

★ 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

四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954

德阳电业局共产党员突击队



四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

Vol.34
2011
No.5

《四川电力技术》 编辑委员会名单

主任委员 王 平

副主任委员 张 伟

刘俊勇

委 员

(按姓氏笔画为序)

方文弟 王 卓 白家棣

刘 勇 朱白桦 朱国俊

朱 康 邓亚军 邬小端

李兴源 李建明 严 平

胡 灿 徐 波 唐茂林

韩晓言 谢 舫 甄 威

秘 书 李世平

吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN1003-6954
CN51-1315/TM

2011年第34卷第5期(总215期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力试验研究院

发行范围:公开

主 编:胡 灿

副 主 编:吴小冬 谢 舫

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力试验研究院情报室

地 址:成都市青华路24号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传 真:(028)87314278

E-mail:cdsdljs@163.com

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册6.00元

[期刊基本参数] CN51-1315/TM* 1978*

b* A4* 94* zh* P* ¥6.00* 4300* 24*

2011-10

目 次

• 智能电网专栏 •

智能电网与电力需求响应的研究 袁志坚 刘旭娜(1)

电气孤岛检测及其检测盲区的三维表示法 赵 泓 汪 颖 肖先勇(5)

利用单端母线的电压暂降特征进行配电网故障定位 郑天文 肖先勇(9)

基于SQL Server代理的地区电网AVC系统数据备份 白天宇 肖先勇(14)

基于网络拓扑和运行状态的电网灾难性事故评估模型 催 振 肖先勇(20)

中性点不接地系统故障充电暂态信号定位法 张文海 汪 颖 肖先勇(26)

3种典型220 kV GIS变电站进线方式的电磁场分析

..... 牟秋谷 周 凯 肖先勇(30)

基于变电站GOOSE网络的OPNET与NS2仿真比较

..... 李成鑫 吴成恩 舒 勤(34)

• 电网技术 •

电力中长期负荷模糊优选组合预测方法的研究 何 焱 黄 静(38)

地区电网中环网短时合环操作分析研究 杨桂兴 王维庆 王 晟 等(43)

输配分离后电网调度管理模式研究 李莹雯 周云峰(46)

西北新疆交联联网后新疆电网控制模式变化机理及对策研究

..... 常喜强 孙谊娟 姚秀萍 等(50)

西宁一日月山750 kV同塔双回线路接地开关选择研究 钟 蓉(54)

基于电压稳定裕度的低压减载方案研究及其工程实践 刘柏私 颜 伟(58)

负荷静态特性对PV曲线的影响 李 林 钟亨君(60)

• 输配电技术 •

城市地下变电站相关问题探讨 苟旭丹(64)

基于110 kV扩大内桥接线的备自投控制策略 张建军 姚越兰(67)

断路器机构与自适应重合闸的配合 郭又华 赵 俊 朱 雨(71)

一起隔离开关瓷瓶缺陷案例分析 罗 飞(74)

变电站直流系统安全隐患的排查和处理 邓明燕(77)

• 综述与专论 •

微电网并网时的环保经济调度 侯国彦 王 彪 丁理杰 等(80)

基于灰色关联分析的负荷季不平衡系数的分析方法与应用

..... 徐 飞 周步祥 林 楠(84)

基于工程模型的光伏建模与输出特性仿真 郭 立 晁 勤 袁铁江 等(89)

300 MW机组回油滤网堵塞导致主油箱油位下降原因分析及处理 郑能伟(92)

CONTENTS

Study of Smart Grid and Power Demand Response	Yuan Zhijian Liu Xuna (1)
Electrical Islanding Detection and Three - dimensional Representation of Its Non - detection Zone	Zhao Hong Wang Ying Xiao Xianrong (5)
Fault Location in Distribution Network Based on Voltage Sag of Single - end Bus	Zheng Tianwen Xiao Xianrong (9)
Data Backup Scheme for AVC System in Regional Power Grid Based on SQL Server Agent	Bai Tianyu Xiao Xianrong (14)
Assessment Model of Catastrophic Failures in Power Grid Based on Network Topology and Operating Condition	Cui Zhen Xiao Xianrong (20)
Single Phase Earth Fault Location Method in Isolated Neutral System Using Charge Transients	Zhang Wenhai Wang Ying Xiao Xianrong (26)
Electromagnetic Field Analysis of Three Typical Incoming Lines in 220 kV GIS Substation	Mu Qiugu Zhou Kai Xiao Xianrong (30)
Simulation Comparison of OPNET and NSZ Based on Substation Goose Network	Li Chengxin WU Chengen Shu Qin (34)
Research on Fuzzy Optimized Combination Method for Middle and Long Term Load Forecasting	He Yan Huang Jing (38)
Analysis and Research on Short - time Loop Closing Operation of Ring Network in Regional Power Grid	Yang Guixing Wang Weiqing Wang Sheng et al (43)
Study on Dispatching Management Mode of Power Grid after Transmission and Distribution Separation	Li Yingwen Zhou Yunfeng (46)
Research on Control Mode Change Mechanism and Countermeasures in Xinjiang Power Grid after Its AC Interconnection with Northwest Power Grid	Chang Xiqiang Sun Yiqian Yao Xiuping et al (50)
Research on Earthing Switch Selection for Xining to Riyueshan 750 kV Double Circuit Transmission Lines on the Same Tower	Zhong Rong (54)
Study on Low - voltage Load Shedding Scheme Based on Voltage Stability Margin and Its Engineering Practice	Liu Baisi Yan Wei (58)
Influence of Load Static Characteristic on PV Curve	Li Lin Zhong Hengjun (60)
Discussion on Relevant Problems about Urban Underground Substation	Gou Xudan (64)
Control Strategy of Spare Power Automatic Switching Based on 110 kV Expanded Internal Bridge Main Connection	Zhang Jianjun Yao Yuelan (67)
Cooperation of Circuit Breaker Mechanism and Adaptive Recloser	Guo Youhua Zhao Jun Zhu Yu (71)
Cause Analysis of Defects in Porcelain Insulator of Disconnected Switch	Luo Fei (74)
Investigation and Treatment of Security Risks in Substation DC System	Deng Mingyan (77)
Environmental - protection and Economic Dispatch of Grid - connected Microgrid	Hou Guoyan Wang Biao Ding Lijie et al (80)
Analysis Method of Load Seasonal Unbalance Coefficient Based on Gray Relational Degree Analysis and Its Application	Xu Fei Zhou Buxiang Lin Nan (84)
Photovoltaic Modeling Based on Engineering Model and Simulation of Output Characteristics	Guo Li Chao Qin Yuan Tiejiang et al (89)
Reason Analysis on Decline of Main Oil Tank Level Caused by Blockage of Returned Oil Strainer of 300 MW Unit and Its Treatment	Zheng Nengwei (92)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2011 Vol. 35 No. 5

(Ser. No. 215)

Bimonthly, Started in 1978

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

Postcode: 610072

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Test and Research Institute of Electrical Power

Editor in chief: Hu Can

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

智能电网与电力需求响应的研究

袁志坚¹, 刘旭娜^{2,3}

(1. 德阳电业局, 四川 德阳 610000; 2. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

3. 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘 要: 智能电网已经成为未来电网的发展方向, 将供电侧与用户侧资源全面、动态地整合, 才能真正实现智能型的完美电力系统。因此, 智能电网势必对需求响应产生极大的推动作用。分析了智能电网与需求响应二者相互包容、相互影响的关系, 然后针对智能电网时代引入的与需求响应相关的技术变革进行探讨, 最后结合中国电力市场的情况, 提出了进一步促进需求响应发展的建议与设想, 并探讨了今后的研究方向。

关键词: 智能电网; 需求响应; 完美电力系统; 技术变革

Abstract: Smart grid has become the development direction of the future grid. It comprehensively and dynamically combines the resources of supply side with that of user side by which the intelligent perfect power system can only be achieved. Therefore, smart grid is bound to promote the demand response. The mutually inclusive, interactive relationship between smart grid and demand response is analyzed. Afterward, the technological revolution relevant to demand response which is introduced by the epoch of smart grid is discussed. Finally, combining with the circumstance of electricity market in China, the better proposals and ideas which can advance the development of demand response are put forward, and the further research direction is discussed.

Key words: smart grid; demand response; perfect power system; technological revolution

中图分类号: TM76 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0001-04

0 引言

智能电网 (smart grid)^[1-3] 与需求响应 (demand response, DR)^[4-6] 是当今电力行业的研究热点^[7]。作为 21 世纪电力系统的重大科技创新和变革趋势^[8], 安全、可靠、经济、清洁、高效、互动的智能电网给电力行业实施需求侧管理 (demand side management, DSM) 带来了新的机遇和挑战。其中, 信息和电能的双向互动, 鼓励用户改变传统的用电方式, 积极参与电网运行, 根据实时电价调整用电模式等内容更是将需求响应设为其主要建设目的。

2005 年与 2007 年, 美国前总统布什分别签署了《能源政策法案》与《能源独立与安全法案》, 将支持需求响应和智能电网作为美国能源政策的重要组成部分。2009 年, 美国总统奥巴马签署的高达 7 870 亿美元的经济刺激计划不但宣布了智能电网时代的到来, 也把包括供应侧和需求侧在内的综合资源概念引入了公众关注范围内。目前, 许多国家从政府、发电公司、电网公司到相关的 IT 企业均投入了较多的政

策支持、资金支持和研发力量^[9], 这必将推动需求响应的大力发展。

由于电能不能大规模经济存储, 需要供需双方保证实时平衡, 需求响应就是为运用市场机制去影响需求的时间和水平, 达到电能平稳运行的目的。但与发、输、电环节相比, 配电、用电等需求侧资源与系统的联系相对薄弱, 这影响了需求响应提高系统的整体性能的效率。智能电网的突出贡献就是利用先进的信息技术灵活地整合、调度需求侧资源, 实现信息和电能的双向互动^[10], 可以预见未来的智能电网时代, 需求响应将会有长足的进步和发展。

首先介绍了智能电网与需求响应的联系, 并总结了目前国内外需求响应的研究进展, 然后针对智能电网时代引入的技术变革会给需求响应带来的影响和机遇进行了分析, 最后就中国面向智能电网的需求侧响应发展做出了展望, 并给出了具体的建议。

1 智能电网与需求响应

智能电网的最终目的是实现电网的经济、高效、

可靠、安全运行,实现能源,包括可再生能源的规模化高效利用,实现经济、环境和社会效益的最大化。它不但全面地涵盖了发电、输电、变电、配电、用电和调度的整个电力行业,还涉及到能源、信息、经济、法律等多个学科领域,对技术、经济、社会、环境等因素都会产生相互的作用和影响,因而实施智能电网需要多方参与协作。图1展示了智能电网的利益相关方^[3]。社会与政府希望智能电网能满足环境友好、节能减排的要求;电力企业希望能提升电力系统的各方面性能,提高自身运营业绩;电力用户希望智能电网能给生活带来更大的便利与实惠;设备制造商和服务提供商希望借助智能电网所带来的巨大商机来获取丰厚的利润;倡导者和科研机构也能从智能电网的实施中获利。需求响应则是将这些利益相关方通过用户响应的手段联系在一起,既分享了各自的利益,也推动了智能电网的建设。

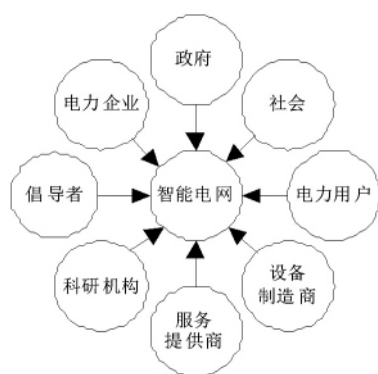


图1 智能电网的利益相关方

需求响应的概念是美国在进行了电力市场化改革以后,针对需求侧管理如何在竞争市场中充分发挥作用,以维持系统可靠性和提高市场运行效率而提出的一种技术途径。需求响应可定义为^[4]:电力市场中的用户针对市场价格信号或者激励机制做出响应,并改变正常电力消费模式的市场参与行为。强调电力用户直接根据市场情况主动作出调整自身负荷需求的反应,从而作为一种资源对市场的稳定和电网的可靠性起到促进作用。

根据美国能源部的研究报告^[5],可以按照用户不同的响应方式将电力市场下的需求响应划分为以下2种类型:基于价格的需求响应和基于激励的需求响应。

(1) 基于价格的需求响应是指用户响应零售电价的变化并相应地调整用电需求,包括分时电价(time-of-use pricing, TOU)、实时电价(real-time

pricing, RTP) 和尖峰电价(critical peak pricing, CPP)等。用户通过内部的经济决策,将用电时段调整到低电价时段,并在高电价时段减少用电,来实现减少电费支出的目的。参与此类需求响应项目的用户可以与需求响应实施机构签订相关的定价合同,但用户在进行负荷调整时是完全自愿的。

(2) 基于激励的需求响应是指需求响应实施机构通过制定确定性的或者随时间变化的政策,来激励用户在系统可靠性受到影响或者电价较高时及时响应并削减负荷,包括直接负荷控制(direct load control, DLC)、可中断负荷(interruptible load, IL)、需求侧竞价(demand side bidding, DSB)、紧急需求响应(emergency demand response, EDR)和容量/辅助服务计划(capacity/ancillary service program, CASP)等。

这2类需求响应项目存在一定的内在联系,相互间可以互补,都具备节能、负荷整型的功能。需求响应还是缓解系统短期容量短缺和推迟电网升级投资的有效方法,还能够降低系统高峰期电价、减少电价波动风险、优化资源配置和保证市场稳定运行,对电力工业和经济发展以及环保等方面都有着重要的战略作用,这与智能电网需要达到的目的不言而喻。

需求侧作为智能电网建设的重点环节,需求响应项目的推行对于智能电网建设目标的实现具有举足轻重的作用;另一方面,智能电网框架下的先进的计量、通信和控制手段对于需求响应的支持也起到非常关键的促进作用。因此,智能电网和需求响应二者关系密切,相辅相成,具体表现在以下几个方面。

(1) 需求响应是智能电网框架下的重要组成部分,是实现其建设目标的关键技术保证。智能电网与传统电网的一个重要不同点就是智能电网尤其强调与用户的互动性,包括信息互动与电能互动,而互动性主要是通过部署各类需求响应项目来实现的。

在信息互动方面,主要体现在供需之间的信息交互。需求响应实施机构可及时收集、统计与分析用户需求,来增强系统的安全、可靠与经济运行能力;用户也可以通过需求响应平台及时了解电网的实时动态,并在参与需求响应项目时安排合理的用电方案和响应策略,以更好地管理、优化、节约、监控和理解电能使用。

在电能互动方面,主要体现在供需之间的双向互动供电。普通计费电表为传统电网的计量工具,而在智能电网中,借助于具有双向计量与通信功能的高级

计量系统,用户也可以向电网供电,打破了传统的供需双方的电能单相传输方式。

(2) 智能电网肩负着节能减排、应对全球性环境和能源危机挑战的重任。该目标的实现离不开需求侧资源的积极参与。需求响应项目的直接目的虽然是负荷整形,但有研究发现^[12],在高峰时段减少的需求在非峰时段不会完全反弹,保守估计可以减少4%的总能源需求,甚至还能达到11%,而且需求响应项目通过智能电网的交互性,可使用户随时了解目前电价信息和自己的能源消耗情况,潜意识地起到了节能降耗的后发作用。

(3) 智能电网背景下的需求响应项目还有利于电力工业的稳定可靠运营,提高整体电网的安全可靠性,以及灾后的自愈能力。针对智能电网的可再生能源计划,需求响应可通过可中断负荷、动态能源储备等手段有效减少高峰能源需求,合理和有效地利用其即插即用特点,排除危险事件的发生。2008年3月,美国得克萨斯州一个风机突然停运,造成系统容量从1 700 MW 跌落到300 MW,10 min 内系统紧急调度1 100 MW 需求响应参与,避免了一次全州性的大停电事故。

(4) 智能电网通过创新营销策略,引导用户主动参与电力市场竞争,实现积极的需求响应策略,改善了以往主要由政府或电力公司推动需求侧管理实施的尴尬局面。智能电网提供了双向互动的营销技术和机制支持,使智能电网下的需求利益相关方均能得到收益、投资回报。在经济效益的驱动下,从电力公司到电力用户到整个社会,对于需求响应项目必将投入更多的热情和信心。

2 与需求响应相关的智能电网技术

针对智能电网技术,各国均已经形成强大的研究群体,研究内容覆盖发电、输电、配电和售电等环节,各行业也在如火如荼地开展智能电网建设。其中,以高级计量基础设施(advanced metering infrastructure, AMI) 为主的智能电网技术对支持需求响应和促进电网与用户的互动方面起着最为关键的作用。AMI 是一个使用智能电表通过多种通信介质,按需或者以设定的方式测量、收集并分析用户用电数据、能够提供开放式双向通信的系统,是智能电网的基础信息平台。

AMI 具有的主要功能包括^[13-14]:改善客户服务、停电管理、窃电监测、远程连接/断开用户、电能质量管理、负荷预测、远程改变计量参数、远程升级仪表固件、与水表或天然气表接口、预付电费购电、电价高峰/紧急事件的通知等。由此可知,AMI 支持各类需求响应项目,以AMI 为核心的技术体系构成了与需求响应相关智能电网技术的主要部分。这些智能电网技术主要包括:

(1) 智能电表。智能电表是实现响应的信息与控制的终端设备。相对于传统电表不可操作性而言,智能电表能给用户带来更加优质的服务。它可以为用户提供实时用电信息,使用户能更加清楚自身用电习惯和耗电清单,为用户参与各类需求响应项目提供数据支持;它也可以为电力部门传递用电信息,实现对用户远程抄表、更好地掌握用户用电规律、并按动态电价收取用户电费。

智能电表这一关键技术受到了极大的关注,2009年1月25日,美国白宫最新发布的《复苏计划尺度报告》宣布:将铺设或更新4 828 km 输电线路,并为4 000 万美国家庭安装智能电表。

(2) 双向通信技术。实时、高速与完全集成的双向通信技术是使智能电网成为动态的与交互式电网的大型基础设施。该系统工程包含从电力网络到用户侧均需要安装大量传感器和先进的测量和控制装置,来支持其先进的能源计量和实时市场交易功能。双向通信技术不但能帮助用户在参与各类需求响应项目时做出合理的策略,还能将该策略快速、准确无误地传送到指定位置。目前常用的通信方式主要有电力线载波、光纤、Internet 和无线通信等。

(3) 能量端口(Energyport) 技术。能量端口是指包括“门户”、“网关”和“智能仪表”的设备。狭义上讲,是指与通信数据集中器有关的传统电力公司与电力用户的交接界面。实际上,它是指终端子系统和设备间的通信,使得用户设施中的智能设备可通过广域网和远程系统实现无缝连接。通过实施能量端口技术,可让用户在安全性、保护措施、便利性、舒适性、通信、能量管理及娱乐这7个方面受益。该项技术的发展为用户提供了自动管理电能的工具,用户可自行做出定价决策、选择默认的用电曲线,同样也可使供电商通过开关操作控制用电需求。

(4) 智能储能技术。智能电网时代的智能储能技术也为需求响应的发展带来契机,有了智能储能技

术,可以弥补可再生能源发电不确定性的不足,让用户以需求侧竞价的方式将屋顶风电、屋顶光电装置等所产生的电能卖给电网,具有充分的选择权进行供电服务商的选择。该项技术不但提高能源利用的市场性、独立性和安全性,还促进了用户响应,实现真正的电能“智能互动”。

(5) 高效技术。高效技术涉及通过促进用户改变负荷形状(数量和用电模式),努力提高电网利益的各种活动,包括与硬件有关和与非硬件有关的活动,其中,与硬件有关的活动,如改进楼宇热能完整性和增加高效设备,与非硬件有关的活动,包括选择用户用电模式以及通过使用电力取代石化燃料,以减少总体上能量消耗和污染排放。用户通过投资高效的用电装置来提高用电效率和节省用电成本,投资者通过延迟新的投资需求来获得利益,这大大增强了需求响应项目的参与性。

3 推动需求响应发展的建议

智能电网时代的到来,整个电力行业甚至各行业均将会实现整体的飞跃和提升。在过去的努力建设下,需求响应项目已迈出实质性的步伐,正越来越多地被大众所接受,成为化解电力供求矛盾的有效手段,保证电力安全运行的有力措施和促进可持续发展的重要途径。为将智能电网与需求响应的作用发挥到极致,应结合中国实际情况,现提出以下几点建议。

(1) 与发达国家相比,中国的需求响应项目起步较晚、发展较慢,政府部门电力相关行业应制定适应智能电网背景下的需求响应项目的具体方案和措施,并引导其规划、实施,并将智能电网技术与需求响应有机整合到智能电网发展愿景中,形成智能电网与需求响应相互促进、共同发展的局面。

除此之外,需要成立专门的执行机构来协调各个项目的实际履行工作,并从财政、税收、贷款等方面对智能电网与需求响应项目的发展给予充分政策和资金支持,以创建各利益相关方共赢的局面。

(2) 智能电网与需求响应项目均需要多方的积极参与,但来自系统、公众,以及电力用户等方面的群体尚未意识到实施需求响应的紧迫性和重要性,因而需要多种渠道向各利益相关方展示其发展愿景。

从电力系统部门的角度,认为需求响应会减少电力部门的售电收入,从而削弱其投资的积极性。所以

不但应健全相关政策法规等激励机制,同时加深其对需求响应的进一步认识,看到需求响应项目能延迟发电侧建设,提高运行稳定性等带来的效益。

对于用户而言,应大力开展广泛的宣传与教育,创新营销策略,引导用户主动参与需求侧响应项目,消除其怀疑、回避的态度。

(3) 推广与需求响应相关的智能电网各项技术。随着主动参与需求响应项目的用户日益增多、用户侧分布式电源的大规模部署,系统安全问题将变得更加复杂,应该依靠智能电网的新技术来应对新形势的挑战。

与此同时,除了上一节提到的智能电网技术外,鼓励电力企业、科研机构、设备制造商等开展智能电网与需求响应的专题研究,增大对智能电网与需求响应项目的资金投入,加强自主的新技术研发与国外先进技术引进。在此基础上,应加快建立、完善包含需求响应的智能电网技术规范与行业标准,以支持智能电网技术与需求响应项目的大规模部署。

4 结 语

智能电网已经成为未来电网的发展方向,使电网智能化的核心就是全面、动态地整合用户侧资源,包括负荷以及电力使用的相关信息。它体现了电网发展理念、电力企业发展思路与电力用户角色全面变革的过程。由此可见,需求响应项目是智能电网最重要的组成部分之一。

讨论了智能电网给需求响应所带来的促进作用,以及针对自身特点的完善建议。如何让需求响应在智能电网环境下相得益彰地发展,找准合适的方案措施,并与供应侧的资源进行合理的综合资源规划,充分发挥其稳定系统运行、节能减排与绿色环保的作用,也是今后研究的热点。

参考文献

- [1] Vojdani A. Smart Integration [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(6): 71-79.
- [2] Editorials of Nature. The Greener Grid: Governments Need to Back an Overhaul to Get the Electricity Grid Ready for Renewable Energy [J]. Nature, 2008, 454(7204): 551-552.

