合的理想整定方法费时费力,且很难实现,简化整定计算成为现实需要。要求“加强主保护,简化后备保护”的呼声也越来越高。

2 简化整定计算的可行性

在微机及信息技术广泛应用的今天,继电保护装

置的原理越来越先进,性能越来越可靠。目前四川电网 220 kV 及以上线路均配置了两套完整的、独立的全线速动数字式主保护。每套主保护对全线路内发生的各种类型故障均能无时限动作切除故障;每套主保护均具有独立选相功能,可实现分相跳闸和三相跳闸;断路器有两组跳闸线圈,每套主保护分别启动一组跳闸线圈。在运行中,即使因装置原因停用一套保护,仍有一套保护能正常运行。同时根据运行经验和统计数据,电网发生的故障绝大部分是由纵联保护动作切除,后备保护动作极少,且一般都是在特殊情况下由动作时间最长的最末段动作,后备保护中的Ⅱ段保护几乎从未动作过。因此,“加强主保护,简化后备保护”的简化整定计算是切实可行的。四川省调继保处按照这一思路进行整定计算已有数年的实践,从未出现任何由简化整定计算引起的事故。

3 简化整定计算的原则和方法

3.1 纵联保护整定计算的原则和方法

纵联保护作为线路的主保护,对保证电网的安全稳定运行,起着举足轻重的作用。

纵联保护的突变量启动元件按最小方式下线路可能的高阻故障,故障相电流应有足够灵敏度同时躲过正常负荷电流波动最大值整定。并保证在被保护线路末端经高阻接地时有足够灵敏度,一般取 $I_{\text{D}} =$

240 A (一次值)。需要注意的问题是:必须保证线路两侧定值 (一次值) 一致, 这样两侧保护才可以一起启动; 其次, 保护中每个 CPU 的突变量启动电流应整定相同。

零序启动电流, 这种电流启动方式是保护启动元件的另一种方式, 零序辅助启动元件在线路经过渡大电阻接地短路且突变量启动元件灵敏度不够时作为辅助保护装置启动, 启动电流值按躲过稳态最大零序不平衡电流整定, 同时保证零序启动电流 I_{0qzd} 小于零序过流 III 段电流 I_{0zd3} , 一般取 $I_{0qzd} = 120$ A (一次值)。如因 TA 变比问题不能整定时, 取最小能整定的值, 同时必须保证线路两侧定值 (一次值) 一致。

纵联零序方向电流按线路可能的高阻故障有一定的灵敏度整定, 同时保证零序方向过流定值 I_{0zdf} 大于零序过流 III 段定值 I_{0zd3} 。取 $I_{0zdf} = 300$ A (一次值), 同样必须保证线路两侧定值 (一次值) 一致。

纵联差动电流定值按保证线路末端短路有足够灵敏度且不小于 4 倍的电容电流整定, 一般取 600 A (一次值), 相应地, 两侧定值 (一次值) 也要保证相同。

3.2 后备保护整定计算的原则和方法

在继电保护和安全自动装置技术规程中要求 220 kV 及以上线路的后备保护宜采用近后备方式。因此主保护拒动应由故障线路的后备保护切除故障, 不应由相邻线路的后备保护切除故障。前者讲的是灵敏性, 即要求故障线路后备保护必须对线路任何位置故障有足够的灵敏度; 后者讲的是选择性, 即后备保护与相邻线路保护的配合关系。

过去后备保护的整定原则是逐级配合, 即保护范围和动作时间均取得配合, 缺一不可。但在实际整定计算工作中, 很难做到完全按照理想原则整定, 常常遇到选择性与灵敏性、选择性与速动性的矛盾, 整定计算工作在很多情况下就是协调这些矛盾, 根据电网的实际情况做出取舍。而按照加强主保护、简化后备保护的思想, 因为线路配置有独立、完善的双重主保护, 应允许后备保护的整定计算作相应简化, 简化后备保护的配合关系, 也就是采用一种不完全配合原则。具体办法为: 正常情况下线路发生故障时由纵联保护切除故障, 不依靠后备保护, 只在特殊情况下再考虑其作用。在计算后备保护定值时不考虑与相邻线路后备保护的完全配合关系, 即后备保护 II 段与相邻线纵联保护配合整定, 定值只要求保证本线路未故

障有足够灵敏度, 时限统一为 1.0 s。在本线路两套纵联保护都停用, 线路又不允许停电的特殊情况下, 将本线路后备保护 II 段时间调整为 0.3 s 这样即保证了本线路后备保护与相邻出线保护在时间上的配合关系。同样后备末段在保证本线路末故障有足够灵敏度的同时力争作相邻设备的后备, 动作时限按统一整定。这样不仅保证了保护动作的选择性和灵敏性, 同时大大简化了复杂的后备保护的配合关系, 计算工作量锐减, 在运行中当电网结构发生改变, 可少调整甚至不调整保护运行定值。经过四川电网近年来的实际运行情况来看, 此保护整定方案是切实可行的, 在保证电网安全运行的情况下, 既减少了调度及运行人员繁琐的定值修改工作, 又简化了保护人员累赘的计算工作。

3.2.1 距离保护的整定

接地距离 I 段和相间距离 I 段阻抗值分别按线路全长的 70% 整定, 以确保定值整定范围不伸入对端母线, 动作时间取 0 s。

接地距离 II 段和相间距离 II 段阻抗值按确保线路末端发生金属性故障有足够灵敏度整定。这是因为 220 kV 及以上系统的所有线路的接地距离 II 段和相间距离 II 段定值只考虑与相邻线路全线速动保护相配合整定, 并不伸出相邻变压器中压侧。

为保证线路末端故障有不小于规程规定的灵敏度且尽可能躲变压器其他侧母线故障。对距离保护的灵敏度根据线路长度要求如下:

- 1) 50 km 以下线路, 灵敏度为 1.8, 但一次定值最低不得小于 6 Ω ;
- 2) 50~100 km 线路, 灵敏度为 1.7;
- 3) 100~200 km 线路, 灵敏度为 1.4;
- 4) 200 km 以上线路, 灵敏度为 1.3。

相间距离 III 段按躲线路最大事故过负荷电流并在本线路末故障有足够灵敏度整定, 同时力争能作相邻线路和变压器的后备保护。接地距离 III 段阻抗值取与相间距离 III 段相同值。距离保护 III 段时限均与相邻线路距离 II 段时间及变压器后备保护时限相配合整定, 所以全网相间和接地距离保护时限按统一时限整定。由于 500 kV 变压器和 220 kV 出线的保护配置较完善, 同时作为 500 kV 系统的后备保护也应以较快的时间切除故障, 因此 500 kV 相间和接地距离 III 段与 500 kV 主变的后备保护跳本侧段 (未考虑与跳三侧的后备保护时间配) 及 220 kV 出线后备 II 段

时限相配合整定,时限都取 3.5 s 。而 220 kV 线路的距离保护考虑了与相邻变压器后备保护完全配合的问题,因此相间距离Ⅲ段时间取 5.5 s 接地距离Ⅲ段取 4.0 s (四川电网整定原则规定 220 kV 变压器接地后备保护的最长动作时限为 3.5 s 相间后备保护的最长动作时限为 5.0 s 因而与线路的后备保护在动作时限上是配合的)。

目前系统采用新型号的保护装置越来越多,这些装置靠负荷限制电阻动作特性来可靠躲过事故过负荷,因此距离Ⅲ段定值可按灵敏度整定。为防止线路跳闸后,大功率转移,引起线路连锁跳闸,要求 220 kV 、 500 kV 线路距离保护躲过线路热稳定功率,负荷限制电阻定值根据线路截面取值。

3.2.2 方向零序电流保护的整定

经过近年来的继电保护改造工程,四川电网 220 kV 及以上的线路保护装置的技术性能和设备健康状况均有较大的提高,线路均配置了双套纵联保护;双套允许接地电阻较大的三段式相间、接地距离保护和双套方向零序电流四段式或两段式保护 (LFP-900 或 RCS-900 系列保护装置未配置方向零序电流 I 段保护)。总之,随着系统纵联保护的加强和接地距离保护的广泛采用,方向零序电流保护的作用越来越不明显。

方向零序电流 I 段保护范围短,适应系统运行方式变化的能力差,在电网发生连续故障时,还可能由于网架的变化而导致误动。现在方向零序电流 I 段的保护功能完全可以由双套允许接地电阻较大的接地距离保护 I 段代替。因此,目前四川电网 220 kV 及以上线路配置的所有方向零序电流 I 段和零序电流不灵敏 I 段保护都停用。

由于接地距离 II 段定值确保了被保护线路末端故障有灵敏度,方向零序电流 II 段的整定作了适当简化,按规程规定与相邻线纵联保护配合,即躲相邻线末端最大接地短路电流整定,在系统为最大运行方式下灵敏度大约 1.0 。对线路配置的为四段式方向零序电流保护的微机保护装置,其整定原则Ⅲ段整定原则同 II 段,即 II 段和Ⅲ段采用相同的保护定值。

零序最末段 (Ⅲ段或 IV 段) 定值按保线路经高阻接地时有一定灵敏度整定。目前可能出现的最大接地电阻: 500 kV 线路为 $300\ \Omega$; 330 kV 线路为 $150\ \Omega$; 220 kV 线路为 $100\ \Omega$ 。三种情况下,通过故障点的电流都在 1000 A 左右,按线路两侧均匀分配并考

虑一定的灵敏度,最末段零序电流整定为 300 A 。如果考虑纵续动作,后跳侧保护的灵敏度会更高。所以零序最末段一般不大于 300 A ,时间为 4.0 s 。

方向零序电流保护 II、III (四段式) 段带方向,零序电流最末段和不灵敏 II 段不带方向。

3.3 综合重合闸整定原则

220 kV 及以上系统的线路综合重合闸一般采用单重方式。全网只有纵联保护、接地距离 I 段启动重合闸,相间保护和带延时的接地保护均不启动重合闸,保护动作直接三相跳闸。

220 kV 线路的重合闸单重时间一般为 1.0 s 。部分线路根据运行方式处提出的系统稳定计算结果的要求,将重合闸时间整定为 0.5 s 这样带来的后果是重合闸重合成功率降低。

500 kV 系统的边开关的重合闸时间整定为 1.0 s 为避免 $3/2$ 或 $4/3$ 接线方式的中开关在线路发生永久性故障时同边开关一起再次重合于故障,因此中开关的重合闸时间比边开关延时 0.5 s 均整定为 1.5 s 。

4 结束语

四川省调继保处从电网运行生产实际出发,以“强化主保护的作用、简化后备保护的配合”的整定原则,在整定上实行标准化管理。从计算工作中找出规律、抓住重点,化繁为简制定标准。大大提高了保护整定计算的工作效率,妥善解决了基建、运行任务繁重、时间紧迫情况下大量继电保护整定计算和调整保护定值易出错的矛盾,具有广泛的推广价值。国网公司颁布的“继电保护和安全自动装置技术规程”及“保护装置标准化设计规范”已经采纳了这项理念。

参考文献

- [1] 王梅义. 电网继电保护应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [2] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护规定汇编 (第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [3] 崔家佩, 孟庆炎, 等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [4] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术 (第三版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

(收稿日期: 2009-01-10)

宜宾电网 2008 年夏季运行分析

刘 勤

(宜宾电业局调度通信局, 四川 宜宾 644000)

摘 要:近年来宜宾电网负荷增长较快, 电网供电能力未能随负荷的增长而同步增长, 电网供需矛盾比较突出。为此, 针对宜宾电网现状及 2008 年迎峰度夏期间电网结构, 按照与电网安全相关的负荷水平、断面潮流、单一元件切除后设备过载能力以及进行必要事故限电等情况进行了分析, 提出解决建议。

关键词:电网; 夏季方式; 分析

Abstract: In recent years the load growth of Yibin Power Grid is rapid but the power supply of the power grid is not growing with the simultaneous increase in growth of load capacity so the power grid has more prominent contradictions between supply and demand. To this end, aiming at the status of Yibin Power Grid and its structure during the summer peaks in 2008, some conditions are analyzed, such as load levels related to power grid security, the trend of cross-section, overload capacity of equipment after the removal of a single component and the necessary emergency load shedding, and then the suggestions are proposed.

Key words: power grid; operation in summer; analysis

中图分类号: TM714 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)02—0044—04

宜宾电网作为四川电网的组成部分, 地处四川电网的南部, 通过四条 220 kV 线路与乐山、自贡、泸州电网相联, 并通过 220 kV 叙江南 (北) 线经叙府变电站主变和四川电网 500 kV 系统联网。

宜宾电网的主要电源是区内黄桷桩电厂、宜宾电厂、张窝水电厂, 500 kV 叙府站 (1×1000 MVA) 和 220 kV 龚山线、孜平线。

正常运行方式下, 宜宾电网分为西部 (豆坝电厂、屏山) 片区, 中部 (白沙、孜岩) 片区, 南部 (江南、龙头、北荆坝) 片区等三个供电区域, 各供电区域内采用分层、分区呈辐射状供电方式, 各供电区域之间为环网接线、开环运行。

2007 年宜宾电网运行主要存在问题:

1) 电网断面过载现象时有发生。由于豆坝电厂机组的部分关停, 而 220 kV 豆坝变电站未能及时修建, 导致屏山—豆坝片区断面时常过载。

2) 电网建设滞后用电负荷增长, 电网供需矛盾突出。220 kV 输变电设备重载和过载现象严重, 部分单线、单变或单线运行等情况仍不时威胁电网的安全稳定运行。

3) 区内三个发电厂机组的开机方式和运行状况对宜宾电网的稳定运行影响较大。2007 年多次发生因电厂机组突然故障停机, 引起输变电设备超稳定限额的事件。

1 宜宾电网 2008 年夏季典型负荷分析

2008 年宜宾电网统调发电容量为 710 MW, 根据《2008 年四川电网稳定运行规定》和《宜宾电力系统 2008 年度运行方式》确定的电网运行接线方式, 在保持全接线运行时, 通过采用特殊运行方式后, 输送能力能满足用电需求, 但主要输变电设备停电后, 即使采用特殊运行方式仍不能满足用电需求, 高峰时段需要避峰限电。

1.1 700 MW 负荷水平潮流分析

以 7 月 1 日 17:45 数据为例, 宜宾电网负荷 703 MW, 区内电厂发电出力 195 MW, 宜宾断面联络线交换功率送进 508.17 MW, 送出 0 MW, 净送进 508.17 MW。

表 1 2008 年 7 月 1 日宜宾电网主要断面潮流 MW			
断面名称	断面功率	断面极限	负载率/%
豆坝—屏山片区	174.97	160	109.36
220 kV 白沙站主变	181.79	216	84.16
220 kV 龙头站主变	82.66	160	51.66
220 kV 孜岩站主变	102.51	135	75.93
220 kV 江南站主变	126.03	135	93.36
220 kV 屏山站主变	91.59	135	67.84
110 kV 龙巡东 (西) 线	41.28	96	43.00
500 kV 叙府站主变	344.92	900	38.32
宜宾断面	508.17	600	84.70

表 2 2008 年 7 月 1 日宜宾电网区内电厂开机情况表 MW

	黄桷庄	宜宾电厂		张窝	高县 (地方)	九河 (地方)	合计
		11 号	12 号				
装机容量	400	100	150	60	51	19	780
停机备用	400	100	0	0	0	0	500
实际上网	0	0	120	43.34	20.35	11.12	194.81
实际下网	0	0	0	0	0	0	0

表 3 2008 年 7 月 1 日宜宾电网地区间功率交换表 MW

方式	宜宾—乐山	宜宾—自贡	宜宾—泸州	合计
送进	120.56	59.37	20.69	200.62
送出	0	0	0	0

通过上表可以看出在 700 MW 负荷水平时宜宾电网区内开机 200 MW 情况下能保持潮流稳定,各线路及设备均能满足系统运行要求,无须对系统进行调整。但对于白沙、江南站主变以及宜宾断面仍需加强监视防止断面过载,特别是豆坝—屏山片区高峰时段还存在短时过载。

1.2 800 MW 负荷水平潮流分析

以 7 月 17 日 11:45 数据为例,宜宾电网负荷 797 MW,区内电厂发电出力 315 MW,宜宾断面联络线交换功率送出 19.53 MW,送进 502.58 MW,净送进 483.05 MW。

表 4 2008 年 7 月 17 日宜宾电网主要断面潮流 MW

断面名称	断面功率	断面极限	负载率%
豆坝—屏山片区	156.71	160	97.84
220 kV 白沙站主变	167.66	216	77.62
220 kV 龙头站主变	170.56	160	106.60
220 kV 孜岩站主变	114.74	135	84.99
220 kV 江南站主变	112.96	135	83.67
220 kV 屏山站主变	84.05	135	62.26
110 kV 龙巡东(西)线	95.46	96	99.44
500 kV 叙府站主变	377.83	900	41.98
宜宾断面	483.05	600	80.51

表 5 2008 年 7 月 17 日宜宾电网区内电厂开机情况表 MW

	黄桷庄	宜宾电厂		张窝	高县 (地方)	九河 (地方)	合计
		11 号	12 号				
装机容量	400	100	150	60	51	19	780
停机备用	0	100	150	0	0	0	250
实际上网	254.77	0	0	60.3	0	0	315.07
实际下网	0	0	0	0	30.25	2.61	32.86

表 6 2008 年 7 月 17 日宜宾电网地区间功率交换表 MW

方式	宜宾—乐山	宜宾—自贡	宜宾—泸州	合计
送进	117.04	7.71	0	124.75
送出	0	0	19.53	19.53

通过上表可以看出在 800 MW 负荷水平时宜宾电网区内开机要在 300 MW 以上才能保持潮流稳定,系统断面不过载,同时需要对电网局部方式进行调整

才能平衡线路及设备负荷,但已有部分线路或设备在高峰时短时超限,对此必须引起足够重视。

1.3 900 MW 负荷水平潮流分析

以 7 月 25 日 16:40 数据为例,宜宾电网负荷 899.7 MW,区内电厂发电出力 390 MW,宜宾断面联络线交换功率送出 13.72 MW,送进 524.27 MW,净送进 510.55 MW。

表 7 2008 年 7 月 25 日宜宾电网主要断面潮流 MW

断面名称	断面功率	断面极限	负载率%
豆坝—屏山片区	158.39	160	98.99
220 kV 白沙站主变	206.29	216	95.51
220 kV 龙头站主变	195.55	160	122.22
220 kV 孜岩站主变	138.19	135	102.36
220 kV 江南站主变	113.77	135	84.27
220 kV 屏山站主变	97.45	135	72.19
110 kV 龙巡东(西)线	104.27	96	108.62
500 kV 叙府站主变	402.20	900	44.69
宜宾断面	510.55	600	85.09

表 8 2008 年 7 月 25 日宜宾电网区内电厂开机情况表 MW

	黄桷庄	宜宾电厂		张窝	高县 (地方)	九河 (地方)	合计
		11 号	12 号				
装机容量	400	100	150	60	51	19	780
停机备用	0	100	0	0	0	0	100
实际上网	244.86	0	80.60	64.32	0	0	389.78
实际下网	0	0	0	0	35.36	1.94	37.30

表 9 2008 年 7 月 25 日宜宾电网地区间功率交换表 MW

方式	宜宾—乐山	宜宾—自贡	宜宾—泸州	合计
送进	112.02	10.05	0	122.07
送出	0	0	13.72	13.72

通过上表可以看出在 900 MW 负荷水平时宜宾电网区内开机要在 400 MW 左右才能保持潮流稳定,系统断面不过载,但是由于系统大部分输电线路和主变压器均已满载或超载运行,安全形式十分严峻,必须加大对设备的巡查力度,做好事故预想,防止因某一设备退出运行后引起连锁反映,导致系统大面积停电。

2 宜宾电网断面安全分析

2008 年随着豆坝电厂的全部关停,宜宾西部电网失去了一个重要的电压支撑点,加上电网建设速度不能满足地区负荷高速增长的需求,夏季高峰期存在宜宾局部电网部分设备重载运行、N-1 故障后元件重载、过载以及电压低的问题,加上实施节能发电调度也增加了保证电网安全稳定运行的难度。

2.1 豆坝—屏山片区安全分析

由于豆坝电厂机组的全部关停豆坝一屏山片区断面限额急剧下降,根据省调对豆坝电厂全停后豆坝一屏山变电站断面功率线限额的要求:220 kV 龚山线+豆沙线断面的稳定限额为 160 MW,豆坝站下网有功不超过 75 MW。而豆坝、屏山片区主供 110 kV 变电站 11 座,根据负荷预测水平分析,豆坝和屏山片区的断面潮流将达到 20.9 万 kW,超过该片区的安全稳定限额。

为解决在豆坝站下网有功不超过 75 MW 问题,可在豆坝与屏山之间可相互倒换电源的建新、马延坡和金石进行相互倒换;为解决豆坝一屏山片区过载问题可采用增加张窝、九河电厂出力,将天池站部分负荷转移到白沙片区供电或采用限电等方式控制。

如出现区内 220 kV 龚山线、山豆线、豆沙线任一线路停电,为保持豆坝一屏山片区电压稳定,防止发生电压崩溃,必须使 220 kV 电压维持在 228 kV 以上,事故情况下不低于 215 kV,否则需采取限电措施,来维持 220 kV 母线电压。

2.2 白沙一孜岩片区断面安全分析

白沙一孜岩片区潮流受宜宾电厂 11 号机开停影响较大,正常方式下 220 kV 孜岩站主变供 110 kV 变电站 7 座,220 kV 白沙站主变供 110 kV 变电站 9 座,按照方式安排白沙站 2×120 MVA 主变下网有功限额为 160 MW,孜岩变电站 150 MVA 主变下网有功限额为 135 MW,但在 2008 年夏季期间由于宜宾电厂 11 号机组因发电机端部漏水停机,增大了白沙站下网负荷,导致白沙一孜岩片区断面超限,2008 年夏季白沙站主变最大下网负荷 226 MW,孜岩站主变最大下网负荷 149 MW 均超过设备运行限额。

因此,在迎峰度夏期间,需安排宜宾电厂 11 号机开机运行,并且发电出力大于 80 MW,电网才能确保按正常运行方式运行,不超限。若出现白沙站或孜岩站单一设备过载可采用调整城中、方水、鹭州等变电站倒换电源方式来调整负荷分配,或将 110 kV 大观站和王场电铁站负荷 (23 MW) 调自贡供电。若出现白沙~孜岩片区断面超限,可对天原等大宗用电负荷进行限电。

2.3 220 kV 江南一龙头一北荆坝片区安全分析

220 kV 江南一龙头一北荆坝片区为宜宾南部电网,负荷易受小水电来水影响,如 8 月 6 日的一场雷雨宜宾南部电网负荷从 289 MW 降至 8 月 7 日的 204 MW,共下降 85 MW,降低 29.41%。

表 10 8 月 5 日与 8 月 7 日负荷比较表					MW
变电站	江南	龙头	北荆坝	110 kV 龙巡东 (西) 线	合计
8 月 5 日	108	170	16	108	294
8 月 7 日	103	96	5	63	204
降低额度	5	74	11	45	89
降低百分比 %	4.63	43.53	68.75	41.67	30.27

从上表可以看出:宜宾南部电网因小水电众多,受降水影响较大,一次大范围的降水将使负荷水平大幅度的下降。

表 11 宜宾南部电网夏季最大负荷统计表					MW
变电站	江南	龙头	北荆坝	110 kV 龙巡东 (西) 线	
断面限额	135	160	100	96	
最大负荷	130	200	19	113.3	
负载率 %	96.30	125	19	118	

220 kV 江南站为单台主变,供有 7 座 110 kV 变电站,根据负荷预测水平分析,220 kV 江南站 1 号主变负荷电流将达到 420 A,超过主变额定允许电流,即 393 A,在运行中可采取将 110 kV 南溪站 110 kV I 母负荷 (包括 110 kV 阳春坝站负荷共 23 MW) 调泸州 220 kV 玉观站供电;限制江南站供区高耗能负荷的方式进行负荷控制。

220 kV 龙头站主变供 9 座 110 kV 变电站,其中,经 110 kV 龙巡东 (西) 线供电的有 6 座 110 kV 变电站,因此,只要将 110 kV 龙巡东 (西) 线负荷控制住,龙头站主变也就不会过载,在运行中可要求高县电力公司的来复电站、油灌口电站必须保持足够的调节水位,按调度命令做好调峰工作,原则上油灌口电站应保持 351.5 m 以上的发电水位,来复电站应保持 311 m 以上的发电水位,也可以将 110 kV 高县站、庆符站负荷调北荆坝站或 110 kV 天池站供电。

北荆坝站由于电网结构不满足 N-1 的需要,因此,北荆坝站所带负荷不重,未能发挥应有作用。

2.4 叙府站主变及宜宾断面安全分析

宜宾电网主要依靠 500 kV 叙府变电站和 220 kV 龚山线、孜平线以及沙玉南 (北) 线和区内三座发电厂供电,正常情况下黄桷庄、宜宾电厂分别各开一台机组运行时,主网送入宜宾电网潮流较轻,能够控制在稳定限额内。仅在高峰时段豆坝、屏山电压偏低,承受 220 kV 豆沙线 N-1 的故障能力较差,要求屏山+豆坝负荷控制在 160 MW 以内。

2.4.1 500 kV 叙府变电站主变停电

由于节能调度的需要,宜宾电网区域内只安排两台火电机组来保持系统潮流不越限和电压稳定,这时

500 kV 叙府变电站主变将承担宜宾电网 1/3~1/2 的负荷,如出现 500 kV 叙府变电站主变突然停电,将使宜宾电网出现大范围的限电,同时宜宾电网电压不能保持稳定。

- 2.4.2 220 kV 龚山线、孜平线任一线路停电
- 220 kV 龚山线和孜平线作为宜宾电网对外联系的主要联络线在任意一回线路停电后,将使宜宾、泸州电网断面稳定限额降低 100 MW,届时宜宾、泸州电网分别按 3:1 比例削减负荷。
- 2.4.3 区内电厂全停
- 黄桷庄及宜宾电厂作为宜宾电网重要电源点和电压支撑点,若发生全停事故,将会导致宜宾地区电压普遍低于 220 kV 以下,龙头、北荆坝地区电压最低到 206 kV,严重威胁系统安全。

3 结论及建议

(上接第 16 页)

[7] Djokic S Z, Desmet J, Vanalme G, et al. Sensitivity of personal computers to voltage sags and short interruptions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (1): 375—383.

[8] Djokic S Z, Stockman K, Milanovic J V, et al. Sensitivity of ac adjustable speed drivers to voltage sags and short interruptions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (1): 494—505.

[9] Djokic S Z, Milanovic J V, Kirschen D S. Sensitivity of ac coil contactors to voltage sag, short interruptions and undervoltage transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19 (3): 1299—1307.

[10] 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—37.

[11] 陈志强. 敏感设备受电压暂降影响分析 [D]. 中国台湾国立中山大学硕士论文, 2005, 7.

[12] Milanovic J V, Gupta C P. Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags—part I: the methodology [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (2): 918—924.

[13] Milanovic J V, Gupta C P. Probabilistic assessment of fi-

综上所述,2008 年 500 kV 叙府变电站 2 号主变未投运和 220 kV 未形成环网前,宜宾电网供电能力将不能满足电网用电需求,正常及检修方式下均有断面过载和设备过载以及电压支撑不足的问题,电网将继续面临负荷控制。

鉴于目前电网存在问题,应加快建设 220 kV 城南站、豆坝站,220 kV 叙荆线,山孜线形成 220 kV 环网,以增强电网受电能力,解决电网供电能力不足问题。完善地区 110 kV 网络建设,改变电力输送受阻局面,同时重视地区电网无功平衡,防止发生电压崩溃。

作者简介:

刘 勤 (1968—),男,四川宜宾人,工程师,高级调度员,从事电网运行工作。

(收稿日期: 2009—02—10)

nancial losses due to interruptions and voltage sags—part II: practical implementation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (2): 925—932.

[14] P. Pohjanheimo and M. Lehtonen. Equipment sensitivity to voltage sags—test results for contactors, PCs and gas discharge lamps [C]. Proceeding of 2002 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power Brazil 2002, pages 559—563.

[15] Gupta C P, Milanovic J V. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (2): 711—718.

[16] Chan—Nan Lu, Cheng—Chieh Shen. Estimation of Sensitive Equipment Disruptions Due to Voltage Sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22 (2): 1132—1137.

作者简介:

李 皖 (1987—),女,硕士研究生,研究方向:电能质量及其控制技术。

陈卫东 (1985—),男,硕士研究生,研究方向:电能质量及其控制技术。

肖先勇 (1968—),男,副教授,硕士生导师,长期从事电能质量及其控制的教学与研究。

(收稿日期: 2008—12—18)

基于继电保护信息管理系统的隐藏故障分析

王 伟¹, 余 锐¹, 熊小伏², 刘晓放²

(1. 四川电力公司调度中心, 四川 成都 610041; 2. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400030)

摘 要:继电保护系统的隐藏故障对电网的运行威胁很大,而隐藏故障的诊断十分困难。论文对继电保护信息管理系统的结构及功能进行了说明,提出利用继电保护信息系统对继电保护装置进行监测从而发现其隐藏故障的新方法。对继电保护的動作特性进行了划分,建立了保护装置测量回路存在隐藏故障的判据,对利用故障录波信息进行动态特性检测进行了探讨。

关键词:继电保护; 信息系统; 隐藏故障; 状态诊断

Abstract: The operation of power grid is seriously threatened by the hidden failures of relay protection systems, however, the diagnosis of hidden failures is quite difficult. The structure and function of relay protection information management system are described, and a new method of detecting the hidden failures through monitoring protective devices using relay protection information management system is proposed. Operating characteristics of relay protection is analyzed, the criterion of the hidden failures in measurement circuit of protective devices is established and the dynamic characteristics of relays are discussed by use of fault record information.

Key words: relay protection; information management system; hidden failures; fault diagnosis

中图分类号: TM769 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003—6954(2009)02—0054—08

随着电网的不断发展,电力系统对安全、稳定、经济运行的要求越来越高。及时、准确分析故障和保护动作信息,充分利用故障数据信息,对提高继电保护及安全自动装置的运行水平有极其重要的意义。随着微机型继电保护装置、微机型故障录波器等数字式设备在电网中的普遍使用,在电力系统发生故障时,保护和故障录波器均具备了以数据方式上传故障信息的可能。为了提高电网安全运行的调度系统信息化、智能化水平,在电网发生故障时为调度提供实时故障信息,有效地快速恢复系统,继电保护信息管理系统的建设得到了相当的重视。继电保护信息管理系统将数字式保护和故障录波器的信息来源有效地关联,使这些信息更加同步、完整,提高了分析电网故障的效率,使二次装置的综合管理、分析、应用水平不断提高,并逐渐产生了良好的经济效益及作用^[1-2]。

由于继电保护信息系统所获取数据的同步性、实时性和可靠性都比较高,通过对比继电保护装置的测量值与其他参考值之间的差异,有望实现对继电保护装置运行情况的监控。

为此,提出将继电保护隐藏故障监视功能融入继电保护信息系统,以继电保护装置信息为诊断输入进行继电保护系统隐藏故障诊断的新方法。由于扩展了信息来源,继电保护的工作状况特别是测量回路的隐藏故障诊断将变得可行。

1 继电保护信息系统的结构

1.1 继电保护信息系统的结构

根据电力系统本身的结构特点,继电保护信息管理系统具有层次化的体系,由主站和多个子站构成,形成一个完整的分层、分布式系统^[3-4]。继电保护信息管理系统主要用于对电网的事故分析与处理,以及对保护设备的动作行为详细分析,具有事故处理决策支持、保护动作系统性分析、设备异常及时报警及其他应用的数据支撑等基本功能^[5],其结构如图 1 所示。

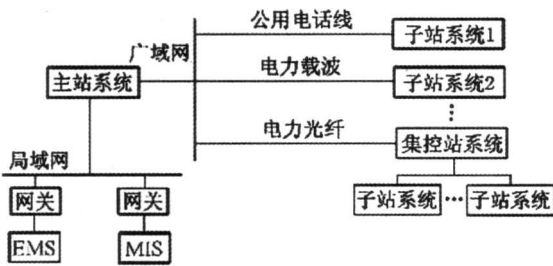


图 1 继电保护信息管理系统结构图

主站系统不间断地监视各继电保护和故障录波设备的运行,并通过对保护动作情况历史数据的积累分析,综合对保护运行状态的监视,对保护系统的运行状况作出判断;在电网发生故障时,主站系统收取

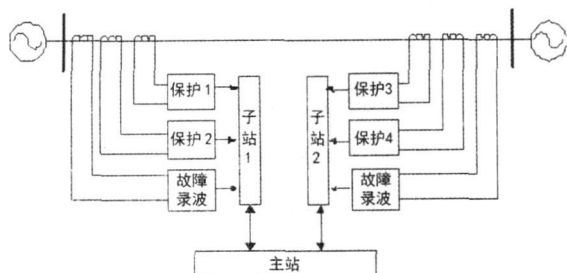


图 3 隐藏故障诊断基本原理

3.1.1 静态特性诊断

通常,继电保护装置采集模拟量、开关量作为其动作的输入。对开关量采集环节的监视可通过装置自身的硬件来实现,而对模拟量采集(测量值)回路的监视则难以实现。

继电保护装置的测量回路包括 TA、连接电缆、端子、继电保护装置内部的前置变送器、滤波电路、A/D 转换及 CPU、存储器等多个环节。任一环节的失效或误差增大,均将导致测量值不准。对继电保护静态特性的监视最重要的是监视其测量值的准确性是否发生变化。

若能获得另外一个或多个元件的测量计算值作为参考量,将继电保护装置的测量计算值与其进行比较,所得结果应该基本相同。当二者之差超过预先设定的门槛值,则认为继电保护装置的静态特性出现了隐藏故障。考虑到在目前的高压及超高压电网中,继电保护装置已经基本实现从互感器到跳闸线圈的双重化配置,可以利用继电保护信息管理系统获取测量对象有逻辑关系的多套继电保护装置(如同一线路两端各配置的两套保护)的测量计算值,对这些测量计算值进行相互比较,即可对继电保护装置的静态特性进行诊断。

目前,要实现上述功能,尚须解决继电保护装置的信息开放性问题。由于现有继电保护装置在未启动的情况下不会向外送出任何信息,这就意味着在电网中没有故障或扰动时,继电保护信息管理系统主站无法对继电保护装置进行监视。为此,应由生产厂家对继电保护装置的软件进行改进,使装置能将测量计算值及时上传至继电保护信息管理系统主站。

3.1.2 动态特性诊断

当电网中发生故障或出现较大的扰动时,继电保护和故障录波装置都会启动并记录下相应的启动信息,包括各回路的三相电压、三相电流、故障发生时刻、保护动作类型及保护出口时间、开关动作时间等原始信息,由这些原始信息还可以计算出电压电流的

负序和零序分量、测量阻抗、故障类型、故障距离等。所有的这些信息在现有的装置中都是对外开放的,可以很容易地从继电保护和故障录波装置获取。

由于继电保护和故障录波装置的启动信息都是对电网故障的反映,因此二者之间有着必然的关联关系。按照事先确定的关联关系对这些信息进行分析计算,可以诊断继电保护系统中是否存在保护原理、整定值、故障量计算、逻辑判断以及跳闸出口回路等环节的隐藏故障,从而实现对继电保护动态特性隐藏故障的诊断。

按照上述思路扩充继电保护信息管理系统的功能后,在变电站内,继电保护信息子站与各继电保护装置及故障录波器之间通过高速通信网相连,收集本变电站内继电保护装置和故障录波器的测量计算信息,可实现站内继电保护设备的隐藏故障诊断,但不能实现站间保护的诊断;通过继电保护及故障信息管理系统主站,可同时收集电网内不同地点继电保护装置的测量信息和当地的测量装置测量信息,实现对多端信息继电保护系统的隐藏故障诊断。

3.2 基于继电保护信息系统保护装置测量回路诊断

继电保护装置测量回路的准确测量对保证保护系统的正常运行起着决定性的作用。为了对测量回路中的隐藏故障进行诊断,按照前述的静态特性隐藏故障诊断方法,在继电保护信息管理系统对测量对象有逻辑关系的多套继电保护装置的测量计算值进行运算,以运算结果作为保护是否存在隐藏故障的判断。

在系统未发生故障的情况下,各套保护装置对同一电气量的测量计算结果应该相同。若有某一套保护装置的结果与其他装置相差超过一定程度,则可以判断为其测量回路存在隐藏故障。

以 X_i 代表各套保护装置测量值, $i=1, \dots, n$ 为测量值数量。在进行数据处理时,为简化分析,只考虑 X_i 中有一个发生错误的情况。

按以下步骤进行隐藏故障诊断:

求本组测量值的均值:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

计算各测量值对均值的距离:

$$d_i = X_i - \bar{X} \quad (2)$$

找出 d_i 中绝对值最大者 d_j :

$$d_j = \max \{ |d_i| \}, 1 \leq j \leq n \quad (3)$$

找出 d_j 对应的采样值 X_j , 计算不包括 X_j 的测量值均值:

$$\bar{X}' = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1, i \neq j}^n X_i \tag{4}$$

设 $\Delta\epsilon_{nl}$ 为隐藏故障报警门槛值, 当连续多组采样值均有下式成立时:

$$\frac{|X_j - \bar{X}'|}{|\bar{X}'|} > \Delta\epsilon_{nl} \tag{5}$$

则可确定第 j 个测量值对应的保护装置测量回路异常。

3.3 基于故障录波信息的保护动作行为分析

电力系统故障录波装置是自动记录电力系统事故和振荡的发生、演变以及恢复正常运行全过程的重要设备。它可以记录电力系统发生大扰动时继电保护与安全自动装置的动作行为。将继电保护装置的故障动作数据与故障录波装置所记录下参数波形和数据进行比较, 能及时地发现继电保护装置中的隐藏故障。

在进行数据比较时, 主要可以作如下内容的分析:

- 1) 利用故障录波数据计算保护动作判据与保护装置实际动作行为是否一致;
- 2) 负序、零序等分量的是否与故障录波结果一致;
- 3) 动作值与整定值是否满足逻辑关系;
- 4) 断路器实际动作情况与继电保护装置跳闸出口命令是否吻合;
- 5) 在电网发生复杂故障时, 保护装置的动作是否合理。

其中, 对保护装置实际动作判据及行为的分析过程如图 4 所示, 其他的分析过程与此类似。

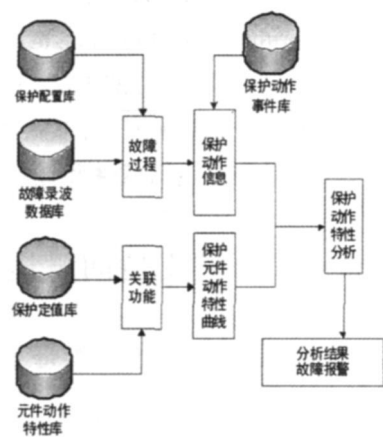


图 4 保护动作特性分析过程

4 结 论

继电保护隐藏故障的诊断是一项十分困难的工作。从继电保护的机理出发, 将继电保护隐藏故障诊断划分为两个环节, 即静态特性监视和动态特性, 并进而提出获取建立继电保护装置外部参考信息, 实现对继电保护装置隐藏故障的诊断。

由于继电保护信息管理系统能够获取广域范围的继电保护及故障录波装置的动作信息, 提出了以利用继电保护信息管理系统实现继电保护隐藏故障诊断的思路, 建立了相应判据, 这对于扩展继电保护信息管理系统功能、提高电力系统运行可靠性将具有积极的作用。

参考文献

- [1] 倪益民, 丁杰, 赵金荣, 等. 电网继电保护及故障信息管理系统的设计与实现 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 86—88.
- [2] 袁宇波, 丁俊健, 陆于平, 等. 基于 Internet/Intranet 的电网继电保护及故障信息管理系统 [J]. 电力系统自动化, 2001, (17): 39—42.
- [3] 王振树, 张波, 孟昭勇. 电力系统继电保护及故障信息子站系统的方案设计 [J]. 继电器, 2006, 34(7): 65—69.
- [4] 黄树帮, 叶留金, 袁宇波, 等. 电网继电保护及故障信息处理主站系统的设计和实现 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 88—92.
- [5] 任建文, 周明, 李庚银. 电网故障信息综合分析及管理系统的研究 [J]. 电网技术, 2002, 26(4): 38—41.
- [6] 甘德强, 胡江溢, 韩祯祥. 2003 年国际若干停电事故思考 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 1—4.
- [7] Surachet Tamronglak. Analysis of Power System Disturbances due to Relay Hidden Failures[D]. Blacksburg Virginia Polytechnic and State University, 1994.
- [8] 朱永利, 宋少群, 朱国强, 等. 地区电网保护定值在线校验智能系统 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 87—92.
- [9] J. De La Ree, Y. Liu, L. Mili, 等. Catastrophic failures in power systems: causes analyses and countermeasures [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 956—964.

作者简介:

余 锐 (1976 —), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护和配电网自动化。

(收稿日期 2008—12—03)

主副线带开关的分支箱结构优化配网结构

曾勇波, 张 玻, 杨 钧

(德阳电业局广汉供电局, 四川 德阳 618000)

摘 要:在主副线环网结构的基础上, 提出了主副线带开关的分支箱结构。该结构具有主副线环网结构的主要优点, 在满足可靠性要求的基础上, 用开关和分支箱取代环网柜, 减少了一次性投资, 具有可操作性。最后以广汉供电局的 10 kV 广连路和 10 kV 炳城一路来进行实例分析。

关键词:城市配网; 主副线环网结构; 主副线带开关的分支箱结构; 供电可靠性; 配网自动化

Abstract: Based on the ring main structure of main and auxiliary lines the branch-boxing structure with switch of main and auxiliary lines is presented which have the special advantages of the main and auxiliary loop lines. On the basis of meeting the requirements of reliability using branch box and switch to replace the ring main unit has reduced one-time investment and has been put into practice. Finally the cases of 10 kV Guang-lian line and 10 kV Bing-cheng line of Guanghan Power Supply Bureau are analyzed.

Key words: distribution network; ring main structure of main and auxiliary lines; branch-boxing with switch network structure of main and auxiliary lines; power-supply reliability; automation of distribution network

中图分类号: TM645 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0048-03

随着电力改革的不断深入和发展, 电力企业作为电力行业的主体、经济建设的服务者、以建设“一强三优”为经营主体、以“优质服务”为社会形象; 一方面需要不断提高电力员工的综合素质, 另一方面需要不断优化网络结构, 不断提高操作应用技术, 建设坚强的电网。以此, 来提高服务质量、电能质量以及供电可靠性。其中供电可靠性作为电力经营的重要指标, 越来越受到关注和重视, 同时为全面贯彻国网公司增供促销精神, 深化优质服务理念, 减少停电时间、次数以及一次停电面积, 增加售电量, 也需要提高供电可靠性, 而可靠性的提高, 最重要的一环是需要不断优化网络结构。

主副线环网结构很大程度上减少了停电用户数, 提高了供电可靠性。但由于其投资中有环网柜的存在, 其一次性投资较大。在主副线环网结构的基础上, 提出了用带开关的高压分支箱来代替环网柜, 在保证供电可靠性和灵活性的基础上, 减少了一次性建设成本。同时采用主副线带开关的分支箱结构给灵活供电提供了基础, 可以使不同的线路间能够灵活的进行互供互送, 并为合环操作提供了有利的网络基础。

1 主副线带开关的分支箱结构

主副线带开关的分支箱的线路结构, 即在主副线

环网结构的基础上, 用带开关的高压分支箱来代替环网柜, 在拥有主副环网结构的主要优点的同时, 但投资却经济了很多, 下面结合电气接线示意图进行具体分析和说明, 其电气接线示意图如图 1 示。

该结构的线路特点是: 主线 (电缆或架空绝缘导线), 自变电站出线沿城市主干道至另一变电站出线的联络 (通过高压分支箱和开关联络); 高压分支箱和开关设置在路口, 从主线 T 接进线或将主线开断分支箱进线, 分支箱的各支线通过开关出线, 各支线称为副线; 对于架空网络, 城市主干道为主、副线双回同杆架设, 一般街道为副线单回架设, 通过一个柱上断路器与另一条线路的副线联络; 所有用户接副线, 主线不接任何用户, 包括公用配电变压器。

1.1 可靠性方面

1) 停电范围小。当任一用户设备发生故障时, 该副线断路器保护动作, 该副线被隔离。变电站重合闸动作后, 其它用户全部恢复供电。计划检修和业扩接电时, 只需停副线断路器。假设分支箱都是一进四出, 每条副线所分配的负荷都一样, 每次停电, 一次只需停 1/6 的负荷。

2) 主线由于沿线不接任何用户, 也不装柱上断路器等其它设备, 因此不存在计划检修停电, 本身故障率也几乎为零。

3) 采用这种结构, 线路间互供互送将非常方便

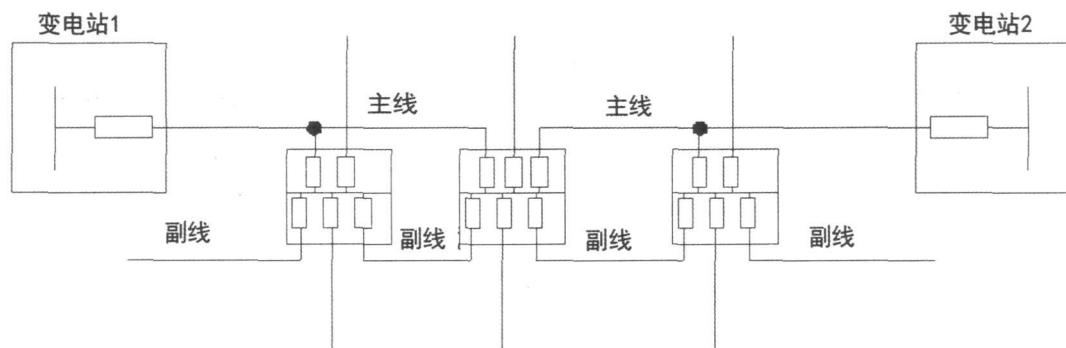


图 1 主、副线带开关的分支箱结构示意图

和灵活,一条线路的 1、5/6、4/6、3/6、2/6、1/6 的负荷可灵活向另一条线路转移。

1.2 方便运行维护

1)由于断路器等都集中在一起,运行维护也非常方便,还可将杆上断路器落地入室,事故处理不需要爬杆,还能够在特殊天气下操作,可以大大提高事故处理速度,缩短事故停电时间,从而进一步提高供电可靠性。

2)由于断路器等都集中在一起,通过对断路器加装电动操作机构和远方控制终端,将非常容易实现配网自动化的各种功能。

1.3 经济性方面

1)和普通的线路相比,一次性建设投资增加了,但和主副环网结构相比就经济多了,下面通过计算比较。

假设两条线路全长 6 km,主线均采用 240 绝缘线。普通的“手拉手”结构分两段线路,线路用断路器 3 台;主副环网结构有环网柜 3 座,断路器 2 台,主线为同塔双回结构;主副分支箱结构有分支箱 3 台,断路器 8 台,主线为同塔双回结构。主线一次性建设费用:

普通结构: $6 \times 40 + 3 \times 3 = 249$ (万)

每公里费用: $249 \div 6 = 41.5$ (万)

环网结构: $6 \times 48 + 3 \times 40 + 2 \times 3 = 426$ (万)

每公里费用: $249 \div 6 = 69$ (万)

分支箱结构: $6 \times 48 + 8 \times 3 + 3 \times 2 = 330$ (万)

每公里费用: $330 \div 6 = 53$ (万)

从上面计算可知,采用主副线分支箱结构的费用和普通“手拉手”结构每公里只增加了 11.5 万左右,但和主副环网结构相比每公里节约了 16 万左右。

2)对于小容量用户申请专线供电的,可由附近的分支箱出线,既可减少用户的投资,又解决了用户专线大量占用变电站间隔和公用线路走廊的问题。

3)在未来经济条件许可、城市配网实现电缆化

时,只需把架空主、副线换为电缆沿原有路径埋管入地,不会造成浪费。

以上对主副线分支箱结构的线路特点及其优点进行了说明,下面结合实际线路进行分析,选取线路为德阳电业局广汉供电局城网的 10 kV 广连路和 10 kV 炳城一路。

2 实例分析

上面已经阐述了主副线分支箱结构的线路特点及其优点,现在选取德阳电业局广汉供电局城网的 10 kV 广连路和 10 kV 炳城一路进行实例分析,来充分论证该线路结构的优特点和经济特点。

2.1 线路的基本现状

线路的基本现状:广连路使用 240 mm² 绝缘线,长约 3.1 km,炳城一路长约 4.4 km,其中 185 mm² 绝缘线 1.2 km, LGJ-120 mm² 线 3.2 km;炳城一路 2007 基本负荷为 4 000 kW,广连路 2007 基本负荷为 5 000 kW。下面给出它们的负荷分配的电气示意简图如图 2 示。假设线路的基本情况不变,仅将现在的线路结构改为主副线分支箱结构,其线路连接情况示意图如图 3 示。

2.2 不同结构线路优缺点对比

对于主副线环网结构的线路,就是用环网柜来代替高压分支箱和开关,其他结构基本一致,因此在结构优缺点比较上,只用主副线分支箱结构和线路现在的结构进行对比,只在经济上进行对比。

2.2.1 可靠性方面

1)停电范围。现结构一次停电:10 kV 广连路为 1 005 kVA 或 6 275 kVA,10 kV 炳城一路为 4 960 kVA、2 315 kVA 或 8 425 kVA。

主副线分支箱结构一次停电:10 kV 广连路为 1 820

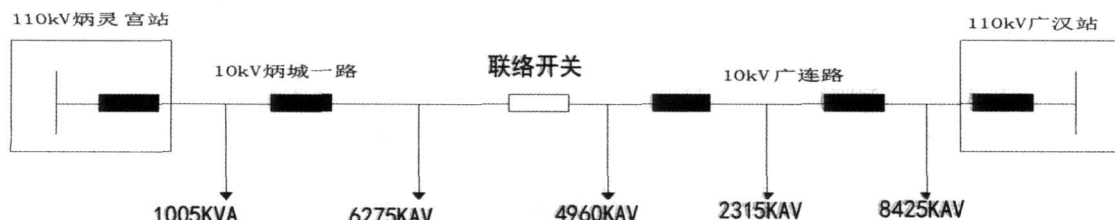


图 2 线路负荷及连接情况示意图

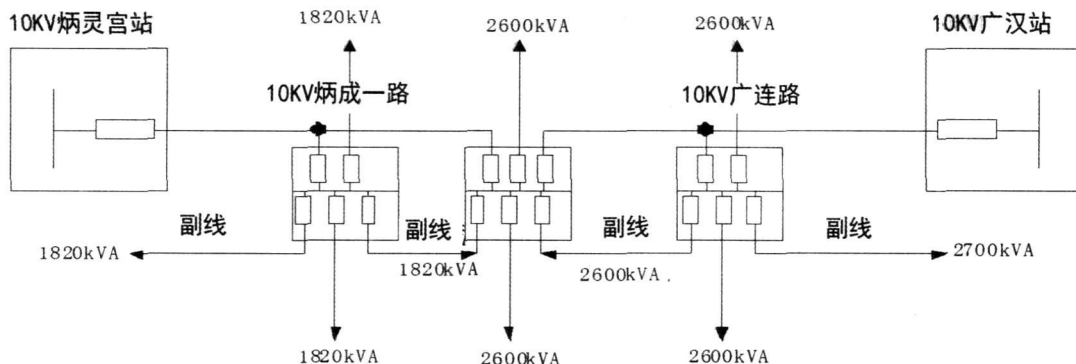


图 3 改为主、副线带开关的分支箱结构后连接示意图

kVA, 10 kV 炳城一路为 2 600 kVA。

2) 停电次数。现结构主线停电次数 (2007 年): 10 kV 广连路为 9 次, 其中一段 4 次, 二段 2 次, 三段 3 次; 10 kV 炳城一路为 7 次, 其中一段 2 次, 二段 5 次。

如上述主副线分支箱结构主线由于沿线不接任何用户, 也不装柱上断路器等其它设备, 因此不存在计划检修停电, 本身故障缺陷率也几乎为零, 新接用户只需要在副线上接入, 主线基本可以实现不停电。

在可靠性提高的同时, 主副线分支箱结构因停电产生的电量损失也会减少, 假设每次停电时间为 8 h, 载容比为 0.8, 功率因数为 0.9, 则电量损失分别为现结构:

$$10 \text{ kV 广连路: } (8425 \times 4 + 2315 \times 2 + 4960 \times 3) \times 0.8 \times 0.9 \times 8 = 30.6 (\text{万度})$$

$$10 \text{ kV 炳城一路: } (6275 \times 4 + 1005 \times 2) \times 0.8 \times 0.9 \times 8 = 15.6 (\text{万度})$$

$$\text{共: } 30.6 + 15.6 = 46.2 (\text{万度})$$

主副线分支箱结构:

$$10 \text{ kV 广连路: } 2700 \times 9 \times 0.8 \times 0.9 \times 8 = 14 (\text{万度})$$

$$10 \text{ kV 炳城一路: } 1820 \times 7 \times 0.8 \times 0.9 \times 8 = 7.3 (\text{万度})$$

$$\text{共: } 14 + 7.3 = 21.3 (\text{万度})$$

2.2.2 经济性方面

和普通的线路相比, 一次性建设投资增加了, 但和主副环网结构相比就经济多了, 根据上面给出的数据, 下面通过计算进行比较。

从上面计算可知, 采用主副线分支箱结构的费用和普通“手拉手”结构每公里只增加了 9.5 万左右, 但和主副环网结构相比每公里节约了 12.8 万左右; 但通过上面的计算, 每年可以少停电, 所以只需要一年增加的投资成本就可以节约回来。

3 结 论

在主副线环网结构的基础上, 提出了一种主副线带开关的分支箱结构来优化配网结构, 通过实际分析计算, 该结构在提高配网供电可靠性的效果明显, 其在可靠性方面的作用和多增加分段开关相似; 但是如上面提到的, 由于断路器等都集中在一起, 运行维护将非常方便, 还可将杆上断路器落地入室, 事故处理不需要爬杆, 还能够在特殊天气下操作, 可以大大提高事故处理速度, 缩短事故停电时间, 从而进一步提高供电可靠性。同时由于断路器等都集中在一起, 落地入室, 城市配网实现配网自动化将变得很容易, 这也是该结构的一个主要特点。

作者简介:

曾勇波, 硕士学位, 现任四川省电力公司德阳电业局广汉供电局可靠性专责。

张 玻, 学士学位, 工程师, 现任四川省电力公司德阳电业局广汉供电局生技科长。

杨 钧, 大专学历, 助理工程师, 四川省电力公司德阳电业局广汉供电局配网专责。

(收稿日期: 2009-02-10)

110 kV 线路圆特性阻抗元件的相间距离 Ⅲ 段保护整定分析

陈旭锋, 李旭涛

(宜宾电业局调度中心, 四川 宜宾 644000)

摘 要:通过对《3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》(DL/T 584—95)相关条款的分析,明确 110 kV 线路相间距离Ⅲ段保护为线路末端变压器作远后备的必要性。针对圆特性阻抗元件的特点,对圆特性相间距离Ⅲ段保护的整定进行讨论,并介绍了一种圆特性相间距离Ⅲ段保护作线路末端变压器远后备的简化整定计算方法。

关键词:圆特性;相间距离Ⅲ段;远后备保护;整定

Abstract With the analysis of "Operational and Setting Code for Relay Protection of 3~110 kV Electrical Power Networks" (DL/T 584—95), it makes certain that it is necessary to take partⅢ of phase-to-phase distance protection of 110 kV line as the remote backup protection of line-end transformer. According to the circle characteristics of the distance relay, the setting calculation of partⅢ of phase-to-phase distance protection with circle characteristics is discussed, and a simplified setting calculation method is introduced.

Key words: circle characteristics; partⅢ of phase-to-phase distance protection; remote backup protection; setting calculation

中图分类号: TM762 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003—6954(2009)02—0051—03

110 kV 线路相间距离Ⅲ段保护的整定原则,主要依据现行《3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》(DL/T 584—95)中第 4.2.2.8 条款和 4.2.2.9 条款,两条款并未明确提出相间距离Ⅲ段保护要为线路末端变压器作远后备保护。

而该规程的第 2.2.2 条款提出:运行中的电力设备,一般应有分别作用于不同断路器,且整定值有规定的灵敏系数的两套独立的保护装置作为主保护和后备保护,以确保电力设备的安全。第 2.2.3 条款提出:3~110 kV 电网继电保护一般采用远后备原则,即在临近故障点的断路器处装设的继电保护或该断路器本身拒动时,能由电源侧上一级断路器处的继电保护动作切除故障。

当 110 kV 变压器发生故障,主变 110 kV 侧总路开关拒动,则必须由电源侧 110 kV 线路开关跳闸,切除故障。因此 110 kV 线路保护中的相间距离Ⅲ段保护不仅只作相邻线路的远后备,还应对线路末端变压器提供远后备,其远后备灵敏系数,按《继电保护和自动装置技术规程》(GB/T 14285—2006)中附表 A.1 作远后备保护的电流、电压和阻抗元件,最小灵敏系数为 1.2。

目前,宜宾电网 110 kV 线路相间距离保护,以圆

特性阻抗元件为主(如南瑞继保的 LFP—941A)。由于相间距离Ⅲ段阻抗元件为圆特性,在作线路末端变压器远后备的同时,还应可靠躲过线路的事故过负荷最小阻抗。

1 圆特性阻抗元件

图 1 复平面中,经过坐标原点 O 的圆为相间距离Ⅲ段的阻抗圆,圆内区域为阻抗元件动作区域。OC 为阻抗圆直径,即相间距离Ⅲ段整定值。 $\angle COR$ 为阻抗圆直径与 R 轴的夹角,即相间距离保护的正序灵敏角整定值,应整定为线路正序阻抗角。

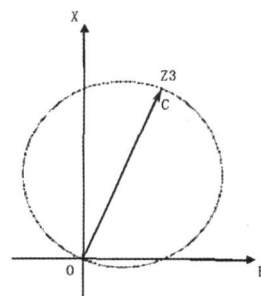


图 1 复平面中的阻抗图

2 系统实例

图 2 系统中 Z_L 为线路正序阻抗, θ 为线路正序阻抗角, 即 $Z_L \angle \theta$ 。
 Z_{Tmin} 为归算至 110 kV 侧的变压器 110~35 kV 正序阻抗, 忽略变压器电阻, 变压器正序阻抗角为 90° , 即 $Z_{Tmin} \angle 90^\circ$ 。
 Z_{Tmax} 为归算至 110 kV 侧的变压器 110~10 kV 正序阻抗, 即 $Z_{Tmax} \angle 90^\circ$ 。

为突出重点, 这里只讨论终端变电站的情况, 对于非终端变电站, 相间距离Ⅲ段还应与相邻线路相间距离Ⅲ段配合, 并在相邻线路末端故障时有足够灵敏度, 同时还应考虑助增的影响。

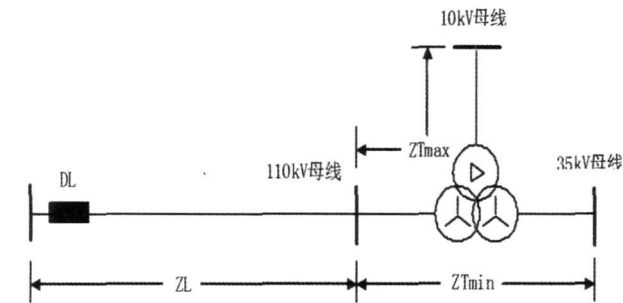


图 2 系统实例

3 可靠躲过本线路的事故过负荷最小阻抗

本线路的事故过负荷电流为 I 可靠系数为 Kk 负荷功率因素按 0.9 考虑, 则事故过负荷阻抗为

$$Z_{fh} = \frac{U_e}{\sqrt{3} \times (Kk \times I)} \tag{1}$$

负荷阻抗角为 $\alpha = \cos^{-1} 0.9$

相间距离Ⅲ段阻抗定值可靠躲过本线路的事故过负荷最小阻抗整定, 根据圆特性阻抗元件的动作原理, 使事故过负荷阻抗 $Z_{fh} \angle \alpha$ 不超出圆外。如图 3 所示。