(下转第13页)

- neers, 58th Annual Conference, Apr. 2005: 211 – 216.
- [6] J. Mora – Flórez, J. Meléndez. Comparison of Impedance Based Fault Location Methods for Power Distribution Systems [J]. Electric Power Systems Research, 2008: 657 – 666.
- [7] A. L. Dalcastagne and S. L. Zimath, A Study about the Sources of Error of Impedance – Based Fault Location Methods [C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES: 1 – 6.
- [8] 陈铮, 董新洲, 罗承沐. 单端工频电气量测距算法的鲁棒性 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(3): 310 – 313.
- [9] Girgis A. A, et al. A New Fault Location Technique for Two and Three – terminal Lines [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1992, 7(1): 98 – 107.
- [10] Magnago, F. H., Abur, A. Fault Location Using Wavelets [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1998, 13(4): 1475 – 1480.
- [11] 徐丙垠, 李京, 陈平, 等. 现代行波测距技术及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62 – 65.
- [12] 李友军, 王俊生, 郑玉平, 等. 几种行波测距算法的比较 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 36 – 40.
- [13] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距的研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 76 – 80.
- [14] 曾祥君, 尹项根, 林福昌, 等. 基于行波传感器的输电线路故障定位方法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 42 – 46.
- [15] Hizman, H., Crossley, P. A., et al. Fault Section Identification and Location on a Distribution Feeder Using Traveling Waves [C]. Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, 25 July 2002, (3): 1107 – 1112.
- [16] 于盛楠, 杨以涵, 鲍海. 基于 C 型行波法的配电网故障定位的实用研究 [J]. 继电器, 2007, 35(10): 1 – 4, 12.
- [17] Tawfik, M. M. Morcos, M. M. ANN – based Techniques for Estimating Fault Location on Transmission Lines Using Prony Method [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2001, 16(2): 219 – 224.
- [18] YU Yue – hai, BAI Yichuan, XI Guo – fu, et al. Fault Analysis Expert System for Power System [C]. 2004 International Conference on Power System Technology, 21 – 24 Nov, 2004(2): 1822 – 1826.
- [19] 杜刚, 刘迅, 苏高峰. 基于 FTU 和 “S” 信号注入法的配电网接地故障定位技术的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 73 – 76.
- [20] Bollen M. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions IM2. IEEE Press, New York, 2000.
- (收稿日期: 2011 – 04 – 10)

(上接第4页)

- [1] 张钦, 王锡凡, 付敏. 需求响应视角下的智能电网 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 49 – 55.
- [2] Bosheli F, Veloza O P. Review of Developed Demand Side Management Programs Including Different Concepts and Their Results [C]. Proceedings of IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, Bogotá, Colombia, 2008: 1 – 7.
- [3] Rahimi F. Overviews of Demand Response Programs at Different ISOs/RTOs [C]. Proceedings of IEEE Power Systems Conference and Exhibition, USA, Seattle, WA, 2009: 1 – 2.
- [4] Abreu K. PG&E’s Perspective on Demand Response under the Smart Grid Paradigm [C]. Proceedings of IEEE Power Systems Conference and Exhibition (PSCE’09), Seattle, WA, USA, 2009.
- [5] Rahimi F, Ipakchi A. Overview of Demand Response under the Smart Grid and Market paradigms [J]. Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2010: 1 – 7.
- [6] Noreen Parks. Energy Efficiency and the Smart Grid [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(9): 2999 – 3000.
- [7] Steve Collier. Ten Steps to a Smarter Grid [C]. 2009 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC 09), Fort Collins, Colorado, USA, 2009: B2 – B2 – 7.
- [8] Albadi, M. H., El – Saadany, E. F. Demand Response in Electricity Markets: An Overview [C]. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007: 1 – 5.
- [9] Menniti D, Costanzo F, Scordino N, Sorrentino, N. Purchase – Bidding Strategies of an Energy Coalition With Demand – Response Capabilities [C]. Power Systems, IEEE Transactions, 2009, 24(3): 1241 – 1255.
- [10] Dam Q B, Mohagheghi S, Stoupis, J. Intelligent Demand Response Scheme for Customer Side Load Management [C]. Energy 2030 Conference, 2008: 1 – 7.
- [11] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1 – 4.
- [12] Mak S. T. A Synergistic Approach to Implement Demand Response, Asset Management and Service Reliability Using Smart Metering, AMI and MDM Systems [C]. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009: 1 – 4.
- (收稿日期: 2011 – 04 – 10)

电气孤岛检测及其检测盲区的三维表示法

赵泓¹, 汪颖^{1,2}, 肖先勇^{1,2}

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:介绍了各种孤岛检测方法的原理和优缺点。检测盲区可以使用有功功率偏移量 ΔP 和无功功率偏移量 ΔQ 来描述,也可以使用负荷 RLC 参数来描述。使用品质因数 Q_f 和谐振频率 f_0 来描述检测盲区。当负荷的电流电压相位角与逆变器输出电流电压相位角相等时,负荷处于检测盲区。利用这一关系,定量的表示了检测盲区的大小,并且利用 Matlab 在二维空间 $f_0 - Q_f$ 上直观地表示了各种孤岛检测方法检测盲区的大小,并进一步的推广到三维空间。并分析了各种孤岛检测方法的参数对检测盲区的影响。

关键词:分布式发电; 孤岛检测; 检测盲区; 相位角

Abstract: The main principle of various islanding detection methods (IDMs) is introduced, and the merits and faults of these methods are also compared. There are many ways to describe the non-detection zone (NDZ) of IDMs, such as the $\Delta P - \Delta Q$ space and the RLC parameter space, but the $f_0 - Q_f$ parameter space is used here. When the phase angle of local load equals to the phase angle of the inverter, the load is within the NDZ. Then the phase angle criterion can be used to quantify the size of NDZ. The $f_0 - Q_f$ curves which are obtained by the Matlab intuitively show the NDZ of every method. The influence of the design parameters of each IDM on the NDZ is analyzed finally.

Key words: distributed generation; islanding detection; non-detection zone; phase angle

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0005-04

0 引言

随着人们对资源有限性的认识,基于可再生资源的分布式发电得到了快速发展,而分布式电源接入电网首先必须要解决反孤岛效应问题。孤岛被定义为当一部分包含发电机和负荷的局部电网与大系统隔离开来,并能维持局部电网继续供电的状态。孤岛效应可能影响电网安全稳定,使设备遭到损坏,孤岛部分的电压、频率失控,甚至危及人员安全,因此,从保证系统安全稳定运行的角度出发,为防止孤岛效应的发生,要求在出现孤岛后快速、准确地检测出孤岛状态并断开分布式电源。从用户满意度的角度,要求在任何情况下最大限度地保持继续供电,这就要求电气孤岛与大系统断开后,分布式电源能继续维持孤岛部分负荷的供电。孤岛检测的研究内容主要集中于快速准确地检测出孤岛状态,并能进一步实现对电气孤岛的有效控制。

衡量孤岛检测方法优劣的常用指标是可靠性、安全性和响应时间^[1]。常用检测盲区(或不可检测区域, non-detection zone)来描述孤岛检测的可靠性。

检测盲区定义为所用检测方法不能可靠检测出孤岛效应所对应的负荷空间。传统的检测盲区通常通过有功功率不匹配量(ΔP)和无功功率不匹配量(ΔQ)表示。对于不同 RLC 负荷,可对应于同样的有功和无功功率不匹配量,也就是说,每种负荷状态下,即使同一种孤岛检测方法其检测盲区也是不同的,仅使用有功和无功功率不匹配量并不能完全准确地判定不同情况下的检测盲区。文献[2]提出采用 RLC 负荷参数的二维空间来刻画检测盲区。常用负荷参数空间有 $L - C$ 空间^[3]和 $Q_f - f$ 空间^[4]。IEEE Std. 1547 标准规定,应在 2 s 内准确检测出孤岛。

孤岛检测法主要有被动法、主动法和基于通信的孤岛检测法。被动检测法直接监测系统并网连接点的电压和频率是否越限来判断孤岛效应。主动检测法向系统施加一定的小扰动量,如正序电流或负序电流幅值、电流相位、输出有功功率、输出无功功率等,并结合被动检测方法来判断孤岛效应。基于通信的孤岛检测法通过实时监控电网的运行状态来判断孤岛效应。

这里对现有孤岛检测方法的基本原理和主要优缺点进行了分析,并定量分析了检测盲区的大小。

1 孤岛检测原理

图1给出了 IEEE Std. 1547 推荐的用于孤岛检测的系统。开关 S1 闭合时, DG 与系统并网运行, 共同为 RLC 负荷供电。开关 S1 断开时, DG 单独为 RLC 负荷供电, 孤岛发生。如果开关断开前 ΔP 和 ΔQ 均为 0, 则孤岛形成后的 DG 部分能满足 RLC 负荷的需求, 此时孤岛能稳定运行。如果开关断开前 ΔP 和 ΔQ 不为 0, 孤岛形成后并网连接点 PCC 的电压和频率将发生偏离, 孤岛带电部分可能失去稳定。

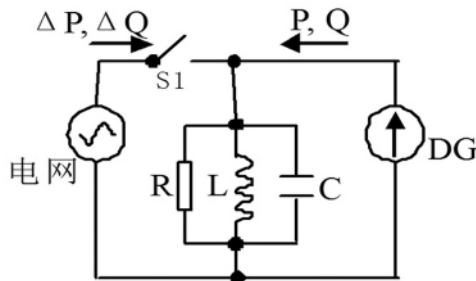


图1 孤岛的原理图

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

$$Q_f = R\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \theta_{load} &= \tan^{-1} \left[R \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right] \\ &= -\tan^{-1} \left[Q_f \left(\frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式(1)~式(3)中, R 为负荷电阻; L 为负荷电抗; C 为负荷电容; P 为有功功率; f 为电网频率; Q_f 为品质因数; θ_{load} 为负荷电流与电压间的相位角。

2 现有孤岛检测法

2.1 被动检测法

2.1.1 过频/欠频检测方法 OFP/UFP

过频/欠频检测方法 OFP/UFP 通过监视并网连接点(PCC)的频率来检测孤岛状态, 当频率高于 60.5 Hz 或低于 59.3 Hz 时判定为孤岛发生。所有分布式电源的逆变器均配置过压/欠压和过频/欠频检测法。如果使用相位角来表示孤岛检测方法的检测盲区^[3], 可得下式。

$$-\tan^{-1} \left[Q_f \left(\frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0} \right) \right] = 0 \quad (4)$$

由式(4)可得

$$f_0 = f_{is} \quad (5)$$

可见, 对于 OFP/UFP 方法, 谐振频率 f_0 与品质因数 Q_f 无关, 仅由 f_{is} 的上下限确定。该方法的检测盲区用 $Q_f - f_0$ 参数空间表示如图 2。

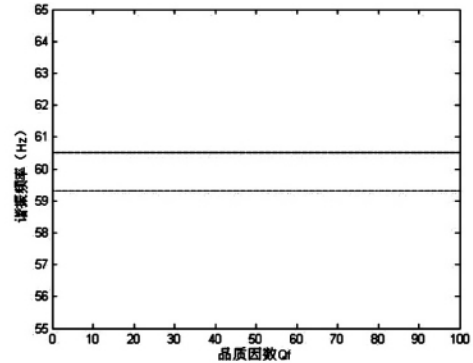


图2 OFP/UFP方法在 $f_0 - Q_f$ 坐标下的检测盲区

由图2可见, 无论对于何种品质因数 Q_f , 检测盲区始终为 $59.3 \text{ Hz} \leq f_0 \leq 60.5 \text{ Hz}$, 当负荷谐振频率在此范围内如 $f_0 = 60 \text{ Hz}$ 时, OFP/UFP 法不能检测出孤岛效应。

2.1.2 相位跳变检测法 PJD

相位跳变检测法 PJD 通过监测并网连接点 PCC 的电压与电流之间的相位差的突变量来检测孤岛^[4]。一般相位差预置值为 Φ_{th} , 通常取 $\Phi_{th} = 2^\circ$ 。当相位跳变小于 Φ_{th} 时, 认为电网处于正常状态; 当相位跳变大于 Φ_{th} 时, 认为发生了孤岛效应。可得检测盲区如下^[5]。

$$-\tan^{-1} \left[Q_f \left(\frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0} \right) \right] \leq \varphi_{th} \quad (6)$$

当 Φ_{th} 为定值时, f_{is} 分别取上下限, 可得以谐振频率 f_0 为变量, Q_f 为自变量的函数。用 MATLAB 画出函数图形如图 3, 其中两条曲线之间的部分即为检测盲区。

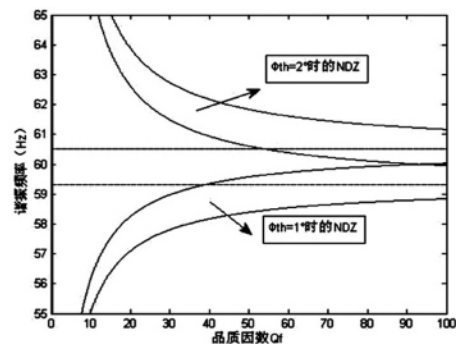


图3 PJD方法在 $f_0 - Q_f$ 坐标下的检测盲区

图3分别给出了 PJD 方法对于 $\Phi_{th} = 2^\circ$ 和 $\Phi_{th} = 1^\circ$ 时的检测盲区。可见, 当 Q_f 小于 2.5 时, PJD 法的检测盲区较 OFP/UFP 法小。随着 Q_f 值增加, 检测盲

区变大。文献[6]指出,较大的 Q_f 使孤岛检测难度增加,即检测盲区收负荷特性的影响较明显。

2.2 主动检测方法

2.2.1 主动频移法 AFD

主动频移法 AFD 通过对逆变器输出电流增加一个短期零值来使输出电流略微失真,使电流频率偏移 δf [7]。失真后的电流为

$$i_k = \sqrt{2}I \sin [2\pi(f + \delta f)t] \quad (7)$$

主动频移法中,逆变器输出电流电压间的相位角为 θ_{AFD} , cf 为斩波系数,有

$$\theta_{AFD} = \pi f \cdot t_z = \frac{\pi \cdot \delta f}{f + \delta f} = \frac{\pi \cdot cf}{2} \quad (8)$$

$$cf = \frac{t_z}{T/2} = 2f \cdot t_z \quad (9)$$

式中,斩波系数 cf 定义为电流过零时间 t_z 与电网电压周期一半 $T/2$ 的比值。斩波系数 cf 用于描述主动频率偏移法对电网频率干扰的大小。 cf 值较大时,说明 AFD 法引入的短期电流零值较大,电流总谐波畸变率 THD 较大,将降低电能质量。

孤岛发生时 θ_{load} 与 θ_{AFD} 相等[8],因此

$$-\tan^{-1} \left[Q_f \left(\frac{f_0}{f_{is}} - \frac{f_{is}}{f_0} \right) \right] = \frac{\pi \cdot \delta f}{f + \delta f} \quad (10)$$

当系统频率位于正常频率允许范围时,即 $f_{min} < f_{is} < f_{max}$,此时,所对应的负荷位于检测盲区内。假设每种情况下 δf 为定值,对于式(9),分别取 f_{is} 为上下限时,得 f_0 关于 Q_f 的方程组

$$\begin{cases} -\tan^{-1} \left[Q_f \left(\frac{f_0}{f_{max}} - \frac{f_{max}}{f_0} \right) \right] = \frac{\pi \cdot \delta f}{f + \delta f} \\ -\tan^{-1} \left[Q_f \left(\frac{f_0}{f_{min}} - \frac{f_{min}}{f_0} \right) \right] = \frac{\pi \cdot \delta f}{f + \delta f} \end{cases} \quad (11)$$

将公式(10)进一步化简,得到

$$\begin{cases} f_0^2 \frac{f_{max} \cdot \tan(\frac{\pi \cdot \delta f}{f + \delta f})}{Q_f} - f_0^2 - f_{max}^2 = 0 \\ f_0^2 \frac{f_{min} \cdot \tan(\frac{\pi \cdot \delta f}{f + \delta f})}{Q_f} - f_0^2 - f_{min}^2 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

由此可得关于 $Q_f - f_0$ 的两个图像,图像间的区域即为检测盲区。图4分别给出了 $\delta f = 0.5$, $\delta f = 1$, $\delta f = 1.5$ 时 AFD 方法的检测盲区。

当 $Q_f < 2.5$ 时,AFD 法的检测盲区较 OFP/UFP 法小。随着 δf 增大,检测盲区往下偏移,这并非说明检测盲区随着 Q_f 增大而减少;仅说明对于 $59.3 \leq f_0$

≤ 60.5 的负荷,随着 δf 增加,检测盲区有所减小。当 $\delta f = 1.5$, $Q_f \leq 2$ 时,谐振频率大于 59.3 Hz 的负荷几乎不存在检测盲区。

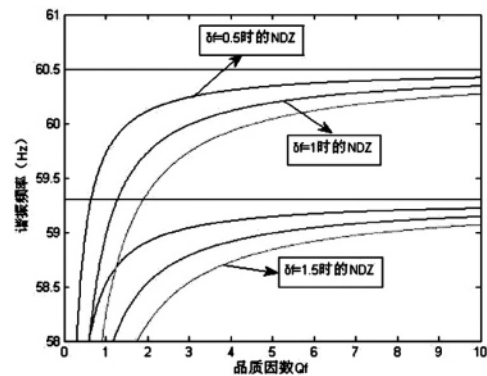


图4 AFD 方法在 $f_0 - Q_f$ 坐标下的检测盲区

2.2.2 滑模频率偏移法 SMS

滑模频率偏移法控制逆变器的输出电流电压的相位角为频率的函数。在额定频率下,逆变器工作于正功率因数,即输出电流和电压之间的相位差为0。在孤岛状态下,使频率偏移正常值[9],滑模频移法的相位角 θ_{SMS} 为

$$\theta_{SMS} = \theta_m \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{f - f_g}{f_m - f_g} \right) \quad (13)$$

孤岛发生时, θ_{load} 与 θ_{SMS} 相等,得滑模频移法的检测盲区。

$$\begin{aligned} &-\tan^{-1} \left[Q_f \left(\frac{f_0}{f_{is}} - \frac{f_{is}}{f_0} \right) \right] \\ &= \theta_m \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{f - f_g}{f_m - f_g} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

同理,分别取系统频率为上下限 f_{min} 和 f_{max} 时,得化简后的函数方程组。

$$\begin{cases} f_0^2 \frac{f_{max} \cdot \tan(-\theta_m \sin(\frac{\pi}{2} \frac{f_{max} - f_g}{f_m - f_g}))}{Q_f} - f_0^2 - f_{max}^2 = 0 \\ f_0^2 \frac{f_{min} \cdot \tan(-\theta_m \sin(\frac{\pi}{2} \frac{f_{min} - f_g}{f_m - f_g}))}{Q_f} - f_0^2 - f_{min}^2 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

若分别取 $\theta_m = 5^\circ$ 或 $\theta_m = 10^\circ$, $f_m - f_g = 3 \text{ Hz}$,得两个 f_0 关于 Q_f 的函数图像如图5。