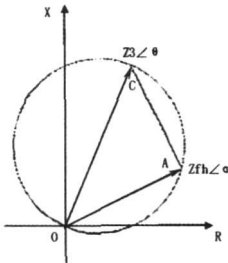


图 3 复平面中的负荷阻抗

图 3 中, OC 为阻抗圆直径, 由几何原理可知,

$\angle CAO$ 为直角。
相间距离Ⅲ段整定值 Z_3 的正序灵敏角, 整定为线路正序阻抗角 $\angle \theta$ 而事故过负荷阻抗的阻抗角为 $\angle \alpha$, 应将事故过负荷阻抗 $Z_{fh} \angle \alpha$ 折算至 $\angle \theta$ 即
$$Z_3 \leq \frac{Z_{fh}}{\cos(\theta - \alpha)} = \frac{U_e}{\sqrt{3} \times (Kk \times I) \times \cos(\theta - \alpha)}$$

正序灵敏角为 $\angle \theta$ (2)
由式 (2) 可以确定相间距离Ⅲ段整定值 Z_3 的上限。

4 作线路末端变压器远后备

为确保变压器任意处故障, 相间距离Ⅲ段保护均有足够灵敏度, 取变压器阻抗最大值 110 kV~10 kV 正序阻抗进行计算, 即 $Z_{Tmax} \angle 90^\circ$ 。在复平面中, 将线路正序阻抗 $Z_L \angle \theta$ 与线路末端变压器正序阻抗 $Z_{Tmax} \angle 90^\circ$ 进行矢量求和。如图 4 所示。

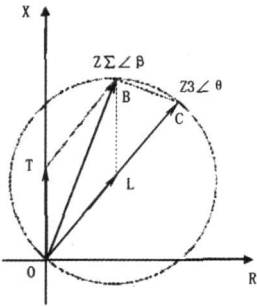


图 4 变压器阻抗矢量和复平面中的线路

图 4 中, OL 为线路正序阻抗 $Z_L \angle \theta$ OT 为变压器正序阻抗 $Z_{Tmax} \angle 90^\circ$ 。为图示清楚, 将 $Z_{Tmax} \angle 90^\circ$ 缩小。设 $Z \angle \beta$ 为 $Z_L \angle \theta$ 与 $Z_{Tmax} \angle 90^\circ$ 的矢量和, 则 $|Z| = |OB|$, $\angle \beta = \angle BOR$ 。

OC 为阻抗圆直径, 由几何原理可知, $\angle CBO$ 为直角。将 $Z \angle \beta$ 折算至 $\angle \theta$ 取灵敏系数 Kk , 则

$$Z_3 \geq Kk \times \frac{Z}{\cos(\beta - \theta)} \tag{3}$$

正序灵敏角为 $\angle \theta$

借助计算机程序, 很容易得到 $Z_L \angle \theta$ 与 $Z_{Tmax} \angle 90^\circ$ 的矢量和 $Z \angle \beta$ 。但在手工整定计算时, 矢量求和计算过程较繁琐, 下面介绍一种简化处理方法。

①如图 4 所示, $|Z| = |OB|$, 将之代入式 (3), 即

$$Z_3 \geq Kk \times \frac{|OB|}{\cos(\beta - \theta)}$$

正序灵敏角为 $\angle \theta$ (4)

②由几何原理可知,

$|OL| + |OT| > |OB| > 0$ (5)

③ $\angle \beta < 90^\circ$, 推出

$0 < \cos(90^\circ - \theta) < \cos(\beta - \theta)$ (6)

④由式 (5)、式 (6), 可得出

$\frac{|OL| + |OT|}{\cos(90^\circ - \theta)} > \frac{|OB|}{\cos(\beta - \theta)}$ (7)

⑤由式 (4)、式 (7), 可得出

$Z_3 \geqslant K \ln \frac{|OL| + |OT|}{\cos(90^\circ - \theta)} > K \ln \frac{|OB|}{\cos(\beta - \theta)}$ (8)

式 (8) 中, $|OL|$ 为线路正序阻抗 Z_L , $|OT|$ 为变压器正序阻抗 Z_{Tmax} , θ 为线路正序阻抗角, 均为已知参数。因此可将式 (3) 简化为

$Z_3 \geqslant K \ln \frac{|OL| + |OT|}{\cos(90^\circ - \theta)} = K \ln \frac{Z_L + Z_{Tmax}}{\cos(90^\circ - \theta)}$ (9)

由式 (7) 可知, 式 (9) 确定相间距离 III 段整定值 Z_3 的下限, 实际灵敏系数略大于 $K \ln$ 。

5 结 语

按式 (2)、式 (9), 可以分别得出终端变电站圆特性相间距离 III 段整定值的上限和下限, 确定其整定取

值范围。在圆特性相间距离 III 段保护作线路末端变压器远后备的整定计算过程中, 由于线路与变压器的正序阻抗角不同, 引入了矢量求和运算, 致使手工整定计算繁琐, 针对圆特性阻抗元件的特点, 推导出了—种简化的整定方法。通过该简化整定方法计算的相间距离 III 段整定值 Z_3 的下限, 其实际灵敏度略大于计算灵敏度 $K \ln$, 符合规程, 满足运行要求。

经运行验证, 该简化整定方法准确、简单, 对圆特性阻抗元件的相间距离 III 段整定, 具有较强的通用性和实用性。

参考文献

[1] 南京南瑞继保电气有限公司. LFP-941A (B、D、J、S) 型输电线路成套保护装置技术说明书.
[2] DL/T 584-95, 3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程 [s].
[3] GB/T 14285-2006, 继电保护和安全自动装置技术规程 [s].

作者简介:

陈旭锋 (1980—), 男, 助理工程师, 从事电网继电保护整定计算和运行管理工作。
李旭涛 (1971—), 男, 工程师, 从事电网运行方式和继电保护管理工作。

(收稿日期: 2009-02-10)

(上接第 38 页)

(4) 可靠性: 系统每日接收数据量较大, 且数据要保持长久存储, 系统必须要有较高可靠性。本系统采用了高可用性技术, 保证系统能长期稳定的不间断运行, 采用稳定先进的操作系统、数据库、网络协议和中间件等系统软件平台, 在网络、主机、数据库或应用系统出现问题时, 能及时快速地恢复, 保证系统的稳定性。

3 系统实施效果

本系统从 2006 年 6 月投入运行以来, 改善了未接入水调自动化系统水电厂和电网水情信息采集、传输和交换的手段, 和水调自动化系统形成互为补充作用, 能够准确及时的收集、整理各中小型发电厂水情信息, 为水库调度人员及时了解水电厂运行情况及实时水、雨情提供了技术保障, 为调度决策提供了及时、科学的依据, 在水电调度中发挥了重要作用。

通过水情数据自动交换系统不但有利于节约水情收集整理时间, 而且便于历史数据查询, 可方便快速的对历史水情数据进行分析查询, 提高了水情预测精度, 为水电电力电量平衡计算提供了依据。

4 结 语

随着四川大量水电相继投产和节能调度的实施, 及时掌握各水电厂水情信息和准确预测来水是水调的一项重要工作。水情数据自动交换系统较好的解决了四川中小型电厂的水情信息上报工作, 在水电的优化调度, 充分利用水能资源, 保证电网安全经济运行发挥了较大作用。本系统设备配置少、投资低、操作简单、实时性强, 目前在全国各网省调中属首个采用, 具有独创性和技术先进性, 对推进水调管理工作有一定的示范作用, 有较广的应用前景。

(收稿日期: 2008-12-03)

基于复 Gaussian 小波 SVM 的短期负荷预测

郑永康¹, 郝文斌¹, 刘俊丽², 李梓玮¹

(1. 成都市电业局, 四川 成都 610000; 2. 德阳市电业局, 四川 德阳 610000)

摘要:提出了复 Gaussian 小波 SVM 模型, 并将其应用于对电力系统短期负荷的预测。证明了复 Gaussian 小波核满足 SVM 平移不变核条件, 建立了相应的 SVM, 并且使用搜寻者优化算法对相关参数进行优化选择。在短期负荷预测的仿真实验中, 通过与常用的径向基核 SVM 模型的对比, 验证了该方法具有较好的精确度和有效性, 有一定的实用价值。

关键词:短期负荷预测; 复 Gaussian 小波; 支持向量机 (SVM); 搜寻者优化算法 (SOA)

Abstract: A new model of short-term load forecasting (STLF) based on complex Gaussian wavelet support vector machine (CGW-SVM) is presented. It is proved that the complex Gaussian wavelet is an admissible translation-invariant kernel function of support vector machine (SVM). CGW-SVM is constructed and its parameters are optimized using seeker optimization algorithm (SOA). The comparison results for STLF show that the proposed method has better performance than the conventional radial basis function SVM (RBF-SVM) in effectiveness and accuracy and is promising in STLF problem.

Key words: short-term load forecasting; complex Gaussian wavelet; support vector machine (SVM); seeker optimization algorithm (SOA)

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0058-04

短期负荷预测 (short-term load forecasting, STLF) 是电力系统的一项基本工作, 直接影响着系统开停机的宏观调控。负荷预测的精度关系到整个电力系统运行的经济效益, 是一个值得深入研究的课题。由于负荷受到各种社会、自然因素影响, 模糊、非线性、强扰动是其最大特点, 难于精确建模。许多传统的方法, 包括: 时间序列法、回归法、卡尔曼滤波法、自回归法等都被用于 STLF^[1, 2], 并取得了一定的效果。但这些方法基本上是线性的, 难以获得短期负荷时间序列中的非线性特征。人工神经网络 (artificial neural networks, ANN) 也被大量用于 STLF^[3, 4]。ANN 具有较强的非线性映射能力, 但是由于它采用的是结构风险最小化原则 (empirical risk minimization, ERM), 算法结果并不理想。

近年来, 支持向量机 (support vector machine, SVM) 在电力系统负荷预测中得到广泛应用^[5~8]。SVM 算法基于统计学习理论^[9] (statistical learning theory, SLT), 遵循结构风险最小化 (structural risk minimization, SRM) 准则, 通过核函数的映射, 将原空间的非线性问题转化成特征空间中的线性问题^[10], 实现小样本下的机器学习。SVM 不仅可从理论上保证收敛到全局最优点, 并且能有效地避免维数灾难问题。文献 [5~8] 都选用了径向基核函数 SVM (radial

basis function SVM, RBF-SVM) 进行 STLF。对于 SVM 模型参数的选择, 文献 [5, 7, 8] 采用了经验取值的方法, 文献 [6] 对多个参数分别给出了相应的近似算法。这些优化方法都难以得到普遍适用的满意结果。

为了利用小波在提取非线性非平稳信号高频细微特征方面的优势, 故选用复 Gaussian 小波作为 SVM 的核函数, 构建了相应的复 Gaussian 小波 SVM (complex Gaussian wavelet SVM, CGW-SVM)。针对 SVM 的参数选择, 文中使用了搜寻者优化算法 (seeker optimization algorithm, SOA) 进行优化。最后对澳大利亚新南威尔士州每半小时的电力负荷 (<http://www.nemmco.com.au>) 进行预测, 结果验证了该小波核函数及其参数优化方法的有效性和优越性。

1 复 Gaussian 小波支持向量机

根据张量积理论^[11], 对于一维母小波函数 $\psi(x)$, 可分离的 d 维小波函数为 $\psi_d(x) = \prod_{i=1}^d \psi(x_i)$ 。以其构建的平移不变小波核函数可以表示为: $k(x, x') = \prod_{i=1}^d \psi\left(\frac{x_i - x'_i}{a}\right)$ 。

一个函数只要满足 Mercer 条件就是一个可容许的 SVM 核。但是对于平移不变函数, 将其分解为两个相同函数的点积形式比较困难, 文献 [12] 给出了平移不变核函数的充要条件:

定理: 平移不变核函数 $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ 是可容许的支持向量核, 当且仅当 $k(\mathbf{x})$ 的傅里叶变换

$F[k(\omega)] = (2\pi)^{-d/2} \int_{\mathbb{R}^d} \exp(-j\omega \cdot \mathbf{x}) k(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$ (1) 为非负数。

1.1 复 Gaussian 小波核

复 Gaussian 小波由复 Gaussian 函数的 n 阶导数构成, 定义如下: $\psi(t) = C_n \frac{d^n}{dx^n} (e^{-x^2} e^{-jx})$, 其中 C_n 为常数, 是用来保持小波函数的能量归一化特性。在文中, 令 $C_n = 1$ 不会影响小波核函数的性能。取复 Gaussian 函数 1 阶导数的虚部, 得到如下复 Gaussian 小波:

$$f(x) = (-\cos x + 2x \sin x) \exp(-x^2) \quad (2)$$

则平移不变复 Gaussian 小波核函数定义如下:

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \prod_{i=1}^d \left(-\cos \frac{x_i - x'_i}{a} + 2 \frac{x_i - x'_i}{a} \sin \frac{x_i - x'_i}{a} \right) \times \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}'_i\|^2}{a^2}\right) \quad (3)$$

当 d 为大于零的偶数时, 该平移不变小波核函数是可容许的支持向量核函数, 证明如下。

证明: 将

$$\begin{aligned} k(\mathbf{x}) &= \prod_{i=1}^d \psi\left(\frac{x_i}{a}\right) \\ &= \prod_{i=1}^d \left(-\cos \frac{x_i}{a} + 2 \frac{x_i}{a} \sin \frac{x_i}{a} \right) \exp\left(-\frac{\|x_i\|^2}{a^2}\right) \end{aligned}$$

代入 (1) 式积分项可得

$$\begin{aligned} &\int_{\mathbb{R}^d} \exp(-j(\omega \cdot \mathbf{x})) k(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \\ &\int_{\mathbb{R}^d} \exp(-j(\omega \cdot \mathbf{x})) \prod_{i=1}^d \left(-\cos \frac{x_i}{a} + 2 \frac{x_i}{a} \sin \frac{x_i}{a} \right) \exp\left(-\frac{\|x_i\|^2}{a^2}\right) d\mathbf{x} \\ &= \prod_{i=1}^d \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-j(\omega x_i)) \left(-\cos \frac{x_i}{a} + 2 \frac{x_i}{a} \sin \frac{x_i}{a} \right) \exp\left(-\frac{\|x_i\|^2}{a^2}\right) dx_i \\ &= \prod_{i=1}^d \left[-a^2 \sqrt{\pi} \omega \sinh(\omega a/2) \exp(-1/4 - \omega^2 a^2/4) \right] \\ &= (-1)^d \prod_{i=1}^d a^2 \sqrt{\pi} \omega \sinh(\omega a/2) \\ &\times \exp(-1/4 - \omega^2 a^2/4) \end{aligned} \quad (4)$$

代入 (1) 得

$$F[k(\omega)] = (2\pi)^{-d/2} \times (-1)^d \times \prod_{i=1}^d a^2 \sqrt{\pi} \omega \sinh(\omega a/2) \exp(-1/4 - \omega^2 a^2/4)$$

显然, 当 d 为大于零的偶数时, $F[k(\omega)] \geq 0$, 得证。

1.2 支持向量机

在样本集 $\{(\mathbf{x}_i, y_i), i=1, 2, \dots, n\}$ 中, $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^d$ 为输入, y_i 为对应的输出, 定义 ϵ -不敏感损失函数:

$$|y - f(\mathbf{x})|_\epsilon = \begin{cases} 0, & |y - f(\mathbf{x})| \leq \epsilon \\ |y - f(\mathbf{x})| - \epsilon, & |y - f(\mathbf{x})| > \epsilon \end{cases} \quad (5)$$

根据 SVM 构造如下回归估计函数:

$$f(\mathbf{x}) = \langle \mathbf{w} \cdot \Phi(\mathbf{x}) \rangle + b \quad (6)$$

式中 $\Phi(\mathbf{x})$ 为从输入空间到多维特征空间的非线性映射, $\mathbf{w}$ 为权值系数, b 为偏差。

优化目标是:

$$\begin{aligned} &\min_{\mathbf{w}, b, \xi} \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \\ &\text{s.t. } |y_i - \langle \mathbf{w} \cdot \Phi(\mathbf{x}_i) \rangle - b| \leq \epsilon + \xi_i, \\ &\xi_i \geq 0, \xi_i^* \geq 0, i=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (7)$$

松弛变量 ξ_i, ξ_i^* 和惩罚因子 C 用于调节超出 ϵ 管道的样本点。引入 Lagrange 乘子, 把这个不等式约束下的优化问题转化成无约束二次规划问题进行求解, 形式如下:

$$\max_{\alpha, \alpha^*, \beta, \beta^*} \left[\min_{\mathbf{w}, b, \xi, \xi^*} [L(\mathbf{w}, b, \xi, \xi^*)] \right] \quad (8)$$

其中: $L(\mathbf{w}, b, \xi, \xi^*) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) - \sum_{i=1}^n$

$$\begin{aligned} &\alpha_i (\epsilon + \xi_i) \\ &- (y_i - \langle \mathbf{w} \cdot \Phi(\mathbf{x}_i) \rangle - b) - \sum_{i=1}^n \alpha_i^* (\epsilon + \xi_i^*) \\ &+ (y_i - \langle \mathbf{w} \cdot \Phi(\mathbf{x}_i) \rangle - b) - \sum_{i=1}^n (\beta_i \xi_i + \beta_i^* \xi_i^*) \end{aligned}$$

式中 $\alpha_i, \alpha_i^*, \beta_i, \beta_i^*, i=1, 2, \dots, n$ 是 Lagrange 乘子。

根据鞍点定理, 对 $L(\mathbf{w}, b, \xi, \xi^*)$ 分别求 $\mathbf{w}, b, \xi, \xi^*$ 的偏导数并令其为零, 将所得结果代入到 (8) 式可以把原问题转化它的对偶问题:

$$\begin{aligned} &\max_{\alpha, \alpha^*, \beta, \beta^*} \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [(\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*) K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)] \right. \\ &\quad \left. - \epsilon \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \alpha_i^*) + \sum_{i=1}^n y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) \right\} \\ &\text{s.t. } \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0, \quad 0 \leq \alpha_i \leq C, \quad 0 \leq \alpha_i^* \leq C \end{aligned} \quad (9)$$

根据 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件^[9] 下面关系成立:

$$\begin{cases} \alpha_i [\epsilon + \xi_i - (y_i - \langle \mathbf{w} \cdot \Phi(\mathbf{x}_i) \rangle - b)] = 0 \\ \alpha_i^* [\epsilon + \xi_i^* - (y_i - \langle \mathbf{w} \cdot \Phi(\mathbf{x}_i) \rangle - b)] = 0 \end{cases} \quad (10)$$

α_i, α_i^* 必有一个为零, 或者均为零。 $\alpha \neq 0$ 对应

的样本点 x_i 称作支持向量, 求解实际只针对支持向量。这样, 就得到 SVM 的回归估计函数:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) \Phi(x_i) \cdot \Phi(x) + b$$

$$= \sum_{x \in SV} (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b \quad (11)$$

其中 K 为核函数, 采用不同的核函数可以构建不同的 SVM, 常用的核函数为 Gaussian 核。这里选用复 Gaussian 小波核 $K(x, x_i) = \exp(-(x - x_i)^2 / a^2)$ 函数, 构成 CGW-SVM。

2 搜寻者优化算法

SVM 参数的选择实质上是最小化泛化误差, 一般使用遗传算法和粒子群 (particle swarm optimization PSO) 算法进行参数的寻优。文献 [13, 14] 提出了一种新的优化算法: SOA。SOA 模拟人的智能搜索行为, 将其应用于优化问题的求解。

2.1 SOA 算法原理

在搜索连续空间, 较优解的邻域内可能存在更优的解。因此, 当搜寻者即个体所处位置较优时, 应该在较小邻域内进行搜索; 而当搜寻者所处位置较差时, 应该在较大邻域内搜索。因此, SOA 利用描述自然语言 and 不确定性推理的模糊逻辑来对上述搜索规则进行建模。同时, SOA 通过社会学习和认知学习来获取社会经验和认知经验, 在结合智能群体的利他行为、利己行为和预动行为的基础上, 确定个体的搜索行为。SOA 算法流程如下:

- 1) $t=0$;
- 2) 在搜索空间内均匀随机地产生初始位置 p ;
- 3) 评价每个搜索者的位置;
- 4) 对每一个个体 i 每一维 j 上分别计算搜索方向 $d_{ij}(t+1)$ 和步长 $\alpha_{ij}(t+1)$;
- 5) 根据式 (12) 和 (13), 更新每一个个体的位置为 $\bar{x}(t+1)$;
- 6) $t=t+1$;
- 7) 若不满足进化结束条件 $t=T_{\max}$ 则转 3), 否则输出结果。

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + \Delta x_{ij}(t+1) \quad (12)$$

$$\Delta x_{ij}(t+1) = \alpha_{ij}(t+1) d_{ij}(t+1) \quad (13)$$

在算法开始前每一个个体都定义了一个邻域, 以此来实现信息的社会共享。根据种群索引将种群分为三个子群, 同一子群中的所有个体构成一个邻域。

每次迭代中, 各子群中最差的两个个体替换成其它两个子群中最好的个体。

2.2 搜索步长的确定

SOA 搜索步长的模糊变量采用高斯隶属函数, 如式 (14) 所示。显然, 输出变量超出 $[u - 3\delta, u + 3\delta]$ 时, 其隶属度小于 0.011 1, 设定最小隶属度 $\mu_{\min} = 0.011 1$ 。

$$\mu_i = e^{-(x_i - u)^2 / 2\delta^2} \quad (14)$$

根据目标函数值的优劣递减排序, 对应序列号为 1 到 s (s 是种群大小)。目标函数的模糊变量采用线性隶属函数, 使隶属度直接与函数值的排列顺序成正比。设在最佳位置有最大隶属度值 $\mu_{\max} = 1.0$, 最差位置有最小值 $\mu_{\min}$ 如式 (15) 所示。

$$\mu_i = \mu_{\max} \frac{s - I_i}{s - 1} (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \quad (15)$$

其中, I_i 是种群函数值按降序排列后 $\bar{x}(t)$ 的序列编号。根据式 (16) 的不确定推理的行为部分可得出步长。

$$a_{ij}(t) = \delta_{ij} (-2 \times \ln(\mu_i))^{1/2} \quad (16)$$

高斯隶属函数参数 δ_{ij} 由式 (17) ~ (19) 确定。

$$\delta_i = \omega \times \text{abs}(\bar{x}_{\max} - \bar{x}_{\min}) \quad (17)$$

$$\omega = (T_{\max} - t) / T_{\max} \quad (18)$$

$$\delta_{ij} = \text{RAND}(0, \delta_i) \quad (19)$$

其中, $\bar{x}_{\min}$ 和 $\bar{x}_{\max}$ 分别是同一子群中的最小和最大函数值的位置; ω 是惯性权值; t 和 $T_{\max}$ 分别为当前迭代次数和最大迭代次数; $Y = \text{abs}(X)$ 返回一个数组 Y , 使 Y 的每一个元素是 X 与其对应的元素的绝对值。式 (19) 是为了模拟人的搜索行为的随机性。

2.3 搜索方向的确定

搜索方向由利己行为、利他行为和预动行为共同决定, 如式 (23) 所示。 $\bar{d}_{i, \text{ogg}}$ 、 $\bar{d}_{i, \text{ego}}$ 和 $\bar{d}_{i, \text{pm}}$ 分别为第 i 个搜寻者根据利他行为、利己行为和预动行为确定的利他方向、利己方向和预动方向。

$$\bar{d}_{i, \text{alt}} = \bar{g}_{\text{best}} - \bar{x}_i(t) \quad (20)$$

$$\bar{d}_{i, \text{ego}} = \bar{g}_{\text{best}} - \bar{x}_i(t) \quad (21)$$

$$\bar{d}_{i, \text{pm}} = \begin{cases} \bar{x}_i(t) - \bar{x}_i(t-1) & \text{if } \text{fun}(\bar{x}_i(t)) \leq \text{fun}(\bar{x}_i(t-1)) \\ \bar{x}_i(t-1) - \bar{x}_i(t) & \text{if } \text{fun}(\bar{x}_i(t)) > \text{fun}(\bar{x}_i(t-1)) \end{cases} \quad (22)$$

$$\bar{d}_i(t) = \text{sign}(\omega \bar{d}_{i, \text{pm}} + \omega_1 \bar{d}_{i, \text{ego}} + \varphi_2 \bar{d}_{i, \text{alt}}) \quad (23)$$

其中, $\bar{g}_{\text{best}}$ 为第 i 个搜寻者所在邻域的集体历史最佳位置, $\bar{g}_{\text{best}}$ 为第 i 个搜寻者到目前为止经历过的

最佳位置, $\text{fun}(\cdot)$ 为最小问题目标函数, $\text{sign}(\cdot)$ 表示输入矢量每一维的符号函数, φ_1 和 φ_2 是在已知区间 $[0, 1]$ 内被均匀、随机选择的实数, 是如 (18) 式所示的惯性权值。

3 应用实例

采用前面提出的 CGW-SVM 方法和常用的 RBF-SVM 方法, 对澳大利亚新南威尔士州 2006 年 7 月 23 日每半小时的负荷进行预测, 实验所用的原始数据是该地区 7 月份每半小时的负荷。对负荷进行归一化处理后, 按文献 [15] 的方法进行相空间重构。取预测日前 10 天的数据进行训练, 用 SOA 进行 SVM 参数优化, 用平均绝对百分比误差 E_{mape} 作为参数评价的依据。

3.1 数据预处理

首先对负荷进行归一化处理, 搜寻该负荷时间序列 $x(k)$ 中的最大值 x_{max} 和最小值 x_{min} , 则归一化后的 $x(k)$ 为:

$$x(k) = \frac{x(k) - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}} \quad (24)$$

根据文献 [15] 提出的方法, 将该负荷时间序列重构为 6 维向量点作为支持向量机的输入, 并得到其对应的输出参量。

3.2 参数选取

使用 SOA 对参数进行优化选择, 绝对百分比误差 E_{mape} 作为判断参数优劣的条件。 E_{mape} 定义为:

$$E_{\text{mape}} = \frac{1}{N \sum_{i=1}^N} \frac{f_i - y_i}{y_i} \times 100\% \quad (25)$$

其中, f_i 和 y_i 分别表示预测值和实际值, N 是预测值的个数。

针对 CGW-SVM 和 RBF-SVM 的宽度参数 a 惩罚因子 C 管道半径 ϵ 等参数, 分别设置寻优区间为: $a \in [1, 100]$; $C \in [10^2, 10^{10}]$; $\epsilon \in [0.0001, 0.1]$ 。

用 SOA 和 PSO 优化算法 [16] 对比实验, 种群个数均取为 20 个。多次独立试验表明, SOA 算法平均在进化到 17 代时能获得最优值, 而 PSO 算法需要进化到 31 代左右才能取得最优值。

通过优化学习, 对于 CGW-SVM, 得到如下参数: $a=19.673\ 3$, $C=2.8 \times 10^7$, $\epsilon=0.014$; 对于 RBF-SVM, 优化后的参数为: $a=2.4$, $C=3.7 \times 10^4$, $\epsilon=0.009$ 。

3.3 预测结果

图 1 给出了 CGW-SVM 和 RBF-SVM 的预测结果, 图 2 给出了相应的预测误差。表 1 给出了平均绝对百分比误差 E_{mape} 、最大相对误差 E_{max} 和支持向量个数 N_{SV} 。可以看出: 经过 SOA 优化参数的 SVM 模型都能取得比较好的预测效果, 但 CGW-SVM 模型效果更好, 其 E_{mape} 和 E_{max} 值都相对较小; 另外, CGW-SVM 的支持向量数比 RBF-SVM 多 21 个。

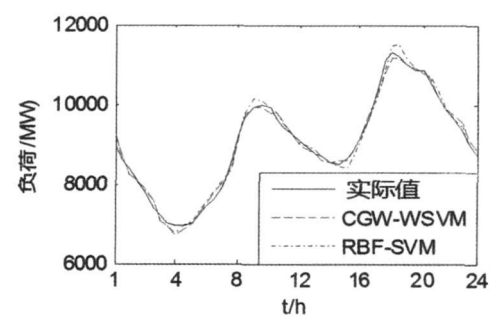


图 1 实际负荷值及 CGW-SVM 和 RBF-SVM 预测负荷曲线图

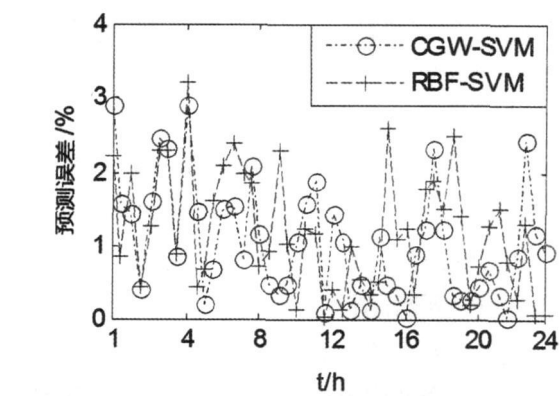


图 2 对应图 1 的预测误差

结 果	$E_{\text{mape}}(\%)$	$E_{\text{max}}(\%)$	N_{SV}
CGW-SVM	1.09	2.91	274
RBF-SVM	1.17	3.22	253

4 结 论

前面尝试将复 Gaussian 小波理论与核函数方法相结合, 构造 CGW-SVM 进行 STLFE。通过对“1 阶复 Gaussian 小波在输入向量维数为偶数时, 满足 SVM 平移不变核函数条件”这一命题的证明, 表明它可以作为 SVM 的核函数使用; 将该小波 SVM 应用于 STLFE, 前面使用 SOA 进行 SVM 参数的优化。从仿真结果可以看出: 提出的 CGW-SVM 的预测效果优于

(下转第 94 页)

再热蒸汽温度和炉膛燃烧室温度无法控制,漏出的冷却水进入外置床后,还将导致外置床内灰渣结成块,堵塞外置床及其进灰管道,引起故障停炉,也给检修带来麻烦。遇到这种情况,立即将泄漏灰控阀冷却水回水直接排到地沟,尽可能降低冷却水出水背压,并调整灰控阀冷却水进水量,防止大量冷却水漏入外置床,待停炉后进行检修。切不可关闭冷却水水源继续运行,否则阀杆在高温下弯曲或断裂,将给运行和检修带来较大困难。

4 结 论

灰控阀是大型循环流化床的一个重要控制设备,正确运行和维护好灰控阀,有利于大型循环流化床锅炉安全稳定运行。

作者简介

王永龙(1972—),男,四川内江人,大学本科学历,助理工程师、技师,四川白马循环流化床示范电站有限责任公司,从事 300 MW 循环流化床机组机务方面的检修维护技术管理工作。

(收稿日期:2008—09—25)

(上接第 61 页)

常用的 RBF—SVM,并且 SOA 与 PSO 优化算法相比,能更快地得到优化的 SVM 参数。因此,其研究成果初步展示出基于 CGW—SVM 的 STLF 和 SOA 参数优化方法的有效性和优越性,具有一定的理论意义和实用价值。

参考文献

- [1] I Moghram, S Rahman. Analysis and evaluation of five short-term load forecasting techniques [J]. IEEE Trans Power Syst 1989; 1484—1491.
- [2] 刘晨晖. 电力系统负荷预报理论与方法 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1987.
- [3] 邰能灵,侯志俭. 小波模糊神经网络在电力系统短期负荷预测中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 24—29.
- [4] Topalli AK, Erkanen I. A hybrid learning for neural networks applied to short term load forecasting [J]. Neurocomputing 2003; 51: 495—500.
- [5] 李元诚,方廷健,于尔铿. 短期负荷预测的支持向量机方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 55—59.
- [6] 谢 宏,魏江平,刘鹤立. 短期负荷预测中支持向量机模型的参数选取和优化方法 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 17—22.
- [7] Zhang Ming-guang. Short-term load forecasting based on support vector machines regression [J]. Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics Guangzhou 2005; 8: 4310—4314.
- [8] 姜惠兰,刘晓津,关颖等. 基于硬 C 均值聚类算法和支持向量机的电力系统短期负荷预测 [J]. 电网技术, 2006, 30(8): 81—85.
- [9] Vapnik V. N. Statistical learning theory [M]. New York;

Springer-Verlag 2000.

- [10] Nello C. John S. T. An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods [M]. UK: Cambridge University Press 2000.
- [11] Burges C. J. C. Geometry and invariance in kernel based methods [A]. Advance in Kernel Methods—support Vector Learning [C]. Cambridge: MIT Press 1999; 89—116.
- [12] Zhang Li, Zhou Wei-da, Jiao Li-cheng. Wavelet support vector machine [J]. IEEE Transactions on systems man and cybernetics—Part B: cybernetics 2004; 34(1): 34—39.
- [13] Dai Chao-hua, Zhu Yun-fang, Chen Wei-rong. Seeker optimization algorithm [J]. Proc 2006 Inter Conf Computational Intelligence and Security, Guangzhou, China, IEEE, 2006, 1: 225—229.
- [14] Dai Chaohua, Zhu Yunfang, Chen Weirong. Seeker optimization algorithm for training feed-forward neural networks. IEEE Transactions on Neural Networks (revised and resubmitted).
- [15] Jiang Chuan-wen, Li Tao. Forecasting method study on chaotic load series with high embedded dimension [J]. Energy Conversion and Management 2005; 46: 667—676.
- [16] Y Shi and R Eberhart. Empirical study of particle swarm optimization [J]. in Proc of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, pp 1945—1950.

作者简介:

郑永康(1977—),男,博士,研究方向为电力系统负荷预测、计算智能等;

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:2008—12—03)

一种应用于配电网合环操作的计算模型与方法

陈 曦,曾勇波,叶 涛,张 玻
(四川省德阳电业局,四川 德阳 618000)

摘 要:提出了一种简化 10 kV 配电网合环计算模型,计算合环冲击电流、稳态电流和合环状态下保护灵敏度校验的方法,得出能否进行配网合环操作的结论,为调度员进行 10 kV 配网合环操作提供指导。

关键词:配电网;合环操作;计算模型;方法

Abstract A simplified calculation model of closed loop operation in distributing network is presented as well as a calculation method of impact current steady current and verification protection in the closed loop state A conclusion of whether or not to carry out closed loop operation can be obtained which provides the guidance for dispatchers to do closed loop operation in 10kV distribution network

Key words distributing network; closed loop operation; calculation model; method

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003—6954(2009)02—0062—04

随着社会经济的迅猛发展和人民生活水平的不断提高,用电客户对电能质量和供电可靠性的要求越来越高。由于新增用户接入、配网缺陷处理、通道维护、事故抢修、方式改变等原因造成配网停电,大大减低了供电可靠性。

经过近几年大规模的城网改造后,10 kV 配电网大多实现了“闭环接线,开环运行”的供电方式,负荷区域用联络开关隔离,形成供电负荷岛。正常情况下,联络开关一般开断运行。当“手拉手”式线路中有一条需停电时,另一条线路可转供负荷,此时若进行合环操作,可以增强配电网的供电可靠性,减少对外停电。但合环瞬间产生的冲击电流,可能对电网安全稳定运行造成影响。当电网厂站较多、结构较为复杂时,常规的潮流计算方法需输入大量数据,计算极其复杂,无法满足配电网合环潮流的计算要求。就此提出了一种简单实用、满足工程需要的 10 kV 配网合环计算模型,并在合环模型简化的基础上提供了计算合环冲击电流、稳态电流和合环状态下保护灵敏度校验的方法,用以指导调度人员进行合环操作。

1 合解环路的操作规定

合环操作过程是指:当配电网中一段线路或变电站出线开关需要检修或出现其他突发事件时,先合上联络开关,再断开这一线路的各侧进线电源开关或变电站出线开关,需停电的 10 kV 配网线路通过其他

配网线路转带负荷,如图 1 所示。

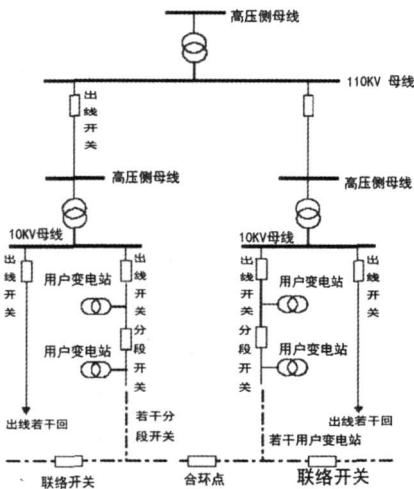


图 1 10 kV 母线及环网配电系统合环示意图

根据《四川电网调度管理规程》和《德阳电网调度管理规程》的有关规定:

- 1)合环操作必须相位相同,应保证合环后各环节潮流的变化不超过继电保护、系统稳定和设备容量等方面的限额。合环前应将合环点两端电压幅值差调整至最小,220 kV 系统一般允许在 20%,最大不超过 30%,负荷相角差一般不超过 30 度,500 kV 系统一般不超过 10%,最大不超过 20%,负荷相角差不超过 20 度。有条件时,操作前应启用合环开关的同期装置,检查负荷相角差和电压差。
- 2)解环操作应先检查解环点的有、无功潮流,确解环后系统各部份电压在规定范围内,各环节的潮

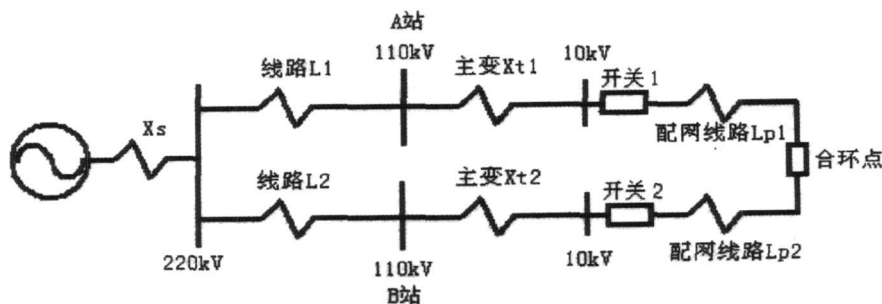


图 2 10 kV 配电网络合环简化图

流变化不超过继电保护、系统稳定和设备容量等方面的限额。

因此,必须进行计算,保证合解环时各部份电压在规定范围内,各环节的潮流变化不超过继电保护、系统稳定和设备容量等方面的限额。同时在实际配电网合环操作前,还要进行线路的核相工作,以确保相序正确。

2 简化的 10 kV 配电网络合环计算模型

常规的潮流计算需要大量的数据和参数:配电网的节点数、平衡节点电压模值和相角、PV 节点注入有功和电压模值、线路型号及长度、变压器分接头位置等运行参数,同时由于配网分支很多,即节点数过多,潮流计算复杂。因此,需根据实际工程需要对 10 kV 配电网网络合环计算模型进行以下简化:

(1)所有进行 10 kV 配网合环操作的变电站均由同一座 220 kV 变电站供电;

(2)不考虑变电站投入的电容器对母线电压和无功的影响;

(3)忽略不经过合环电流的配网支线负荷和分流作用,只进行变电站出线到联络开关之间的线路参数计算;

(4)对不同的主变进行变比取值,使主变的变比尽量接近一致,并规定主变合环时的运行档位。即:尽量控制因主变变比不同产生的稳态环流。

综上,10 kV 配电网络合环可简化为图 2 所示:

其中:线路 L1、线路 L2 为同一座 220 kV 变电站的两条 110 kV 出线;

主变 X_{t1} 、主变 X_{t2} 为 A 站、B 站的主变阻抗;

配网线路 L_{p1} 、配网线路 L_{p2} 为不同变电站的两条 10 kV 配网出线。

3 合环稳态电流、冲击电流的计算方法

在简化的 10 kV 配电网络合环模型下,进行具体分析:

1) 合环点电压的计算:

根据电力系统分析,合环时合环点存在电压差以及合环线路阻抗的不同,导致负荷有无功及潮流的重新分配,该电压差在合环后随着暂态过程结束而逐渐消失,合环电流也由初始电压高的一端流向电压低的一端,直至平衡。最恶劣的情况是解环点在线路的始末端,造成潮流变化最大,产生最大的电压降:

$$\Delta V_{\max} = \frac{PR + QX}{V_N} \quad (1)$$

式中:

P:两条合环线路的总有功率;

Q:两条合环线路的总无功功率;

R:两条合环线路的总电阻;

X:两条合环线路的总电抗;

U_N :线路额定电压。

2) 合环稳态电流、冲击电流的计算:

合环时,系统将因合环点的电压差值产生合环冲击电流。根据《电力系统暂态分析》中阐述,该冲击电流属于暂态过程,时间不大于 2~5 个周波,即大部分非周期分量在不超过 0.1 s 时间内将衰减完毕。合环冲击电流由周期分量和非周期分量构成,其最大瞬时值将在合环发生经过半个周期后 (约 0.01 s) 出现,最大冲击电流值为:

$$\begin{cases} I_t = K_m I_n \\ I_n = \frac{\Delta V_{\max}}{Z_m} \times 10^3 \end{cases} \quad (2)$$

式中:

I_t :最大冲击电流;

K_m :冲击系数,实际计算取 1.8~1.9;

I_m : 合环稳态电流;
 Z_m : 合环网内总阻抗有名值, 如图 3 所示。

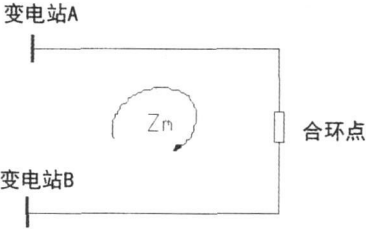


图 3 线路环路阻抗示意图

由式 (2) 可知, 合环稳态电流与合环点前后电压幅值差近似成正比, 与环网总阻抗近似成反比。只要速断保护能够躲过合环最大冲击电流 (即: 负荷电流与冲击电流之和), 过流保护能躲过合环最大稳态电流 (即: 负荷电流与主变变比不同产生的稳态电流之和) 就可以满足合环条件, 否则应采取控制合环线路负荷电流、调整线路保护定值等相应措施。

4 合环状态下过流保护灵敏度校验

分别进行合环线路中点处短路和出线处短路的过流保护灵敏度校验:

$$K=0.866 I_{min}^{(2)} / I \tag{3}$$

式中:
 $I_{min}^{(2)}$: 最小方式下的两相短路电流;
 I : 开关过流保护一次折算电流。

$K>1.3$, 满足灵敏度要求。
 $K<1.3$, 计算相继动作后的灵敏度, 若仍不能满

足灵敏度要求, 则按灵敏度整定过流保护, 同时校核。在正常方式下的过流保护。

5 算 例

1) 以广汉城网数据计算为例, 进行主变档位控制:

广汉站主变:
型号: SFZ9 M — 31500 /110

接线方式: YN, d11
额定电压: $110 \pm 8 \times 1.25 \% / 10.5 \text{ kV}$,
炳灵宫站主变:

型号: SFSZ6 — 31500 /110,
接线方式: Yn yn O, d11,
额定电压: $110 \pm 3 \times 2.5 \% / 38.5 \pm 5 \% / 11 \text{ kV}$,

正常运行时, 广汉站主变运行在 5 档或 6 档, 高、低压侧电压比: $115.5 \text{ kV} / 10.5 \text{ kV} = 11$ 或 $114.125 \text{ kV} / 10.5 \text{ kV} = 10.87$; 炳灵宫站主变运行在 1 档, 高、低压侧电压比: $118.25 \text{ kV} / 11 \text{ kV} = 10.75$ 。取电压差最接近的档位: 广汉站主变运行在 6 档, 炳灵宫站主变运行在 1 档。则两主变产生的电压差为:

$$(110 / 10.87 - 110 / 10.75) \times 1000 = 112.96 \text{ V}。$$

2) 合环电流计算

从表 1 计算结果可知, 在线路始末端进行合解环的极端情况下, 合环最大冲击电流小于速断保护定值, 合环最大稳态电流小于过流保护定值, 满足合环条件。

3) 进行合环过流保护灵敏度的校验, 从表 1 中计算结果可知, 在合环状态下发生各种短路时均有足够的保护灵敏度, 满足保护要求。具体数据见表 2 至表 4。

表 1 广汉城网合环电流计算表

线路名称	TA	速断定值 A	过流定值 A	线路长度 M	线路电阻 Q	线路电抗 Q	线路阻抗 Q	线路有功 kW	线路无功 kVAR	线路负荷 电流	合环点 A ΔU_{UV}^2	主变变比不同 产生的电压差	合环回路 阻抗 Q	合环稳态 电流 A	冲击 电流 A	最大冲击 电流 A	最大冲击速断 定值	最大稳态 电流 A	最大稳态过流 定值	结 论		
广什路 910	300/5	40	6	1	0.13	0.415	0.434	9	2000	968.6	128	451.0	112.96	3.480	0.32	246.24	274.55	6.24	160.76	2.68	满足要求, 可以合环	
炳城本路 903	600/5	25	5.6	5.6	0.952	2.240	2.433	9	0	0	0	451.0	112.96	3.480	0.32	246.24	374.55	3.12	160.76	1.34	满足要求, 可以合环	
广连路 906	600/5	30	5	3.1	0.403	1.286	1.348	1	6000	2906	385	1726.7	112.96	3.810	0.29	65.861	0.71245	98.10	38.414	56.3	45	满足要求, 可以合环
炳城一路 921	600/5	25	5	4.4	1.188	1.667	2.047	5	0	0	0	1726.7	112.96	3.810	0.29	65.861	0.71245	98.10	38.414	56.3	45	满足要求, 可以合环
广城三路 928	600/5	25	5	2.6	0.338	1.079	1.130	7	6000	2906	385	1321.1	112.96	2.710	0.41	68.926	0.23131	14.10	93.426	59.3	55	满足要求, 可以合环
炳城一路 921	600/5	25	5	3.2	0.864	1.212	1.489	1	0	0	0	1321.1	112.96	2.710	0.41	68.926	0.23131	14.10	93.426	59.3	55	满足要求, 可以合环
广城二路 906	600/5	25	5	1.7	0.221	0.705	0.739	3	5500	2664	353	1476.0	112.96	4.020	0.28	10.697	0.59105	0.43	8.75	380.94	3.17	满足要求, 可以合环
炳城四路 926	600/5	25	5.6	6.2	1.054	2.480	2.694	7	0	0	0	1476.0	112.96	4.020	0.28	10.697	0.59105	0.43	8.75	380.94	3.17	满足要求, 可以合环

表 2 合环线路中点短路故障时过流保护灵敏度校验表

线路名称	TA	过流 定值	线路 长度	折算 线路标 么值 L	合环线 路中点 发生短路 的阻抗	分路阻抗	并列 阻抗	总阻抗	合环线 路中点 发生两相 短路电 流	分路电流	灵敏度 校验	结论 K ₁ ≥1.3	
广什路 910	600 /5	6	1	0.394 5	1.301	广汉站 侧阻抗	1.584 2	0.868 4	0.986 1	4 830.37	通过广汉 站侧电源	2 647.6	7.35 满足要求
炳城三路 903	600 /5	5.6	5.6	2.207 6		炳灵宫 侧阻抗	1.921 6				流过炳灵宫 站侧电流	2 182.8	3.25 满足要求
广连路 906	600 /5	5	3.1	1.222 8	1.523 3	广汉站 侧阻抗	1.806 5	0.980 4	1.098 3	4 336.80	流过广汉 站侧电流	2 353.6	3.92 满足要求
炳城一路 921	600 /5	5	4.4	1.823 7		炳灵宫 侧阻抗	2.143 9				流过炳灵宫 站侧电流	1 983.2	3.31 满足要求
广城三路 928	600 /5	5	2.6	1.025 6	1.188 1	广汉站 侧阻抗	1.471 3	0.811 3	0.929 2	5 125.75	流过广汉 站侧电流	2 826.5	4.71 满足要求
炳城一路 921	600 /5	5	3.2	1.350 6		炳灵宫 侧阻抗	1.808 7				流过炳灵宫 站侧电流	2 299.2	3.83 满足要求
广城二路 906	600 /5	5	1.7	0.670 6	1.557 5	广流站 侧阻抗	1.840 7	0.997 6	1.115 5	4 269.78	通过广汉 站侧电流	2 314.1	3.86 满足要求
炳城四路 926	600 /5	5.6	6.2	2.444 4		炳灵宫 侧阻抗	2.178 1				流过炳灵宫 站侧电流	1 955.7	2.91 满足要求

表 3 广流站出口处短路故障时过流保护灵敏度校验表

线路名称	TA	过流 定值	线路 长度	折算 线路标 么值 L	在广汉 站出口 处发生短 路的阻抗	分路阻抗	并列 阻抗	总阻抗	在广汉 站出口处 发生两相 短路的电 流	分路电流	灵敏度 校验	结论 K ₁ ≥1.3	
广什路 910	300 /5	6	1	0.394 5		广汉站 侧阻抗	0.283 2	0.260 3	0.378 0	12 599.7	流过广汉 站侧电流	11 582	32.2 满足要求
炳城三 路 903	600 /5	5.6	5.6	2.207 6		炳灵宫站 侧阻抗	3.227				流过炳灵宫 站侧电流	1 017.8	1.5 满足要求
广连路 906	600 /5	5	3.1	1.228		广汉站 侧阻抗	0.283 2	0.262 9	0.380 6	12 514.5	流过广汉 站侧电流	11 617	19.4 满足要求
炳城一 路 921	600 /5	5	4.4	1.823 7		炳灵宫 站侧阻抗	3.667 1				流过炳灵 宫站侧电 流	897.2	1.5 满足要求
广城三 路 928	600 /5	5	2.6	1.025 6		广汉站 侧阻抗	0.283 2	0.258 7	0.376 4	12 652.5	流过广汉 站侧电流	11 560	19.3 满足要求
炳城一 路 921	600 /5	5	3.2	1.350 6		炳灵宫站 侧阻抗	2.996 8				流过炳灵宫 站侧电流	1 092.4	1.8 满足要求
广城 仁 路 906	600 /5	5	1.7	0.670 6		广汉站 侧阻抗	0.283 2	0.263 2	0.380 9	12 503.2	流过广汉 站侧电流	11 622	19.4 满足要求
炳城四 路 926	600 /5	5.6	6.2	2.444 4		炳灵宫站 侧阻抗	3.735 6				流过炳灵宫 站侧电流	881.1	1.3 满足要求

表 4 炳灵宫站出口处短路故障时过流保护灵敏度校验表

线路名称	TA	过流 定值	线路 长度	折算 线路标 么值 L	在炳灵 宫站出 口处发 生短路	的阻抗	并列 阻抗	总阻抗	在炳灵 宫站出 口处发 生短路 的阻抗	分路电流	灵敏度 校验	结论 K ₁ ≥1.3	
广什路 910	600 /5	6 /	1	0.394 5		广流站 侧阻抗	2.885 3	0.510 7	0.628 4	7 579.04	流过广汉 站侧电流	1 341.6	3.73 满足要求
炳城三 路 903	600 /5	5.6	5.6	2.207 6		炳灵宫 站侧阻抗	0.620 6				流过炳灵宫 站侧电流	6 237.4	9.28 满足要求
广连路 906	600 /5	5	3.1	1.228		广汉站 侧阻抗	3.329 7	0.523 1	0.640 8	7 432.87	流过广汉 站侧电流	1 167.7	1.95 满足要求
炳城一 路 921	600 /5	5	4.4	1.823 7		炳灵宫站 侧阻抗	0.620 6				流过炳灵宫 站侧电流	6 265.1	10.4 满足要求
广城三 路 928	600 /5	5	2.6	1.025 6		广汉站 侧阻抗	2.659 4	0.503 2	0.620 9	7 671.40	流过广汉 站侧电流	1 451.5	2.42 满足要求

(下转第 87 页)

压试验也一次成功。在 31 号、32 号机组启动试运过程中,未发生焊口、焊缝泄漏等金属方面故障。

2.3 31 号、32 号汽轮机是否揭缸检查问题

汽轮机是火力发电厂的重要精密转动机械,转速高达 3 000 r/min,转子和缸体之间的间隙也很小。“5.12”地震后,整个汽轮机平台土建部分外观有明显挤压损坏,对整个汽轮机转子和内部缸体有何影响;特别是 31 号机组地震时满负荷运行,地震跳机后又面临整厂厂用电中断,低压缸排汽温度明显超标(排汽温度最高达 180℃)的影响,所有这些对汽轮机本体影响如何,最简单直接的方法是对 31 号、32 号机组揭缸进行全面检查。但当时面临的问题是如果揭缸,抢修恢复发电时间将大大推后。

专家组经过对地震前后机组本体数据的多次慎重研究认为,鉴于 31 号、32 号机组盘车电流、盘车时转子声音等正常,与地震前无明显差别,在对以下项目进行认真检查的情况下,可不揭缸全面检查。

1)对汽轮机基础进行沉降和倾斜观测并与历史记录作对比。

2)汽轮机本体所有轴承应翻瓦检查,测量转子扬度(中心复查、找正)检查滑销系统。

3)启动冲转时按基建调试机组方式进行。
经过对上述项目的严格检查,特别是在对轴承翻瓦检查过程中,发现个别轴承有损伤并进行了更换处理;31 号、32 号机组启动调试时在冲转、带负荷及满负荷过程中震动、胀差、轴向位移等指标均正常,个别指标甚至优于震前水平。

3 结 语

按照“安全、科学、有力、有序、有效”的原则,在专家组的指导和各级人员的共同努力下,巴蜀江油发电厂 32 号机组于地震后第 48 天并网发电并按调度命令接带负荷,31 号机组于 7 月 14 日并网发电,均比计划提前恢复发电;33 号、34 号机组也正在按照综合性评价专家组的意见和技术方案进行修复,力争年底全面恢复发电。目前 31 号、32 号机组安全、稳定运行,为抗震救灾、迎峰度夏及保奥运用电做出了贡献。巴蜀江油发电厂 330 MW 机组强地震后抢修恢复发电组织和重大技术方案研究,也为今后处理同类事件提供了宝贵的经验和积极的借鉴作用。

(收稿日期:2008—10—13)

(上接第 65 页)

线路名称	TA	过流 定值	线路 长度	折算 线路标 么值 L	在炳灵 宫站出 口处发 生短路	的阻抗	并列 阻抗	总阻抗	在炳灵 宫站出 口处发 生短路 的阻抗	分路电流	灵敏度 校验	结论 K _{ln} >=1.3
炳城一 路 921	600/5	5	3.2	1.350 6	炳灵宫站 侧阻抗	0.620 6				流过炳灵宫 站侧电流	6 219.9	10.4 满足要求
广城二 路 906	600/5	5	1.7	0.670 6	广汉站 侧阻抗	3.398 2	0.524 8	0.642 5	7 413.64	流过广汉 站侧电流	1 144.8	1.91 满足要求
炳城四 路 926	600/5	5.6	6.2	2.444 4	炳灵宫站 侧阻抗	0.620 6				流过炳灵宫 站侧电流	6 268.8	9.33 满足要求

6 结束语

通过建立简化的 10 kV 配电网络合环计算模型,计算合环冲击电流、稳态电流,进行合环状态下保护灵敏度校验,规避了常规潮流计算需要的大量数据和相关软硬件支持,为调度人员进行 10 kV 配网合环操作提供指导,为不停电转移负荷,提高供电可靠性具有积极的意义。

参考文献

[1] 刘天琪、丘晓燕.电力系统分析理论[M].四川大学出版社,2003年 1月.

[2] 幸荣霞,姚爱明.环网合环操作的分析[J].浙江电力,2007,(1): 66—68
[3] 陈 衍.电力系统稳态分析[M].北京,水利电力出版社,1985.

作者简介:

陈 曦,硕士,工程师,四川省电力公司德阳电业局调度中心主任工程师
曾勇波,硕士,四川省电力公司德阳电业局广汉供电局可靠性专责。
叶 涛,硕士,高级工程师,四川省电力公司德阳电业局调度中心主任。
张 玻,学士学位,工程师,现任四川省电力公司德阳电业局广汉供电局生技科长。

(收稿日期:2008—12—04)

防止带地方电源终端变电站 全站失压的保护改造方案

宋汉蓉, 程 钢, 尹 秦
(德阳电业局, 四川 德阳 618000)

摘 要:接有并网小电源的供电系统在主供电源消失后, 应采取措施将并网小电源迅速可靠地解列, 保证终端变电站可靠运行, 为此提出终端变电站保护的改造方案和保护装置改造后的整定计算原则, 保证了电网安全运行。

关键词:地方电源; 终端变电站; 全站失压; 保护改造

Abstract: In case of the disappearance of main supply, the power supply system connected with local electric source should immediately take measures to step out local electric source in order to ensure the reliable operation of terminal substation. For this reason, the protection reform scheme of terminal substation and the setting calculation principles after the reform of protective equipment are proposed to ensure the safe operation of power grid.