图5中的边界即为频率 f 分别取上下限时对应的临界区域,两个函数图像中间部分为检测盲区,其余部分为能可靠检测孤岛的区域。

2.2.3 Sandia 频移法 SFS

SFS 法是对主动频移法 AFD 的扩展,对逆变器的输出电压采用正反馈控制。在正反馈作用下,斩波

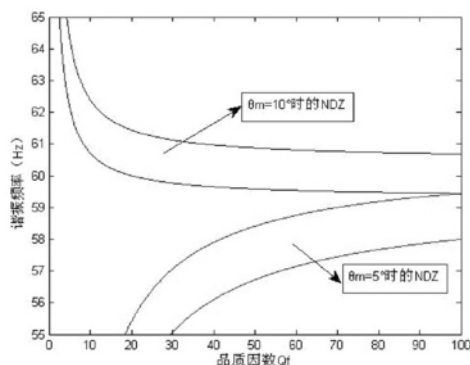


图5 SMS方法在 $f_0 - Q_f$ 坐标下的检测盲区

系数修正为

$$cf(f) = cf_0 + k(f - f_g) \quad (16)$$

式中, cf_0 为无频率正反馈时的斩波系数; k 为加速系数。将修正后的斩波系数公式(16) 带入 AFD 法的相位角公式(8), 得 SFS 法的相位角 θ_{SFS} 为

$$\theta_{SFS}(f) = \frac{\pi \cdot cf(f)}{2} \quad (17)$$

发生孤岛时, θ_{load} 与 θ_{SFS} 相等, 得 SFS 法的检测盲区^[1] 为

$$-\tan^{-1} \left[Q_f \left(\frac{f_0}{f_{is}} - \frac{f_{is}}{f_0} \right) \right] = \frac{\pi \cdot [f_0 + k(f_{is} - f_g)]}{2} \quad (18)$$

同理, 分别取系统频率为上下限 f_{min} 和 f_{max} 时, 得化简后的函数方程组为

$$\begin{cases} f_{max}^2 \cdot \tan\left(-\frac{\pi \cdot [f_0 + k(f_{max} - f_g)]}{2}\right) = \frac{Q_f}{f_0 - f_{max}^2} \\ f_{min}^2 \cdot \tan\left(-\frac{\pi \cdot [f_0 + k(f_{min} - f_g)]}{2}\right) = \frac{Q_f}{f_0 - f_{min}^2} \end{cases} \quad (19)$$

SFS 法中, 一般取 cf_0 为 0.5, 物理意义是在额定电网频率时的总谐波失真为 5%。孤岛后的频率在正反馈作用下将更加快速的偏移。图 6 中标注了加速系数 k 取不同值时检测盲区的上限和下限, 位于上

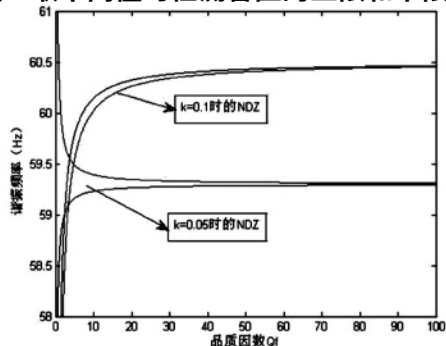


图6 SFS方法在 $f_0 - Q_f$ 坐标下的检测盲区

下限之间的部分为检测盲区。

检测盲区的大小不仅由品质因数 Q_f 和谐振频率 f_0 决定, 也与加速系数 k 值有关。当 k 由 0.05 变成 0.1 时, 检测盲区缩小了。当 k 值增大时, 斩波系数 cf 增大, 使得电流失真增大, 这在一定程度上减小了检测盲区, 却降低了电能质量。

3 不可检测区的三维空间表示

考虑主动频移法 AFD 的不可检测区为

$$-\tan^{-1} \left[Q_f \left(\frac{f_0}{f_{is}} - \frac{f_{is}}{f_0} \right) \right] = \frac{\pi \cdot \delta f}{f + \delta f} \quad (20)$$

可以考虑以品质因数 Q_f 和 δ_f 为自变量, f_0 为变量的二元方程。用 Matlab 画出的不可检测区如下。

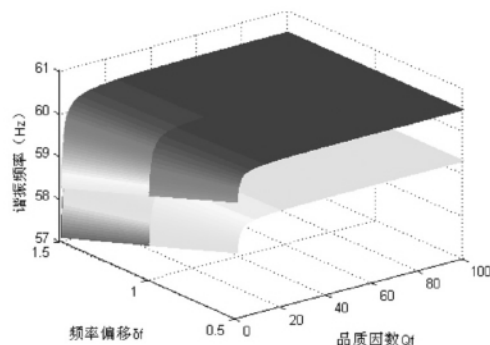


图7 三维空间表示不可检测范围

用三维空间表示不可检测区的意义在于, 对于可连续调节的 δ_f , 不可检测区的范围更加直观清晰。

参考文献

- [1] Samuelsson, O., Strath, N. Islanding Detection and Connection Requirements [C]. Powe Engineering Society General Meeting, 2007: 1 - 6.
- [2] Zhihong Ye, Amol Kolwalkar, Yu Zhang, etc. Evaluation of Anti - Islanding Schemes Based on Nondetection Zone Concept [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1171 - 1176.
- [3] M · E · RoPP, M. Begovie, A. Rohatgi. Determining the Relative Effectiveness of Islanding Prevention Techniques Using Phase Criteria and Non - detection Zones [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15(3): 290 - 296.
- [4] Luiz A. C. Lopes, Huili Sun. Performance Assessment of Active Frequency Drifting Islanding Detection Methods [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 171 - 180.

(下转第 29 页)

小、故障初始角以及故障分支的影响,但当过渡电阻较大时精度大大降低,原因是过渡电阻增大时,暂态信号的衰减速度增大;当过渡电阻大于某值时,方法将失效。还利用了充电暂态信号进行故障的定位,思路新颖清晰,但是精度不高,还需要在信号的分析处理上进行深入研究,特别是充电信号的提取问题。前面只考虑了故障电阻较小时的单相接地故障定位问题,以后还需要对高阻抗故障以及瞬时性故障的识别与定位进行深入研究。而且只是利用了故障时产生的暂态信号,在以后的研究中还应加入故障稳态信号的分析,利用暂稳结合的方法以提高故障定位的准确性和可靠性。

参考文献

- [1] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理(第三版)[M]. 北京:中国电力出版社,1994.
- [2] M. Mirzaei, M. Z. A. Ab Kadir, E. Moazami, etc. Review of Fault Location Methods for Distribution Power System [J]. Australia: Basic and Applied Science, 2009, 3(3): 2670 - 2676.
- [3] 马士聪,高厚磊,徐丙垠,等. 配电网故障定位技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 119 - 124.
- [4] 许奎,张雪松,杨波. 配电网故障定位的改进通用矩阵算法[J]. 继电器, 2007, 35(3): 6 - 8.
- [5] 王林川,李庆鑫,刘新全,等. 基于改进蚁群算法的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 29 - 33.
- [6] 张利,杨以涵,司冬梅,等. 基于零序电流和磁场检测故障杆的配电网故障定位[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 73 - 76.
- [7] 孙波,徐丙垠,孙同景,等. 基于暂态零模电流近似熵的

小电流接地故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 83 - 87.

- [8] 张惠芬,潘贞存,桑在中. 基于注入法的小电流接地系统故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 64 - 66.
- [9] 于盛楠,鲍海,杨以涵. 配电线路故障定位的实用方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 86 - 90.
- [10] 吴振升,杨学昌,伊贵业. 配电网三相不换位线路接地故障定位的传递函数法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 7 - 11.
- [11] 梁志瑞,穆毓,牛胜锁,等. 一种小电流接地系统单相接地故障测距新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 66 - 70.
- [12] 唐轶,陈奎,陈庆. 小电流接地电网单相接地故障的暂态特性[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 175 - 179.
- [13] Seppo Hanninen. Single Phase Earth Faults in High Impedance Grounded Networks: Characteristics, Indication and Location [D]. Espoo, Finland: Helsinki University of Technology, 2001.
- [14] William H. Hayt Jr, Jack E. Kemmerly. 工程电路分析(第七版)[M]. 周玲玲,蒋乐天,等译,北京:电子工业出版社, 2007: 285 - 318.
- [15] Seppo Hanninen, Matti Lehtonen. Characteristics of Earth Faults in Electrical Distribution Networks with High Impedance Earthing [J]. Electric Power Systems Research, 1998, 44: 155 - 161.
- [16] David C. Robertson, Octavia I. Camps, Jeffrey S. Mayer, et al. Wavelets and Electromagnetic Power System Transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 1050 - 1058.
- [17] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京:水利水电出版社, 1993.

(收稿日期:2011-04-10)

(上接第8页)

- [8] Irvin J. Balaguer, Heung - Geun Kim, Fang Z. Peng, ect. Survey of Photovoltaic Power Systems Islanding Detection Methods [C]. Industrial Electronics, 34th Annual Conference of IEEE 2008: 2247 - 2252.
- [9] H. H. Zeineldin, James L. Kirtley, Jr. A Simple Technique for Islanding Detection with Negligible Nondetection Zone [J]. IEEE Transactions on power Delivery, 2009, 24(2): 779 - 786.
- [10] M E Ropp, M Begovic, A Rohatgi. Analysis and Performance Assessment of the Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention [J]. IEEE Transactions on Energy

Conversion, 1999, 14(3): 810 - 816.

- [11] M. E. Ropp*, M. Begovic and A. Rohatgi. Prevention of Islanding in Grid - connected Photovoltaic Systems [J]. Progress in Photovoltaics, Summer, 1999: 39 - 59.
- [12] Ward Bower, Michael Ropp. Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility - Interactive Inverters in Photovoltaic Systems [R]. SANDIA REPORT, SAND2002 - 3591, November 2002.
- [13] H. H. Zeineldin, S. Kennedy. Instability Criterion to Eliminate the Non - detection Zone of the Sandia Frequency Shift Method [C]. Power System Conference and Exposition, 2009: 1 - 5.

(收稿日期:2011-04-13)

利用单端母线的电压暂降特征进行配电网故障定位

郑天文¹, 肖先勇^{1,2}

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:提出一种“离线仿真, 在线定位”的故障定位方法, 根据线路在不同位置发生不同短路故障时会引起母线处发生不同的电压暂降的特点, 对这一特定的配电网建立仿真模型, 进行仿真, 得到配电网中各个支路的故障区段定位函数和故障测距函数, 录入仿真数据库。当配电网中发生实际短路故障时, 根据母线处采集的电压波形或者数据, 得到故障后第二周波的电压暂降幅值和相位跳变, 将其代入仿真数据库中, 利用模式识别确定故障区段, 利用解析式法求得故障距离。通过对 10 kV 配电系统进行金属性和非金属性单相接地短路故障的仿真, 结果证明了该故障定位方法的准确性和可靠性。

关键词:配电系统; 电压暂降; 单端法; 仿真数据库; 故障定位

Abstract: A fault location method is proposed, that is, simulating off-line and locating on-line. Based on that when different fault occurs at different location, the bus will experience different voltage sag, a simulation mode is established for a special distribution network to obtain the location function and fault distance function in fault section of all the branches of distribution network. Then these data are recorded into the simulation database for further use. When a real short-circuit fault occurs in distribution network, it only uses the voltage waveform or data that are acquired at the bus, the sag magnitude and phase shift value can be obtained, then they are substituted into the simulation database, the fault branch and the fault distance can be obtained through pattern recognition and analytic method respectively. Through the simulation for 10 kV distribution network with bolted and non-bolted single-phase earth short-circuit fault, it proves the accuracy and reliability of the proposed fault location method.

Key words: distribution system; voltage sag; single-end method; simulation database; fault location

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0009-05

0 引言

线路故障会造成用户供电中断。据统计, 在电力用户遭受的停电事故中, 90% 以上是由配电网故障引起的^[1]。为了快速进行故障恢复, 故障定位的目的是, 发生故障后, 快速、准确地识别故障点, 自动或手动消除故障, 恢复供电。因此, 方便、快速、准确、可靠的故障定位方法是缩短停电时间、快速恢复供电和最大限度的减少用户损失的关键^[2,3]。

现有的故障定位方法主要有: 工频分量阻抗法、高频分量行波法和基于知识的方法。阻抗法^[4-9]是经典的故障定位方法之一, 其基本原理是, 利用端点测得的工频电压、电流计算端点到故障点的电气距离, 以此确定故障点。阻抗法又分单端阻抗法和双端阻抗法, 单端阻抗法的误差来源多^[8], 双端阻抗法^[9]在一定程度上能消除对端电源阻抗和过渡电阻的影

响, 阻抗法原理简单, 但易受线路阻抗、负荷和电源参数影响, 且配电线路分支较多, 难以排除伪故障点, 因此, 该方法一般不适合于配电线路故障定位。行波法^[10-14]的基本原理是通过测量故障(或人工)产生的行波, 记录行波在故障发生点和母线测量装置之间往返所需要时间(单端行波法)或者通过计算行波到达线路两端测量点的时间差(双端行波法), 根据行波波速、时间和距离的关系, 判定故障距离。在高压输电线路中, 行波测距技术已得到成功应用^[13,14]。也有学者利用行波测距法对配电网的故障定位进行探索^[15,16], 但是, 由于配电系统的结构复杂, 支路多, 存在很多波阻抗不连续点, 行波的反射和折射可能会发生路径改变, 或者行波波形的不稳定, 很难正确地识别出故障点的反射行波, 给故障定位带来困难。基于知识的方法^[18,19]主要包括人工智能法和基于分布式设备的方法。人工智能法的理论和实践都还在不断发展并逐步成为一个独立的知识体系, 主

要包括: 人工神经网络(ANN)、模糊逻辑(fuzzy logic)、专家系统(expert system)等。基于分布式设备的方法充分利用了多个馈线和节点处的测量信息,建立数据库,综合分析数据,进行故障定位。基于知识的方法能充分利用各种故障信息,有较高的准确性、快速性、经济性,但算法、模型复杂,而且,在实际配电系统中,尤其是中低压配电系统中,一般仅在变电站端(母线处)安装有测量装置,能得到的故障信息有限,给配电网故障定位带来了很大困难,其主要原因在于能获得的有限信息没有得到充分利用。

实际配电系统发生故障时,除了故障线路的电流特征发生变化外,母线电压也会发生改变,不同类型、不同位置的故障引起的母线电压暂降特征不同,这里在现有故障定位方法的基础上,引入故障时母线电压暂降特征信息^[2],在分析配电线路结构特征及其描述方法的基础上,提出了一种基于母线电压值特征的配电网单端故障定位方法。用 Matlab 对 10 kV 配电系统进行金属性和非金属性单相接地短路故障仿真,证明了该方法的准确性和可靠性。

1 基于母线电压特征的故障定位原理

考虑如图 1 所示的 10 kV 配电网模型。

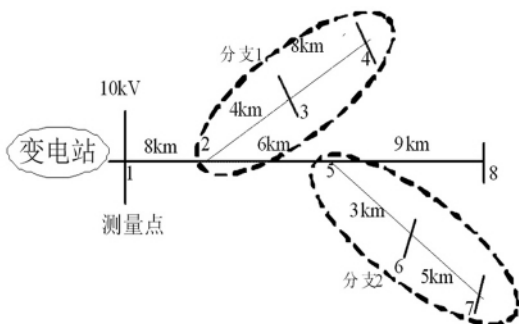


图 1 10 kV 配电网的单线图

此配电网具有一条主干线,两条分支线。当网络中任意一点发生短路故障,测量点 1 处都会经历不同程度的电压变化,这种变化包括电压幅值下降和相应相位改变等,如果电压值维持在额定电压的 10% ~ 90% 之间,根据 IEEE 的定义,这类事件被定义为电压暂降。对于给定系统,测得的电压暂降严重程度主要取决于故障发生的位置,即故障点距母线 1 的距离。靠近母线 1 的位置发生故障,测得的暂降较为严重,反之,电压暂降特征的明显度会减小。对于不同的故障类型、故障位置,在母线 1 得到的电压暂降

特征也不相同。分析发现,有三种不同类型的变量引起电压暂降幅值和相位的变化: 非线性变量、线性变量、不变量。而且,不同区段对应各自不同的变量值。基于这些特点,可以确定电压暂降幅值、相位跳变、故障距离三者之间的函数关系。通过仿真得到电压暂降数据库,用于存储故障区段定位函数和故障测距函数的相关系数。图 2 为故障定位方法的大体构架。

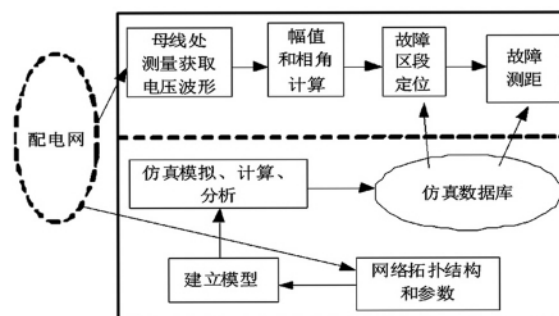


图 2 故障定位方法大体结构

2 仿真数据库的建立

仿真数据库相当于一面镜子,能够映射出实际配电系统中的故障情况。仿真数据库主要包括以下两个子数据库: 母线处电压暂降数据库、故障区段和故障测距数据库。

2.1 母线处电压暂降数据库

通过对实际配电系统进行三相不平衡潮流和故障分析,建立母线处电压暂降数据库。其大致步骤如下。

- (1) 用三相不平衡潮流分析某个节点故障前和故障期间的电压值;
- (2) 通过故障分析,计算出某个仿真节点故障时,在母线处得到的电压暂降幅值和相位跳变。
- (3) 重复步骤(1)、(2),直至计算完所有仿真节点故障时引起的母线电压暂降。

得到的电压暂降数据库如图 3

1	V_1	θ_1
2	V_2	θ_2
3	V_3	θ_3
4	V_4	θ_4
5	V_5	θ_5
⋮	⋮	⋮
x	V_x	θ_x

图 3 母线处电压暂降数据库

第一列是仿真节点编号,第二、三列分别是在对应的仿真节点下发生故障时,母线处得到的电压暂降幅值和相位跳变。

2.2 故障区段和测距数据库

由前面的理论分析可知,在不同的区段,电压暂降幅值和相位跳变,电压暂降幅值和故障距离之间的函数关系不同。函数关系如下。

$$\theta_x = b_1^{ij} V_x + b_0^{ij} \quad (1)$$

$$v_x = a_2^{ij} d^2 + a_1^{ij} d + a_0^{ij} \quad (2)$$

V_x, θ_x 为在仿真点 x 处发生故障时,母线处得到的电压暂降幅值和相位跳变; ij 为区段两端点 i, j ; b_0^{ij}, b_1^{ij} 为故障区段函数的系数; $a_0^{ij}, a_1^{ij}, a_2^{ij}$ 为故障测距函数的系数。

1	2	b_0^{12}	b_1^{12}
2	3	b_0^{23}	b_1^{23}
3	4	b_0^{34}	b_1^{34}
⋮	⋮	⋮	⋮
i	j	b_0^{ij}	b_1^{ij}

图4 故障区段数据库

1	2	a_0^{12}	a_1^{12}	a_2^{12}
2	3	a_0^{23}	a_1^{23}	a_2^{23}
3	4	a_0^{34}	a_1^{34}	a_2^{34}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
i	j	a_0^{ij}	a_1^{ij}	a_2^{ij}

图5 故障测距数据库

3 故障定位算法

所提故障定位算法分为两步:①确定可能的故障区段;②计算可能故障区段内的故障距离。

3.1 故障区段定位算法

不同区段电压暂降幅值和相位跳变存在不同的一次线性关系。图6反映了三个区段的这种线性关系。

从图6可知,分别计算测量点得到的电压暂降和相位跳变(V_{meas}, θ_{meas})到各区段函数表示的曲线的最短距离。根据点到直线的距离公式为

$$D_{ij} = \frac{AV_{meas} + B\theta_{meas} + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (3)$$

ij 为区段两端点 i, j ; $A = b_1^{ij}, B = -1, C = b_0^{ij}$; 得到一系列距离值,按从小到大的顺序升序排列,就可以得到可能的故障区段排序。如图6所示, $D_{67} < D_{34} <$

D_{58} ,则按可能性大小降序排列的故障区段分别为区段6-7、区段3-4、区段5-8。

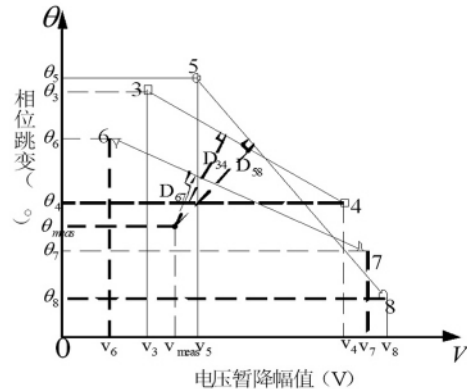


图6 不同区段的电压暂降幅值和相位跳变关系

3.2 故障测距算法

故障测距函数表示的是电压暂降幅值和故障距离的二次函数关系,确定出可能的故障区段后,就可以根据下式计算出故障距离为

$$d = \frac{a_1^{ij} \pm \sqrt{(a_1^{ij})^2 - 4a_2^{ij}(a_0^{ij} - V_{meas})}}{(2 - 2a_2^{ij})} \quad (4)$$

此方程有两个实数解,根据各个区段的距离范围,摒除不在所求区段的伪根,就有且只有一个满足要求的故障距离 d 。

4 仿真结果

利用 Matlab 仿真软件,通过构建一个图1所示的仿真模型和相应的编程算法,对文中的故障定位方法作了初步验证。分别进行金属性(接地电阻 $R = 0 \Omega$) 和非金属性(接地电阻 $R = 50 \Omega$) 单相接地短路故障仿真,结果如表1、表2。

通过仿真结果的数据可以看出,该方法能够比较准确的确定故障区段和故障距离:最多两次就能定位出故障区段;故障距离的最大绝对误差不超过250米,最大相对误差不超过2%。对于非金属性故障,由于接地电阻增加,引起母线处的电压暂降程度减小,相对金属性故障误差较大,但是在允许的范围之内。

5 结论

所提故障定位方法精度较高,需要的测量装置少,使用的数据容易获得。能比较准确地确定故障所在支路和故障距离,消除了伪故障点,提高了故障定位的准确性和可靠性。此方法适用于任何辐射状的

表1 金属性单相接地短路故障

实际故障发生区段	实际故障距离/km	可能的故障区段	各区段对应的故障距离/km	故障区段准确率/%	故障距离绝对误差/m	故障距离相对误差/%
1-2	6	1-2	6.034	100	34	0.57
2-3	11	2-3	10.8548	100	-145.2	-1.32
		2-5	10.905		95	0.87
3-4	17	3-4	16.982	100	-18	-0.11
		6-7	17.190		190	1.11
		5-8	17.200		200	1.18
2-5	12.8	2-5	12.7802	100	-19.8	-0.15
		3-4	12.7186		-81.4	-0.64
5-6	15.5	5-8	15.518	66.7	18	0.12
		5-6	15.489		-11	-0.07
		3-4	15.404		-96	-0.62
		5-8	19.480		-20	-0.10
6-7	19.5	6-7	19.490	66.7	-10	-0.05
		3-4	19.410		-90	-0.46
		5-8	18.980		-20	-0.11
5-8	19	6-7	19.050	100	50	0.26
		3-4	18.917		-83	-0.44

表2 非金属性单相接地短路故障

实际故障发生区段	实际故障距离/km	可能的故障区段	各区段对应的故障距离/km	故障区段准确率/%	故障距离绝对误差/m	故障距离相对误差/%
1-2	6	1-2	6.054	100	54	0.90
2-3	11	2-3	10.813	100	-187	-1.70
		2-5	10.905		95	0.87
3-4	17	3-4	16.973	100	-27	-0.16
		6-7	17.201		201	1.18
		5-8	17.220		220	1.29
2-5	12.8	2-5	12.790	100	10	0.08
		3-4	12.712		88	0.69
5-6	15.5	5-6	15.520	66.7	20	0.13
		5-8	15.472		-28	-0.18
		3-4	15.422		-78	-0.50
		6-7	19.531		31	0.16
6-7	19.5	5-8	19.486	100	-14	-0.07
		3-4	19.425		-75	-0.38
		6-7	19.028		28	0.15
5-8	19	5-8	19.047	66.7	47	0.25
		3-4	18.905		-95	-0.50

配电网络,只要网络的拓扑结构(线路参数,连接方式,供电区域等)已知,就可以对这个特定的网络采用文中方法进行分析,准确有效地实现这个网络的故障定位。本方法是一种“离线仿真,在线定位”的故障定位方法,仿真过程中的故障模型以及负荷模型的建立有待改进和完善。

参考文献

- [1] 李天友,金文龙,徐丙垠. 配电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 郭俊宏,谭伟璞,杨以涵,等. 电力系统故障定位原理综述 [J]. 继电器, 2006, 34(3): 76-81.
- [3] 马士聪,高厚磊,徐丙垠,等. 配电网故障定位技术综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 119-124.
- [4] 索南加乐,齐军,陈福锋,等. 基于 R-L 模型参数辨识的输电线路准确故障测距算法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 119-125.
- [5] Karl Zimmerman and David Costello, Impedance - Based Fault Location Experience [C]. Protective Relay Engi-

- neers, 58th Annual Conference, Apr. 2005: 211 – 216.
- [6] J. Mora – Flórez, J. Meléndez. Comparison of Impedance Based Fault Location Methods for Power Distribution Systems [J]. Electric Power Systems Research, 2008: 657 – 666.
- [7] A. L. Dalcastagne and S. L. Zimath, A Study about the Sources of Error of Impedance – Based Fault Location Methods [C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES: 1 – 6.
- [8] 陈铮, 董新洲, 罗承沐. 单端工频电气量测距算法的鲁棒性 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(3): 310 – 313.
- [9] Girgis A. A, et al. A New Fault Location Technique for Two and Three – terminal Lines [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1992, 7(1): 98 – 107.
- [10] Magnago, F. H., Abur, A. Fault Location Using Wavelets [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1998, 13(4): 1475 – 1480.
- [11] 徐丙垠, 李京, 陈平, 等. 现代行波测距技术及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62 – 65.
- [12] 李友军, 王俊生, 郑玉平, 等. 几种行波测距算法的比较 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 36 – 40.
- [13] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距的研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 76 – 80.
- [14] 曾祥君, 尹项根, 林福昌, 等. 基于行波传感器的输电线路故障定位方法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 42 – 46.
- [15] Hizman, H., Crossley, P. A., et al. Fault Section Identification and Location on a Distribution Feeder Using Traveling Waves [C]. Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, 25 July 2002, (3): 1107 – 1112.
- [16] 于盛楠, 杨以涵, 鲍海. 基于 C 型行波法的配电网故障定位的实用研究 [J]. 继电器, 2007, 35(10): 1 – 4, 12.
- [17] Tawfik, M. M. Morcos, M. M. ANN – based Techniques for Estimating Fault Location on Transmission Lines Using Prony Method [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2001, 16(2): 219 – 224.
- [18] YU Yue – hai, BAI Yichuan, XI Guo – fu, et al. Fault Analysis Expert System for Power System [C]. 2004 International Conference on Power System Technology, 21 – 24 Nov, 2004(2): 1822 – 1826.
- [19] 杜刚, 刘迅, 苏高峰. 基于 FTU 和 “S” 信号注入法的配电网接地故障定位技术的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 73 – 76.
- [20] Bollen M. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions IM2. IEEE Press, New York, 2000.
- (收稿日期: 2011 – 04 – 10)

(上接第4页)

- [1] 张钦, 王锡凡, 付敏. 需求响应视角下的智能电网 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 49 – 55.
- [2] Bosheli F, Veloza O P. Review of Developed Demand Side Management Programs Including Different Concepts and Their Results [C]. Proceedings of IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, Bogotá, Colombia, 2008: 1 – 7.
- [3] Rahimi F. Overviews of Demand Response Programs at Different ISOs/RTOs [C]. Proceedings of IEEE Power Systems Conference and Exhibition, USA, Seattle, WA, 2009: 1 – 2.
- [4] Abreu K. PG&E’s Perspective on Demand Response under the Smart Grid Paradigm [C]. Proceedings of IEEE Power Systems Conference and Exhibition (PSCE’09), Seattle, WA, USA, 2009.
- [5] Rahimi F, Ipakchi A. Overview of Demand Response under the Smart Grid and Market paradigms [J]. Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2010: 1 – 7.
- [6] Noreen Parks. Energy Efficiency and the Smart Grid [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(9): 2999 – 3000.
- [7] Steve Collier. Ten Steps to a Smarter Grid [C]. 2009 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC 09), Fort Collins, Colorado, USA, 2009: B2 – B2 – 7.
- [8] Albadi, M. H., El – Saadany, E. F. Demand Response in Electricity Markets: An Overview [C]. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007: 1 – 5.
- [9] Menniti D, Costanzo F, Scordino N, Sorrentino, N. Purchase – Bidding Strategies of an Energy Coalition With Demand – Response Capabilities [C]. Power Systems, IEEE Transactions, 2009, 24(3): 1241 – 1255.
- [10] Dam Q B, Mohagheghi S, Stoupis, J. Intelligent Demand Response Scheme for Customer Side Load Management [C]. Energy 2030 Conference, 2008: 1 – 7.
- [11] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1 – 4.
- [12] Mak S. T. A Synergistic Approach to Implement Demand Response, Asset Management and Service Reliability Using Smart Metering, AMI and MDM Systems [C]. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009: 1 – 4.
- (收稿日期: 2011 – 04 – 10)

基于 SQL Server 代理的地区电网 AVC 系统数据备份

白天宇, 肖先勇

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:基于 SQL Server 代理(SQL Server Agent), 提出一种实用于地区电网自动电压无功控制(AVC)系统的备份方案, 根据地区电网数据库的特点进行分类备份, 通过定期清除日志和过期数据文件的方式, 有效地解决了地区电网 AVC 系统日志溢出问题, 大大提高数据备份效率, 基于 FTP 协议实现地区电网 AVC 子站与主站系统之间的备份异地传输, 改善了恢复点目标(RPO)和恢复时间目标(RTO), 提高了整个 AVC 系统的容灾能力。基于 SQL Server Agent 编写了应用程序, 在实际地区电网 AVC 系统的应用证明, 该备份方式具有操作简单、成本低的特点, 备份效果良好, 满足地区电网 AVC 系统对数据备份与恢复的要求。

关键词:SQL Server 代理; 地区电网; AVC 系统; 数据备份; RPO; RTO; 数据恢复

Abstract: A new data backup scheme of automatic voltage control (AVC) system based on SQL Server Agent is proposed. The backup of the databases is carried out based on the features of regional power grid. The problems of log overflowing in AVC system are solved by clearing the logs and the expired data files, which improves the efficiency of data backup. Through the FTP protocol, the off-site transmission between the master station of AVC system and its sub-stations has been realized, thus RPO and RTO are improved, and the disaster tolerance of the system is increased. This scheme does not use any other made-up backup software, and it is realized by the application program written by SQL Server Agent. The scheme is of simple operation and low cost proved by the trial operation in AVC system of Sichuan Power Grid. Besides, the results of the test prove that this scheme has excellent performance and meets the special requirements of data backup and recovery of AVC system.

Key words: SQL Server Agent; regional power grid; automatic voltage control system; data backup; RPO; RTO; data recovery

中图分类号: TM769 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0014-06

0 引言

随着电力系统自动化系统的快速发展, 尤其是坚强智能电网的建设, 电力系统中信息系统和相关数据系统的安全问题, 已成为当前研究人员和工程技术人员共同面临的重大课题。地区电网作为直接面向用户供配电网, 其自动化水平和信息系统、数据系统的安全, 直接关系到供电质量和用户利益。近年来, 地区电网的信息化、自动化水平得到了大幅度提高, 其中, 地区电网的自动电压无功控制(automatic voltage control, AVC)系统作为降低网损, 提高供电质量, 提高电网运行管理水平的重要手段, 在各地区电网中得到了大量推广应用, 如何低成本解决地区电网 AVC 系统的数据备份与恢复是确保系统安全的重要内容, 已成为工程技术人员和研究人员的重大课题。

在实际电力自动化系统中, 因人为的操作失误、系统故障或自然灾害原因造成电力数据丢失时有发生, 给系统恢复、故障分析等造成极大影响, 并可能引起整个电网的巨大损失。采用合理的数据备份方案, 在发生事故后尽快地恢复系统正常运行, 保证电网和自动化系统尽快投入运行, 已成为提高电网运行水平和供电可靠性的重要环节。

在很多地区电网中, AVC 系统已投入实际运行。现有 AVC 系统大多建立在能量管理(energy management system, EMS)系统基础上, 利用电网实时数据, 通过优化对电网电压无功进行协调控制, 能有效降低网损, 提高供电质量, 为电网安全稳定运行发挥了重要作用^[1]。由于 AVC 系统基于实时数据进行实时控制, 其数据具有变化快、容量大的特点, 为了保证 AVC 系统具有良好的容灾能力, 需做好数据备份与恢复, 遗憾的是, 现有地区电网 AVC 系统往往没有对

数据备份给予充分注意,如没考虑各历史数据库、实时数据库、事件库等不同数据库的具体特征,而仅采用单一备份方式,常出现日志溢出报错,造成服务器宕机,备份操作不方便等问题,针对这些问题迫切需要提出更好、更合理的数据备份方案。

在信息化时代,数据备份是保证系统安全的重要内容,国内外开展了大量研究。文献[2]提出了多磁盘数据备份方案;文献[3]对数据保护和恢复过程中的阻塞问题进行了探索;文献[4]给出了一个磁盘阵列的连续数据保护与阻塞管理的案例;文献[5]提出了一种磁盘和 SAN 的网络数据备份模型;文献[6]对数据库崩溃的检测及其恢复方法进行了研究;文献[7]利用数据网络结构备份和恢复临床图像数据;文献[8]提出了一种优化增量备份方案;文献[9]对数据存储和灾难恢复的自动规划技术进行了探索;文献[10]对容灾备份设计思想进行了分析。针对电力系统的实际需要,文献[11-12]从网络架构上研究电力系统的数据备份方案;文献[13]利用 IBM 公司的 Tivoli 备份软件和 Oracle 数据库的 rman 软件,提出了一种应用于南方电网 EMS 系统的备份方案,能满足系统新引进的时间序列数据库备份要求,解决了 Oracle 数据库归档日志带来的日志溢出的问题;文献[14]提出了一种异地紧急容灾备份方案;文献[15]提出了专用电力数据网的保护策略。

文章的备份方案是针对四川电网 AVC 系统制定的,其主流数据库是 SQL Server,采用的数据库引擎是 SQL Server 2005。SQL Server 2005 中的 SQL Server Agent 模块可以对 SQL Server 作业集和程序指令集进行管理,而且提供定时机制,可以实现计划任务的自动执行。对四川电网 AVC 系统的数据库根据其各自特点进行分类,对不同类别的数据库采用不同的备份策略;编写 SQL 脚本程序定期清除过期日志和过期数据文件,解决日志溢出的问题;利用 Windows 服务器的 FTP 协议实现 AVC 系统主站和子站间的备份异地传送。作者未采用额外的备份软件,把自己编写的备份方案代码建于 SQL Server Agent 的架构上,从而解决了 AVC 系统数据备份现存的一些问题,并降低了项目成本。

1 重要概念

1.1 SQL Server 代理

代理(Agent)是指对过程运行中决策或控制任务进行抽象而得到的一种具有主动行为能力的实体[16]。SQL Server 代理是一个 Windows NT 服务,可以自动执行制定的作业任务、监视 SQL Server 的运行和触发告警事件。

1.2 RPO 和 RTO

• RPO(recovery point objective)可以描述为企业所能容忍的最大数据丢失量,也就是最近一次备份的时间点与灾难发生的时间点之间丢失的数据。

• RTO(recovery time objective, RTO)可以描述为企业所能容忍的最大恢复时间,也就是灾难后系统恢复正常运作的所花费的时间。

RPO 和 RTO 的总和就是灾难后系统故障的总时间,是衡量一个系统容灾能力的两个重要指标。RPO 和 RTO 越小,则表示系统的容灾能力越强。在理想状况下, $RPO = RTO = 0$,即灾难发生后没有丢失任何数据,且恢复所需的时间为 0,显然,这是不可能的。在设计容灾备份方案时,也不能过分追求 RPO 和 RTO,因为 RPO 和 RTO 越小,投资成本就越大。所以,需要在考虑投资成本的情况下,控制合适的 RPO 和 RTO 来满足实际工作。

1.3 常用备份策略

SQL Server 中几种常规的基本备份策略的定义和区别。

全备份:对数据库中所有使用过的数据进行备份,重建了数据库的所有数据。

日志备份:是对数据库日志实体的备份,也就是通过对数据库历史操作的备份,从而达到备份数据的目的,每次备份自上次事务日志备份后发生的所有事务。

差异备份:备份上次完全备份后所有发生变化的文件。

从数据备份时间的角度来看,全备份花费的时间最长,而在容量大、变化快的数据库中,日志备份比差异备份的备份时间要短很多。从数据恢复时间的角度来看(每种基本备份策略中都需要全备份,这里不考虑全备份),差异备份的恢复时间最短,由于日志备份的恢复需要恢复上次全备份和该全备份后所备份的所有日志备份,故恢复时间较长。

2 基于 SQL Server 代理的数据备份模型设计

2.1 数据备份方案整体架构

根据 AVC 系统备份现存的问题,可将 SQL Server 代理功能设计分为 3 个部分: (1) 数据库分类备份; (2) 清除过期日志和数据文件; (3) 实现 AVC 系统主站子站间备份的异地传输。分类备份是通过数据库的功能和特点对其采用不同的备份策略,以改善 RPO 和 RTO 指标。清理过期日志和数据文件则是主要针对历史数据库繁杂的数据进行合理的处理,解决日志溢出带来的问题,且控制数据备份文件的大小,方便 AVC 系统主、子站间数据传输。最后则是利用 FTP 协议(文件传输协议)实现 AVC 主、子站间备份数据的相互传输,提高系统的异地容灾能力。图 1 为本方案的整体结构图。

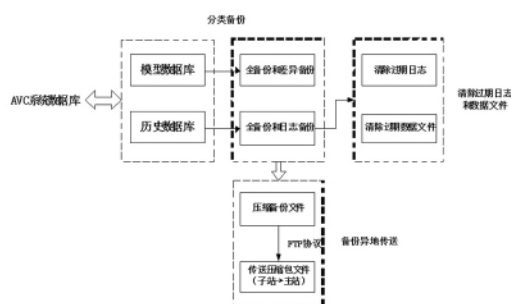


图1 备份方案整体结构设计图

2.2 SQL Server 代理作业集分类设计

SQL Server 代理是通过对许多作业进行协调管理来实现其功能的,针对上述对数据备份策略功能的划分,在设计中形成了下面三个作业集。

2.2.1 AVC 系统数据库分类备份设计

在四川电网 AVC 系统中,数据库用来存储和读取数据,根据其作用和特点主要分为两类。

(1) AVC 系统模型数据库,主要用于存储地方电网拓扑信息、遥信和遥测信息、事故告警类型以及实时数据采集模型等。由于模型数据变更很小,该类数据库的数据随时间变化小,且数据容量较小。但这类数据库与电网实际运行和实时监控密切相关,其重要等级是最高的。所以该类数据库受 RPO 影响很小,但对 RTO 指标要求很高,一般 EMS(能量管理)系统要求 $RTO \leq 15 \text{ min}$,采用的备份策略就要求灾难后数据恢复速度满足系统要求。

(2) AVC 系统历史数据库,主用记录 AVC 系统的历史操作数据和历史参数设置数据等,以使用户查询历史信息、分析电网的运行情况。这类数据库数据变化快,且容量巨大,例如对于一个地级市 AVC 主站一个月的历史库约为 10 GB。由于此类数据库数据的多变性,灾难后数据恢复较为复杂,备份时间较长,

最严重的情况是在临近数据备份完成时系统故障了,即 RPO 就是数据库的备份周期和数据备份时间的总和。数据备份周期一般是固定的,所以优化数据备份时间是关键。通过删减过期日志和文件结合特殊的备份方式来优化历史数据库的 RPO 指标。

文章基于上述分类,对这两类数据库分别采用下面的备份策略。

(1) 对模型数据库采用全备份和差异备份结合的方案,这种备份方案最大的特点就是灾难后备份恢复速度是最快的,只需要恢复上次全备份和最近的差异备份,尽快恢复 AVC 系统的实时运行,优化 RTO 指标。

(2) 对历史数据库采用全备份和日志备份结合的方案,据上述定义知,日志备份是一种增量备份,只备份新增的事务变更。历史数据库不可能采用差异备份,因为历史库差异备份产生的备份文件很大,而且备份时间很长,会占用大量系统资源。采用这套备份方案结合删除过期日志和数据文件,节约每次备份的时间,节省了服务器系统资源,其缺点就是灾难后恢复数据时需要恢复最近一次全备份和后面所有的日志备份,恢复时间很长。历史数据库不会影响系统的正常运行,对恢复时间,即 RPO 指标的要求没有模型数据库高,容许在系统恢复正常后缓慢进行。

2.2.2 清除过期日志和数据文件设计

AVC 系统历史数据库产生的日志文件和数据文件十分巨大,以往出现的日志溢出问题,就是指历史库的日志溢出,所以清除过期日志和数据文件是针对历史库而言的。

(1) 删除过期日志的主要问题是,如何判断哪些日志文件是过期的。从上述历史数据库的备份方案知,日志备份是建立全备份基础上的,当系统进行一次全备份后,在该全备份之前的日志文件都可以视为过期的,所以在每次全备份后及时清除日志文件是安全可行的。利用作业实现自动清除过期日志比人工手动操作更方便、更可靠。

(2) 庞大的历史数据库中的数据文件随着时间的推移增长很迅速,每次全备份都要把以前所有的历史数据都备份进去,这样备份时间会越来越长,严重时会影响 AVC 系统的正常运行。定期删减时间较久的数据文件是一种解决手段,但要保证用户在需要查询这些数据时,可以通过相应的备份文件恢复出来。所以在删减过期数据文件前,一定要确保这些数据备

份的完备性。可以设定 SQL Server 作业半年或一年进行一次文件清理。

2.2.3 备份异地传输设计

数据备份可能会受到意外因素的破坏,例如火灾、人为操作失误、地震等,从而导致系统数据的丢失,造成不可挽回的损失。在不同站点进行异地数据备份,即异地容灾方案,可以进一步增强系统的容灾能力。