Key words: local electric source; terminal substation; loss of pressure; protection reform

中图分类号: TM761 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0066-03

德阳 110 kV 电网为放射性网络, 其主供电源由各地区的 220 kV 主变向本地区的 110 kV 变电站供电。根据规程规定: ①变电所变压器中性点的接地方式应尽量保持地区电网零序阻抗基本不变; ②发电厂的母线上至少应有一台主变中性点接地运行的原则, 安排所在地区的一台 220 kV 主变 200 kV 侧与 110 kV 侧中性点同时接地, 本地区 110 kV 电压上网电厂一台主变中性点直接接地, 其余 220 kV 和 110 kV 主变中性点经间隙接地的接地方式运行。

根据国标 GB/T 14285-2006《继电保护和安全自动装置技术规程》中 5.2.5.3 条: 双侧电源的单回线路, 可采用下列重合闸方式: ①解列重合闸方式, 即

将一侧电源解列, 重合于故障线路上, 可采用一侧无电压检定, 另一侧采用同步检定的重合闸方式。经分析: 如采用解列重合闸方式, 终端变电站必须上一套解列装置或对现有保护装置进行改造; ②如采用自同步重合闸方式, 小电源机组会承受很大的冲击, 所以不采用这种方式; 根据以上规定和对现有设备进行分析的结果确定双侧电源 110 kV 线路重合闸的投入方式, 采用大电源侧线路开关重合闸投检线路无压方式, 终端变电站侧线路开关重合闸投检同期方式。

德阳电网小电上网有如下几种接线方式, 局部电网接线如图 1、图 2 所示。

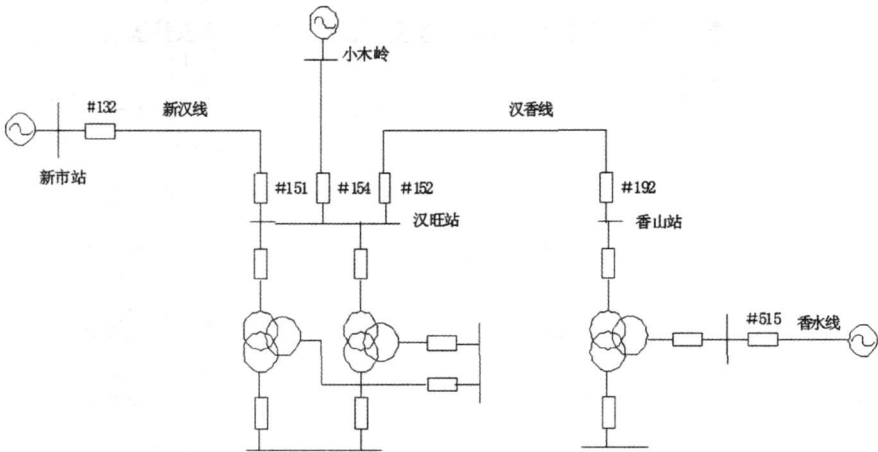


图 1 局部电网接线图之一

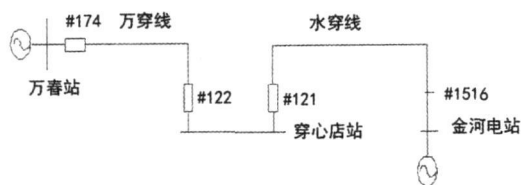


图 2 局部电网接线图之二

1 事故设想

1) 在电网接线图 1 所示电网中: 如雷击 110 kV 汉香线, 线路发生瞬时接地故障, 110 kV 汉香线 152 号开关线路保护动作跳闸, 重合成功, 香山站 1 号主变间隙零序过流或零序过压保护动作, 跳主变三侧开关, 香山站全站失压。

2) 在电网接线图 2 所示电网中: 万穿线线路发生瞬时故障, 万穿线线路两侧保护动作, 开关跳闸 (正常方式下, 金河电站 1 号主变中性点直接接地运行)。万春站万穿线 174 号开关在穿心店站侧万穿线 122 号开关跳闸后重合闸启动, 检线路无压后重合成功。此时在穿心店地区孤网中, 周波、电压会下降很多, 小水电和大电网不能保持同期, 穿心店站侧万穿线 122 号开关检同期重合闸不会动作, 穿心店站全站失压。

2 存在的问题和故障跳闸分析

1) 在电网接线图 1 所示电网中: 正常方式下, 采用 220 kV 新市站 1 号主变 220 kV 侧和 110 kV 侧中性点直接接地, 本地区 110 kV 及以上网络中的其余 220 kV 和 110 kV 主变中性点经间隙接地运行方式运行。带地方小电源供电的 110 kV 香山变电站, 当汉香线路发生瞬时故障时, 在线路主供电源侧汉香线 152 号开关跳闸后, 地方小电源并未解列, 此时汉香线故障点还存在, 香山地区形成小接地系统, 香山站 110 kV 侧会出现很大的零序过电压, 香山站 110 kV 侧 TV 理论上应感受到的 $3U_0$ 为 300 V, 但电压互感器在系统电压升高时铁心会饱和, 故实际可传变出的电压为 220~230 V。如香山站变压器中性点间隙未被击穿, 主变中性点零序过压保护动作, 跳香山站变压器各侧开关; 如香山站变压器中性点间隙击穿, 变压器中性点间隙零序过流保护动作, 跳香山站变压器

各侧开关。这时故障消失, 主供电源侧汉香线 152 号线路重合闸装置检线路无压, 线路开关重合成功, 恢复香山 110 kV 母线供电。但这时显然没有意义了, 香山地区已经失压了。

2) 在电网接线图 2 所示电网中: 正常方式下, 采用本地区 220 kV 云西站 1 号主变 220 kV 侧和 110 kV 侧中性点直接接地, 110 kV 金河电站 1 号主变中性点直接接地, 本地区 110 kV 及以上网络中的其余 220 kV 和 110 kV 主变中性点经间隙接地方式运行。穿心店站一侧接大电源万春站一侧接小电上网金河电站, 金河电站的装机容量为 18 kW。穿心店站正常负荷为 25 MW。如万穿线线路发生瞬时故障, 万穿线线路两侧保护动作, 开关跳闸。万春站万穿线 174 号开关在穿心店站侧万穿线 122 号开关跳闸后重合闸启动, 检线路无压后重合成功。此时穿心店站的 110 kV 系统接有金河电站而金河电站的装机容量仅有 18 MW, 一般只能发电 10 MW, 而穿心店站的负荷一般有 25 MW, 所以金河电站不能带穿心店站负荷正常运行, 此时在穿心店地区孤网中, 周波、电压会下降很多, 小水电和大电网不能保持同期, 所以穿心店站侧万穿线 122 号开关检同期重合闸不会动作, 穿心店站全站失压。

3 保护改造方案

1) 在电网接线图 1 所示电网中: 按照变压器中性点过电压保护设计原则, 对 110 kV 及 220 kV 有效接地系统中可能形成的局部不接地 (如中性点接地变压器误跳闸) 或低压侧有电源的不接地变压器的中性点应装设放电间隙零序保护, 零序保护在间隙放电或感受到相当大过电压时, 及时切除变压器, 依据这一原则, 德阳电网中的所有变压器中性点均装设了主变中性点间隙, 并配置完善的零序电压和零序电流保护。

2) 根据香山地区 110 kV 网络的接线方式, 提出采用主变中性点零序保护动作首先切除地方小电源上网线路, 再跳香山主变各侧开关的保护方案, 解决大电网与小电机组并列运行线路发生瞬时故障时, 局部地区快速恢复供电的方案。利用现有主变高后备保护装置, 对其主变中性点间隙零序过压、零序过流保护进行改造, 使其在主变中性点零序过压或间隙零序电流保护动作后, 以一较短时限先跳上网线路开

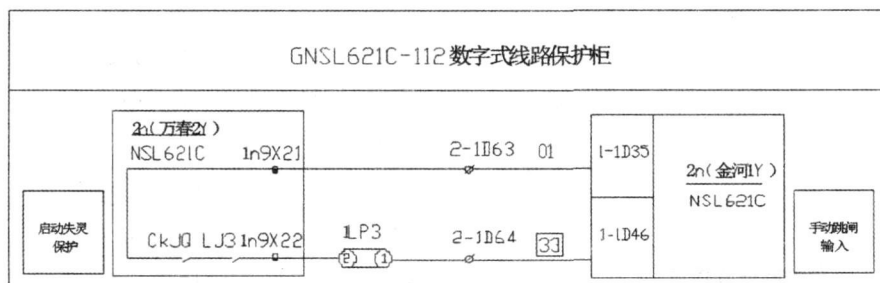


图 4 改造示意图之二

关,再以 0.5 s 延时跳闸主变各侧开关。

3)具体改造方案:见图 3。香山站 1 号主变保护屏为南京电研产品。PBB-06 型保护柜,香山站 35 kV 香水线 515 号保护为南京电研产品 NSA3112 分散式微机保护装置。

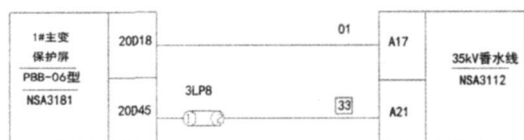


图 3 改造示意图之一

4)在电网接线图 2 所示电网中:根据穿心店地区 110 kV 网络的接线方式,提出穿心店侧万穿线 122 号线路保护动作联跳小电源上网线路,再由对侧线路开关检线路无压重合成功后,本侧开关检母线无压后重合,解决大电网与小电机并列运行线路发生瞬时故障时,局部地区快速恢复供电的方案。具体改造方案:见图 4。穿心店站万穿线 122 号线路保护柜为国电南思产品 GNSL621C-112 数字式线路保护柜。利用国电南思产品 GNSL621C-112 数字式线路保护柜启动失灵保护出口回路联跳水穿线 121 号开关。即在零序、重合闸 CPU 中设置一电流元件,当保护启动且任一相电流大于定值,该元件动作;该元件驱动信号模块上的失灵启动继电器,失灵启动接点与保护动作继电器接点串联后启动失灵保护,实现联跳水穿线 121 号开关。

4 改造后的整定计算原则

保护改造后,主变中性点零序过压、间隙过流、线路失灵启动保护整定计算原则。

1)主变中性点零序过压,间隙过流保护整定计算原则。

根据《3—110 kV 电网继电保护装置运行整定规

程》的整定原则确定改造后的变压器中性点放电间隙零序电流、零序电压保护的整定原则如下:

(1)变压器中性点放电间隙零序电流保护:

电流元件:一次值 40~100 A

时限元件: $t=0.2$ s 跳上网小电线路开关; $t=0.5$ s 跳主变各侧开关。

(2)变压器中性点零序过压保护:

电压元件: $3U_0 = 180$ V

时限元件: $t=0.2$ s 跳上网小电线路开关; $t=0.5$ s 跳主变各侧开关。

2)穿心店万穿线 122 号线路失灵启动保护整定计算原则:保证线路末端短路有 1.5 灵敏度整定

电流元件: $I_{dz} = I_{min}^{(2)} / 1.5$ 。

5 结束语

根据带地方电源供电系统的具体接线方式,经分析后得出在主供电线路发生瞬时故障时,局部地区会发生全站失压事故。提出改造 110 kV 主变高后备保护跳闸回路,以较短时间首先跳上网小电源线路开关,再以一较长时间跳主变各侧开关。对由 110 kV 系统直接上网电站的供电系统,提出改造现有保护装置,在主供线路发生瞬时故障时,终端变电站故障线路开关在跳闸的同时,实现联跳小电上网线路开关,保证主供电线路重合成功,避免发生局部地区全站失压的事故,同时提出了保护装置改造后的整定计算原则。此方案简单可靠,易于实现,提高了电网供电可靠性。

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].

[2] 崔家佩,孟庆炎,陈永芳,熊炳耀. 电力系统继电保护与

(下转第 77 页)

表 1 某站 10 kV 电流互感器动热稳定校核

出线名称	铭牌参数				是否超过铭牌 动、热稳定值
	TA 型号	热稳定电流 (kA · s ⁻¹)	I _b ² × T	动稳定电流 (kA)	
出线 1	LFC-10	7.5/1	56	16	是
出线 2	LFC-10	7.5/1	56	16	是
出线 3	LFC-10	30/1	900	66	否
出线 4	LFC-10	15/1	225	33	是
出线 5	LFC-10	12/1	144	—	是
出线 6	LFC-10	30/1	900	66	否
出线 7	LFC-10	15/1	225	33	是

考核时间。一般情况下,后备保护动作时间比重合闸叠加时间更长,因此,一般情况下可以该断路器的后备保护切除故障时间+裕度时间作为 T₁。

利用前述方法,对某 110 kV 变电站 10 kV 出线电流互感器动稳定和热稳定做了校核,结果见表 1。步骤如下:

(1) 该变电站 10 kV 母线短路容量为 301 MVA,三相短路电流 $I_k = \frac{S_d}{\sqrt{3}U_m} = \frac{301}{\sqrt{3} \times 10.5} = 16.6$ (kA),据此,得电流互感器动稳定电流应大于 42.3 kA。

(2) 根据站内 10 kV 保护配置,确定电流互感器的热稳定能力须满足 $I_b^2 \times T \geq 410$ 。

根据校核结果,除线路 3 和线路 6 外其余线路电流互感器动稳定能力和热稳定能力均不满足运行要求。根据校核结果,现已将存在安全隐患的电流互感器全部更换。

对 20 世纪 90 年代投入运行的 4 座 110 kV 变电站的 10 kV 出线电流互感器进行校核,4 座变电站出线共计 58 回,不满足要求的电流互感器组数为 32 组,不合格率为 55%。根据校核结果统计发现,电流互感器变比越大,动、热稳定电流值越大,一般总路的互感器都能满足要求,专线计量互感器一般变比较小,不满足要求的较多,实际运行中,这些专线用电流互感器时常会由于线路短路发生爆炸,并造成断路器损坏,带来不少的直接经济损失。

对动热稳定电流不满足当地短路电流要求的电流互感器,在更换之前,可采取停用重合闸、10 kV 分

段运行等临时措施,降低线路短路电流持续时间或短路电流值,避免互感器爆炸带来损失,并尽快安排更换工作。

目前,电流互感器厂家都能生产多变比的互感器,并且测量精度都能达到 0.2 S 级,价格与单变比的相差不大,应多采用多变比的互感器。在选择电流互感器时,尽量选用一次电流值大的互感器,提高设备的动、热稳定电流值,由于互感器有多个变比,可以用不同的变比来满足实际测量的需要,既解决电力系统短路电流越来越大的电网问题,也满足了高精度计量的要求。

4 结 论

近年来,特别是 2000 年后,电网容量增加较快,电网短路电流越来越大,一些投入运行时间较长的电流互感器的动、热稳定电流多数不满足安装点的要求,对运行中的互感器动、热稳定电流进行校核非常必要。通过分析,在校核电流互感器动、热稳定电流时,电流值比较容易计算确定,校核的关键在于结合实际情况,认真分析流过互感器的短路电流持续时间,确定热稳定短路电流时间。重点分析了如何校核 10 kV 互感器动、热稳定电流值,其方法同样适合其他电压等级的互感器校核。

作者简介:

李世平 (1963—),男,高级工程师,从事高电压技术工作。
(收稿日期: 2009-02-10)

(上接第 68 页)
安全自动装置整定计算 [M]. 中国电力出版社, 2000.
[3] GB/T 14285-2006. 继电保护和安全自动装置技术规程 [S].

作者简介:
宋汉蓉,女 (1962—),四川德阳人,本科,从事过电网调度运行与继电保护整定计算工作。
程 钢,男 (1975—),四川德阳人,本科,从事过电网调度运行与继电保护整定计算工作。
尹 秦,男 (1963—),四川工程职业技术学院。
(收稿日期: 2008-12-03)

特高压换流站直流场管形母线选择

余波, 吴怡敏, 陶俊培

(西南电力设计院, 四川 成都 610061)

摘要: 常规超高压交流变电站设计中, 各级电压配电装置母线选择是设计的重要内容之一, 而国内工程设计中常忽视直流场母线选择。主要从工作电流、电磁环境、机械强度等几方面重点论述, 提出特高压换流站直流场母线型式、截面、对地高度方面要求, 同时满足经济性和安全性的要求。

关键词: 母线; 选型; 工作电流; 电磁环境; 机械强度

Abstract: The selection of busbar type is one of the most important parts in EHVAC substation design. But the busbar selection in DC field is usually ignored in HVDC project design. The working current, electromagnetic environment and mechanical strength of tubular busbar are analyzed. Based on these analyses, an optimal scheme which is about busbar type, conductor section and the height of busbar in UHVDC project is proposed, which has met the requirements of economy and security simultaneously.

Key words: busbar; type selection; working current; electromagnetic environment; mechanical strength

中图分类号: TM645 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0069-04

常规超高压交流变电站设计中, 各级电压配电装置母线选择是设计的重要内容之一, 而国内直流输电技术也是近十多年来开始大规模采用, 早期的直流输电工程换流站设计多由供货商成套设计, 而直流场属于成套设计范围, 国内设计单位接触较少。常对直流场母线选择忽略, 近年来随着国内直流输电工程大量实施, 根据国产化的相关要求, 设计单位也逐步参与成套设计。

根据目前国内外 ±600 kV 电压等级以下的直流输电换流站的工程经验, 直流场母线型式均采用支持管母线, 支持管母配电装置型式具有占地面积较省、土建投资较低、直流场接线清晰等特点, 大多换流站的直流场母线采用此种母线型式。因此, 特高压直流工程中也考虑采用此种母线型式, 不再详细论述。

直流场母线选择, 主要包括截面和对地高度, 其主要由工作电流、电磁环境、机械强度等几方面综合比较后确定。根据在超高压换流站的设计经验, 对于管母线的管径大小和对地高度主要由电磁环境条件决定, 以下就此几方面内容进行论述。

1 工作电流对母线选型的影响

直流场铝管母线的直流载流量与常规交流变电站的铝管母线的载流量的计算方法相同, 即考虑长期工作电流和短时电流要求的最小截面, 可参照常规交

流变电站的计算方法进行计算, 计算公式如下。

(1) 长期工作电流计算

$$Q_R + Q_t = Q_f + Q_d \tag{1}$$

式中:

Q_R ——铝管母线通过电流时电阻发热量 (W/m);

Q_t ——铝管母线太阳辐射热量 (W/m);

Q_f ——铝管母线向周围介质辐射散热 (W/m);

Q_d ——铝管母线对周围介质的对流散热 (W/m)。

(2) 短时电流计算

$$S \geq \frac{\sqrt{Q_d}}{C} \tag{2}$$

式中:

S ——铝管母线截面积 (mm^2);

Q_d ——短路时的热效应 ($A^2 \cdot s$);

C ——与材料及发热温度有关的系数。

根据上述公式以及换流站的气象条件, 可以确定直流场铝管母线的最小要求, 需要注意的是, 在长期直流工作电流计算时, 应考虑直流侧的长期过负荷电流的影响, 同时为了母线的长期安全运行, 铝管母线在长期工作电流下的表面温度不超过 70℃。

目前, 国内 ±500 kV、3 000 MW 的换流站直流场的极母线采用 Φ250 铝镁合金管, 该管母线的载流量可达 5 000 A 以上, 远远大于其工作电流, 因此, 特高压换流站直流场极母线按照载流量选择, Φ250 管形

母线已经满足要求。

2 电磁环境对母线选型的影响

2.1 电磁环境标准

换流站直流场的电磁环境主要指电场强度、磁场强度以及离子流密度,而要控制换流站直流场电场环境,首先需确定电场强度、磁场强度以及离子流密度的限制值,而无论在超高压还是特高压换流站工程,对于电磁环境的控制指标,原则上应一致,但目前尚无相应的标准要求,参照现已运行的、已被接受的 ± 500 kV 换流站的环境状况、国内外相关标准来确定特高压直流换流站的合成电场、离子流密度和磁场限值。

根据中国 ± 500 kV 换流站电磁环境测试结果,管母线下地面的合成电场大致为 $20\sim 30$ kV/m;由于直流场的母线布置结构复杂,而一般工程中仅仅考虑管母线产生的合成电场,建议其限值取 27.5 kV/m。主要考虑因素如下:

(1) 换流站的合成电场由导体上的电荷和空间电荷共同产生,这些导体不仅仅是母线,空间电荷也不仅仅是母线产生,总的合成电场比由管母线产生的合成电场要大,由管母线产生的合成电场限值不能太大。

(2) 避免换流站工作人员工作时出现较重的暂态电击而影响操作或出现事故。

管母线产生的线下地面的离子流密度限值可以参照直流输电线路的离子流密度限值执行;由管母线电流产生的磁场限值可以参照国际非电离辐射防护委员会给出的公众暴露限值执行,对于直流输电工程,这一限值应该不会起到制约作用。

综上所述,建议由管母线产生的线下合成电场、离子流密度和磁场限值为:

- (1) 地面合成电场限值取 27.5 kV/m;
- (2) 地面离子流密度限值取 100 nA/m²;
- (3) 地面磁感应强度限值取 40 mT。

2.2 电场强度计算

换流站中直流场的正负极母线布置距离很远(多在 150 m 以上),其相互影响在研究管母线产生的电场时可看成单极运行方式。合成电场由两部分叠加而成,一部分由管母线上的电荷产生,另一部分由电晕产生的空间电荷产生。前者主要受母线电压

和母线对地高度的影响,后者主要与母线电压、母线对地高度和母线直径有关。在母线电压和母线对地高度一定的条件下,管母线直径大小直接影响母线表面电场强度大小。而母线表面电场强度大小又直接影响母线起晕程度,进而影响空间离子流密度和合成电场大小。

管母线起晕场强与母线表面状况和天气有关。根据国内外研究机构的试验,在常规海拔条件下,可用于特高压直流换流站的管母线的起晕场强为:

干管母线: 18.4 kV/cm

湿管母线: 11.3 kV/cm

而对于污秽状态管型母线的起晕电场强度的试验数据,仅有的参考数据为 EPR I 在《Bipolar HVDC Transmission System Study Between ± 600 kV and ± 1200 kV: Corona》报告中提供的一组在人工污秽条件下的试验数据(约为 9.2 kV/cm),该报告中未说明试验条件,而国内研究单位尚无此方面的示意数据,该数据是否适合在国内工程中采用有待国内研究单位的进一步验证,这里暂不考虑在污秽条件下的合成场强。

对于户外直流场,需考核管母线在干、湿两种状态下的地面合成场强,对管径为 250 mm、高度 $12\sim 16$ m 的管母线表面场强的计算结果见图 1。从图 1 中可以看出,对于在干燥状态下的管母线,其表面场强较低,未达到管母线的起晕场强 18.4 kV/cm,管母线不会起晕,起面场强即为标称场强,计算结果见图 2。而对于湿状态的管母线,表面场强均超过 11.3 kV/cm,管母线起晕,地面场强应为合成场强,计算结果见图 3。从上述计算结果可以看出,对于户外直流开关场,外径为 250 mm,在湿状态下,母线高度 14 m 就满足 27.5 kV/m 的要求。

对于户内直流场,仅需考核管母线在干燥状态条件下的地面合成场强。母线高度仅需 12.0 m 满足 27.5 kV/m 的要求。

2.3 离子电流密度计算

图 4 为采用 $\Phi 250$ 管母线时,在潮湿状态下,地面最大离子电流密度与管母线对地高度之间的变化曲线。由图 4 可见,无论是在户外还是户内,当管母线对地高度为 $12\sim 18$ m 时,地面最大离子电流密度均远小于 100 nA/m²。因此,离子电流密度不是管母线截面和高度选择的关键条件。

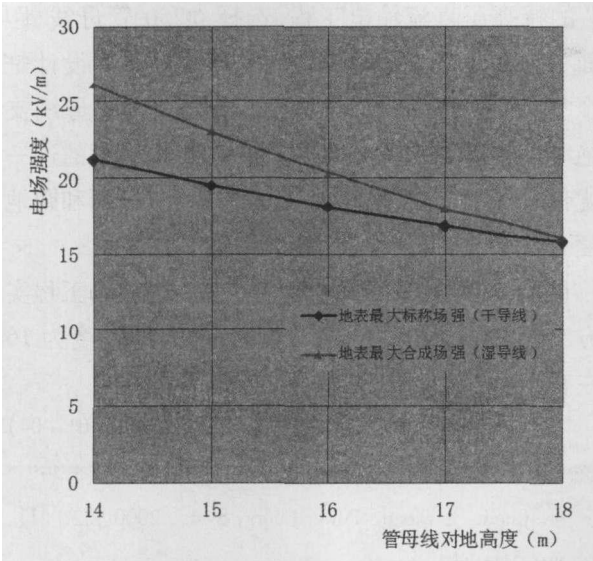


图 1 管母线表面场强与管母线对地高度之间的关系

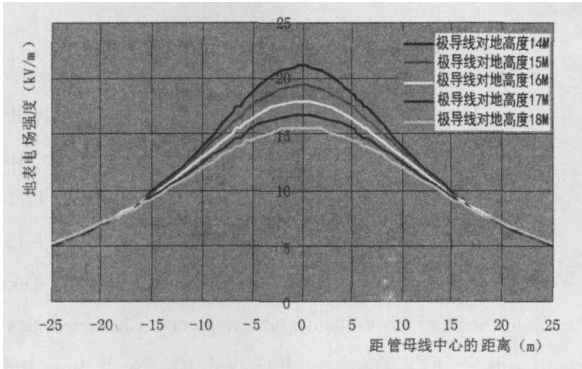


图 2 地面标称场强横向分布

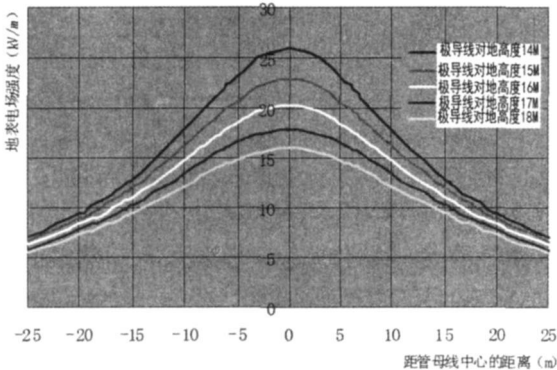


图 3 地面合成场强横向分布 (起晕电压 11.3kV/cm)

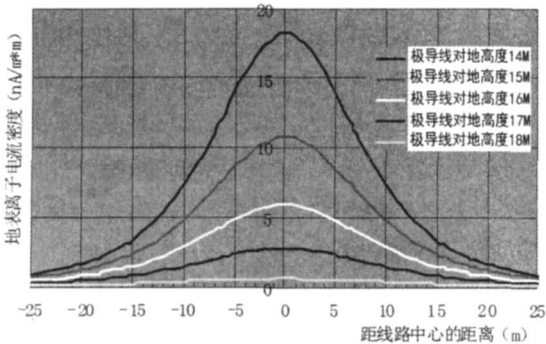


图 4 管母线在潮湿状态下地面最大离子电流密度与母线对地高度间关系图

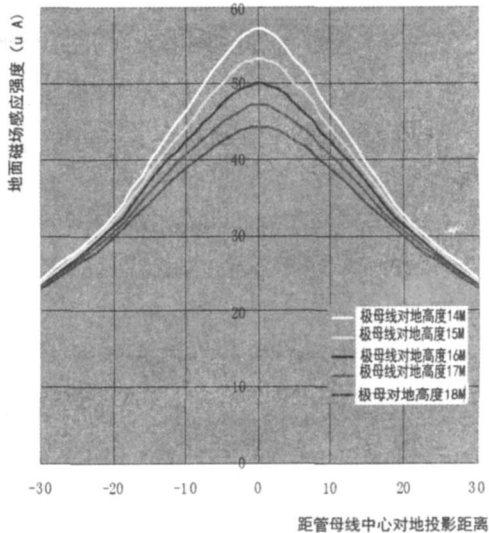


图 5 管母线地面合成磁场与母线对地高度间关系图

2.4 磁场强度计算

直流磁场的产生与交流输电线路产生的工频磁场的机理相同,即电流产生磁场,但直流磁场仅为正负两个方向的恒定电流产生,计算分析更为简单。图 5 为直流场采用 $\Phi 250$ 管母线时,导线通流 4 000 A,两极母线间距 250 m,曲线自上而下的高度变化 12~18 m。ICNIRP 的导则给出一般公众的磁场暴露参照水平(1 Hz 以下),即 40 mT 并且表明直流磁场对人的影响远比交流磁场要小。而通过计算,包括 ± 500 kV 和 ± 800 kV 输电线路的磁场水平,都远远小于 ICNIRP 的磁场暴露参照水平,从这个意义上, ± 800 kV 直流输电线路可以不考虑磁场问题。

可以看出,线路下方附近,磁场随导线高度增加和随距导线的距离增加衰减很快地面合成磁场与管母线对地高度之间的变化曲线。由图 5 可见,无论是在户外还是户内,当管母线对地高度为 12~18 m 时,地面最大磁场强度均小于 60 mT。

3 机械强度的影响

直流场极母线多采用支撑结构,而管母线的机械强度是否能够满足要求,与支柱绝缘子布置有关,布置决定了铝管母线的跨度,从而决定了铝管母线的机械强度是否满足要求,在计算上可以参照交流变电站支持管母线的强度计算公式进行计算,荷载组合和安全裕度的选择上,也可参照其计算方法。此外,需要重点计算在地震条件下的机械强度,正常状况下跨中挠度。

4 结束语

从上述分析情况来看,关于特高压换流站直流开关场母线的选择上,主要受地面合成电场强度和机械强度的影响,而机械强度可以通过调整支撑点的数量进行调节,而工作电流、离子电流密度以及地面磁场强度对直流场管母线的截面和距地高度不起决定性作用。

通过上述论述表面,对于 ± 800 kV、5 000~6 400

MW 的特高压直流输电工程,选择 $\Phi 250$ 管母线、距地面 15 m 左右就可满足要求,但直流场母线设计是一个复杂的工作,还需结合直流场 ± 800 kV 母线支柱绝缘子的特性,进行管母线截面和距地高度的进一步优化设计工作,最终确定直流场母线的截面和距地高度。

目前,云广特高压直流工程换流站直流场工程实施方案中,极母线选择 $\Phi 250$ 管母线,距地高度为 16 m 左右。

(收稿日期:2009-01-04)

(上接第 18 页)

在完成对各发电机的 f 和频率滑差 $\frac{df}{dt}$ 以及惯性常数的估算之后,未知量 ΔP 就能从式 (2) 中得到。进一步,可以得到要切除的负荷量:

$$\sum P_{LS} = \Delta P - K_L \Delta f_{ss} \quad (5)$$

式中: $\sum P_{LS}$ 为总减负荷功率; ΔP 为系统总的不平衡功率; K_L 为负荷调节效应系数。

如果考虑到充分发挥系统旋转备用容量 (SR, spinning reserve capacity) 的作用,那么减负荷总量为:

$$\sum P_{LS} = \Delta P - K_L \Delta f_{ss} - SR \quad (6)$$

3 小结

前面提出了一种新的自适应的低频减载方案,该方案基于对故障大小的估计和判断,并根据故障大小的变化而改变。该方案的准确性有赖于对 f 和频率滑差 $\frac{df}{dt}$ 的准确测量,这将是下一步所关注的问题。

参考文献

- [1] 方勇杰. 电力系统的自适应解列控制 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 41-44.
- [2] SMAHA, D. W. et al.: 'Coordination of load conservation with turbine underfrequency protection', IEEE Trans Power Appar Syst 1980, 99, pp 1137-1150.
- [3] PRASETIJO, D. et al.: 'A new load shedding scheme for limiting under-frequency', IEEE Trans Power Syst, 1994, 9, (3), pp 1371-1378.
- [4] HUANG, S. J., and HUANG, C. C.: 'An adaptive load shedding method with time-based design for isolated power

- er systems', Electr Power Energy Syst, 2000, 22, (1), pp 51-58.
- [5] [苏] БЕЖКОБ Б. А. 电力系统过渡状态控制 [M]. 杨笑石, 张金镔, 译. 北京: 科学出版社, 1989.
- [6] P. Harrison: 'Restoring system stability by under frequency load shedding in circumstances of sudden supply deficiency. In: Proceedings of the IFAC Symposium on Automatic Control of Power Generation Distribution and Protection Pretoria (Republic of South Africa); 1980. 15-19.
- [7] Kalanishwamy K. A. et al.: 'Optimal Load Shedding Taking into Account of Voltage and Frequency Characteristics of Loads', IEEE Trans on PAS Vol 104, No 6, June 1985.
- [8] 高元楷, 王漪, 郑定海. 东北电力系统低频控制 [C]. 中国电机工程学会稳定控制装置研讨会资料, 湖北武汉, 1989.
- [9] 秦明亮. 在频率紧急控制装置中扩充 $\frac{df}{dt}$ 应用的探讨 [J]. 电网技术, 1998, (6): 39-41.
- [10] Delfino B, Massucco S, Morini A, Scalera P, Silvestro F.: 'Implementation and comparison of different under frequency load shedding schemes', Power Engineering Society Summer Meeting 2001, (1).
- [11] ANDERSON, P. M., and FOUAD, A. A.: 'Power system control and stability' (The Iowa Press Ames 1977).