由于四川电网目前许多电力二次系统采用的直接连接存储(DAS)^[4],在 AVC 系统中对远方站点进行在线异地备份,受到网络通信的限制,这种方案不是很理想。所以考虑在本站各自进行数据备份,当数据备份完成后将各子站的数据备份通过网络传送到主站,于是就可以实现对数据进行异地容灾的作用,主站与子站互为异地容灾服务器,这样没有附加额外的存储设备,降低了项目成本的同时又满足了 AVC 系统的异地备份容灾的需求。

利用网络传输数据,由于数据备份传送和 AVC 系统的数据采集通道采用的是同一个网络,这就必须考虑备份异地容灾不能影响到 AVC 系统运行数据的传输。模型数据库的数据备份很小,数量级在 10 MB 级上,而历史数据库的备份文件一般较大,每个月的容量高达 GB 数量级。而历史数据库中存在大量重复冗余信息,有很好的压缩比。针对这个问题,在备份异地传输前,对历史数据库备份方案产生的备份文件先进行压缩(压缩比约为 20:1)然后再利用 FTP 协议将压缩文件传送到指定远端服务器上,这样就解决了带宽限制问题。

3 备份方案的实现

基于上述设计思想,采用 SQL 语言编写实现,然后创建代码 SQL Server 作业集,把代码内置于作业脚本中,制定数据库维护计划,利用 SQL Server 代理统一管理作业集的运行。采用定时机制设自动执行作业集的操作,实现自动执行所制定的备份方案。

3.1 分类备份部分的实现

存储过程是一组 SQL 代码集,可以存储在数据库中,在需要时可以像调用函数一样来执行它。利用 PRODUCE PROCEDURE 创建三个存储过程分别编写上文提到的三种基本策略,即存储过程 FULL_BACKUP、LOG_BACKUP 和 DIFFIERENTIAL_BACKUP。其

中实现相应的备份方式,并把相应数据备份存储到指定的磁盘路径,通过 xp_cmdshell 指令把数据备份压缩到指定文件夹。由于程序设定 AVC 子站备份压缩文件所在路径即为备份上传的路径,为了保证每次只上传上次传送后新增的备份包,故每次进行备份压缩时,先把备份压缩文件复制到指定的另一个路径下,再清空 RAR 文件夹。下面是部分代码及其注释(这里以 FULL_BACKUP 的部分代码为例)。

```
PRODUCE PROCEDURE FULL_BACKUP AS DE-
CLARE
@bakadd nvarchar(100),
@datefile nvarchar(100),
@bakfile nvarchar(100),
@rarfile nvarchar(100),
@copfile nvarchar(100),
@copcmd nvarchar(100),
@delcmd nvarchar(100),
@rarcmd nvarchar(150) -- 声明变量
set @bakadd = 'd:\backup\ databasename\'
-- 备份文件夹路径
set @datefile = 'databasenamefull' + cast(Year(GetDate()) as varchar(4)) + cast(Month(GetDate()) as varchar(2)) + cast(Day(GetDate()) as varchar(2))
-- 备份文件命名方式
set @bakfile = @bakadd + @datefile + '.bak'
set @rarfile = @bakadd + 'RAR' + @datefile + '.rar'
set @copfile = 'd:\backup\ copy' + @datefile + '.rar'
BACKUP DataBASE databasename TO DISK = @bakfile WITH INIT, NOUNLOAD, NAME = N'databasename 数据备份', NOSKIP, STATS = 10, NOFORMAT
-- 全备份
set @copcmd = 'xcopy ' + @rarfile + ' ' + @copfile + '/Y'
-- 复制备份压缩包到指定路径
set @delcmd = 'del ' + @bakadd + 'RAR\*.rar'
-- 先清空 RAR 备份文件夹
set @rarcmd = 'c:\WinRAR.exe a -ep -df ' + @rarfile + ' ' + @bakfile
-- 其中 -ep 和 -df 是 WinRAR.exe 的参数
exec master..xp_cmdshell @copcmd
exec master..xp_cmdshell @delcmd
exec master..xp_cmdshell @rarcmd
go...
```

模型数据库和历史数据库的分类备份方案通过建立 SQL 作业利用 exec 指令调用上述基本备份的存储过程,利用 SQL 作业的定时机制来确定备份时间让其自动执行。

3.2 删除过期日志和数据文件的实现

删除过期日志的指令主要是确定只删除过期的日志,在实现过程中也就是确定删除日志的时间一定要在全备份后。所以在维护计划作业集中,在全备份作业完成后,建立一个清除日志的作业,把该作业执行周期时间放在全备份时间完成之后,利用 DUMP TRANSACTION DATABASENAME WITH NO_LOG 指令清除掉日志文件。然后利用 DBCC SHRINKFILE (database_name_log,1000) 指令把日志文件收缩为初始化大小。

在历史数据库中删除过期的数据文件,主要是对表的删除操作。在历史库中所有表的命名方式是包含表的创建时间信息(年、月、日)的,利用这个特征对全表进行遍历,只保留当前时间往前推 N 个月(N 是根据用户需要来确定)的,利用 DROP TABLE 指令删除其他的数据文件,这样历史数据库就只保留最近 N 个月的信息。

3.3 备份异地传输的实现

在 Windows Server 2003 中,可以利用 FTP 协议(文件传输协议)来传送文件。FTP 协议支持双向传输,同时也是一个应用程序。所以可以通过建立作业定时调用 FTP 脚本来实现备份异地传输。首先建立一个批处理 bat 脚本文件,部分代码如下。

```
open [远方主站服务器 IP 地址]
指定备份目录 FTP 登录用户名]
指定备份目录 FTP 登录密码]
verbose off
lcd [本地服务器保存路径]
mput *.rar
bye
```

历史数据库和模型数据库除了基本备份方法不同外,在另外两个模块中的设计也略有不同,图2是历史数据库的备份方案作业集整体流程图,图3是模型数据库的备份方案作业集整体流程图,代码上的差异此处就不再赘述了。

4 仿真测试

为了测试该方案的合理性,在四川 AVC 系统中

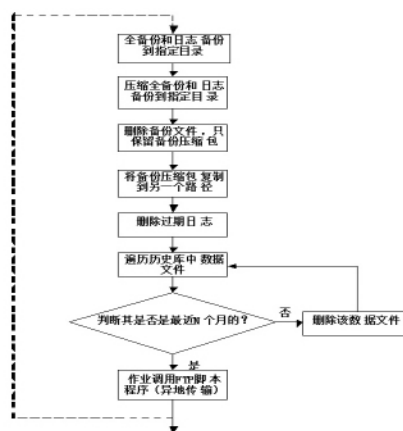


图2 历史库备份方案作业集流程图

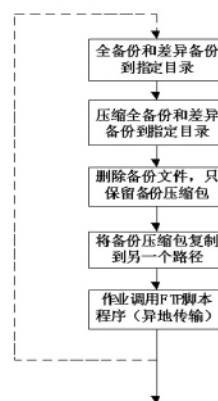


图3 模型数据库备份方案作业集流程图

进行测试。测试主要是对比新旧方案间的备份效率和容灾能力。本节以德阳 AVC 系统的数据备份为例进行测试,比较了不同方案下的 RPO 和 RTO 指标。测试系统环境为:(1)主站服务器配置:CPU 4×3 GHz,内存 8 G,4×146 G SAS 热插拔硬盘。(2)子站服务器配置:CPU 2×2 GHz,内存 4 G,2×146 G SAS 热插拔硬盘。(3)工作站配置:CPU 2×2.4 GHz,内存 1 G,160 G SATA 硬盘。(4)交换机 10/100/1 000 Mbps。测试结果如下。

表1 模型数据库 RTO 指标对比

指标	旧方案/min	新方案/min
RTO	18	5

表2 历史数据库 RPO 指标对比

AVC 运行 时间/月	数据库大小/G (不含日志文件)	旧方案 RPO/min	新方案 RPO/min
1	2.9	2	2
3	9.2	5.8	5.8
6	21	15	15
12	49.4	32	14.7
15	57	38	5.1
18	60.3	42.5	14
24	97	62	15.6

表3 历史库日志文件新旧方案对比

AVC 运行 时间/月	历史库日志 文件大小/GB	改进后历史库日志 文件大小/GB
0.5	2.6	2.6
1	6	1
3.5	20.8	2.9
4	25.3	1
7.5	29.4	3.1
8	52	1
11.5	62.7	2.5
12	65.6	1

在对 RPO 测试中,假定极端情况下,即在备份即将完成时发生灾难故障,则 RPO 中包含备份间隔周期和备份时间。备份周期是在备份策略中设定好的,所以 RPO 主要受备份时间的影响,这里就以备份时间来作为 RPO 的对比标准。由于新方案中历史库备份采用的事完全备份和日志备份结合的策略,测试中采用时间最久的完全备份时间作为新方案 RPO 指标的测量结果。测试中,对过期文件的处理周期是 6 个月,从表 2 中可以看出,在开始的半年内,新方案和旧方案是一样的,而 6 个月以后,新方案的最大 RPO 是 15.6 min,而旧方案会随着时间推移而不断增加。

在对历史库日志文件的仿真中,设定日志文件处理周期为 1 个月。所以在表 3 中,改进后方案月份在 1、4、8、12 时,日志文件会自动清理并初始化为 1 GB 大小,只有在月份 0.5、3.5、7.5、11.5 时,日志文件才会显现出来。旧方案下的日志文件不经过处理,1 年的历史库日志大约有 65 GB,不仅浪费存储空间,还影响数据备份的效率。

测试结果表明:模型数据库的 RTO 指标控制在 15 min 内,符合 AVC 系统的要求;经过新方案对过期文件和日志文件的处理,极大节省了存储空间,解决日志溢出的问题,缩短数据灾难备份时间,提高系统容灾能力,优化了历史库的 RPO 指标;此外,通过备份的异地传输使系统具备了异地容灾能力,进一步保证了数据的安全性。

5 结 语

提出了基于 SQL Server Agent 的 AVC 系统新的备份方案,采用数据库分类设计思想,针对具体数据库实施适合自身的备份策略,优化 RTO 和 RPO 指标。通过自动清除过期日志和数据文件,解决了项目中存在的日志溢出的问题,并优化了数据备份效率。

通过 FTP 协议实现了 AVC 系统子站和主站间的备份异地传送,即异地容灾,进一步保障数据的安全。SQL Server Agent 的管理实现了无人操作,备份方案自动执行,减少了人工操作带来的数据安全问题。而且,本方案未采用市场上的主流备份软件,是通过作者编写的代码实现的,降低了项目的成本。经过在四川电网 AVC 系统中的测试,该方案取得了良好的效果。

参考文献

- [1] 唐茂林,庞晓艳,李旻,等. 计及梯级电站的省地一体化 AVC 系统研究及实现方案 [J]. 电力自动化设备,2009,29(6):119-122.
- [2] Chong-Won Park, Jin-Won Park. A Multiple Disk Failure Recovery Scheme in RAID Systems [J]. Journal of Systems Architecture,2004,50(4):169-175.
- [3] Weijun Xiao, Jin Ren, Qing Yang, et al. Design and Analysis of Block-Level Snapshots for Data Protection and Recovery [J]. IEEE Trans. Computers,2009,58(12):1615-1625.
- [4] Weijun Xiao, Jin Ren, and Qing Yang. A Case for Continuous Data Protection at Block Level in Disk Array Storages [J]. IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems,2009,20(6):898-911.
- [5] 熊琦,王丽娜,王德军,等. 基于磁盘和 SAN 的网络数据备份模型 [J]. 计算机工程,2007,33(4):233-235.
- [6] Philip Bohannon, Rajeev Rastogi, S. Seshadri, Avi Silberschatz, and S. Sudarshan. Detection and Recovery Techniques for Database Corruption [J]. IEEE Trans. Knowledge And Data Engineering,2003,15(5):1120-1136.
- [7] Brent J. Liu, M. Z. Zhou, J. Documet. Utilizing Data Grid Architecture for the Backup and Recovery of Clinical Image Data [J]. Computerized Medical Imaging and Graphics,2005,29(2-3):95-102.
- [8] Cunhua Qian, Syouji Nakamura, and Toshio Nakagawa. Optimal Backup Policies for a Database System with Incremental Backup [J]. Electronics And Communications In Japan Part III - Fundament Electronic Science,2002,85(4):1-9.
- [9] S. Gopisetty, E. Butler, S. Jaquet, et al. Automated Planners for Storage Provisioning and Disaster Recovery [J]. IBM Journal Of Research And Development,2008,52(4-5):353-365.
- [10] 熊文. 广州电网调度自动化系统容灾备份研究 [J]. 继电器,2004,32(20):60-61.

(下转第 49 页)

新的技术支持体系不仅能够为电网运行部门提供快速、直观的对电力系统健康状况的定量评价手段,系统在市场要求下趋近其极限时所冒的风险,还能够告知电网运行部门电网运行的薄弱环节和相应的校正手段,这些都可以通过如图2所示的基于广域测量系统的电力系统安全稳定决策系统来达到。



图2 电力系统安全稳定决策系统总体结构

其中输电合同安排主要包括阻塞管理、合同安排、辅助服务管理、可用输电能力计算等功能。其中阻塞管理主要用于减轻输电网络的阻塞。合同安排主要是根据输电网络运行情况来决定配电公司或发电厂的输电合同申请是否可以得到满足。辅助服务用于决定系统对辅助服务的要求及分析对各类辅助服务的满足手段。可用输电能力计算根据合同安排情况来计算剩余的输电系统可用能力并提供给电力市场参与各方。

输电系统安全稳定评价包括实时网络分析、负荷预测、实时暂态稳定分析和实时电压稳定分析等功能。实时网络分析包括网络拓扑分析、状态估计、调度员潮流分析、静态安全分析、有功及无功最优潮流分析。实时暂态稳定分析和实时电压稳定分析计算实时暂态和电压稳定极限以及控制所需的校正手段。

实时不平衡交易是用于保证电力系统发供处于实时平衡状态。电网调度人员可以根据计算结果调度能提供实时不平衡服务的资源,达到电力系统供需实时平衡。

数据储存是用于收集、打时标和维护系统动态和静态数据以便于分析和评价系统运行情况。主要包括实时数据存储和历史数据存储。

输配分离后,配电公司在服务区提供电力网络域内属于自然垄断,其与输电公司(或发电公司)的关系类似于目前电网公司与发电公司的关系,因此在配电公司的市场技术支持手段上可以采纳目前发电厂竞价上网的技术支持手段。

5 结 语

中国的电力体制改革不能脱离实际,盲目照搬外国经验。在输配分离后,电网的安全性和稳定性必须得到保持和提高,新环境下对调度运行人员的素质要求也将更高,调度运行人员不仅要熟悉电网调度运行业务,还要熟悉电力市场交易规则,熟悉技术支持系统,要具有相当的经济调度头脑,调度运行人员的责任更大,压力也更大。电网调度在电力市场化改革的道路上的作用越来越大,同时挑战也越来越大。要适应新形势对电网调度工作的要求,还有许多问题有待作更深入、细致的研究。

参考文献

- [1] 姚建刚,秦红三,王路,等. 电力市场中输电与配电分开的方略初探 [J]. 电网技术,2001,25(3):70-73.
- [2] 吴国丙,任震,黄雯莹. 基于潮流分解的输电成本分摊的改进方法 [J]. 继电器,2004,32(9):7-11.
- [3] 谢俊,陈星莺,廖迎晨,等. 激励性输配分开电力市场竞价机制的建模 [J]. 中国电机工程学报,2006,26(23):25-31.
- [4] 张少华,方勇,李渝曾. 电力市场中激励性机制设计 [J]. 电网技术,2003,27(1):52-56.
- [5] 陈星莺,谢俊. 计及风险的输配分离电力市场供电公司最优竞价策略 [J]. 电力系统自动化,2005,29(1):13-17.
- [6] 刘继春,武云霞,刘俊勇. 市场环境下的输电安全定价方法 [J]. 水电能源科学,2007,25(4):152-154.

(收稿日期:2011-06-21)

(上接第19页)

- [1] 李付亮. 电力二次系统存储备份方案分析 [J]. 继电器,2006,34(19):42-45.
- [2] 万继光,詹玲. 一种集群NAS网络备份系统的研究与实现 [J]. 小型微型计算机系统,2005,26(6):905-908.
- [3] 邱洪泽. 共享磁盘冗余阵列在SCADA双机系统中的应用 [J]. 电力系统自动化,2005,29(16):90-92.
- [3] 余静,麦绍辉,刘立东,等. 电力系统EMS数据备份方案 [J]. 电力系统自动化,2009,33(17):101-104.

- [4] 林其友,高振华,陈嘉庚. 调度自动化系统紧急容灾备份方案 [J]. 电力自动化设备,2009,29(12):98-100.
- [5] 王益民,辛耀中,向力,等. 调度自动化系统及数据网络的安全防护 [J]. 电力系统自动化,2001,21(1):5-8.
- [6] 王卓,殷国富. 基于多代理的智能ERP研究及其在电力营销系统的应用 [J]. 电力自动化设备,2008,28(12):88-92.

(收稿日期:2011-04-10)

基于网络拓扑和运行状态的电网灾难性事故评估模型

催振^{1,2}, 肖先勇^{1,2}

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 电网拓扑结构作为承载电气运行量的主体, 和电气状态量一起成为影响电网灾难性事故的两个关键因素。在着重关注运行状态的风险评估之后, 以复杂网络理论为基础, 综合考虑结构状态和运行状态的方法得到研究人员的广泛关注。以电网拓扑结构和电气运行量的评估指标为切入点, 对各种评估方法的思想、方法手段、目的进行了类比、评述。指出了在分析电网灾难性事件中, 将电网运行状态耦合到电网拓扑结构上是全面系统评估电网连锁故障严重度的关键。而采用拓扑剖分的方法, 将复杂电网分为若干单元系统, 再采用不确定风险分析的方法将各个单元系统有机整合, 在单元系统层面来分析电网灾难事故的严重性可能是一条有效途径; 并指出了今后值得注意的研究方向。

关键词: 复杂网络; 灾难性事故; 连锁事件; 拓扑结构状态; 运行状态; 不确定性理论

Abstract: Grid topology which is the principle part of carrying electrical operation capacity, and electrical state capacity are two key factors to influence the catastrophic failures in power grid. After focusing on risk assessment of operating condition and based on complex network theory, the methods synthetically considering topology state and operating condition are obtained close attention by researchers. Taking the evaluation indices of grid topology and electrical operation capacity as the cut-point, the ideas, means and purposes of various assessment methods are analogized and reviewed. It is pointed out that during analyzing grid catastrophic events, using the operating condition of power grid coupled to the grid topology is crucial for the comprehensive assessment of the severity of grid cascading failures. Based on topological triangulation method, the complex power grid is divided into several modules, then the module systems are integrated by uncertain risk analysis method, and making the analysis of grid catastrophic failures on the module systems level may be effective. In the end, the research direction which should be noted in the future are proposed.