作者简介:

巫 柯 (1983-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作;

李兴源 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作;

李青芸 (1982-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作。

(收稿日期:2009-01-09)

220 kV 母线保护改造问题

何仕卿

(广元电业局, 四川 广元 628000)

摘要:对母线保护改造工作中所遇到的二次接线问题进行分析, 并提出相应解决办法。

关键词:母线保护改造; RCS-915; 二次接线

Abstract: The problems of secondary wiring occurring in bus protection reform are analyzed and the corresponding solutions are proposed

Key words: bus protection reform; RCS-915; secondary wiring

中图分类号: TM755 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0073-02

母线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, 能灵敏快速切除故障。广元局所辖的 220 kV 和 110 kV 母线保护多数通过改造更换为南瑞继保公司的 RCS-915 微机母线保护装置, 该保护装置具有适合于现场各种主接线方式、动作速度快、灵敏度高、性能稳定且运行维护方便。现提出一些改造过程中所遇的问题和解决办法。

1 改造二次接线问题

RCS-915 母线保护屏内端子排上二次布线设计清晰明了, 但在各单元的外部回路有一些细节性问题特别需要注意, 如果接线错误, 在一些特殊故障中将会产生严重后果。

1.1 线路电流互感器绕组选择

电流互感器的极性同以母线侧为正极性, 二次采用减极性标注接线, 但在互感器的二次绕组选择上, 容易出现选择错误, 如图 1 所示。

图 1 中 (a) 为错误接法, 电流互感器的 U 型环底部是其绝缘薄弱环节, 为互感器本体接地短路的常发生点, 如 (a) 的错误接法, 当底部发生击穿短路事故

时, 就会造成母差保护动作, 扩大事故影响范围。如图 1(b) 的为正确接法, 当底部短路时, 母差保护电流回路不会形成差流, 而由线路保护的距离或接地保护快速出口跳开该断路器, 切除故障。此外需要注意的是母差保护和线路保护所接 TA 二次绕组要互相满足保护范围相互交叉, 增加可靠性, 防止在两绕组之间接地故障时母差和线路保护均拒动的情况发生。

1.2 母联死区保护接线

若母联开关和母联 TA 之间发生故障, 断路器侧母线跳开后故障仍然存在, 正好处于 TA 侧母线小差的死区, 为提高保护动作速度, 本装置专设了母联死区保护, 其逻辑框图如图 2。

由逻辑图可看出, 母联死区保护在差动保护发母线跳令后, 母联开关已跳开而母联 TA 仍有电流, 且大差比率差动元件及断路器侧小差比率差动元件不返回的情况下, 经死区动作延时跳开另一条母线。各线路支路电流互感器同名端在母线侧, 则母联电流互感器同名端在接线时候应选 I 母线侧。但对于母联电流互感器的二次绕组接线选择如果错误, 在特定的故障下就会造成母联死区保护误动, 切除所有母线, 扩大事故范围。如图 3 所示, 如果错误接在绕组 3 或

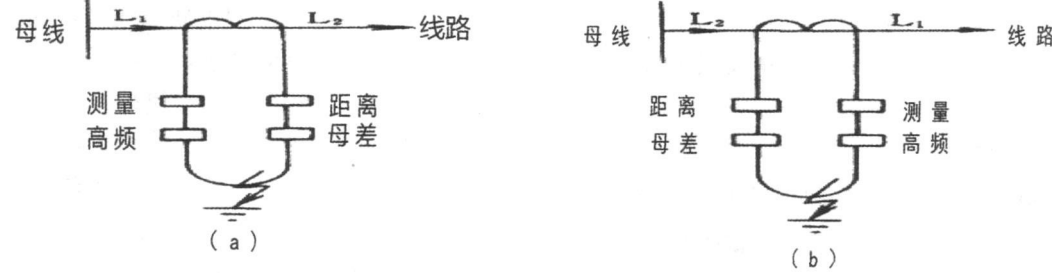


图 1 线路电流互感器绕组

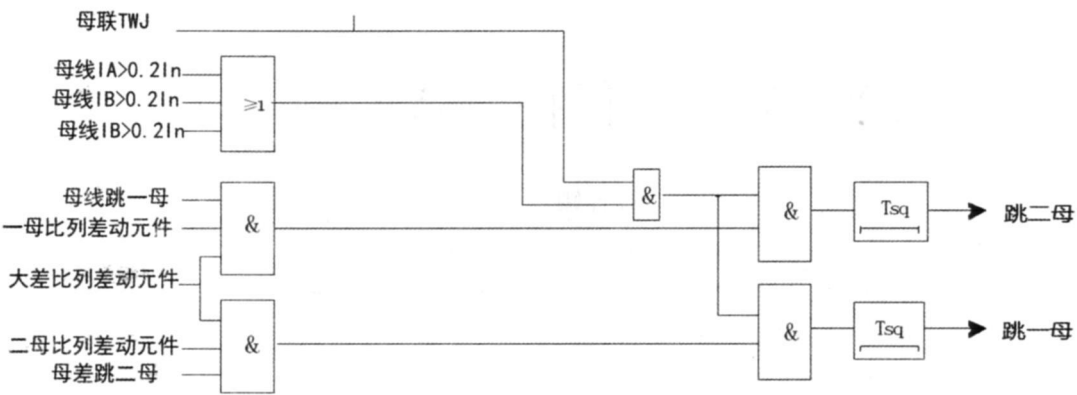


图 2 母联死区保护逻辑图

绕组 4。在电流互感器底部击穿短路时，就会造成大差和 I 母小差动作，切除 I 母和母联断路器，但故障点仍在，根据逻辑图，此时同时满足了母联断路器跳位而 TA 仍有电流、大差和 I 母小差动作，经 T_{sq} 延时，死区保护动作跳开 II 母，造成两段母线无选择全部跳开，扩大了事故范围。正确的接法应该是接在绕组 1。电流互感器底部击穿短路时，只起动大差和 II 母小差，仅切除 II 母和母联断路器，不会造成母联死区保护动作，使其死区保护范围减至最小。

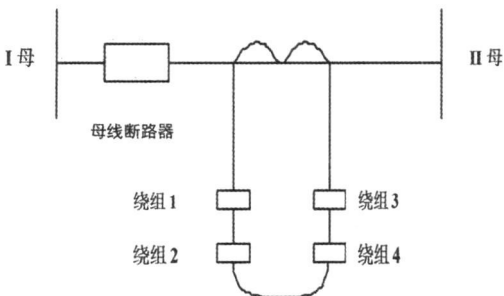


图 3 母联电流互感器绕组

1.3 变压器断路器失灵保护

变压器断路器的失灵保护在变压器低压侧内部故障时，可能存在母保装置电压元件因灵敏度不够，不动作的情况。为了解决这个问题，对于微机变压器保护，比如本站的 RCS-974 可直接采用装置提供的由“零序或负序电流 + 保护动作触点和断路器合闸位置”构成的与逻辑启动的失灵启动触点在第一时间来解除母线保护装置的失灵电压闭锁，取自母保屏的 ZD5 端子正电源，经该触点后接入解除失灵闭锁的开入 ZD7 端子。

1.4 母联充电的保护措施

当一组母线检修后再投入之前，利用母联断路器对该母线进行充电试验时可投入母联充电保护，但为了防止在充电时，检修母线有故障或是母联断路器辅助接点与实际不同步等原因错误启动非故障运行母

线母差，造成母差保护错误切除正常运行母线，则需要母联充电时采取一定的措施。不同的母差保护装置，采取了不同的措施，比如 BP-2B 装置采用“充电预合”设置母联开关预投逻辑，在母联开关由断变合时，预先投入母联电流 50 ms WMZ-41A 装置采用在“短充电”方式下合母联后闭锁母差保护 700 ms RCS-915 装置对于母联断路器跳位将母联电流退出小差，其前提条件是两段母线均有电压，所以在充电过程中可以避免因母联辅助接点切换慢于电流采集而错误启动母差，在接线中要注意对母联断路器的辅助接点做好测试，防止切换不可靠而影响小差差流的计算。另外，RCS-915 设有充电闭锁 CDBS 控制字，可以在充电过程中闭锁母差 300 ms 可在充电过程中参考使用。

1.5 母联非全相

当母联开关是分相操作机构时，需要启用母联非全相保护，注意母联非全相开入的正确接入。为了可靠性，需要取开关的实际辅助接点，采用三相常开、常闭分别并联后再串联的接入方式，另外需要注意 RCS-915 开入是弱电，需要加装辅助继电器作强弱电转换后再接入保护装置。

2 结 论

继电保护在电网运行中具有极其重要的作用，随着技术的不断发展，保护装置也会相应地更新换代，本次母线保护改造，更换为新的微机保护装置后，极大地提高了保护装置的性能，在改造工作中一定要吃透装置的性能和原理，把握住每一个技术细节，不放过每一个疑问，防止人为的原因给保护的运行留下隐患，为电网的稳定运行保驾护航。

(收稿日期: 2009-02-15)

校核电流互感器动稳定和短时热电流的方法

李世平, 蒋 平

(四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘 要:分析了电网短路电流的特点, 结合 10 kV 配网特点, 介绍了根据电网短路容量校核及选择电流互感器额定动稳定电流和短时热稳定电流的方法。

关键词:电流互感器; 动稳定电流; 热稳定电流

Abstract The characteristics of short-circuit current of power grid are analyzed. According to the characteristics of 10 kV distribution network, the method to calibrate and select the rated dynamic stability current and the short-time heat stability current is introduced based on the short-circuit capability of power grid.

Key words current transformer; dynamic stability current; heat stability current

中图分类号: TM644 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0075-03

随着电力系统规模扩大, 系统短路容量快速增加。以 10 kV 系统为例, 短路容量从以前的几千安增大到了几十千安。电网使用电流互感器的额定动稳定电流和额定短时热稳定电流是按照当时电力系统短路容量设计的。电网短路容量增大导致电流互感器实际承受的故障电流超过互感器承受能力, 从而带来安全隐患, 致使经常发生电流互感器爆炸事故, 造成不必要的损失。介绍了电流互感器动稳定和短时热稳定电流校核的一般方法, 可供使用者借鉴。

1 电流互感器动、热稳定性及评价方法

为保证电流互感器完成其职能, 除必须具有良好的精度及绝缘特性外, 电流互感器还需具有一定的耐受短路电动力冲击的能力以及耐受短时热冲击的能力, 分别用电流互感器的额定动稳定电流 I_{dyn} 和额定短时热电流 I_h 衡量。额定短时热电流 (I_h) 是在二次绕组短路情况下, 电流互感器在 1 s (或厂家规定的其他时间 T) 内无损伤地可承受的最大一次电流方均根值, 与互感器导体电阻、材料比热系数及耐热能力等因素有关。额定动稳定电流 (I_{dyn}) 是在二次绕组短路的情况下, 电流互感器能承受其电磁力的作用而无电气或机械损伤的最大一次电流峰值。

在电流互感器型式试验中, 需验证电流互感器的动稳定电流和短时热稳定电流是否达到铭牌值。做短时热稳定电流试验时, 互感器的初始温度应在 10 ~ 40 °C 之间, 试验在二次绕组短路条件下进行, 所加

试验电流 I 和持续时间 t 应满足 $(I^2 t)$ 不小于 $I_h^2 T$ 且 t 在 0.5 ~ 5 s 之间。

动稳定试验应在二次绕组短路条件下进行。所加一次电流至少有一个峰值不小于额定动稳定电流 (I_{dyn})。动稳定电流通常为短时热电流的 2.55 倍。

动稳定试验可以与上述热试验合并进行, 只需试验中电流第一个主峰值不小于额定动稳定电流 (I_{dyn})。

2 电流互感器动、热稳定性校核方法

即使在设计中做了仔细的考虑, 当电网扩大后, 电流互感器仍然可能出现实际故障电流超过互感器动稳定承受能力或热稳定承受能力的情况。为防止因实际故障电流超过设备承受能力而使电流互感器遭到电动力破坏或热损坏, 需及时更换超限运行的电流互感器。

在电力系统中, 一般三相短路电流数值最大, 产生的电动力和发热也最严重。在确定实际故障电流是否超出电流互感器动稳定电流和短时热电流限制时, 可以根据三相短路电流来校核。

设三相短路发生在 $u(t) = 0$ 时刻:

$$i(t) = \sqrt{2} \bar{I} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) + \sqrt{2} \bar{I} e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{1}$$

$$\bar{I} = \frac{U_m}{Z} \tag{2}$$

式中, i ——短路全电流瞬时值;
 U_m ——系统母线电压有效值。对于不同电压等

级,可取 10、5、37、115、230、525 kV;

I'' ——由次暂态参数确定的短路电流周期分量有效值;

Z ——系统侧等值阻抗。

上式右边第一部分为正弦电流,是短路电流的周期分量。第二部分是一个按指数衰减的直流分量,又叫非周期分量或自由分量, $i_k(t)$ 可以表达为:

$$i_k(t) = i_p(t) + i_{np}(t)$$

短路后半周期时刻 ($t=0.01$ s), 短路电流瞬时值达到最大值, 这一瞬时电流称为短路冲击电流, 用 i_{sh} 表示。

$$i_{sh} = i_k(0.01) = i_p(0.01) + i_{np}(0.01) \approx \sqrt{2} I'' (1 + e^{\frac{-0.01}{\tau}}) = k_{sh} \sqrt{2} I''$$

对高压电网, 一般取 $\tau=0.05$ s 得到:

$$i_{sh} = 2.55 \times I'' \quad (3)$$

式中, k_{sh} ——短路电流冲击系数。

进行互感器大电流稳定性校核时需要知道母线短路容量 S 。根据 S 可以利用式 (4) 计算短路电流。

$$I_k = \frac{S}{\sqrt{3} U_m} \quad (4)$$

一般情况下, 电网分析部门给出的短路容量是由电网次暂态参数获得, 故由短路容量 S 求出的短路电流可直接用于电流互感器动稳定能力校核。当校核对象距离电厂很近时, 利用短路容量 S 求得的短路电流校核互感器热稳定能力将显得偏于严格; 当校核对象远离电厂时, 校核结果将更接近真实。所以, 在利用短路容量 S 校核互感器热稳定能力前, 需对次暂态过程持续时间做出判断。

在大电网的配网电压等级, 发电机次暂态过程及超高压输电系统暂态过程对配网过渡过程影响很小, 利用 S 计算短路电流并作为校核电流互感器动稳定和热稳定的依据是可行的。

在进行配网电流互感器校核时可按下面步骤进行:

1) 利用式 (5) 计算互感器安装点稳态短路电流 I_k , 检查短路电流暂态分量最大值 ($2.55 \times I_k$) 是否小于电流互感器额定动稳定电流 I_{lyn} 。

$$2.55 \times \frac{S}{\sqrt{3} U_m} \leq I_{lyn} \quad (5)$$

2) 根据后备保护切除故障时间并留有一定时间裕度, 检查流过电流互感器的稳态短路电流及其时间是否超过互感器短时热稳定电流。10 kV 出线的后

备保护为主变压器的过流保护, 动作时间一般为 1~2 s 根据现场情况实际整定情况确定。

根据后备保护确定的断路器切除故障时间 + 裕度时间, 确定热稳定考核时间 T_1 。当电流互感器额定热稳定电流为 I_{th} 、对应时间为 T 时, 可按式 (6) 校核电流互感器热稳定电流。

$$I_k = \frac{S}{\sqrt{3} \times U_m} \leq \frac{I_{th} T}{T_1} \quad (6)$$

以上两式中:

I_{lyn} 为电流互感器额定动稳定电流;

I_{th} 为电流互感器额定短时热稳定电流;

T 为与电流互感器额定短时热稳定电流对应的持续时间;

T_1 为由后备保护确定的断路器切除故障时间 + 裕度时间。当故障切除时间 + 重合后切除时间 + 裕度时间大于前者时, 取大者。

3 电流互感器动、热稳定电流的选择

当被校核电流互感器的动稳定电流和热稳定电流不满足要求时, 需进行更换。选择电流互感器时, 应保证其额定动稳定电流 I_{lyn} 满足式 (7) 约束。

$$I_{lyn} \geq 2.55 \times \frac{S}{\sqrt{3} \times U_m} \quad (7)$$

电流互感器的额定短时热电流应满足式 (8) 约束。

$$I_{th} T \geq \frac{S}{\sqrt{3} \times U_m} \times T_1 \quad (8)$$

在电力系统中, 电流互感器安装地点不同, 流过的短路电流不同。10 kV 线路一般均为单电源, 短路电流情况最为简单, 便于分析说明选择原则。以下就以 10 kV 出线电流互感器为例, 分析说明电流互感器的动稳定电流和短时热稳定电流的选择方法, 其分析方法也同样适用于其他安装地点的电流互感器的选择。

对于 10 kV 出线, 应按出线端三相短路选择电流互感器。短路电流持续时间越长, 电流互感器发热越严重。在计算短路电流持续时间时, 应考虑断路器可能发生拒动并由后备保护动作切断短路电流的情况。另外, 当断路器重合闸时, 由于断路器两次动作时间间隔很短, 电流互感器的热量来不及散发, 温度不会发生明显变化, 应将两次短路电流持续时间相加作为短路电流持续时间并考虑必要裕度时间作为热稳定

表 1 某站 10 kV 电流互感器动热稳定校核

出线名称	铭牌参数				是否超过铭牌 动、热稳定值
	TA 型号	热稳定电流 (kA · s ⁻¹)	I _b ² × T	动稳定电流 (kA)	
出线 1	LFC-10	7.5/1	56	16	是
出线 2	LFC-10	7.5/1	56	16	是
出线 3	LFC-10	30/1	900	66	否
出线 4	LFC-10	15/1	225	33	是
出线 5	LFC-10	12/1	144	—	是
出线 6	LFC-10	30/1	900	66	否
出线 7	LFC-10	15/1	225	33	是

考核时间。一般情况下,后备保护动作时间比重合闸叠加时间更长,因此,一般情况下可以该断路器的后备保护切除故障时间+裕度时间作为 T₁。

利用前述方法,对某 110 kV 变电站 10 kV 出线电流互感器动稳定和热稳定做了校核,结果见表 1。步骤如下:

(1) 该变电站 10 kV 母线短路容量为 301 MVA,三相短路电流 $I_k = \frac{S_d}{\sqrt{3}U_m} = \frac{301}{\sqrt{3} \times 10.5} = 16.6$ (kA),据此,得电流互感器动稳定电流应大于 42.3 kA。

(2) 根据站内 10 kV 保护配置,确定电流互感器的热稳定能力须满足 $I_b^2 \times T \geq 410$ 。

根据校核结果,除线路 3 和线路 6 外其余线路电流互感器动稳定能力和热稳定能力均不满足运行要求。根据校核结果,现已将存在安全隐患的电流互感器全部更换。

对 20 世纪 90 年代投入运行的 4 座 110 kV 变电站的 10 kV 出线电流互感器进行校核,4 座变电站出线共计 58 回,不满足要求的电流互感器组数为 32 组,不合格率为 55%。根据校核结果统计发现,电流互感器变比越大,动、热稳定电流值越大,一般总路的互感器都能满足要求,专线计量互感器一般变比较小,不满足要求的较多,实际运行中,这些专线用电流互感器时常会由于线路短路发生爆炸,并造成断路器损坏,带来不少的直接经济损失。

对动热稳定电流不满足当地短路电流要求的电流互感器,在更换之前,可采取停用重合闸、10 kV 分

段运行等临时措施,降低线路短路电流持续时间或短路电流值,避免互感器爆炸带来损失,并尽快安排更换工作。

目前,电流互感器厂家都能生产多变比的互感器,并且测量精度都能达到 0.2 S 级,价格与单变比的相差不大,应多采用多变比的互感器。在选择电流互感器时,尽量选用一次电流值大的互感器,提高设备的动、热稳定电流值,由于互感器有多个变比,可以用不同的变比来满足实际测量的需要,既解决电力系统短路电流越来越大的电网问题,也满足了高精度计量的要求。

4 结 论

近年来,特别是 2000 年后,电网容量增加较快,电网短路电流越来越大,一些投入运行时间较长的电流互感器的动、热稳定电流多数不满足安装点的要求,对运行中的互感器动、热稳定电流进行校核非常必要。通过分析,在校核电流互感器动、热稳定电流时,电流值比较容易计算确定,校核的关键在于结合实际情况,认真分析流过互感器的短路电流持续时间,确定热稳定短路电流时间。重点分析了如何校核 10 kV 互感器动、热稳定电流值,其方法同样适合其他电压等级的互感器校核。

作者简介:

李世平 (1963—),男,高级工程师,从事高电压技术工作。
(收稿日期: 2009-02-10)

(上接第 68 页)
安全自动装置整定计算 [M]. 中国电力出版社, 2000.
[3] GB/T 14285-2006. 继电保护和安全自动装置技术规程 [S].

作者简介:
宋汉蓉,女 (1962—),四川德阳人,本科,从事过电网调度运行与继电保护整定计算工作。
程 钢,男 (1975—),四川德阳人,本科,从事过电网调度运行与继电保护整定计算工作。
尹 秦,男 (1963—),四川工程职业技术学院。
(收稿日期: 2008-12-03)

基于 MATLAB 的跨平台电能质量分析软件研究

刘宇航, 黄 军, 周 晋, 董 祥

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 在电能质量测试工作中, 需要对测试仪器采集的数据进行分析。介绍了基于 MATLAB 7.1 开发的离线电能质量分析软件的原理和功能。无论是对于三相电力系统还是单相牵引供电系统, 该软件都能进行电能质量的自动分析和定制分析, 具有通用、高效、灵活和人性化的特点。最后提出了利用 MATLAB Compiler 和 MATLAB Component Runtime 实现软件跨平台和独立运行的方法。

关键词: 电能质量; 分析软件; 跨平台

Abstract: Data gathered by measuring instrument are required to be analyzed in power quality testing. The principle and the function of the off-line power quality analysis software are introduced. Power quality analysis can be performed automatically whether on three-phase power system or on single-phase traction system by the software which is general, high efficient, flexible and humanized. In the end, the method to make the software be capable to execute independently and on multi-platform is proposed by using MATLAB Compiler and MATLAB Component Runtime.

Key words: power quality; analysis software; cross-platform

中图分类号: TM769 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0078-03

在电能质量测试工作中, 需要对测试仪器采集的数据进行分析。电能质量测试仪一般都配有在线监视和离线分析软件, 但常常不能完全提供分析工作所需的功能, 如对任意时间点或时间段的电能质量进行分析, 消除背景谐波和负序的影响, 根据不同电压等级、根据国标自动采取相应的算法^[1], 以及根据需要自动、灵活地生成图表等。例如对于交流电气化铁路牵引变电所的电能质量分析, 除了三相电力系统常用的分析方法外, 还要根据供电电压、接线形式、行车情况等具体分析。而这些往往需要对仪器采集的数据离线的进行再次编程处理或利用其他统计工具进行人工分析。所以, 通用于电力系统和牵引供电系统的, 功能强、效率高、设置灵活, 并且操作方便的电能质量分析软件将极大地简化电能质量离线分析工作, 提高工作效率。

1 算 法

1.1 电压偏差

国标 GB/T 12325-2003《电能质量 供电电压允许偏差》^[2]中规定:

$$\text{电压偏差}(\%) = \frac{\text{实测电压} - \text{额定电压}}{\text{额定电压}} \times 100(\%)$$

35 kV 及以上供电电压正、负偏差的绝对值之和不超过标称系统电压的 10%; 10 kV 及以下三相供电电压允许偏差为标称系统电压的 $\pm 7\%$; 220 kV 单相供电电压允许偏差为标称系统电压的 $+7\%$, -10% 。

对于 35 kV 及以上供电电压, 采取如下方法计算: 计算出每一个采样点的电压偏差 $\text{Dev}(t)$, 统计出每一分钟的最大偏差值 $\max(\text{Dev})$ 和最小偏差值 $\min(\text{Dev})$, 如果 $\max(\text{Dev}) - \min(\text{Dev}) < 10\%$, 则认定这一分钟的电压合格, 反之, 则不合格。

铁道部行业标准 TB 10009-2005《铁路电力牵引供电设计规范》^[3]中规定: 牵引网的最高电压为 29 kV, 最低电压为 20 kV^[1]。

1.2 电压畸变率

按照国标 GB/T 14549-93《电能质量 公用电网谐波》^[4]和 GB/Z 17625.4-2000《电磁兼容 限值 中、高电压电力系统中畸变负荷发射限值的评估》^[5]的规定:

谐波电压含量

$$U_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2}$$

电压畸变率

$$\text{THD}_u = \frac{U_H}{U_1} \times 100(\%)$$

谐波测量的数据应取测量时段内各相实测量值的 95% 概率值中最大的一相值, 作为判断谐波是否超过允许值的依据。实测值 95% 概率值按下述方法近似选取: 将实测值按由大到小次序排列, 舍弃前 5% 的大值, 取剩余实测值中的最大值。

1.3 电压不平衡度

国标 GB/T 15543—1995《电能质量 三相电压允许不平衡度》^[6]规定了不平衡度的表达式:

$$\epsilon_U = \frac{U_2}{U_1} \times 100(\%)$$

式中: U_1 ——三相电压的正序分量方均根值, V;

U_2 ——三相电压的负序分量方均根值, V。

判断是否合格, 应和实测值的 95% 概率值对比, 即将实测值按由大到小次序排列, 舍弃前 5% 的大值, 取剩余实测值中的最大值。

1.4 功率因数

对于三相系统

$$\begin{cases} p(t) = p_A(t) + p_B(t) + p_C(t) \\ q(t) = q_A(t) + q_B(t) + q_C(t) \end{cases}$$

一段时间 $[t_1, t_2]$ 内, 无功若采用反送不计的方式, 则

$$\begin{cases} P = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1[t_1, t_2], p(t) > 0}^{t_2} p(t) dt \\ Q = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1[t_1, t_2], q(t) > 0}^{t_2} q(t) dt \end{cases}$$

无功若采取反送正计的方式, 则

$$\begin{cases} P = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1[t_1, t_2], p(t) > 0}^{t_2} p(t) dt \\ Q = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |q(t)| dt \end{cases}$$

有功的计量方式均为反送不计。

2 软件的实现

软件基于 MATLAB 7.1 编程实现。MATLAB 提供了大量的数学运算和矩阵操作函数, 还提供了丰富的数值绘图函数, 这些函数功能强大, 稳定性好, 经过了长期、大量的检验, 可靠性高。利用 MATLAB 提供的图形用户界面 (GUI) 编辑器, 可以方便地设计软件的图形界面, 如图 1。并且由于 MATLAB 推出了不同操作系统平台下的版本, 基于 MATLAB 开发的图形界面程序可以相当方便地移植到 Linux 或 MAC/OS

系统下, 这是与 VC/MFC 等开发平台相比很大的优点。

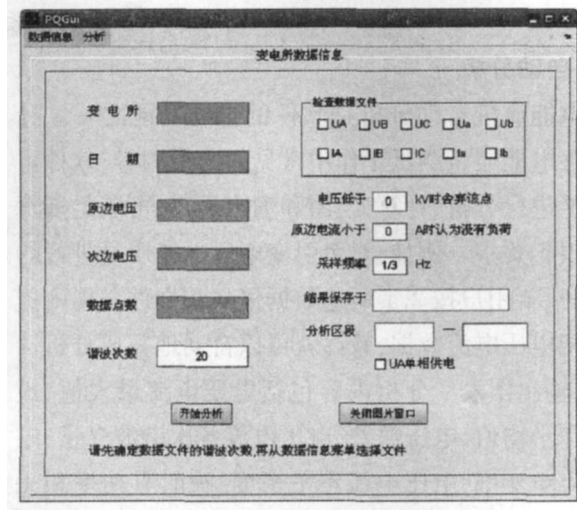


图 1 电能质量分析软件的界面

2.1 数据格式及信息初始化

本软件进行分析所需的数据来自各种测试仪器, 要求的数据文件格式为二进制文件、文本文件或 Excel 文件, 其结构如图 2。

本软件的一个特色就是可以根据数据文件的文件名自动的获得数据信息, 前提是所有的数据文件均按如下规则命名, 以二进制 dat 文件为例。

〈变电所名〉〈变量名〉〈额定电压〉—〈日期〉. dat

如马角坝变电所 A 相电压 U_A 数据文件, 额定电压 110 kV, 测试日期 2008 年 9 月 27 日, 则文件名应为:

马角坝 UA110—08—09—27. dat

程序可自动识别, 并检查各相电压和电流文件是否存在。

对于三相系统, 完整的数据应包括三相电压和三相电流数据; 对于电气化铁路中三相—两相或单向系统, 也须提供相应原、次边各相的电压、电流文件。在读取数据文件前, 要求用户提供谐波次数和采样频率信息。

例如, 对成都铁路局辖下马角坝牵引变电所进行的电能质量测试, 采用西南交通大学电气工程学院研制的 BDC—5 型牵引变电站电能质量监测系统, 记录了 24 h 内一次侧三相电压电流和牵引侧两相电压电流, 记录数据的频率为 $1/3$ Hz 数据文件中包含基波和 2~20 次谐波的幅值和相角。则在软件中将谐波次数设置为 20, 采样频率设置为 $1/3$ Hz 选择从 U_A 、 U_B 或 U_C 数据文件获取信息即可。



图 2 数据文件存储结构

2.2 自动分析

电能质量自动分析是软件的主要功能之一。针对实际电能质量测试工作中常见的分析内容,软件可自动地进行分析、计算、绘图和输出报表,可满足撰写测试报告要求。例如,对牵引变电所电能质量进行的测试,只要用户按 2.1 所述数据格式和文件名规则提供各相电压电流数据,软件就可以自动地完成分析计算,并输出图表。分析内容包括电压电流最大值、最小值和平均值、电压偏差、电压电流各次谐波含量、电压电流畸变率、电压电流不平衡度、瞬时有功率和无功功率、平均功率因数等。

2.3 定制分析

除了自动分析外,用户还可以灵活地利用本软件进行定制分析。如将 U、I、P、Q 等各种参数绘于一张图上进行比较分析,绘制 P、Q 等随 I 变化的趋势图,分析其波和谐波的相位变化或专门针对某一次谐波进行分析等。

2.4 独立、跨平台运行

MATLAB 7.1 中调用 MATLAB Compiler 命令为 mcc。如对 PQGui.m 进行编译,则可执行如下语句:

```
mcc -m PQGui.m
```

编译后的可执行文件在 Windows 系统中为 PQGui.exe 在 Unix/Linux 或 MacOS 平台下为 PQGui。为了实现软件独立于 MATLAB 环境运行,需要在要运行软件的计算机上安装相应的运行库——MATLAB Component Runtime。在 <matlabroot>\toolbox\compiler\deploy\win32 下找到 MCRInstaller.exe 在目标机器上运行该文件安装 MATLAB Component Runtime。安装完成后,就可以在该机器上运行用 MATLAB Compiler 编译的程序了。

3 结 论

基于 MATLAB 开发的跨平台电能质量分析软件实现了数据信息的自动识别,电能质量自动分析和定制分析功能。得益于 MATLAB 的多种平台版本 MATLAB Component Runtime 运行库,软件实现了跨操作系统平台运行。该软件通用于各种电压等级和接线方式的电能质量分析,运行效率高,分析方式灵活,界面设计人性化。

参考文献

[1] 贺建闽,黄治清. 电压质量问题分析 [J]. 电气化铁道, 2002, 3.
[2] GB/T 12325—2003, 电能质量 供电电压允许偏差 [S].
[3] TB 10009—2005, 铁路电力牵引供电设计规范 [S].
[4] GB/T 14549—93, 电能质量 公用电网谐波 [S].
[5] GB/Z 17625.4—2000, 电磁兼容 限值 中、高电压电力系统中畸变负荷发射限值的评估 [S].
[6] GB/T 15543—1995, 电能质量 三相电压允许不平衡度 [S].