Key words: complex network; catastrophic failures; chain events; topology state; operating condition; uncertainty theory

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0020-06

0 引言

随着电网的复杂性增加和自然环境等的变化, 电力系统灾难性连锁事故频繁发生, 这些灾难性大停电事件大多始于系统某一元件故障^[1]。系统设计的安全水平大多满足 $N-1$ 准则, 但在 $N-1$ 故障情况下, 一些不确定性因素可能会影响电网薄弱环节, 如果这些薄弱环节也故障, 就很可能引发一系列连锁故障, 连锁性故障迅速传播最终可能导致大面积崩溃^[20,22], 因而, 国内外学者对电网薄弱环节的关注程度越来越高, 进行了许多有益的探索。

随着经济的高速发展, 电网的互联程度越来越高, 互联坚强智能电网是未来电网发展的必然趋势。但是, 对于高度互联的电网, 若发生连锁性故障, 造成

的损失和影响程度必然也是灾难性的。因而, 考虑到系统规模和复杂程度都在不断增加的高度互联电网的实际, 从一个整体系统的层面研究电网的灾难性事件, 更具有工程意义。下面先从复杂网络的角度出发, 对已有电网连锁故障评估模型进行评述, 从中得出值得关注的研究方向, 对其进行分析研究, 以便进一步深入研究参考。

1 复杂网络理论

1.1 复杂网络的拓扑参数^[1,2]

用复杂网络理论研究电力系统, 先将系统描述为 n 节点、 m 支路的复杂网络, 引入以下特征参数。

平均距离 L : 假设网络节点数为 n , 节点 i 和 j 之间以最少的边数连通的路径是最短路径 d_{ij} 。将所有

节点间的最短路径求均值,得网络平均距离

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

节点度数 D : 连接该节点的边数。

节点介数 B_n : 按照最短路径遍历网络中所有发电机节点与负荷节点之间的连接路径,节点被这些路径经过的次数就是节点介数。

线路介数 B_l : 按照最短路径遍历网络中所有发电机节点与负荷节点之间的连接路径,线路被这些路径经过的次数就是线路介数。

网络冗余性 R : 断开有直接相连关系的两节点之间的支路,此时连接两节点的最短路径就是网络冗余性 R ,从物理含义可以看出冗余性反映了节点间的最短备用路径长度。

最大连通域的大小 G : 最大连通域是指网络发生解列后,所有连通区域中节点数最大的区域,其大小指最大连通域中的节点数目。

1.2 复杂网络模型^[3]

实际的电网总是呈现出各种特征,研究人员从所关注的目标出发,通过抓住一些特征、忽略一些特征的方法,建立起了一系列理想的复杂网络模型,以此研究电网能较好地反映出所关注的重点。

1959年,数学家 Erdős 和 Rényi 提出了最早的随机网络模型,几十年来复杂网络理论有了很大发展。特别是20世纪末,Watts 和 Strogatz 提出小世界模型 (small world) 以及 Barabási 和 Albert 提出无标度网络特性 (scale free),引发复杂网络研究的又一轮高潮。在小世界网络模型中,只有少数节点拥有较高的度数,但对网络的连通起着决定性作用,该特征与电网特征之间的相似度很高,因而不少研究人员以此为工具研究电网连锁故障。

2 基于复杂网络理论的电网连锁故障评估

电网灾难性事故的评估中,研究人员从防御目的出发,虽然研究的方法和手段各不相同,但主要从3个角度来研究:①从网络固有拓扑结构出发,辨识触发连锁故障的单一脆弱线路;②从网络运行状态出发,辨识引发电网灾难的连锁故障序列;③综合考虑拓扑结构和运行状态来评估电网灾难性事件的风险。

2.1 基于拓扑结构的单一脆弱线路辨识

对于拓扑结构已知的电网,在一定运行状态下,

其网络中固然存在脆弱的环节是电网的固有属性。这些固有脆弱环节对触发系统发生连锁故障,最终导致灾难性大停电起着导火索的作用。因而,单独将这些脆弱环节辨识出来,对其严加防范以防触发连锁事故的发生。

在对单一脆弱线路的辨识方法中,经历了从简单图论结构到有权有向网络再到考虑一些简单电气量等阶段。在最初的研究中,电网被描述为无权无向的网络^[4],这与实际电网中,每条支路按照一定的方向输送各不相同的电能,是有差异的。因而,评估的结果不能很好地准确辨识出脆弱支路。文献^[5]在文献^[4]的基础上,提出了加权的电网模型,该模型的线路权重基于线路的电抗,并提出了新的电网脆弱评估指标。并且,该模型在保持了小世界特性的同时,在反映节点重要度和实际电力系统运行状态方面都优于无权网络。其中,提出的用失负荷百分比 L_{out} 来测度故障影响的广度、用输电效率下降百分比 E 来测度故障影响的深度,对后续研究都具有启发和指导的意义。文献^[6]又在文献^[5]的基础上进一步把电网模型扩展为有向有权网络,提出了综合考虑功率特性和网络特性的新的脆弱性指标。并在此模型上,从随机攻击和蓄意攻击2种方式出发,辨识出了网络中的脆弱节点和脆弱线路。可见,研究人员已从单一考虑拓扑结构,向兼顾电网实际特性层面研究。

既考虑网络本身的拓扑结构又满足电力系统运行的实际状态,是复杂网络模型发展的必然趋势。在电网模型中,常将发电机节点称为源节点,将负荷节点称为流节点(汇接点),源流节点之间的串联轴路径称为输电路径^[7],以下也以此简称。实际电网中,只要源流节点对之间存在输电路径,电能就可以从该源节点传输到该流节点。基于电网这一实际运行情况,文献^[7、8]提出了线路的电气介数,以此用于辨识电网中的关键线路(也称“脆弱线路”)。该方法解决了以前方法中假设源流节点间潮流只沿最短路径传输的不足,比较真实的反映了源流节点之间对输电路径的实际利用情况,与实际电力系统更贴近了一步。并且,其提出的系统最大传输能力指标,对于后续从更系统更整体的层面研究系统故障的影响具有很好的开创性作用。

2.2 基于运行状态的连锁故障序列辨识^[9、10]

引发电网灾难性大停电的连锁事件序列就如同多米诺骨牌一样,两者都存在一定崩溃路径。崩溃路

径中的前一事件触发了后续事件的发生。如果能够筛选出风险高的连锁事件序列,在前一事件发生后,按照已筛选出的高风险的连锁故障序列进行阻断,可以有效防治后续故障事件的发生。可见,高风险的连锁故障序列筛选是解决问题的关键。在连锁事件序列的筛选中,都是建立在各种网络模型的基础上的,以下详细分析几种主流的复杂网络模型。

2.2.1 OPA 模型^[9]

这是由美国橡树岭国家实验室和威斯康辛大学电力系统工程研究中心和阿拉斯加大学这三所研究机构首个英文字母命名的网络模型。其主要关注的是系统负荷的变化,该模型包含了快时间尺度和慢时间尺度两个度量标准。其中,快时间尺度过程描述的是网络连锁过负荷和连锁故障这两个相互平衡的过程;慢时间尺度描述的是负荷增长和网络传输性能逐步提高这一对相互平衡的过程。

该模型基于直流潮流,采用线性规划法对目标函数进行求解,目标函数为求解代价函数: $C = \sum P_s(t) - W \sum P_l(t)$ 的最小值, $\sum P_s(t)$ 为 t 时刻所有发电机的总功率, $\sum P_l(t)$ 为 t 时刻系统的总负荷, W 通常取值为 100,以保证在能满足负荷的情况下,尽量增加发电机而不甩负荷。

该模型存在的不足是,所做假设与实际电网差距较大,所有网络元件都按照相同方法进行假设,对于网络自身拓扑结构考虑不够完善。

2.2.2 隐性故障模型^[10]

根据国内外统计数据显示,电力系统中 75% 的连锁事件都与保护的隐性故障有关^[11]。隐性故障:电力系统中一种固有的、不可避免的元件缺陷,在系统处于正常运行状态下,它一直“隐而不发”,但是当系统在一定的故障状态下,隐性故障就会暴露出来。

常见的隐性故障分为:基于线路保护的隐性故障和基于电压的隐性故障。基于线路保护的隐性故障是指,当网络中支路断开后,与该支路首末节点有连接关系的所有支路的保护都暴露在隐性故障的威胁之下,其发生的可能性如图 1 所示。基于电压的隐性故障是指,在网络中,如果系统无功不足,会造成发电机母线电压下降,在此情况下可能会造成发电机跳开,此时所有与该发电机母线相连的支路都暴露在隐性故障的威胁之下,其发生的可能性可以用图 2 来描述。文献[1]基于隐性故障模型,综合考虑了运行状态的负荷特性和机组调速器特性,结合电压不稳定

指数、有功无功裕度指数、掉负荷指数等指标来筛选出了高风险的连锁故障序列。

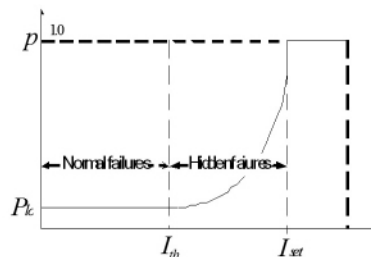


图1 暴露线故障概率

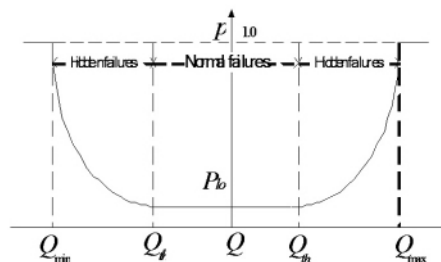


图2 发电机故障概率

2.2.3 其他复杂网络模型^[14]

除了以上的模型外,国外的研究人员以图论为基础,提出了一系列新的复杂网络模型,虽然在现阶段还没有得到广泛的认可和应用,但是其中的思想非常具有开创性和启发性,现对其各自进行简述分析。

Holme 和 Kim 相隔中心性模型:把电网以图 $G = (V, E)$ 来描述,其中 V 为网络的节点集, E 为网络的支路集。相隔中心性模型假设两节点之间的功能都是通过最短路径完成的,其主要关注的是网络演化所导致的过负荷,并采用相隔中心性来评估网络节点和支路的负荷和容量。该模型存在的不足在于:模型以无标度网络模型为基础,模型中的网络是一直生长变化的,但模型假设了每个节点容量的最大值均相同。

Motter 与 Lai 模型: Motter 与 Lai 模型与相隔中心性模型不同在于,其假设了各节点的容量不同,故障节点会从网络中永久删除;并且,在由于连锁故障发生的过程是短时间的,所以不考虑网络生长。相似之处都是采用经过某节点最短路径的总数目来定义该节点负荷,节点能够处理的最大负荷为节点的容量,节点的容量正比于其初始负荷。

Crucitti 和 Latora 的有效性能模型:该模型基于系统中某一元件故障引起的潮流动态重分布,应用有效性能概念将电网描述为由 N 个节点, K 条支路形成的有权图 G ,用 $N \times N$ 邻接矩阵 e_{ij} 来描述, e_{ij} 为节点 i 与 j 之间的有效性能, $e_{ij} \in (0, 1]$,如果两点之间没有

边相连则 $e_{ij} = 0$ 。引入 Crucitti 和 Latora 的有效性能模型的优点: 第一, 是假设过负荷节点的负荷降到额定值以下, 这些节点可能通过重新接入网络而再次正常工作; 第二, 是避免了在以往的静态故障研究中通过移除系统中一定比例的元件并评估仿真后的故障能在多大程度上影响网络运行的方法, 而是采用了动态仿真法, 认为一个元件故障不但能对网络行为产生直接影响, 还会导致其他元件过负荷, 使得相应部分或全部元件发生故障, 从而产生连锁影响。

3.3 基于拓扑结构和运行状态的综合模型

在对电网灾难性事故的评估中, 准确合理地制定故障引起的严重指标一直是评估方法需要解决的难题, 现有的指标中通常是仅仅考虑运行状态的严重性, 而忽略了网络结构的严重性。网络结构作为承载电气量的主体, 其结构的完整性直接影响到供电的可靠性, 因而, 网络结构的严重性和运行状态的严重性应该是值得同等关注的两个方面。

文献 [2] 在已有研究基础上, 提出了状态脆弱性及结构脆弱性的准确定义及新评估模型; 并提出了结合这两个脆弱因素综合考虑的思想, 既考虑电网的运行状态又结合网络拓扑结构, 并以此建立了可针对不同运行状态变量以获取不同评估目的评估模型通式。

文献 [6] 在评估故障对电力系统带来的影响方面, 将故障后系统最大连通区域指标和系统最大传输能力指标结合使用, 因而可以从拓扑结构和输电能力两个方面的变化来更全面地评估连锁故障对系统的影响。

电力系统自身的网络拓扑结构指标和运行状态指标是两个平级的指标, 两者相互独立, 又相互承载。准确合理地将这两类指标耦合是评估连锁故障影响的关键。文献 [3] 受中国人口与地理关系中著名的胡焕庸线的启发, 采用二维平面拟合的思路来研究电网脆弱性。

电网灾难性事件中连锁故障和电网灾难发生后的黑启动, 可以说是一对互逆的过程。黑启动中网络重构的策略是寻求网络结构和运行质量的最优, 而筛选高风险的连锁故障序列的策略是辨识出对网络结构和运行质量影响最大的故障序列, 可以看出, 两者具有密切的联系, 可以互相借鉴。对于大停电之后的黑启动策略, 文献 [4] 提出了一种基于节点重要度评估的网络重构策略, 该策略采用节点收缩后的网络凝聚度定量评估网络中电源和负荷的重要性。以此

为基础, 结合网络结构和运行质量的综合评价指标——网络重构效率来全面、客观地评估重构效果。这一方法策略对于如何结合网络自身结构和运行状态来评估网络的状态有很好的借鉴作用。

3 相关问题探讨及今后值得注意的研究方向

现有电网灾难性事件评估中, 以孤立的眼光来分析每一个事件给系统带来的风险(即: 某条支路故障的可能性测度·此支路故障后的系统严重性测度=该支路故障引来的系统风险)。以此方法, 对电网中所有正常运行的支路分别求出其故障带来的系统风险, 然后对求出的风险值排序, 筛选出其中风险值最大的 Q 组事故链, 然后据此进行下一次支路故障的风险分析)。在求取故障造成的严重性时, 大多认为事件发生后对电网整体造成的严重程度就是系统中所有孤立元件严重程度的叠加 [11]。所以, 针对现有的理论认识, 为后续研究提供了 2 个很好的切入点 [15-18]。

(1) 经济学中最早提出风险分析的概念: 风险 = 该事件发生的可能性测度·该事件带来的损失。风险指数: 某一具体损失发生的不确定测度(Risk index is defined as the uncertain measure that some specified loss occurs)。可见对事件发生的测度和事件引来的损失是造成风险的两个关键因素, 请注意是损失, 而不是严重程度。传统的理论正苦于解决如何将一系列严重性指标整合为一个统一的指标来评估连锁故障的影响时, 可以从风险评估的定义出发, 抓住损失这一概念, 得出一个统一的、可加的指标。其实, 现有的方法关注于母线电压越限指标、支路功率越限指标、发电机有无功裕度指标、电负荷百分比指标等等, 这些归根结底都指向于负荷的丢失。因而, 完全可以将这系列指标采用一定的映射关系指向负荷的丢失, 从而得出一个统一的、可加的负荷丢失期望。

(2) 电力网络中节点与支路、之路与支路之间并不是相互独立的, 电网之所以能够将电源节点的电能传输到负荷节点是依靠各组源流对之间一条条路径实现的。可见在电网中单独独立的支路是没有意义的, 只有当一系列支路通过一定的拓扑连接关系后, 这些支路才能具有相应的传输功能。正因为各支路之间存在着一系列相互关联的关系, 所以, 对于系统风险的评估是应该站在一个考虑了网络拓扑关系的

单元系统层面来分析,而不是将系统中的各条支路当作各不相干的孤立元件来分析。文献 [21] 已提出了对电网进行功能组分解的思想,并在功能组的基础上给出了 $N-K$ 事故辨识方法。受此启发,在此采用拓扑图论的方法将一个复杂电网分割成一个一个的单元系统,将风险分析从孤立地单独分析每一个元件的层面提升到从单元系统的层面来分析。

单元系统 [9]: 最原始的基本电力网络就是单机系统(即:一台电机+一条支路+一个负荷,这就是所定义的单元系统)。电力系统的发展就是将一系列的这样单元系统通过一系列的并联、串联关系得到现有的复杂电力系统。因对简单的串联、并联系统分析时很有必要,文献 [9] 以针对单元串、并联系统,对其进行风险分析,在此不做赘述。在实际电网中,电源节点与负荷节点之间的连接关系并不是简单的并联或者串联,而是两种关系同时交织存在的,所以想要从简单的单元系统的层面来分析电网连锁事件的风险就先得采用拓扑图论的方法将复杂电力网络分割成一组一组的单元系统。以下以一个包含了串、并联关系的桥联系统来分析。

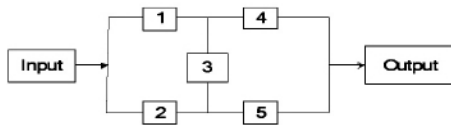


图3 简单桥联系统

(1) 图3这个简单的桥联网络中包含了5个元件,其各自正常运行的测度分别用5个不确定变量 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 来表示。显然,其中存在4条输电路径,分别为

Path₁: Input—1—4—Output;
Path₂: Input—2—5—Output;
Path₃: Input—1—3—5—Output;
Path₄: Input—2—3—4—Output。

对于这4条路径各自来说,都是当且仅当本路径中所有元件都正常运行时本路径才能工作,因而可得出这4条路径各自的正常运行的测度分别为

$$\begin{cases} path_1 = x_1 \wedge x_4 \\ path_2 = x_2 \wedge x_5 \\ path_3 = x_1 \wedge x_3 \wedge x_5 \\ path_4 = x_2 \wedge x_3 \wedge x_4 \end{cases} \quad (1)$$

显然对于这个桥联系统,只要这4条路径中任意一条路径正常运行,系统都可以运行,当且仅当这4条路

径全故障后,系统才会故障,所以该系统能保持运行的测度为 $f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (x_1 \wedge x_4) \vee (x_2 \wedge x_5) \vee (x_1 \wedge x_3 \wedge x_5) \vee (x_2 \wedge x_3 \wedge x_4)$ (2)

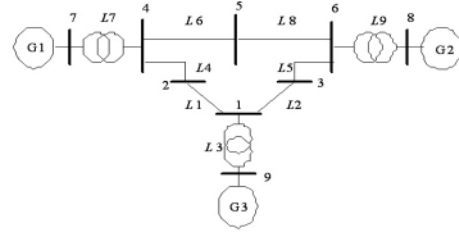


图4 IEEE9节点系统

(2) 以图4的9节点系统为例,各支路正常运行的不确定测度为 $x_1, x_2, \dots, x_9$,经过源流路径剖分,可以得出系统共有9对源流对: $G_1-2, G_1-3, G_1-5, G_2-2, G_2-3, G_2-5, G_3-2, G_3-3, G_3-5$ 。

现仅对5号负荷节点具体分析,当网络正常运行时, G_1, G_2, G_3 对负荷节点5的6条供电路径分别为
Path₁: $G_1-L_7-L_6-5$
Path₂: $G_1-L_7-L_4-L_1-L_2-L_5-L_8-5$
Path₃: $G_2-L_9-L_8-5$
Path₄: $G_2-L_9-L_5-L_2-L_1-L_4-L_6-5$
Path₅: $G_3-L_3-L_1-L_4-L_6-5$
Path₆: $G_3-L_2-L_5-L_8-5$

若IEEE9节点系统中各支路正常运行的不确定测度为 $x_1, x_2, \dots, x_9$,则5号负荷节点正常供电的不确定测度为

$$\begin{aligned} x_n = & (x_7 \wedge x_6) \vee (x_7 \wedge x_4 \wedge x_1 \wedge x_2 \wedge x_5 \wedge x_8) \\ & \vee (x_9 \wedge x_8) \vee (x_9 \wedge x_5 \wedge x_2 \wedge x_1 \wedge x_4 \wedge x_6) \\ & \vee (x_3 \wedge x_1 \wedge x_4 \wedge x_6) \vee (x_2 \wedge x_5 \wedge x_8) \end{aligned} \quad (3)$$

现假设支路 L_9 故障,则此时 G_1, G_2, G_3 对负荷节点5的4条供电路径为

Path₁: $G_1-L_7-L_6-5$
Path₂: $G_1-L_7-L_4-L_1-L_2-L_5-L_8-5$
Path₃: $G_3-L_3-L_1-L_4-L_6-5$
Path₄: $G_3-L_2-L_5-L_8-5$

此时对负荷节点5供电的测度为

$$\begin{aligned} x_f = & (x_7 \wedge x_6) \vee (x_7 \wedge x_4 \wedge x_1 \wedge x_2 \wedge x_5 \wedge x_8) \\ & \vee (x_3 \wedge x_1 \wedge x_4 \wedge x_6) \vee (x_2 \wedge x_5 \wedge x_8) \end{aligned} \quad (4)$$

将正常情况下节点5的负荷标么化为1,在支路 L_9 故障,经潮流计算得出的节点5的负荷输出标么化为 R_5 ,从而可以得出 L_9 支路故障后,节点5的期望负荷

为 $R_5 = \frac{x_f}{x_n} \times R_5$,所以可得在 L_9 故障后节点5的损失

期望为 $\bar{L}_5 = 1 - \bar{R}_5$ 。同理,可以求出,在 $N-1$ 故障情况的 $\bar{L}_2, \bar{L}_3, \bar{L}_5$ 他们的物理含义都是负荷节点掉电损失期望值,从而可以分别求得 $N-1$ 事故后对于每个负荷节点带来的风险指数为 $RISK_n = x_f \times \bar{L}_n$ ($n=2, 3, 5$), 最后可以求得故障对于全网带来的风险指数为 $RISK = \sum_{n=2,3,5} w_n \times RISK_n$, w_n 为每个负荷点在总的负荷中所占的权重,可以根据 $w_n = \frac{S_n}{\sum_{n=2,3,5} S_n}$ 可以得到,其中 S_n 为 n 节点的视在功率。

这样,就得出了 $N-1$ 故障情况下各组事件给系统带来的风险,将其进行排序筛选出风险值最大的 Q 组事件后,进行潮流计算再按照上述方法可得到 $N-2$ 情况下各组事件带来的系统风险,再重复上述步骤,依次类推,直到搜索到预先设定的最大允许故障数或者最大允许失负荷比例或者是直到潮流不收敛时结束。从而得出一个给系统造成高风险的预想事故库。

可见,该方法在分析过程中摆脱了以孤立的眼光来审视电网支路的传统思路,提升到了从单元系统这一个整体层面来评估电网的故障风险,可以说向更系统化、更逼近科学实际;在结果方面,该方法不仅可得出故障给系统带来的风险,更能得出具体事件对具体负荷节点带来的风险。

所以综上所述,该方法采用拓扑剖分,将复杂网络剖分为若干单元系统,再采用刘宝琰教授不确定理论中最新提出的不确定风险分析(uncertain risk analysis)将各个单元系统有机结合,从而得出了评估电网连锁事件风险的新思路,此方法在分析手段上更系统整体化,在分析结果上更细致具体化。

4 结 语

从复杂网络理论角度对电力系统连锁故障进行研究,为探索未来高度互联化、智能化大电网的安全提供了新的理论基础和思路。以复杂网络为基础,先分别评述了从拓扑结构角度探索触发连锁故障的单一脆弱支路,再到从运行状态角度辨识高风险连锁故障序列的各种模型方法,最后再分析了综合考虑网络结构和运行状态的模型。上述模型无论从哪个角度出发,都紧紧秉承了网络拓扑结构作为电气量运行的主体,网络结构的指标应该和运行状态量指标同等重

要这一思想。因而,如何将结构状态与运行状态有机结合起来评估电网的灾难性事件是关键点也是难点,采用拓扑剖分,将复杂网络剖分为若干单元系统,再采用不确定风险分析将各个单元系统有机结合,从而得到评估电网连锁事件风险的新思路。值得注意的是,复杂电力系统建模绝非易事,理论研究仅是第一步,各种模型对存在自身的局限性,如何提高和验证模型与方法的普适性是需要继续深入研究的。

参考文献

- [1] 曹一家,陈晓刚,孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-5.
- [2] 陈晓刚,孙可,曹一家. 基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 138-144.
- [3] 孙可,韩祯祥,曹一家. 复杂电网连锁故障模型评述 [J]. 电网技术, 2005, 29(13): 1-9.
- [4] 丁明,韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 20-25.
- [5] 张国华,张建华,杨京燕,等. 基于有向权重图和复杂网络理论的大型电力系统脆弱性评估 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4): 21-26.
- [6] 邵莹,于继来. 采用源流路径电气剖分信息的电网脆弱性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 34-39.
- [7] 徐林,王秀丽,王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 33-39.
- [8] 徐林,王秀丽,王锡凡. 基于电气介数的电网连锁故障传播机制与积极防御 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 61-68.
- [9] 孙可. 复杂网络理论在电力网中的若干应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [10] 李蓉蓉. 复杂电力系统连锁故障风险评估研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [11] Hazra J, Sinha A K. Identification of Catastrophic Failures in Power System Using Pattern Recognition and Fuzzy Estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 378-387.
- [12] 魏震波,刘俊勇,朱国俊,等. 基于电网状态与结构的综合脆弱评估模型 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 11-14.
- [13] 丁剑,白晓民,赵伟,等. 基于二维平面拟合的电网脆弱性分析 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 1-4.
- [14] 刘艳,顾雪平. 基于节点重要度评价的骨架网络重构 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 20-27.