作者简介:

刘宇航 (1983—), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 研究方向为牵引供电系统理论。
黄 军 (1983—), 男, 四川内江人, 硕士研究生, 研究方向为供电系统仿真与优化。
周 晋 (1983—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统谐波分析。
董 祥 (1983—), 女, 甘肃通渭人, 硕士研究生, 研究方向为电能质量与控制。

(收稿日期: 2008—11—10)

中国首台特高压交流变压器通过关键绝缘性能试验考核

中国首台,也是世界首台 1000 kV、1000 MVA 单体式特高压交流变压器在特变电工沈阳变压器集团有限公司顺利通过带局部放电测量的长时感应电压试验 (ACLD) 的考核。
此前该产品已顺利通过常规项目试验和操作冲击、雷电冲击试验的考核,至此,该产品的关键绝缘性能已通过严格试验验证,中国特高压交流变压器的研制取得重大突破。
此次绝缘试验的成功充分验证和肯定了产品关键绝缘性能,为圆满完成特高压交流变压器全部型式试验提供了重要的技术保障。

YN, vd平衡变压器负序仿真分析

黄 军,魏 光,周 晋,刘宇航

(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘 要:首先分析了 YN, vd平衡变压器的接线原理。推导了 YN, vd变压器原次边电压和电流关系。结合负序电流的通用表达式,讨论了在不同负荷条件下的原边电流不平衡度。最后利用 Matlab 结合某牵引变电所的实测数据仿真分析了变压器的负序情况,并同 YN, d11接线牵引变压器的实测数据进行了分析比较。

关键词:YN, vd平衡变压器;负序电流;不平衡度

Abstract: The connection principle of YN, vd is analyzed. The relationships between primary secondary currents and voltages are deduced. The unbalanced degrees of current in primary winding under different load conditions are discussed, which are based on the general expressions of negative phase sequence current. Finally, the simulation of negative phase sequence current of the transformer is performed with Matlab based on the measured data from a substation. And the simulation result is compared with the measured data of YN, d11 connected traction transformer.

Key words: YN, vd balance transformer; negative phase sequence current; unbalanced degree

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0081-04

目前,在中国现有电气化铁路中,大部分牵引变电所采用的是 YN, d11 变压器。这种变压器由于结构性能的限制,在高压侧存在严重的不对称,有很大的负序电流,对电力系统运行产生不良影响。

YN, vd平衡变压器是一种结构简单、设计制造容易、性能优良、经济效益好的三相变两相变压器。它具有平衡变压器的优点:原边中性点可直接接地,次边有三角联接回路,不需要进行阻抗匹配且两相电路完全独立,适用于电气化铁道采用 BT 或者 AT 供电方式。三相到二相间的对称变换,能有效减弱负序对电力系统的影响。现对 YN, vd平衡牵引变压器的负序特性进行分析。

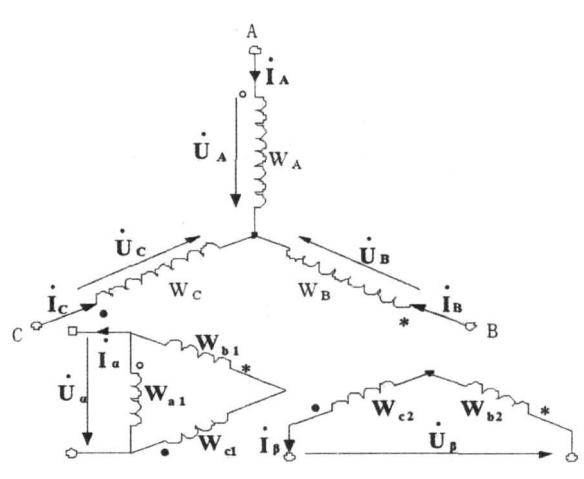


图 1 YN, vd变压器接线原理图

根据图 1 中标注的电压、电流方向,由电流平衡和磁势平衡关系式,可得原次边电流关系如下。

1 YN, vd平衡变压器基本原理

1.1 接线原理图

图 1 中, W_A 、 W_B 、 W_C 为变压器一次侧三相绕组的匝数,其大小关系是 $W_A = W_B = W_C$ 。 W_{a1} 、 W_{b1} 、 W_{c1} 是变压器二次侧 A 相的匝数,其大小关系是 $W_{a1} = W_{b1} = W_{c1}$ 。 W_{b2} 、 W_{c2} 是变压器二次侧 B 相的匝数,其大小关系是 $W_{b2} = W_{c2}$ 。在实际变压器中, W_A 、 W_{a1} 绕在 A 相心柱上; W_B 、 W_{b1} 、 W_{b2} 绕在 B 相心柱上; W_C 、 W_{c1} 、 W_{c2} 绕在 C 相心柱上。

1.2 YN, vd原次边电压、电流关系

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3K_1} & 0 \\ \frac{-1}{3K_1} & \frac{-1}{K_2} \\ \frac{-1}{3K_1} & \frac{1}{K_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $K_1 = W_A / W_{a1}$; $K_2 = W_A / W_{b2}$ 。

根据平衡变压器的工作原理:当三相变两相的时候,绕组接线应使二次侧两相电压大小相同、方向相差 90° 。由此可得 $W_{b1} = \sqrt{3}W_{b2}$ 。

设 K 为高压侧线电压和低压侧电压之比。式

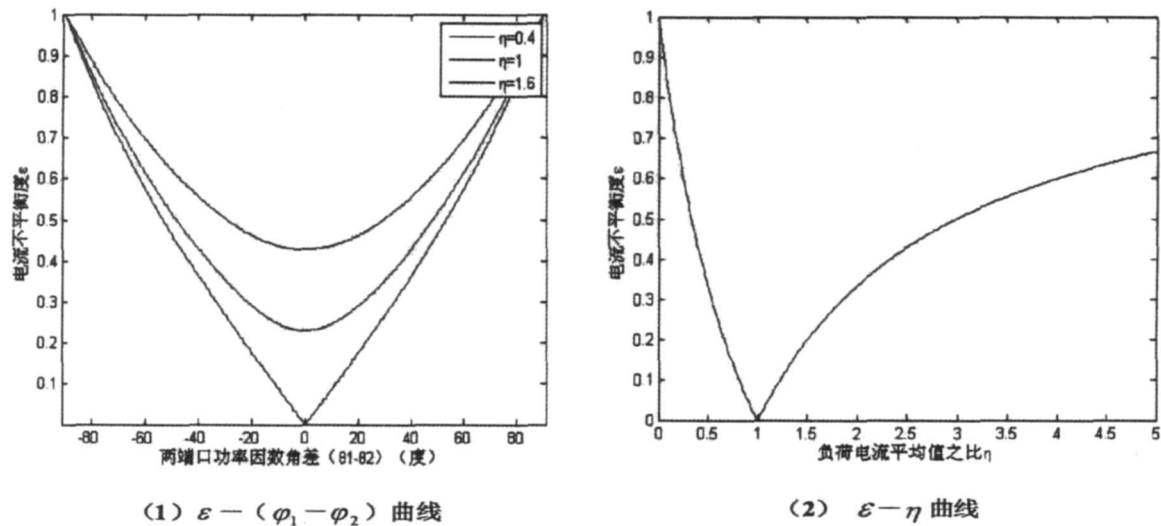


图 2 $K_{\epsilon 1}=1, K_{\epsilon 2}=1$ 时电流不平衡度曲线

(1)可改写为:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K} \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ -1 & -\sqrt{3} \\ -1 & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_p \\ \dot{I}_q \end{bmatrix} \tag{2}$$

同理,根据图 1 可以推导出电压关系如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} \sqrt{3} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \tag{3}$$

2 负序电流的一般表达式

在文献 [1] 中,用系统变换的方法来推导出了正序、负序电流的一般表达式^[1]。

$$\dot{I}^{(+)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{p=1}^n K_p I_p e^{-j\varphi_p} \tag{4}$$

$$\dot{I}^{(-)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{p=1}^n K_p I_p e^{-j(2\psi_p + \varphi_p)} \tag{5}$$

式中: ψ_p 为 $\dot{U}_p$ 滞后 $\dot{U}_A$ 的相角 (称为端口 p 的接线角,且滞后为正);

K_p 为牵引侧端口电压 (U_p) 与一次侧线电压 ($\sqrt{3} U_A$) 之比;

φ_p 为端口 p 电流 I_p 滞后端口 p 电压 $\dot{U}_p$ 的功率因数角。

对应正序电流和负序电流的方均根值,可表示

为:

$$I^{(+)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\sum_{p=1}^n (K_p K_{\epsilon_p} I_p)^2 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n K_k I_k K_l I_l \cos(\varphi_k - \varphi_l) \right]^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

$$I^{(-)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\sum_{p=1}^n (K_p K_{\epsilon_p} I_p)^2 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n K_k I_k K_l I_l \cos(2\psi_k + \varphi_k - 2\psi_l - \varphi_l) \right]^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

式中: K_{ϵ_p} 为端口负荷电流的有效值与平均值之比; I_p 为端口负荷电流的平均值。

电流不平衡度^[2]:

$$\epsilon_1 = \frac{I^{(-)}}{I^{(+)}} \times 100\% \tag{8}$$

3 YN, vd平衡变压器负序电流分析

3.1 YN, vd平衡变压器负序电流表达式

设牵引负荷端口数为 2 其接线原理图如图 1 所示。为通用起见,在式 (6)、(7) 中令 $\psi_1 = 0, \psi_2 = 90^\circ + \theta$ 。且令 $K_1 = K_2 = K, I_p / I_p = \eta$ 。代入相关的参数可从式 (6) 和式 (7) 中解得

$$I^{(-)} = \frac{KI_p}{\sqrt{3}} \sqrt{K_{\epsilon 1}^2 + K_{\epsilon 2}^2 \eta^2 - 2\eta \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \tag{9}$$

$$\epsilon_1 = \frac{\sqrt{K_{\epsilon 1}^2 + K_{\epsilon 2}^2 \eta^2 - 2\eta \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}}{\sqrt{K_{\epsilon 1}^2 + K_{\epsilon 2}^2 \eta^2 + 2\eta \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}} \tag{10}$$

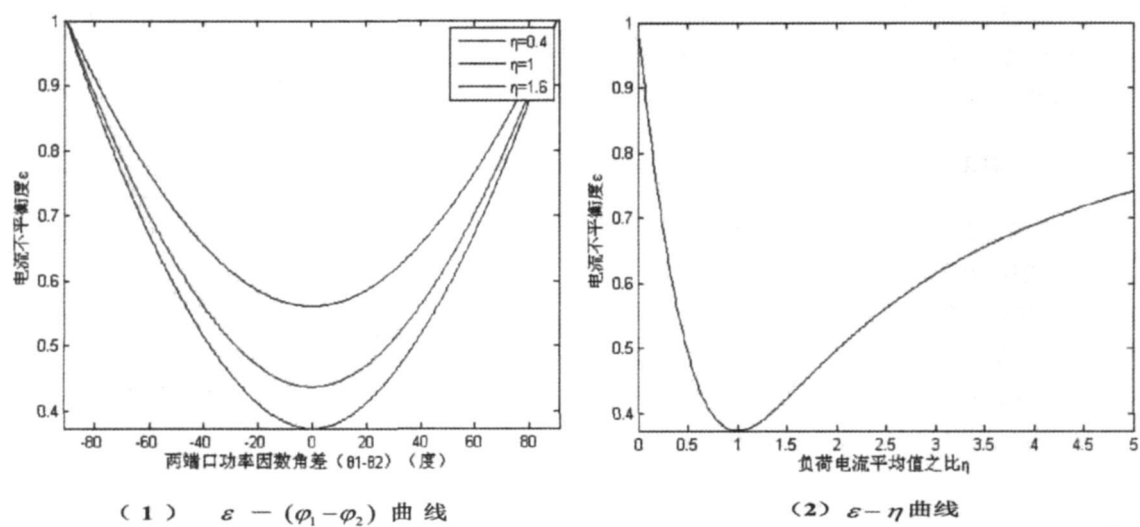


图 3 $K_{e1}=1.15, K_{e2}=1.15$ 时电流不平衡度曲线

3.2 YN, vd平衡变压器的负序特性

利用 Matlab 分以下两种情况仿真分析了 YN, vd 平衡变压器负序电流引起的电流不平衡度问题。

1) 行车密度不大情况, $K_{e1}=1, K_{e2}=1$
在图 2(1)中, 令 $(\varphi_1 - \varphi_2)$ 在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 取值, η 分别取 0.4、1、1.6。当两臂负荷的功率因数角相差 0° 时, 电流不平衡度取得相应的最小值; 当两臂负荷相同时电流不平衡度为 0。

在图 2(2)中, 令 $\varphi_1 = \varphi_2$, η 在 $0 \sim 5$ 取值。当 $\eta = 1$ 时, 电流不平衡度取得最小值。

2) 机车密度较大情况, $K_{e1}=1.15, K_{e2}=1.15$
在图 3(1)中, 令 $(\varphi_1 - \varphi_2)$ 在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 取值, η 分别取 0.4、1、1.6。当两臂负荷的功率因数角相差接近零度时, 电流不平衡度取得相应的最小值。但对比第一种情况时, 电流不平衡度有所增大。

在图 3(2)中, 当 $\eta = 1$ 时, 电流不平衡度也取得最小值, 但也比第一种情况有所增大。

4 仿真分析

以某牵引变电所 (实际采用的是 YN, d11 接线形式) 两供电臂的一天 24 h 连续实测数据 (采样间隔为 3 s 共 28 800 个点) 作为负荷, 把牵引变电所 110 kV 母线作为电流不平衡的监测点。结合 YN, vd 变压器, 利用 Matlab 仿真分析了其电流不平衡度, 如图 4 所示。

该变压器 110 kV 侧三相电流不平衡度仿真结果为: 最大值为 276.526 9%, 95% 概率大值为 122.046 8%。

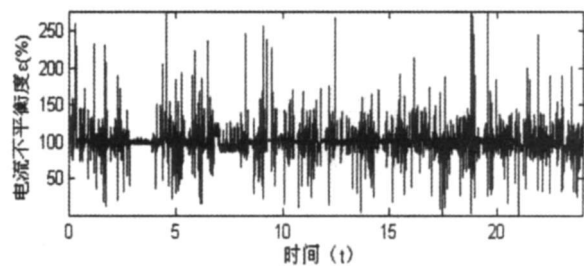


图 4 YN, vd 接线变压器三相电流不平衡度趋势图 (仿真)

为了说明 YN, vd 变压器能有效减弱负序电流, 统计了该变电所的 110 kV 侧实际的三相电流不平衡度情况: 最大值为 474.153 0%, 95% 概率大值为 147.359 2%。如图 5 所示。

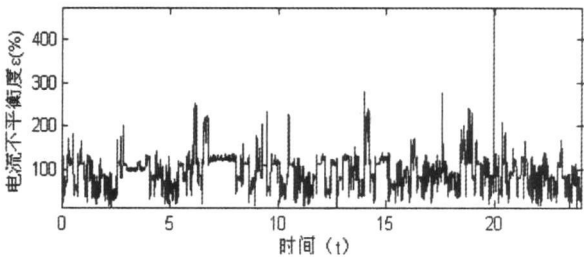


图 5 YN, d11 接线牵引变电所
三相电流不平衡度趋势图 (实测)

5 结 论

对比上面的结果, 可以看出: 当两种情况的负荷相同时, YN, vd 接线变压器的原边电流不平衡度比实际采用 YN, d11 接线的牵引变电所的原边电流不平衡度有所减小。这说明 YN, vd 变压器将是减少牵引负荷通过牵引变电所注入系统负序电流的理想变

器。在理想情况下,当牵引变电所两臂负荷的电流大小相等,两臂(端口)电压等量垂直时,牵引负荷通过牵引变电所注入系统的负序电流为零。

参考文献

[1] 李群湛. 电气化铁道并联综合补偿及其应用 [M]. 北京:中国铁道出版社. 1993.

[2] 林海雪. 电压电流频率和电能质量国家标准应用手册 [S]. 北京:中国电力出版社. 2001.

[3] 刘光晔,周有庆,姚建刚. 新型平衡变压器的平衡条件及等值电路研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4):

84—88.

[4] 张丽艳,李群湛,余丹. 阻抗匹配平衡牵引变压器负序分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(6): 80—83.

[5] 简克良. 电力系统分析 [M]. 成都:西南交通大学出版社. 1992.

作者简介:

黄 军 (1983—),男,四川内江人,硕士研究生,研究方向为供电系统仿真与优化。

(收稿日期: 2008—12—15)

(上接第 23 页)

表 8 不同信息素初始化方案下的算法性能比较

n	1	2	3	4	5	8
最优值 /\$	19 115 19 002 19 036 19 100 19 001 19 337					
平均值 /\$	19 452 19 376 19 324 19 374 19 382 19 446					

参考文献

[1] Zio E, Barakli P, Pedroni N. Optimal power system generation scheduling by multi-objective genetic algorithms with preferences [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(2): 432—444.

[2] 王欣,秦斌,阳春华,等. 基于混沌遗传混合优化算法的短期负荷环境和经济调度 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 128—133.

[3] Senjyu T, Shimabukuro K, Uezato K, et al. A fast technique for unit commitment problem by extended priority list [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 882—888.

[4] Snyder W L, Powell H D, Rayburn J C. Dynamic programming approach to unit commitment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(2): 339—348.

[5] Hobbs W J, Hemon G, Wamer S, et al. An enhanced dynamic programming approach for unit commitment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(3): 1201—1205.

[6] Ongsakul W, Petcharak N. Transmission and ramp constrained unit commitment using enhanced adaptive Lagrangian relaxation [C]. Proceedings of IEEE Power Tech Russia, 2005: 1—8.

[7] 杨朋朋,韩学山. 基于改进拉格朗日乘子修正方法的逆序排序机组组合 [J]. 电网技术, 2006, 30(5): 40—45.

[8] 张利,赵建国,韩学山. 考虑网络安全约束的机组组合新算法 [J]. 电网技术, 2006, 30(21): 50—55.

[9] Damousis I G, Bakirtzis A G, Dokopoulos P S. A solution to the unit-commitment problem using integer-coded genetic

algorithm [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1165—1172.

[10] 杨俊杰,周建中,喻菁,等. 一种求解大规模机组组合问题的混合智能遗传算法 [J]. 电网技术, 2004, 28(19): 47—50.

[11] 孙力勇,张焰,蒋传文. 基于矩阵实数编码遗传算法求解大规模机组组合问题 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 82—87.

[12] Ting T O, Rao M V C, Loo C K. A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle swarm optimization [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1): 411—418.

[13] 胡家声,郭创新,曹一家. 一种适合于电力系统机组组合问题的混合粒子群优化算法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 24—28.

[14] 张力勇,张焰,蒋传文. 求解机组组合问题的嵌入贪婪搜索机制的改进粒子群优化算法 [J]. 电网技术, 2006, 30(13): 44—48.

[15] 李鹏飞,都洪基,郭亮,等. 基于免疫算法的火电厂机组优化组合 [J]. 继电器, 2007, 35(S1): 365—368.

[16] Simon S P, Padhy N P, Anand R S. An ant colony system approach for unit commitment problem [J]. Electrical Power and Energy System, 2006(28): 315—323.

[17] 王琨,刘青松. 蚁群算法在电力系统机组优化组合中的应用研究 [J]. 电力学报, 2005, 20(2): 112—115.

[18] 熊伟清,魏平. 二进制蚁群进化算法 [J]. 自动化学报, 2007, 33(3): 259—264.

[19] 陈烨. 用于连续函数优化的蚁群算法 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(6): 117—120.

作者简介:

蒲 实 (1982—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统优化运行。

(收稿日期: 2009—01—12)

江油发电厂 330 MW 机组恢复发电关键技术方案研究

杨 飞, 杨树林

(四川巴蜀电力开发有限责任公司, 四川 成都 610021)

摘 要:“5·12”汶川特大地震给巴蜀江油发电厂造成严重损害, 机组房顶、烟囱、水塔、除尘器等设备设施都受到严重损坏, 4 台机组全部停运。对电厂恢复生产关键技术方案研究等方面情况进行介绍。

关键词:地震损失; 恢复发电; 方案研究

Abstract: The “5. 12” Wenchuan earthquake brought serious damages to Jiangyou Power Plant, particularly to the turbine house roof, the stack, the cooling tower and ESP. All four units were forcibly shutdown. Some key technical measures adopted to restore the power generation are introduced.

Key word: earthquake losses; power generation restoration; key measures

中图分类号: TK28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0085-03

“5. 12”特大地震使四川巴蜀电力开发公司所属江油发电厂受到严重损害, 所有运行机组全部停运, 发电设备、建构筑物损失严重, 特别是 300 MW 机组汽机房屋顶垮塌, 330 MW 机组烟囱 50~90 m 标高内衬及连接平台垮塌, 全厂直接财产损失数亿元, 是四川火力发电企业和省属国有企业中受灾最严重的企业。作为川西北电网骨干发电企业, 特别是作为川西北电网 220 kV 的电压支撑电源点, 如何尽快让机组并网发电, 对川西北地区灾后恢复生产和重建工作意义重大。

1 江油发电厂简介及地震受灾情况

1.1 电厂简介

巴蜀江油发电厂(前身江油电厂)建于 1958 年, 位于四川省江油市城东 3 km。现有装机容量 1 260 MW, 占全省主网火电装机容量的 12% 左右, 是四川省第二火力发电企业, 年发电能力约 60 TWh。在职职工 1 600 余人。长期以来, 巴蜀江油发电厂在四川电网特别是川西北电网中发挥了骨干发电企业的作用。

1.2 机组主要特性

1) 编号 31 号、32 号机组 (2×330 MW 机组): 于 1991 年建成投运, 三大主机由法国阿尔斯通公司供货。锅炉为亚临界中间一次再热强制循环汽包炉, 负压炉膛、“π”布置; 汽轮机为亚临界单轴三缸两排汽中间再热冲动式, 发电机为三相 Y 型 T255-460; 主变压器为油浸户外型。

2) 编号 33 号、34 号机组 (2×300 MW 机组): 于 2006 年建成投运, 三大主机由中国东方电气集团公司供货。锅炉为东方锅炉厂生产的 DG1025/18.2-II 4 型, 亚临界四角切向燃烧, 自然循环汽包炉; 汽轮机为东方汽轮机厂生产的 N300-16.7/537/537-8 型, 压临界一次中间再热, 单轴, 高中压合缸, 双缸双排气、凝汽式、全电调整型汽轮机; 发电机为东方电机厂生产的 QFSN-300-2-20 型, 水氢氢冷却发电机。主变压器为西安变压器公司生产的 SFP10-370000/500 户外风冷油浸式变压器。

1.3 主要受损情况

“5·12”地震发生时, 31 号机组满负荷运行, 32 号机组上午 10 时停机后处于盘车运行状态, 33 号、34 号机组处于停机备用状态。地震发生后 31 号机组跳闸, 厂用电中断, 运行人员立即启动柴油发电机正常, 保证了事故保安段电源, 沉着冷静地将 31 号机组停运正常; 并于当日 23 时由电网倒送电恢复厂用电运行。

1.3.1 土建部分

330 MW 机组烟囱 50~90 m 标高内衬及连接平台垮塌, 180 m 标高处有六条长几米到十几米、宽一毫米左右的竖向裂纹; 330 MW 机组冷却塔配水竖井根部开裂;

33 号机汽机房网架垮塌, 外墙窗户全部散落; 电厂主厂房、集控楼及其他建构筑物填充墙部分开裂。

330 MW 机组汽轮机房 B 排柱 6 m、12 m 层下部钢筋砼牛腿多处被压损, 柱侧梁端有横向细小裂纹,

12 m 层楼面处柱身砼多处被挤压破碎;

1.3.2 汽轮机部分

由于 33 号机组汽机房屋顶垮塌,导致垮塌的屋顶建材压在 33 号汽轮机、发电机及小汽机上,主机、小机受损严重,汽机房一台行车损坏。

1.3.3 锅炉部分

高温高压管道、烟风道等系统部分保温脱落,31 号、32 号、33 号、34 号机组电除尘器阳极板大部分脱落,楼梯平台等部分设施变形,部分管道移位、支吊架受损。

1.3.4 电气部分

部分变压器受损,500 kV、220 kV 升压站部分线路开关、刀闸、支柱瓷瓶损坏及机构变形。

1.3.5 燃料除灰部分

卸煤站地面沉降较大,南线回转车台环轨基础沉降长度约 4 m,沉降高度 2~10 mm;南线空车推车机基础沉降长度约 3 m,沉降高度 2~10 mm,基础断裂两处,电缆支架扭曲变形。

2 影响机组尽快发电的关键技术问题解决方案

2.1 烟囱能否临时运行问题

330 MW 机组烟囱 90 m 标高以下原设计是内外双筒结构。本次地震中,330 MW 机组烟囱内衬及连接平台垮塌。如果强行运行,也即原来 90 m 以下由烟囱内筒流经的高温烟气现在完全与烟囱外筒直接接触,烟囱外筒内外壁温差将达 50℃以上,这是设计规范所不允许的,规范允许的烟囱外筒内外壁温差是小于 30℃(烟囱外筒 0~90 m 没有敷设耐热、耐酸材料)。

要恢复原烟囱受损部分,保守工期也将在 3 个月以上,这在当时形势下是不允许的。如何解决烟囱制约机组尽快发电的问题,是需要解决的主要核心和关键技术问题。

经过设计、科研、电厂等单位的机务、环保、土建专家的反复论证研究,大胆创新地提出了:现烟囱暂不修复,采用脱硫系统 GGH 抽芯运行(换热组件全部取下),烟囱内壁涂刷防腐油漆的临时运行方案。脱硫系统 GGH 抽芯运行后,进入烟囱的烟气温度小于 50℃,烟囱内外壁温差小于 30℃,GGH 抽芯运行后烟气温度降低带来的低温酸腐蚀用对烟囱内壁涂刷防腐油漆的方式来解决。此方案实施仅需 10 d 左右,大大缩短了机组恢复发电时间。

由于此临时运行方式严禁高温烟气直接进入烟囱,因此脱硫系统烟气旁路门运行中严禁开启,为保证主机安全运行,在机组主保护和脱硫系统保护方面作了相应修改。另外,因为采用脱硫系统 GGH 抽芯运行,GGH 的上下膨胀间隙经专家论证后作了相应调整,以保证其正常运行。

烟囱的永久性修复,待迎峰度夏和奥运保电工作结束后根据系统运行方式择机进行。

2.2 高温高压焊口金属检查问题

“5·12”特大地震对电厂数量巨大的金属焊口有何影响,是一个值得高度重视的问题,按技术监督规定和条例应进行全面检查。

电厂发电机组设备,绝大多数重要部件均属于高温高压或者高速转动部件,其外表面均有保温层,除明显较大的宏观变形和位移等可以观察到外,要从外观对其进行受损分析几乎不可能;其余部件也有防锈和防腐油漆,也一定程度影响从外观对设备受损的分析。要想确切分析设备的受损情况,需要拆除保温等,并做大量细致的检验检测工作。如果要进行全面检测,工作量巨大,时间也非常长。

专家组经过对地震破坏的机理分析以及和电厂设备热应力分析的对比研究,提出重点部位抽检和锅炉水压试验相结合的实施方案,抽检项目如果有问题,再进行重点全面检查。经研究重点对以下部位进行了检查:

1)汽包宏观检查、超声检测吊杆螺纹段;磁粉、超声检查管座焊缝;请有资质单位测量汽包中心线标高。汽包与下降管、汽水引出管的连接焊缝着重检查。

2)主汽联箱主汽出口管座焊缝磁粉、超声检查。

3)炉顶吊架及其附件宏观检查,必要时无损检测。

4)磁粉、超声检查汽轮机高、中缸下部进汽管管座焊缝各 1 个。

5)制氢系统、天然气系统宏观检查、严密性试验,必要时无损检测。

6)承重钢结构及附件宏观检查,必要时无损检测;按现场标记抽检高强螺栓至少 100 颗(包括所有地脚螺栓)、大板梁挠度测量及下弦中部附近抽检焊缝 2 条。

7)汽轮机大轴轴颈、推力盘渗透、超声检查。

8)磨煤机主轴轴颈渗透、超声检查。

9)220 kV 升压站支柱瓷瓶约 200 节超声检查。

10)末级叶片叶根检查。

通过对以上项目的严格抽检,结果正常,锅炉水

压试验也一次成功。在 31 号、32 号机组启动试运过程中,未发生焊口、焊缝泄漏等金属方面故障。

2.3 31 号、32 号汽轮机是否揭缸检查问题

汽轮机是火力发电厂的重要精密转动机械,转速高达 3 000 r/min,转子和缸体之间的间隙也很小。“5.12”地震后,整个汽轮机平台土建部分外观有明显挤压损坏,对整个汽轮机转子和内部缸体有何影响;特别是 31 号机组地震时满负荷运行,地震跳机后又面临整厂厂用电中断,低压缸排汽温度明显超标(排汽温度最高达 180℃)的影响,所有这些对汽轮机本体影响如何,最简单直接的方法是对 31 号、32 号机组揭缸进行全面检查。但当时面临的问题是如果揭缸,抢修恢复发电时间将大大推后。

专家组经过对地震前后机组本体数据的多次慎重研究认为,鉴于 31 号、32 号机组盘车电流、盘车时转子声音等正常,与地震前无明显差别,在对以下项目进行认真检查的情况下,可不揭缸全面检查。

1)对汽轮机基础进行沉降和倾斜观测并与历史记录作对比。

2)汽轮机本体所有轴承应翻瓦检查,测量转子扬度(中心复查、找正)检查滑销系统。

3)启动冲转时按基建调试机组方式进行。
经过对上述项目的严格检查,特别是在对轴承翻瓦检查过程中,发现个别轴承有损伤并进行了更换处理;31 号、32 号机组启动调试时在冲转、带负荷及满负荷过程中震动、胀差、轴向位移等指标均正常,个别指标甚至优于震前水平。

3 结 语

按照“安全、科学、有力、有序、有效”的原则,在专家组的指导和各级人员的共同努力下,巴蜀江油发电厂 32 号机组于地震后第 48 天并网发电并按调度命令接带负荷,31 号机组于 7 月 14 日并网发电,均比计划提前恢复发电;33 号、34 号机组也正在按照综合性评价专家组的意见和技术方案进行修复,力争年底全面恢复发电。目前 31 号、32 号机组安全、稳定运行,为抗震救灾、迎峰度夏及保奥运用电做出了贡献。巴蜀江油发电厂 330 MW 机组强地震后抢修恢复发电组织和重大技术方案研究,也为今后处理同类事件提供了宝贵的经验和积极的借鉴作用。

(收稿日期:2008—10—13)

(上接第 65 页)

线路名称	TA	过流 定值	线路 长度	折算 线路标 么值 L	在炳灵 宫站出 口处发 生短路	的阻抗	并列 阻抗	总阻抗	在炳灵 宫站出 口处发 生短路 的阻抗	分路电流	灵敏度 校验	结论 K ₁ >=1.3
炳城一 路 921	600/5	5	3.2	1.350 6	炳灵宫站 侧阻抗	0.620 6				流过炳灵宫 站侧电流	6 219.9	10.4 满足要求
广城二 路 906	600/5	5	1.7	0.670 6	广汉站 侧阻抗	3.398 2	0.524 8	0.642 5	7 413.64	流过广汉 站侧电流	1 144.8	1.91 满足要求
炳城四 路 926	600/5	5.6	6.2	2.444 4	炳灵宫站 侧阻抗	0.620 6				流过炳灵宫 站侧电流	6 268.8	9.33 满足要求

6 结束语

通过建立简化的 10 kV 配电网络合环计算模型,计算合环冲击电流、稳态电流,进行合环状态下保护灵敏度校验,规避了常规潮流计算需要的大量数据和相关软硬件支持,为调度人员进行 10 kV 配网合环操作提供指导,为不停电转移负荷,提高供电可靠性具有积极的意义。

参考文献

[1] 刘天琪、丘晓燕.电力系统分析理论[M].四川大学出版社,2003年 1月.

[2] 幸荣霞,姚爱明.环网合环操作的分析[J].浙江电力,2007,(1): 66—68
[3] 陈 衍.电力系统稳态分析[M].北京,水利电力出版社,1985.

作者简介:

陈 曦,硕士,工程师,四川省电力公司德阳电业局调度中心主任工程师
曾勇波,硕士,四川省电力公司德阳电业局广汉供电局可靠性专责。
叶 涛,硕士,高级工程师,四川省电力公司德阳电业局调度中心主任。
张 玻,学士学位,工程师,现任四川省电力公司德阳电业局广汉供电局生技科长。

(收稿日期:2008—12—04)

发电厂电力拖动系统的节能研究

刘 琨, 刘 念, 冉 立, 崔东君, 田冰冰, 朱传华

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:随着厂网分开,发电企业市场化程度的加剧,电厂的发电煤耗、厂用电率已成为发电厂考核的重要指标,直接关系到电厂的经济效益和企业竞争力。现代发电厂的厂用电占发电总量的 5%~10%,而电力拖动系统消耗的电量就占到其中的 90%以上。分别从电动机供电电能质量、电动机选择及更换、电动机的改造、电动机监控和维护以及电动机运行角度出发,提出了电动机节能措施,最大程度地降低了电厂电力拖动系统的损耗,起到了良好的节能效果。

关键词:发电厂;电力拖动;节能

Abstract: With the separation of power plants and power grids, the marketability degree of electric generation enterprises aggravating, it has become an important indicator for power plants that how much coal and electricity the power plants consume by itself, because it has much to do with economic benefit and competitive power of power plants. It is true that 5%~10% electricity is consumed by modern power plants itself, while the electric power drive system on the power consumption of which accounted for is more than 90%. Some energy-saving methods in following five perspectives are proposed: the electrical energy quality of power supply, the selection and the replacement of electric motor, the innovation of electric motor, the monitoring and maintenance of electric motor and the operation of electric motor, which can minimize the loss of electric power drive system in power plant to have a good energy-saving effect.

Key words: power plant; electric power drive; energy saving

中图分类号: F407.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0088-04

1 问题的提出

进行电力企业的市场化改革、打破垄断、引入竞争、提高活力,已成为世界各国电力工业发展的趋势。中国从 2001 年开始也放松对电力市场的价格管制,厂网分开,竞价上网,市场竞争程度开始逐步加强。随着电力工业改革的进一步推进,垂直垄断的电力系统中各个实体的传统角色在电力市场环境下发生了变化,从原有的垂直垄断的电力系统中分离出来的若干发电公司与独立发电厂等共同成为发电市场的竞争主体。发电公司的分离与独立,赋予了发电领域激烈的竞争,发电公司要想在竞争中取胜就必须加强自身在发电环节中的效率监管,努力提高发电效率,减少自身损耗以减少单位电量的生产成本,从而在竞价上网时有更多优势。

近年来中国政府加强了对“节能减排”的监管与倡导。据有关资料显示,2007 年一季度,工业特别是高耗能、高污染行业,占全国工业能耗和二氧化硫排放近 70% 的六大行业增长较快,而电力行业首当其

冲。可见,加强电力行业的“节能减排”对建设资源节约型、环境友好型社会有积极重大的意义。

发电厂的生产过程完全是机械化和自动化的,它需要许多以电动机拖动的机械为发电厂的主要设备和辅助设备服务。现代发电厂的厂用电占发电总量的 5%~10%,而其中电力拖动系统消耗的电量则占到其中的 90% 以上。所以,采取相应的措施对发电厂电力拖动系统实施节能降耗就成为一个重要课题。

2 电力拖动系统节能措施

2.1 从电动机供电电能质量角度

1) 尽量保证运行电压水平在电动机铭牌值,最大偏移不要超过 5%。

虽然电动机的最大设计运行电压允许有 10% 的偏移,但大的偏移电压会严重地降低效率、功率因数和电动机寿命。当电动机的实际运行电压低于设计运行电压的 95% 时,会严重地导致效率低下和运行温度升高,这将极大地减少电动机的绝缘寿命。同样地,当电动机的实际运行电压高于设计电压时也会减

小功率因数和效率。

2) 尽量减小三相电压之间的不平衡度。三相电压的不平衡度应保持不超过 1%, 因为过大的不平衡度会导致电动机的定额量降级, 这必然影响其运行效率。

国际电气制造业协会 (NEMA) 对三相电压不平衡度定义的计算公式为:

$$VB = \frac{VMA - VMI}{VAV} \times 100\%$$

其中: VB 为三相电压的不平衡度; VMA 为三相电压中电压最高相电压值; VMI 为三相电压中电压最低相电压值; VAV 为三相电压的平均值;

影响电压平衡的因素有: 其中一相上加有单项负载, 三根线大小不完全相同和线路故障等。不平衡电压不仅降低了电动机效率而且加剧了配电系统的损耗。

3) 采取补偿措施保证高的电动机运行功率因数。发电厂厂用电动机需要大量的无功功率, 如果补偿措施不力会导致电动机正常运行时功率因数严重降低。低功率因数会降低电动机设备本身及其外部配电系统的效率。

发电机发出无功要消耗有功, 增加成本, 厂用电系统内的无功电流增加了设备的发热。在发电厂中采用就地无功补偿技术就成为一种好的改善功率因数方法。通过并联电容器组是常用的方法, 但要注意的是要采取相应的措施使电容器组的投入快速而无冲击。另外, 安装功率因数静补装置的方法也应用较多。该装置主要由交流滤波装置及容量可无级连续调节的感性无功设备组成, 可进行滞相运行。

4) 保证供电电源较低的谐波率。电动机的设计运行条件是 50Hz 的正弦波形, 如果电压波形畸变过甚也就是谐波率过高将严重影响电机运行效率。

抑制谐波的方法主要有两种: 一种是减小的方法, 即采用无源滤波器, 它是利用 L-C 谐振特性, 形成对某一频率的低阻抗特性, 从而减小流向电动机的谐波电流; 二是让补偿装置提供反相的谐波电流, 以抵消变频器所产生的谐波电流, 即有源滤波器。

5) 选择高效、大小合适的变压器以减少电能变换过程中的损耗。老的、欠载的和过载的变压器通常是效率低下的。

6) 对配电系统进行定期检查, 识别并排除配电损耗。

接线点的接触不良和对地短路等故障会引起电能损失、产生谐波并减小系统可靠性。应对线路进行定期检查以排除这些故障带来的额外损耗和对系统的其他种种不良影响。有许多公司生产的电子监控器和红外摄像机就是针对这种问题而研制的。

7) 减小配电系统的电阻。给长期处于满载运行的电动机供电的电力线缆应选择得足够大甚至过大些, 这样可以最小化线路损耗和线路上的电压降。

2.2 从电动机选择及更换角度

1) 选择大小合适的电动机, 杜绝“大马拉小车”的不良现象, 使电动机负载率不低于 80%。另外, 从转子效率考虑, 鼠笼式电动机较绕线式电动机优先选择; 从功率因数考虑, 高速电动机较低速电动机优先选择; 从电压等级考虑, 负载较大时, 高压电动机较低压电动机优先选择。

2) 在经济状况允许的情况下尽量选择节能电动机。节能电动机虽然比普通电动机价格高出 20% 以上, 但从长期运行并综合考虑节能效果角度看, 总费用将会少于普通电动机, 尤其是对于发电厂中终年运行时间很长的电动机。

3) 选择与运行速度匹配的电动机。发电厂中风机类和泵类电动机的耗电量占到整个厂耗电量的比例很大, 它们的能量吸收对速度是非常敏感的。比如, 如果它们的运行速度比额定值高出 2%, 吸收的电能将增加 8%。因此, 在选择和更换泵类和风机类电动机时, 选择与负载相匹配、能满负荷运行的电动机是很重要的。

4) 在现役电动机报废之前, 提前选取替代品将其替换。对设备中的所有电动机进行评估, 综合考虑更换成本、节能和可靠性等对经济效益有影响的因素, 对现役电动机更换为效率更高的和运行工况允许情况下型号更小的电动机。

5) 对于电动机的重绕和更换的选择。电动机的重绕可能会导致效率和可靠性的降低。对于故障电动机是修理还是更换是一个比较复杂的问题, 主要考虑的因素有: 重绕成本、重绕后的损耗、节能电动机的价格、电动机大小、原始效率、负载系数、年运行时间、电价和认定的投资回报标准。

这个问题的一些经验处理如下:

① 大于 30 kW 并且运行时间超过 15 年的电动机, 由于效率已赶不上当前电动机, 所以最好更换掉; 如果重绕电动机的费用高于新的节能电动机的 50% ~ 60%,

那么就选择更换新电动机。更高的可靠性和效率将弥补新电动机高出的价格。

②选择高质量的绕线。使用符合 ISO 9000 国际标准的、清洁的、经多次验证质量可靠的产品。如果重绕质量足够高就可能达到电动机的初始效率,但如果电动机的铁心被损坏或是重绕工艺不精致将会导致严重的效率降低。

③如果重绕的花费超过了一台新节能电动机的 50% ~ 65% 就选择更换新的。高可靠性和效率将会使溢价很快收回。

5) 优化传动设备效率。合理安装和维护轴、皮带、链条、齿轮等传动设备以较少传动过程中的能量损耗。

2.3 从电动机的改造角度

2.3.1 更换磁性槽楔

在修理电动机时,若将普通绝缘槽楔更换成磁性槽楔,可以改善电动机气隙磁势波形,减少空载电流,改善功率因数,降低电动机铁耗,降低温升,减少电磁噪声和振动,延长电动机使用寿命,提高电动机效率等。目前,常用的磁性槽楔有代号 349 号的铁粉层压板磁性楔和模压磁性楔。模压磁性楔由还原铁粉按一定比例与环氧树脂混合,加入少量酚醛玻璃纤维作补强材料经热压制成。因此,具有较高的抗劈强度、电介性能、耐热性能和磁性能。采用模压成型的磁楔与 349 号粉层压板磁性相比,它的精度较高,打入槽内有一定的紧度,加工方便。

2.3.2 采用节能型风扇

由于离心风扇形成较大的涡流,使风扇效率不高,并产生很大的通风噪声。对于保持单一旋转方向的电动机,采用机翼型轴流式风扇,配以空气动力性能良好的风罩,可大大提高风扇效率。在保持同等风量情况下,风扇外径缩小,风阻减小,损耗明显降低,可获得显著的节能效果,同时降低了电动机噪声。由于满载电流下降而降低了电动机温升从而延长了电机的使用寿命。

2.3.3 采用新的绝缘材料增大导线截面积

对于沥青云母带浸胶绝缘的高压电动机,在定子线圈大修时采用环氧玻璃粉云母带(B 级胶带)绝缘。由于沥青云母带绝缘是经浸胶处理的,槽绝缘单面厚度较厚,而 B 级胶带对地绝缘经过热模压固化成型,槽绝缘单面厚度减薄。由于槽绝缘厚度的减薄,铜线截面便可以增加。将沥青云母带绝缘电动机改为 B 级胶

带绝缘后,平均铜线截面积可增大 15% ~ 20%,电动机温升也有所下降。对于以前生产的低压电动机,现定子线圈大修重烧时,也使槽内绝缘变薄,在保持槽满率

不变的前提下可适当加粗导线,电动机效率可提高 1.5% ~ 4%。因此,连续运转的电动机年节电费相当可观。

2.4 从电动机监控和维护角度

1) 按照电动机生产厂商建议和标准的工业技术要求制定监测和维护计划,定期对电动机进行预防性监测和维护以发现潜在故障以使电动机可靠性和效率最大化。每天或每周的巡查内容包括对电动机的噪音、振动和温度的检查。大约每年要对电动机进行两次绕组和绕组对地的阻抗测量以识别绝缘故障。

2) 根据电动机使用说明恰当润滑电动机。要选用高质量的润滑油对电动机润滑并防止脏东西和水的污染。

3) 为每台电动机都单独建立维护档案,保存好每台电动机的技术规范、修理、测试和维修数据,按时间顺序记录下如对电动机绕组阻抗等参数的测试结果。这些资料不仅会帮助维护人员识别出有潜在机械和电气故障的电动机,而且是修理故障电动机必要的参考资料。

2.5 从电动机运行角度

2.5.1 串级调速节能

将异步电动机运行时转子线圈中的感应电势通过滑环引出,经三相整流桥整流为直流电,再由三相全控桥将其逆变为与电网频率相同的交流电,经变压器变压后将转差功率回馈电网起到节能效果。目前已有许多厂家开发出了此类产品。

2.5.2 变压调速节能

当异步电动机轻载时,降低其输入端电压可以实现节能。因为供给电动机的电能除了一部分转变为输出功率外还有一部分固有损耗,这部分损耗中最主要的是铜损和铁损。铜损是由于电流流过电动机绕组而产生,与电流成正比;铁损是由于转子铁心中的磁化电流而产生,与供电电压成正比。当负荷下降时如果适当降低电源电压就可以减少铁损,同时电流随之下降也减少了铜损。

利用单片机或其他微处理芯片为硬件基础,通过检测电动机的供电电压和电流的过零点可以获得它们的相位差即功率因数角。以功率因数为变压依据,

保证功率因数不变即可实现不同负载下电动机供电电压的变化,从而实现变压调速节能。

另外在实际应用中,当电动机的负载率低于 50% 时,可以将 Δ 接法的异步电动机改成 Y 形接法。此时,电动机的相电压变为原来的,此方法也具有较好的节能效果。

2.5.3 变频调速节能

据统计,中国火力发电厂的风机、水泵等辅机约有 35 万台,装机容量 750 多万 kW,年耗电能 400 多亿 kW·h 占厂用电能量的 70% 左右。发电机组的负载是随电网用电设备负荷的变化而变化的,当用电负荷量发生变化时,发电机的出力必须跟着改变以满足系统的需要,否则,系统的平衡受到破坏,发电机组的正常运行就会受到影响。为了改变风机的出力,现在都是采用挡板或阀门来调节。其风机的调风挡板的开度往往在 40% ~ 60%,这种调节方式会浪费大量的电能,而采用高压变频调速则可以有效节约电能,降低生产成本。另外,采用高压变频器还可以保证压力恒定,使系统稳定运行,提高整个系统的效率,同时也能延长电动机和风机以及阀门的使用寿命,降低资本投入。

由于其他节能方法在节能方面的相对有限性,而变频调速在节能和其他诸方面的优势,已成为最具开发潜力和市场前景的节能方式。国内外许多公司、企业加快了对变频器的研制,电压等级更高、性能更优良的变频器频频问世,不断给电力拖动领域注入活力。目前已有国内许多家电厂对锅炉引风机、送风机等进行了高压变频调速技术改造,取得了很好的节能效果,在较短时间内就收回了全部投资,经济效益非常显著。

3 发电厂电力拖动节能的发展方向

随着近年来电力工业不断发展,尤其在变电站自动化领域电气保护控制装置发展很快,随着电力自动化技术实用化程度的不断提高,在发电厂内采用微机

保护测控装置,构成更完善的分布式控制系统 (DCS) 的条件已经成熟。而属于自寻优技术的专家集群全方位自动化控制系统 (ECS) 不仅包含了 DCS 系统,同时还在 DCS 基础上增加了专家集群仿人控制等 15 项功能,成为更具活力的系统。

ECS 是集各专业专家群体和智慧,在变频器、仪表传感器、DCS、PLC、通讯等硬件基础上,借助多变量控制,智能控制、现代控制理论等基础理论,实现数据采集、计算机监控、故障诊断,按照管理规程、操作规程,完成对生产过程、生产设备的全方位自动化控制,达到提高生产率、降低成本、节约能源的目的。

这种趋势必将领航发电厂电力拖动节能技术向自动化程度和效率更高的方向发展。

4 结 语

减少发电厂厂用电中电力拖动系统的损耗,切实做好电力拖动系统节能方面的工作,不仅会给发电厂带来很好的经济效益,提高其在发电行业中竞争力,而且也积极响应了国家号召和政策,取得良好的社会效益,应该在今后的电力生产发展中积极推行。

参考文献

- [1] 姚春球. 发电厂电气部分 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 谢应璞. 电机学 [M]. 成都: 四川大学出版社, 1994.
- [3] 顾绳谷. 电机及拖动基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [4] 舒服华, 王艳. 电机节能降耗技术和方法探讨 [J]. 电机技术, 2008, (3): 39—42.
- [5] 崔学深, 罗应立等. 周期性变工况条件下异步电机节能机理和节能途径 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (18): 90—97.
- [6] 施金良, 汤仕龙等. 基于神经网络模型参考自适应的电机节能控制研究 [J]. 重庆科技学院学报 (自然科学版), 2006, (6): 57—59.

(收稿日期 2008—10—20)

欢迎在《四川电力技术》宣传你的产品

循环流化床灰控阀的维护

王永龙

(四川白马循环流化床示范电站有限责任公司, 四川 内江 641000)

摘要:灰控阀是大型循环流化床的一个非常重要的设备,其运行维护质量好坏,直接影响到循环流化床锅炉燃烧控制。主要介绍了循环流化床锅炉灰控阀的检查和维护。

关键词:灰控阀;外置床;耐火材料;维护;检查

Abstract: Cone valve is one of the important equipment of the large-capacity circulating fluidized bed combustion boiler. The quality of its operation and maintenance directly affects the combustion of the CFB boiler. The maintenance and inspection of the cone valve of the CFB boiler is introduced mainly.

Key word: cone valve; external bed; refractory; maintenance; inspection

中图分类号: TK228 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0092-03

1 灰控阀概述

严格控制燃烧室温度是优化循环流化床环保性能的关键,循环流化床锅炉燃烧室的温度一般控制在 $850^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$,在这一温度下燃烧,脱硫剂脱硫的效果最好,并且低温燃烧产生的氮氧化物少。为了便于控制,300 MW 循环流化床锅炉设置了外置床热交换器。虹吸密封槽溢出的高温物料,一部分直接回到炉膛下部,另一部分经灰控阀进入外置床。调节灰控阀开度来控制进入外置床的高温物料,以满足外置床受热面输入热量要求和床温控制要求,从而确保床温在各种运行工况下都能得到精确控制。

300 MW 循环流化床外置床有两种形式:低温过热器/高温再热器外置床(内部布置低温过热器和高温再热器),中温过热器外置床(内部布置中温过热器 I 和中温过热器 II)。控制低温过热器/高温再热器外置床入口灰控阀的开度来控制进入外置床的高温物料量,使高温再热器汽温维持在 540°C 左右,只有在异常情况下才由设在低温再热器入口的喷水减温器进行调节。中温过热器外置床用于控制床温,调整中温过热器外置床入口灰控阀开度,控制经过外置床后回到炉膛的循环灰量,使燃烧室温度维持在 $850^{\circ}\text{C} \sim 900^{\circ}\text{C}$,过热器的蒸汽温度依靠设在低温过热器和中温过热器、一级中温过热器和二级中温过热器之间以及中温过热器与高温过热器之间的喷水减温器进行调节控制。只有在异常情况下才由设在低

温再热器入口的喷水减温器进行调节。另外,锅炉运行的灰渣必须连续不断地排除,冷渣器灰控阀的作用是为了将炉膛总差压维持在一个恒定值,防止大量物料在燃烧室底部堆积。

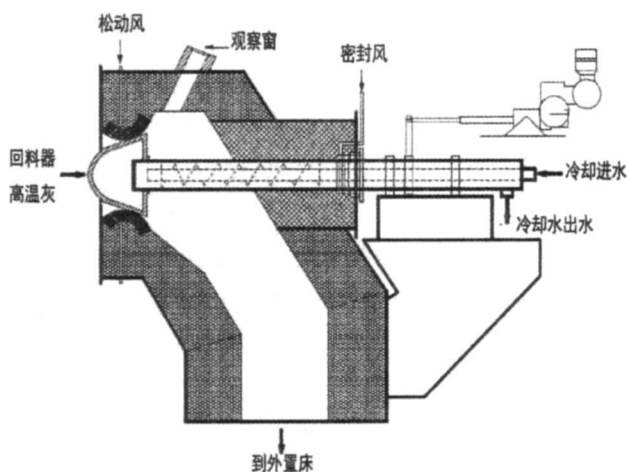


图 1 灰控阀结构简图



图 2 损坏的灰控阀阀杆和阀心

灰控阀对于大型流化床锅炉来说是一个极其重要的设备,一旦发生故障将影响锅炉安全经济运行,

使得锅炉床温和再热蒸汽温度难以控制,严重时不得不停炉处理。

2 灰控阀的维护与检修

如何才能防止灰控阀发生故障呢? 恰当的运行维护方法是解决这一难题的关键,可以从以下几个方面入手。

2.1 灰控阀阀杆的冷却水检查及调整

灰控阀冷却水尽可能用较干净的除盐水或凝结水。灰控阀阀杆冷却水出水口应向上安装,这样才能将灰控阀阀杆内的空气排尽。如图 1 所示,阀杆的安装方向是不正确的,这样安装,运行时阀杆内上部易集有空气,导致阀杆上表面过热而损坏。冷却水管路应布置合理,进出水管路应高于灰控阀所在位置,确保冷却水充满整个阀杆,并在每台灰控阀冷却水管路上安装流量计,用来监控冷却水流量,每台灰控阀的冷却水量控制在 6 t/h 以上。不能在冷却水进水管路上加节流孔板来控制灰控阀冷却水量,应使用安装在管路上的截止阀来调节,否则灰控阀阀杆就可能会因为缺水或水流不畅而损坏。如图 2 所示,从损坏的灰控阀阀杆上,可以发现阀杆朝上的部分过热变黑,并有大量裂纹。经分析,主要是由于阀杆上表面冷却不充分造成的,运行中由于阀杆内上部集有空气或冷却水不畅通,导致阀杆上表面过热,产生裂纹而泄漏,泄漏的冷却水喷溅到阀心上又导致高温阀心骤然冷却而裂纹。同时泄漏的冷却水大量流入外置床内,将造成外置床运行不正常,导致再热蒸汽温度和炉膛燃烧室温度无法控制。

2.2 灰控阀松动风检查及调整

恰当地使用灰控阀松动风可以有效防止灰控阀阀心磨损。灰控阀处于关闭状态时,应关闭松动风门,若阀门处于关闭状态,而松动风未关,高速流动的气体带着大量灰渣颗粒冲刷到阀心上,将冲蚀阀心,灰控阀快速损坏而关闭不严。

2.3 灰控阀阀杆间歇调整

运行时,灰控阀处于自动控制状态。若负荷稳定,灰控阀将长时间停留在某一位置,这就可能导致灰渣淤积在阀杆与耐火材料之间的间隙处。此时,运行人员可以每间隔一段时间手动操作灰控阀,让其较大行程开关一次后再恢复自动,以防止阀杆与耐火材料之间的间隙被灰渣堵塞而引起阀杆卡涩。

2.4 灰控阀阀杆密封风检查与维护

经常检查灰控阀阀杆密封风是否畅通,风压是否恰当,是否有泄漏。适当的密封风量可以将停留在阀杆与耐火材料之间的间隙处的灰渣吹走,保持阀杆与耐火材料之间的间隙干净畅通,保证灰控阀动作灵活。

2.5 灰控阀检修要求

停炉期间要定期检查灰控阀有无损坏,建议每年解体检查修理一次灰控阀。主要检查修理内容为:

检查阀杆表面有无磨损和裂纹。若有裂纹,应进行打磨补焊处理。

检查阀心有无磨损和裂纹,并做适当处理。

检查阀杆与阀心连接处的防磨紧固件有无损伤和松动。

检查填料盒的耐火材料层有无裂纹和脱落,若有,进行修复。

更换密封盘根。

检查阀体耐火材料有无裂纹和脱落,若有,应修复或重新浇铸。

检查灰控阀端盖有无磨损和裂纹,必要时更换。

装复前,应更换填料盒上的陶瓷纤维毡。

2.6 导轨轴承维护

定期维护导轨轴承,加注润滑脂,防止灰渣进入导轨轴承。检查导轨轴承密封帆布,不能有破损和脱落现象,否则异物进入导轨轴承,将导致导轨卡涩,灰控阀动作不灵活,甚至无法开关。

3 灰控阀常见故障及处理

3.1 灰控阀卡涩,动作不灵活

灰控阀卡涩的原因可能是阀杆与耐火材料之间的间隙处淤积有大量灰渣或导轨轴承润滑不足有异物。阀杆与耐火材料之间的间隙淤积灰渣造成的卡涩,可以在就地手动开关灰控阀,并开大密封风吹扫进入阀杆与耐火材料间隙中的灰渣来消除。导轨轴承引起的卡涩,可以清洗导轨轴承,并补充足量润滑脂来消除。

3.2 灰控阀进口堵塞

灰控阀进口堵塞,可就地手动开关阀,往复多次,将进口处的焦块顶碎,并开大松动风来吹扫(必要时,可用压缩空气)。

3.3 阀杆裂纹漏冷却水

阀杆裂纹漏冷却水不仅造成外置床运行不正常、

再热蒸汽温度和炉膛燃烧室温度无法控制,漏出的冷却水进入外置床后,还将导致外置床内灰渣结成块,堵塞外置床及其进灰管道,引起故障停炉,也给检修带来麻烦。遇到这种情况,立即将泄漏灰控阀冷却水回水直接排到地沟,尽可能降低冷却水出水背压,并调整灰控阀冷却水进水量,防止大量冷却水漏入外置床,待停炉后进行检修。切不可关闭冷却水水源继续运行,否则阀杆在高温下弯曲或断裂,将给运行和检修带来较大困难。

4 结 论

灰控阀是大型循环流化床的一个重要控制设备,正确运行和维护好灰控阀,有利于大型循环流化床锅炉安全稳定运行。

作者简介

王永龙(1972—),男,四川内江人,大学本科学历,助理工程师、技师,四川白马循环流化床示范电站有限责任公司,从事 300 MW 循环流化床机组机务方面的检修维护技术管理工作。

(收稿日期:2008—09—25)

(上接第 61 页)

常用的 RBF—SVM,并且 SOA 与 PSO 优化算法相比,能更快地得到优化的 SVM 参数。因此,其研究成果初步展示出基于 CGW—SVM 的 STLF 和 SOA 参数优化方法的有效性和优越性,具有一定的理论意义和实用价值。

参考文献

- [1] I Moghram, S Rahman. Analysis and evaluation of five short-term load forecasting techniques [J]. IEEE Trans Power Syst 1989; 1484—1491.
- [2] 刘晨晖. 电力系统负荷预报理论与方法 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1987.
- [3] 邰能灵, 侯志俭. 小波模糊神经网络在电力系统短期负荷预测中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 24—29.
- [4] Topalli AK, Erkmen I. A hybrid learning for neural networks applied to short term load forecasting [J]. Neurocomputing 2003; 51: 495—500.
- [5] 李元诚, 方廷健, 于尔铿. 短期负荷预测的支持向量机方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 55—59.
- [6] 谢 宏, 魏江平, 刘鹤立. 短期负荷预测中支持向量机模型的参数选取和优化方法 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 17—22.
- [7] Zhang Ming-guang. Short-term load forecasting based on support vector machines regression [J]. Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics Guangzhou 2005; 8: 4310—4314.
- [8] 姜惠兰, 刘晓津, 关颖等. 基于硬 C 均值聚类算法和支持向量机的电力系统短期负荷预测 [J]. 电网技术, 2006, 30(8): 81—85.
- [9] Vapnik V. N. Statistical learning theory [M]. New York;

Springer-Verlag 2000.

- [10] Nello C. John S. T. An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods [M]. UK: Cambridge University Press 2000.
- [11] Burges C. J. C. Geometry and invariance in kernel based methods [A]. Advance in Kernel Methods—support Vector Learning [C]. Cambridge: MIT Press 1999; 89—116.
- [12] Zhang Li, Zhou Wei-da, Jiao Li-cheng. Wavelet support vector machine [J]. IEEE Transactions on systems man and cybernetics—Part B: cybernetics 2004; 34(1): 34—39.
- [13] Dai Chao-hua, Zhu Yun-fang, Chen Wei-rong. Seeker optimization algorithm [J]. Proc 2006 Inter Conf Computational Intelligence and Security, Guangzhou, China, IEEE, 2006, 1: 225—229.
- [14] Dai Chaohua, Zhu Yunfang, Chen Weirong. Seeker optimization algorithm for training feed-forward neural networks. IEEE Transactions on Neural Networks (revised and resubmitted).
- [15] Jiang Chuan-wen, Li Tao. Forecasting method study on chaotic load series with high embedded dimension [J]. Energy Conversion and Management 2005; 46: 667—676.
- [16] Y Shi and R Eberhart. Empirical study of particle swarm optimization [J]. in Proc of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, pp. 1945—1950.

作者简介:

郑永康(1977—),男,博士,研究方向为电力系统负荷预测、计算智能等;

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:2008—12—03)