(下转第53页)

整方向,迅速改进和转变,以满足电网各种运行工况的需求,此外,电网在规划设计方面也需要进行综合考虑,开展电磁环网解环研究、电源分区消纳研究、电源接入地方式研究,750 ~ 220 kV 电压控制专题研究等,建设坚强的各级电网,各级电网统一协调统筹发展,为电网运行提供坚强的物理保障。

作者简介:

常喜强(1976),男,硕士,高级工程师,从事电力系统安全稳定运行控制工作;

孙谊端(1974),女,硕士,高级工程师,从事电力系统安全稳定运行控制工作。

(收稿日期:2011-07-10)

(上接第25页)

- [5] 于继来,汤奕. 交流支路和节点的联合电气剖分 [J]. 中国电机工程学报,2007,27(16):37-42.
- [6] 王锡凡. 电网可靠性评估的随机网流模型 [J]. 电力系统自动化,2006,30(12):1-6,22.
- [7] 汤奕,于继来. 一种新的输电线路阻塞责任定量分析方法 [J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(4):98-103.
- [8] 汤奕,于继来,周苏荃. 电力网络源流路径电气剖分算法 [J]. 2006,30(22):28-33.

- [9] Baoding Liu, Uncertainty Theory [M]. Beijing: Uncertainty Theory Laboratory, 2010, <http://orsc.edu.cn/liu>.
- [20] 管霖,郑传材. 线路 $N-K$ 停运机理及其概率模型 [J]. 电力系统自动化学报,2009,21(4):115-119.
- [21] 宋毅,王成山. 双重故障模式下基于证据理论和功能组分解的 $N-K$ 事故辨识方法 [J]. 中国电机工程学报,2008,28(28):47-53.
- [22] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难 [J]. 电力系统自动化,2003,27(18):1-5.

(收稿日期:2011-04-10)

(上接第42页)

- [6] Kandil M S, El-Debeiky S M, Hasanien N E. Long-term Load Forecasting for Fast Developing Utility Using a Knowledge-based Expert System [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2):491-496.
- [7] 张民,鲍海,晏玲. 基于卡尔曼滤波的短期负荷预测方法的研究 [J]. 电网技术,2003,27(10):39-42.
- [8] 陈泽淮,张尧,武志刚. RBF神经网络在中长期负荷预测中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报,2006,18(1):15-19.
- [9] 钱卫华,姚建刚,龙立波,等. 基于短期相关性和负荷增长的中长期负荷预测 [J]. 电力系统自动化,2007,31(11):59-64.
- [10] 谢敬东,唐国庆,徐高飞,等. 组合预测方法在电力负荷预测中的应用 [J]. 中国电力,1998,31(6):3-5.
- [11] 吉培荣,张玉文,赵青. 组合预测方法在电力系统负荷预测中的应用 [J]. 三峡大学学报,2005,27(5):398-400.
- [12] 牛东晓,陈志业,邢棉,等. 具有二重趋势性的季节型电力负荷预测组合优化灰色神经网络模型 [J]. 中国电机工程学报,2002,22(1):29-32.
- [13] 李金超,牛东晓,李金颖,等. 基于熵权的中长期电力负荷组合预测 [J]. 华东电力,2005,33(8):27-29.
- [14] 李春生,王耀南. 基于条件熵的电力负荷组合预测模型 [J]. 电力系统及其自动化学报,2007,19(4):55-58.
- [15] 肖先勇,葛嘉,何德胜. 基于支持向量机的中长期电力负荷组合预测 [J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(1):84-88.

- [6] 丁巧林,潘学华,杨薛明. 最优组合预测方法在电力负荷预测中的应用 [J]. 电网技术,2008,32(增刊1):127-130.
- [7] 苗增强,武宏波,李婷,等. 基于最小一乘法的组合赋权法在中长期负荷预测中的应用 [J]. 电力系统保护与控制,2009,37(2):28-32.
- [8] 周淳,任海军,李健,等. 层次结构下的中长期电力负荷变权组合预测方法 [J]. 2010,30(6):47-52.
- [9] 孙见荆. 组合预测参数估计方法研究 [J]. 预测,1996,15(6):54-56.
- [20] 陈守煜. 系统模糊决策理论与应用 [M]. 大连:大连理工大学,1994.
- [21] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用 [M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [22] 陈守煜,赵瑛琪. 模糊优选(优化)理论与模型 [J]. 应用数学,1993,6(1):1-6.
- [23] 康海贵,刘艳,孙敏. 施工方案评价中的多级模糊优化及非结构性模糊决策分析 [J]. 四川建筑科学研究,2007,33(6):228-231.
- [24] 杨实俊,刘健夫. 模糊优选考核方法在企业人力资源管理中的应用 [J]. 华北电力大学学报,2007,34(4):110-112.
- [25] 王世儒,雷伟丽. 基于模糊数学的多级泵站老化评价 [J]. 甘肃水利水电技术,2009,45(1):22-23.
- [26] 李海龙. 基于熵权的多级模糊优选模型在软基处理中的应用 [J]. 西部探矿工程,2009(4):50-53.
- [27] 毛李帆,姚建刚,金永顺. 中长期电力组合预测模型的理论研究 [J]. 中国电机工程学报,2010,30(16):53-59.

(收稿日期:2011-04-28)

中性点不接地系统故障充电暂态信号定位法

张文海¹, 汪颖^{1,2}, 肖先勇^{1,2}

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:中国中压配电网的中性点主要采用非有效接地系统, 此类系统在发生单相接地故障后的一个重要特点是故障相电压降低, 非故障相电压升高。由于线路存在电容和电感, 故非故障相电压升高的这一暂态过程可看作对非故障相电容的充电暂态过程。利用出线故障录波器记录的电压电流波形信息, 通过对充电暂态信号进行频谱分析、信号提取然后再进行故障的定位, 并通过 Matlab 进行了仿真分析, 证明了所提方法的正确性。

关键词:故障定位; 单相接地故障; 充电暂态; 频谱分析; 信号提取

Abstract: The neutral points in medium-voltage distribution system in China are mainly non-effectively earthed. An important characteristic of this system is that the voltage of fault phase is decreasing and the voltage of non-fault phase is increasing after single-phase earth fault happened. Due to the existing line capacitance and line inductance, the transient progress of non-fault phase voltage increasing can be regarded as a charge transient. Using voltage and current waveform information recorded by the fault recorder installed in the bus bar, the spectrum analysis and signal extraction of charging transient signal are carried out, and then the fault is located. The validity of the proposed method is proved by Matlab simulation analysis.

Key words: fault location; single-phase earth fault; charge transient; spectra analysis; signal extraction

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0026-04

0 引言

随着智能电网的建设和发展, 配电系统故障诊断与快速准确定位, 是实现智能配电系统的关键内容之一。中国配电网的中性点运行方式主要采用小电流接地, 包括经消弧线圈接地和不接地, 配电网的电压等级主要为 6~35 kV。实践证明, 配电网中发生单相接地故障的情况最多。因此, 针对配电网单相故障的快速准确定位方法的研究, 成为了国内外研究的热点。

欧美国家对配电网故障定位开展了大量研究, 提出的主要方法有基频分量法、高频分量法和基于知识的方法^[1], 但是, 这些研究大多针对中性点有效接地系统进行, 而中国的配电网大多为中性点非有效接地系统, 在发生故障时, 非故障相电压升高为正常运行电压的 $\sqrt{3}$ 倍, 由于线路对地电容的存在, 因此, 故障相电压降低可看作是线路电容的放电过程, 非故障相电压升高是线路电容的充电过程^[2]。

配电网故障定位可分为两类, 一类是对于故障区段定位, 另一类是故障精确测距^[3]。故障区段定位通常利用多点测量, 并结合人工智能或数学理论进

行^[4,5], 单相接地故障通常对零序信号或零模分量进行分析^[6,7]; 故障测距法主要有 S 注入法^[8]、行波法^[9]、传递函数法^[10]以及迭代算法^[11]等。故障区段定位大多基于 FTU 或配电网自动化, 但中国很多实际配电网尚未完全实现配电网自动化; 零序电流多点检测的成本较高, 单相接地故障的稳态零序电流很小, 检测较困难; S 注入法易受互感器容量限制, 且通常仅离线定位; 行波法对于装置的要求高, 需要有较高的安装成本, 主要应用于输电网; 传递函数法的研究还处于理论研究阶段, 实际应用还有待验证; 文献^[11]中提到的迭代的计算方法需知道双端同步的电压电流信息, 局限了此方法的应用。

这里研究中性点不接地系统单相接地故障定位问题。利用非故障相电压升高的暂态充电过程的特点和变化规律进行故障定位, 提出一种暂态充电信号量化分析的方法。主要内容包括基本理论和算法、暂态信号频谱分析、信号提取与故障定位算法, 最后通过仿真证明了方法的正确性和可行性。

1 理论分析研究

1.1 充电暂态测距的理论分析

在中性点不接地系统中发生单相接地故障时,会产生一些暂态信号,其中最主要的就是非故障相电压升高的充电暂态和故障相电压降低的放电暂态。其暂态信号的组成有充、放电暂态信号,其频率主要集中在 $0.3 \sim 3 \text{ kHz}$ [2]。

对于放电暂态信号直接由故障相经过对地电容与地构成通路;而充电暂态信号则需要通过变压器,然后通过非故障相,然后通过对地电容与地构成通路,信号流通路径如图1。将充电暂态信号的流通路径进行简化等效,用集中参数将电路进行定量化的分析,其简化电路如图2。

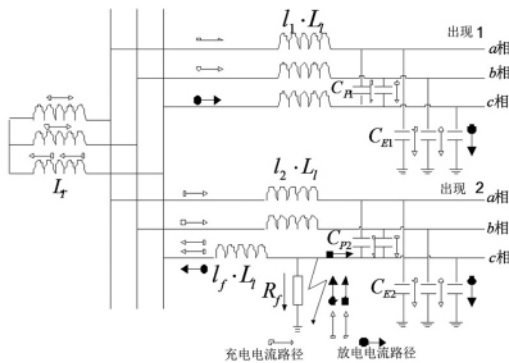


图1 单相接地故障模型

图1中, L_T 为变压器单相电感; L_1 为线路单位电感; R_f 为故障电阻; l_1 、 l_2 分别为出线1和出线2的线路长度; l_f 为故障距离; C_{p1} 、 C_{p2} 分别为出线1、2的相间电容(假设三相对称); C_{E1} 、 C_{E2} 分别为出线1、2的线路对地电容。

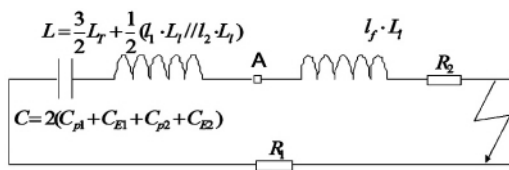


图2 充电暂态电路简化图

图2中,A点代表出线的电压电流测量点(考虑使用的是故障录波器); R_1 为非故障线路和变压器的等值电阻; R_2 为故障点到测量点之间的线路电阻值和故障电阻的和; L 、 C 分别代表变压器和非故障相的等值电感和电容; 其他参数同图1中所示。

通过A点测量到的电压、电流信号很容易计算出故障的距离,其计算原理如下 [3]。

$$L_f = \frac{1}{\omega_c} \cdot \frac{v_c}{i_c} \cdot \sin \varphi \quad (1)$$

$$L_1 = \frac{1}{3} (L_0 + L_1 + L_2) \quad (2)$$

$$l_f = L_f / L_1 \quad (3)$$

式(1)中, ω_c 为充电角频率; v_c 和 i_c 分别代表充电暂态电压和电流信号,可以取瞬时值,也可以取有效值; φ 代表电压超前电流的相位角; 式(2)中 L_1 、 L_2 、 L_0 分别代表线路的正、负、零序单位电感; 式(3)为求取故障距离的公式。

对于式(1)中 v_c 和 i_c 比值的求取,这里采用了两种方法,一种是均方根值(Yoot mean square, RMS)算法,另一种是极值点序列算法。RMS算法是分别取暂态电压和电流信号中的一段,然后分别求其有效值,最后求其比值;而极值点序列算法则是分别求取信号衰减过程中电压和电流信号对应的极值点的比值,然后求取平均值。

1.2 故障电阻的影响

从图2的简化等效电路图可以很容易看出充电回路可看作串联RLC电路,因此根据电阻对RLC电路充电过程的影响,可分析出故障电阻对所提方法的影响。

在串联RLC电路中,当满足式(4)时为欠阻尼,此时的充电暂态过程为振荡衰减,并且其频率的计算如式(5),当不满足时将非振荡衰减 [4]。对于振荡衰减的信号,当识别出其振荡频率后,可以很容易将此信号提取出来进行分析,然而,对于非振荡衰减信号,其信号的提取比较困难。

$$R^2 C < 4L \quad (4)$$

$$f_c = \frac{1}{4\pi L} \sqrt{\frac{4L - R^2 C}{C}} \quad (5)$$

式中, L 、 R 、 C 分别为等效电路中的电感、电阻和电容。

从式(4)中可以看出,充电过程是否为振荡衰减与电路本身的结构参数(电感、电阻和电容)和故障电阻的大小有关。当故障电阻过大时可能导致式(4)不满足,从而所提方法将失效;故障电阻的大小还会影响充电频率大小。

文献 [6] 曾经统计过中性点不接地系统的配电网中的故障情况(包括故障类型和故障电阻大小),有的故障为单相接地故障,而且在单相接地故障中,故障电阻主要集中在 $40 \text{ k}\Omega$ 和 $40 \text{ k}\Omega$ 左右。通过仿真可以发现,当故障电阻小于 $100 \text{ }\Omega$ 时(和网络的参数有关),满足式(4),所提方法成立。

2 信号的分析处理

在得到充电暂态电压和电流的波形后,还必须对

表1 故障测距结果

故障实际 距离/km	故障 电阻/ Ω	负荷大小 /MVA	故障电压 初始角/ $^{\circ}$	是否存在 故障分支	RMS 测距算法		极值点序列测距算法	
					计算结果/km	相对误差/%	计算结果/km	相对误差/%
10	0				8.52	-14.78	8.61	-13.89
10	20				9.08	-9.23	9.42	-5.80
10	40	$5 + j3.75$			9.70	-2.97	10.01	0.07
10	80		45		10.87	8.69	13.52	35.2
10	100			否	12.38	23.8	15.81	58.1
10	20	$10 + j7.5$			9.50	-5.01	9.86	-1.41
10	40				10.01	0.14	10.51	5.13
10	40		0		9.02	-9.77	9.53	-4.68
10	40		90		9.53	-4.72	10.13	1.28
16	0	$5 + j3.75$			15.81	-1.16	15.08	-5.74
16	40		45	是	15.57	-2.64	16.87	5.41

信号进行处理后才能计算得到故障的距离。信号的处理主要包括暂态信号的频谱分析、充电信号的频率识别以及信号的提取。

在进行频谱分析时采用的是FFT(fast Founier transform)变换,在进行信号提取时采用的是连续小波变换。如图3所示是电流和电压暂态信号的频谱分析,从图中可以很容易地识别出充电暂态信号(约700 Hz)和放电暂态信号(约1800 Hz)。

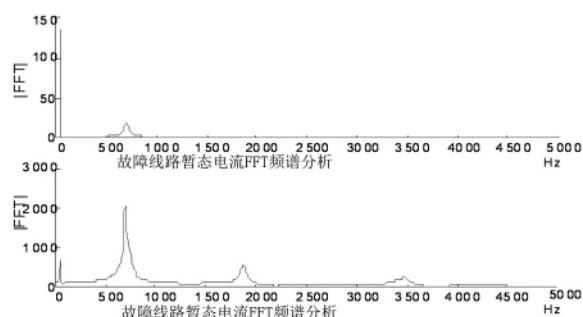


图3 电流和电压暂态信号的频谱分析图

在进行充电暂态信号的提取时可以采用离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)和连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)。当使用离散小波变换时,提取的信号是一个频段范围内的信号^[6],因此,当充电频率在频段范围的边界时就会导致信号提取误差的增大。这里采用的是连续小波变换,当识别出充电暂态信号的频率后,结合选择的母小波的中心频率可计算出小波变换的尺度(见式(6)),然后再在这个尺度下进行连续小波变换即可提取出充电暂态信号随时间变化的曲线图(如图4)。

$$scale = f_c * f_s / f_a \quad (6)$$

式中, f_c 为母小波的中心频率; f_s 为采样频率; f_a 为需要提取的信号频率(即充电频率)。

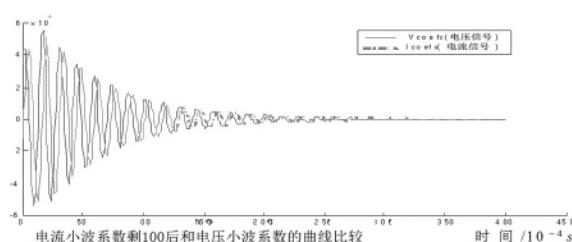


图4 充电暂态电压电流信号波形图

在提取出充电暂态电压和电流信号后,可通过电压电流的波形信号的时间差计算其相位差(相位差的计算见式(7)),再利用前面所提到的测距方法进行故障的定位(包括RMS算法和极值点序列算法)。

$$\varphi = t_s \cdot \omega_c = t_s \cdot 2\pi \cdot f_c \quad (7)$$

式中, φ 为电压超前电流的相位; t_s 代表电压超前电流的时间差(可从提取的电压和电流的波形图中求出); ω_c 为充电角频率; f_c 为充电频率。

3 仿真分析结果

在Matlab的电力系统仿真工具下进行了仿真和数据分析。通过建立配电网模型和设置好相关参数进行仿真分析,根据文献[7]设置线路的参数为线路正序电阻为0.17 Ω /km,零序电阻为0.23 Ω /km,正序电感为1.2 mH/km,零序电感为5.48 mH/km,正序电容为9.697 nF/km,零序电容为6 nF/km。

在仿真中分别考虑了不同故障电阻、负荷大小、故障初始角以及是否存在线路分支对于故障测距的影响,并将RMS算法和极值点序列算法做了简单比较,仿真结果参见表1。

4 结论及展望

从仿真的结果可以看出,所提方法不受负荷大

小、故障初始角以及故障分支的影响,但当过渡电阻较大时精度大大降低,原因是过渡电阻增大时,暂态信号的衰减速度增大;当过渡电阻大于某值时,方法将失效。还利用了充电暂态信号进行故障的定位,思路新颖清晰,但是精度不高,还需要在信号的分析处理上进行深入研究,特别是充电信号的提取问题。前面只考虑了故障电阻较小时的单相接地故障定位问题,以后还需要对高阻抗故障以及瞬时性故障的识别与定位进行深入研究。而且只是利用了故障时产生的暂态信号,在以后的研究中还应加入故障稳态信号的分析,利用暂稳结合的方法以提高故障定位的准确性和可靠性。

参考文献

- [1] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理(第三版)[M]. 北京:中国电力出版社,1994.
- [2] M. Mirzaei, M. Z. A. Ab Kadir, E. Moazami, etc. Review of Fault Location Methods for Distribution Power System [J]. Australia: Basic and Applied Science, 2009, 3(3): 2670 - 2676.
- [3] 马士聪,高厚磊,徐丙垠,等. 配电网故障定位技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 119 - 124.
- [4] 许奎,张雪松,杨波. 配电网故障定位的改进通用矩阵算法[J]. 继电器, 2007, 35(3): 6 - 8.
- [5] 王林川,李庆鑫,刘新全,等. 基于改进蚁群算法的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 29 - 33.
- [6] 张利,杨以涵,司冬梅,等. 基于零序电流和磁场检测故障杆的配电网故障定位[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 73 - 76.
- [7] 孙波,徐丙垠,孙同景,等. 基于暂态零模电流近似熵的

小电流接地故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 83 - 87.

- [8] 张惠芬,潘贞存,桑在中. 基于注入法的小电流接地系统故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 64 - 66.
- [9] 于盛楠,鲍海,杨以涵. 配电线路故障定位的实用方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 86 - 90.
- [10] 吴振升,杨学昌,伊贵业. 配电网三相不换位线路接地故障定位的传递函数法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 7 - 11.
- [11] 梁志瑞,穆毓,牛胜锁,等. 一种小电流接地系统单相接地故障测距新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 66 - 70.
- [12] 唐轶,陈奎,陈庆. 小电流接地电网单相接地故障的暂态特性[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 175 - 179.
- [13] Seppo Hanninen. Single Phase Earth Faults in High Impedance Grounded Networks: Characteristics, Indication and Location [D]. Espoo, Finland: Helsinki University of Technology, 2001.
- [14] William H. Hayt Jr, Jack E. Kemmerly. 工程电路分析(第七版)[M]. 周玲玲,蒋乐天,等译,北京:电子工业出版社, 2007: 285 - 318.
- [15] Seppo Hanninen, Matti Lehtonen. Characteristics of Earth Faults in Electrical Distribution Networks with High Impedance Earthing [J]. Electric Power Systems Research, 1998, 44: 155 - 161.
- [16] David C. Robertson, Octavia I. Camps, Jeffrey S. Mayer, et al. Wavelets and Electromagnetic Power System Transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 1050 - 1058.
- [17] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京:水利水电出版社, 1993.

(收稿日期:2011-04-10)

(上接第8页)

- [8] Irvin J. Balaguer, Heung - Geun Kim, Fang Z. Peng, ect. Survey of Photovoltaic Power Systems Islanding Detection Methods [C]. Industrial Electronics, 34th Annual Conference of IEEE 2008: 2247 - 2252.
- [9] H. H. Zeineldin, James L. Kirtley, Jr. A Simple Technique for Islanding Detection with Negligible Nondetection Zone [J]. IEEE Transactions on power Delivery, 2009, 24(2): 779 - 786.
- [10] M E Ropp, M Begovic, A Rohatgi. Analysis and Performance Assessment of the Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention [J]. IEEE Transactions on Energy

Conversion, 1999, 14(3): 810 - 816.

- [11] M. E. Ropp*, M. Begovic and A. Rohatgi. Prevention of Islanding in Grid - connected Photovoltaic Systems [J]. Progress in Photovoltaics, Summer, 1999: 39 - 59.
- [12] Ward Bower, Michael Ropp. Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility - Interactive Inverters in Photovoltaic Systems [R]. SANDIA REPORT, SAND2002 - 3591, November 2002.
- [13] H. H. Zeineldin, S. Kennedy. Instability Criterion to Eliminate the Non - detection Zone of the Sandia Frequency Shift Method [C]. Power System Conference and Exposition, 2009: 1 - 5.

(收稿日期:2011-04-13)

3 种典型 220 kV GIS 变电站进线方式的电磁场分析

牟秋谷¹, 周 凯^{1,2}, 肖先勇^{1,2}

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘 要: 高压输电系统产生的工频电磁环境成为当今人们关注的热点问题。本研究利用 COMSOL Multiphysics(多物理场有限元仿真软件), 模拟分析了 3 种典型 220 kV GIS(气体绝缘组合电器设备)变电站进线方式在周围空间所产生的工频电场和磁场分布特征及影响规律。首先建立 3 种输电线路的模型; 然后利用有限元法进行软件仿真, 计算电磁场在离地 1.5 m 和 15 m 高度处的水平分布; 最后按照国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP) 1998 年发布的《限制时变电场、磁场和电场磁暴露(300 Hz 以下) 导则》对结果进行评估。计算结果表明, 220 kV 电压等级的 3 种进线方式产生的工频电磁场均低于 ICNIRP 规定的公众暴露限制。

关键词: 输电线路; GIS 变电站; 电磁环境; 有限元法; 仿真

Abstract: The electromagnetic environment of high-voltage transmission systems has become the focus with the increase in high voltage transmission level. The distribution features of power-frequency electric field and magnetic field of three typical incoming lines in 220 kV GIS (gas-insulated switchgear) substation are investigated and analyzed. Firstly, the models of three typical incoming lines are established. Then the horizontal distribution of power-frequency electric field and magnetic field at the height of 1.5 meters and 15 meters above the ground is simulated and calculated using finite element method (FEM) with the software of COMSOL Multiphysics. Finally, according to "Guidelines for Limiting Exposure To Time-varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 Hz)" (ICNIRP, 1998), the data of simulation calculation is analyzed and evaluated. The result indicates that the power-frequency electromagnetic fields generated by three kinds of incoming lines in 220 kV GIS substation are lower than the public exposure limits prescribed in ICNIRP.

Key words: transmission line; GIS substation; electromagnetic environment; finite element method; simulation

中图分类号: TM866 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0030-04

0 引言

随着城市电网的负荷越来越大, 10 kV 系统已远不能满足城市电网需要, 城市中心区域需修建大容量变电站才能满足日益增长的负荷需要。GIS 变电站由于其具有节约占地、安装方便以及不受恶劣环境影响等优点成为城市变电站的首选。然而由于中国电磁环境健康公共信息长期不对称, 部分公众对 GIS 变电站的电磁场环境影响充满担忧和误解, “输变电电磁辐射严重危害健康”等言论流传更增加了公众的误解与不满。居民过度维权造成电网建设受阻, 不仅影响了中国国民经济的发展, 更严重影响了城市居民用电的保障。GIS 变电站采用了较好的电磁屏蔽措施, 其对电磁环境的影响主要来源于高压端进线部分。因此, 对 220 kV GIS 变电站进线产生的电磁场

分布的研究和评估, 对认识输变电系统的环境影响和未来发展有着重要意义。

目前对于输电线路电磁场的研究主要集中于架空输电线^[1,3]和 XLPE(交联聚乙烯)电缆^[2]。但多是单独研究某一类型输电线路的电磁场分布, 缺少将不同输电线路产生的电磁场进行比较的研究。同时, 国内对于 GIC(气体绝缘电缆)的电磁场研究也较少。

这里利用 COMSOL Multiphysics 软件建立架空输电线、XLPE 单芯电缆和 GIC 3 种典型变电站进线模型, 计算其在相同电压等级下输送相同电力容量时工频电磁场的分布, 并对结果进行评估和比较。

1 研究方法

1.1 原理

1.1.1 麦克斯韦方程组

麦克斯韦方程组利用一组偏微分方程(PDEs)概括了电磁场的规律。为了说明其物理意义,这里采用其积分形式。

$$\oint_L H \cdot dl = \int_S (J + \frac{\partial D}{\partial t}) \cdot dS \quad (1)$$

$$\oint_L E \cdot dl = - \int \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS \quad (2)$$

$$\oint_S B \cdot dS = 0 \quad (3)$$

$$\oint_S D \cdot dS = q \quad (4)$$

式(1)是全电流定律,它说明不仅传导电流产生磁场而且变化的电场也会产生电场;式(2)是推广的电磁感应定律,它说明变化的磁场可以产生电场。式(3)是磁通连续性原理,说明磁力线是闭合曲线;式(4)是高斯定理,反映了电荷以发散的方式产生电场。这组方程表明变化的电场和磁场相互联系、相互激发形成统一的电磁场。

1.1.2 数值分析方法

COMSOL Multiphysics 采用有限元法进行求解计算。其基本思想是把连续的求解域划分为有限个网格单元,在每个单元内选取一些合适的点作为求解函数的插值点,将微分方程(组)改写成由各变量或其导数的节点值与所选的插值函数组成的线性方程(组),求解线性方程(组)获得近似解来代替求解域内的真值。COMSOL Multiphysics 通过3步来完成对物理场的仿真计算。①前处理:建立有限元模型,完成单元网格划分;②处理:将微分方程(组)转化为线性方程(组)并进行求解;③后处理:采集处理分析结果,使用户能简便提取信息。

1.2 模型构建

1.2.1 模型参数

模型参数均依据国标采用较为典型的输电线路模型。电压等级采用220 kV,输送容量为180 MVA,电流按照负载达到额定功率时每相平均分配。线路参数如下表1^[4-5]。

表1 输电线路模型主要参数

输电线路	主要参数表
架空 输电线	直线塔同塔双回,铁塔型号 SZ402,导线型号 2×LGJ400/50,地线型号 LGJ95/55
XLPE 单芯电缆	电缆型号 YJLW02-Z,标称截面 630 mm, XLPE 绝缘厚度 26 mm,外半导层厚度 1.2 mm,皱纹铝护套厚度 2.4 mm,PVC 护套厚度 5 mm
GIC	分相封闭式 GIC,ds/dc=307/102 mm

3种输电线路敷设方式如图1、图2、图3。

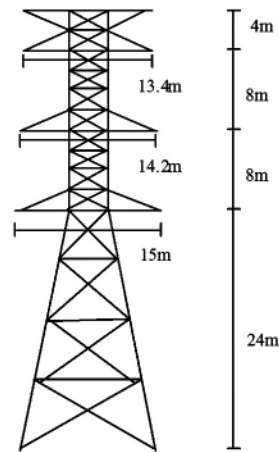


图1 架空输电线铁塔主要参数

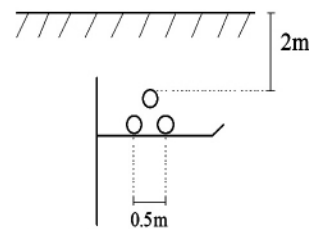


图2 XLPE 单芯电缆的敷设方式

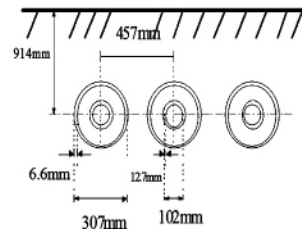


图3 GIC 的敷设方式

1.2.2 模型构建

模型构建如图4所示,以输电线路为水平中心,建立一个120 m×60 m的电磁场求解空间,并将材料设为空气。对于入地敷设的XLPE电缆和GIC,则将求解空间扩大到地面以下10 m。为了较好地模拟真实情况,在求解空间外加入了一层无限元区域,使模拟的工频电磁场在无限远处电场和磁场强度为零。在计算工频电场时,把大地作为电位为零的等位体,因此不需要地面以下的一层无限元区域。

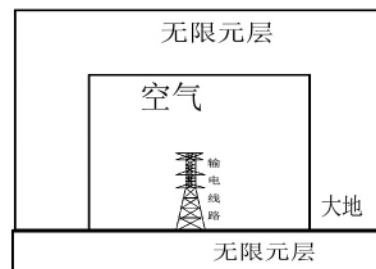


图4 输电线路空间建模图

1.3 评估标准

对计算结果采用国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP) 1998年发布的《限制时变电场、磁场和电场磁暴露(300 Hz以下) 导则》(下称《导则》)以及中国国家环保总局制定的《500 kV超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范》(下称《规范》)。

《导则》规定50 Hz工频磁场的公众暴露限制为 $100 \mu\text{T}$,电场的公众暴露限制为 5 kV/m 。《规范》规定“送电线路的测量是以档距中央导线弛垂最大处线路中心为原点,沿垂直于线路方向进行,测点间距为5 m,顺序测至边相导线地面投影点外50 m处止。分别测量离地1.5 m处电场强度垂直分量、磁场强度垂直分量和水平分量”。

研究选取离地高度1.5 m,水平距输电线路50 m以内的空间作为计算空间,计算电磁场分布以及磁感强度和电场强度最大值从而评定其是否符合公众暴露限制标准。再选取离地高度15 m,水平距输电线路50 m以内的空间作为计算空间,计算电磁场分布,用于判断输电线路产生的工频电磁场对周围高楼居民的影响。

2 结果和讨论

2.1 磁场分布

以输电线路几何中心为原点,计算在离地1.5 m和15 m高度处其磁场的水平分布,结果如图5、图6。

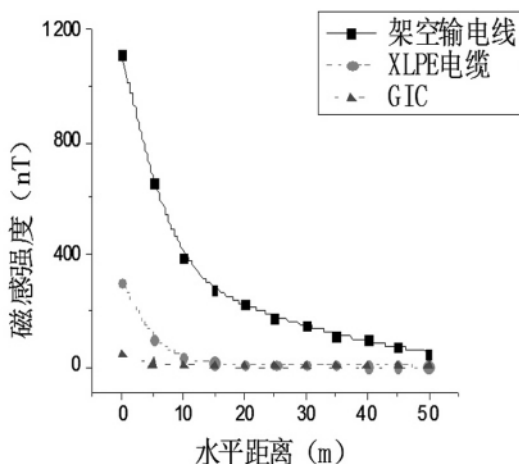


图5 离地1.5 m高处3种输电线路
工频磁场的水平分布

由图5可知,磁感强度随着水平距离的增加而减小。曲线下落速度随水平距离的增加而趋于平缓。

距地1.5 m高处架空输电线、XLPE电缆和GIC的最大磁感强度分别为 $1.11 \mu\text{T}$ 、 $0.30 \mu\text{T}$ 、 $0.04 \mu\text{T}$,远小于ICNIRP规定的公众暴露限制 $100 \mu\text{T}$ 。

XLPE电缆和GIC的磁感强度远小于架空输电线的磁感强度。GIC由于其金属外壳对磁场有较强的屏蔽作用,故其磁场强度最低。XLPE电缆采用了正三角形敷设方式,其三相产生的磁场互相抵消,故其磁感强度也较低。距离电缆越远,这种抵消作用越明显。这种现象在图5表现为其磁感强度曲线从0到10 m处急剧下降,当水平距离大于10 m后,磁感强度小于最大值的1/10。架空输电线由于没有电磁屏蔽措施,其三相导线采用纵向排列,故其磁场最强。

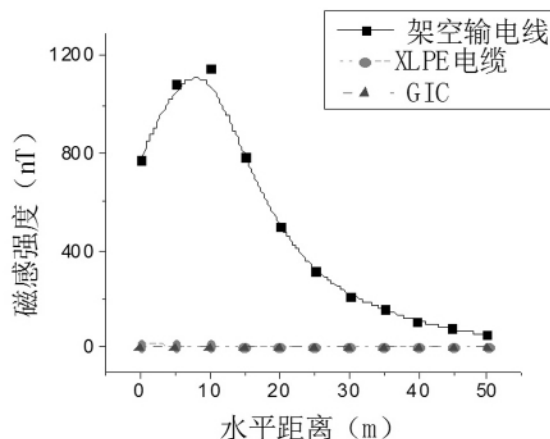


图6 离地15 m高处3种输电线路
工频磁场的水平分布

在离地距离15 m高处,此时相距XLPE电缆和GIC都较远,其磁感强度小于15 nT,可以忽略。主要考虑架空输电线的磁场分布:水平距中点10 m处离架空输电线最下一根导线最近,因而其场强最高,为 $1.154 \mu\text{T}$,仍远小于 $100 \mu\text{T}$ 。当水平距离大于10 m时,磁感强度随着水平距离的增大而降低。距离场源越近,磁感强度的变化越剧烈。

当水平距离大于35 m时,两个高度的磁场强度都小于 $0.2 \mu\text{T}$ 。可认为当居民楼建在距离架空输电线35 m以外的地方,住户不会受到工频磁场影响。

2.2 电场分布

XLPE电缆的皱纹铝护套和GIC金属外壳接地,将电场屏蔽在电缆和GIC内部,故其外部电场强度为零。这里只讨论架空输电线的电场。

图7为220 kV架空输电线工频电场的等位图。由图7可见,靠近导线的区域等位线较密,场强较高。在距地15 m处,位于最低导线下方等位线最密,说明

此处电场最强。在距地 1.5 m 处,位于水平中点等位线最密,说明此处电场强度最强。

以架空输电线几何中心为中点,计算在离地 1.5 m 和 15 m 高度处其电场的水平分布,结果如图 7、图 8。

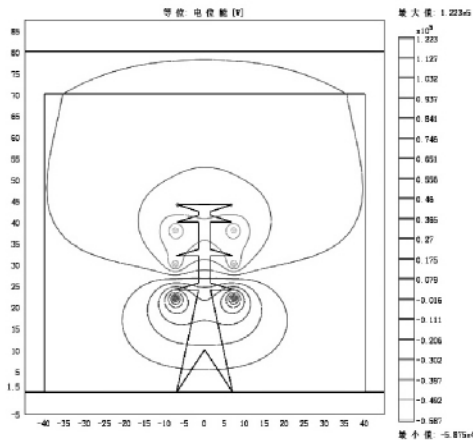


图7 220 kV 架空输电线工频电场等位图

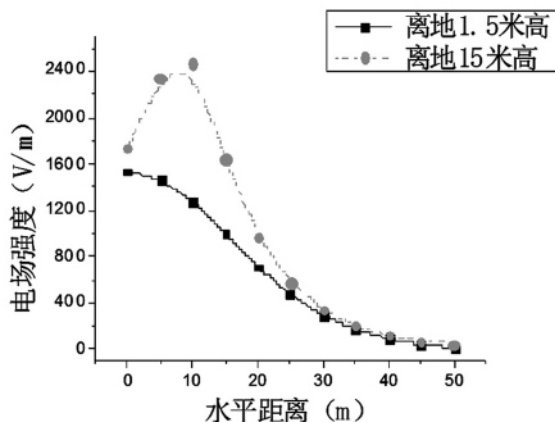


图8 架空输电线工频电场的水平分布

架空输电线产生的工频电场在离地 1.5 m 高处和 15 m 高处电场最大值分别为 1 535 V/m 和 2 468 V/m,均小于 ICN RIP 规定的公众暴露限制 5 000 V/m。

在 15 m 高度水平距中点 10 m 处离架空输电线最下一根导线最近,因而其场强最高,这与电场等位图相符合。当水平距离大于 10 m 时,曲线开始下降,下降速度随水平距离的增加而趋于平缓。

当水平距离大于 50 m 时,两个高度的电场强度均小于 50 V/m,可以认为当 5 层居民楼建在距离架空输电线 50 m 以外的地方,住户不会受到工频电场影响。

3 结 论

1) 在 1.5 m 高度向线路两侧延伸 50 m 空间内,3

种 220 kV GIS 变电站进线方式在输送 180 MVA 容量时产生的工频电磁场最大磁感强度分别为 1.11 μ T、0.30 μ T、0.04 μ T,架空输电线在此空间内最大电场强度为 1.535 kV/m,均小于 ICN RIP 规定的公众暴露限制 100 μ T 和 5 kV/m。XLPE 电缆和 GIC 由于其皱纹铝护套和金属外壳接地将电场屏蔽在电缆和 GIC 内部,故其外部电场强度为零。

2) 输送相同容量时,XLPE 电缆和 GIC 产生的工频磁场强度远小于架空输电线。

3) 在输电线路周围空间中,距离场源越近,电磁场强度越强,其变化也越剧烈。

参考文献

- [1] 许杨, 张小青, 杨大晟. 高压输电线路工频电磁环境[J]. 电力学报, 2007, 22, (1): 9-14.
- [2] 王勤, 杨敬梅, 张欣, 等. 西北 750 kV 输电线路工频电场模拟试验研究[J]. 高电压技术, 2005, 31, (5): 34-36.
- [3] 张愉, 吴锁平, 窦飞, 等. 500 kV 过江电缆空间工频磁场的研究[J]. 华东电力, 2010, 38(6): 881-886.
- [4] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994: 56-62.
- [5] 刘书全. 220 kV XLPE 绝缘电力电缆的设计及试制[J]. 电线电缆, 2000(5): 10-14.
- [6] DL/T 5092-1999, 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程[S].
- [7] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICN RIP). Guidelines For Limiting Exposure To Time-varying Electric, Magnetic, And Electromagnetic Fields (up to 300 GHz) 1998[S].
- [8] HJ/T 24-1998, 500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范[S].
- [9] William B. J. Zimmerman. COMSOL Multiphysics 有限元法多物理场建模与分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [10] 邹澎, 王芳. 高压输电线附近工频电场的数学模型[J]. 中国电力, 1994(6): 20-23.

作者简介:

牟秋谷(1982),男,硕士研究生,高电压与绝缘技术专业;

周 凯(1975),男,博士,副教授,主要从事高电压与绝缘技术方面的研究。

(收稿日期:2011-02-10)

基于变电站 GOOSE 网络的 OPNET 与 NS2 仿真比较

李成鑫¹, 吴成恩², 舒勤²

(1. 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:在网络拓扑参数设置相同的情况下,通过网络仿真软件 OPNET 和 NS2,定量地仿真分析了变电站 GOOSE 网络的网络流量和延迟等特性,得到了一致的仿真结果。分析了 OPNET 和 NS2 在仿真智能变电站通信网络的不足,为以后的电力系统通信网络性能分析系统研究提供借鉴。

关键词:智能变电站; 通信网络; 仿真技术

Abstract: In the state of network topology with the same parameters, by the network simulation software OPNET and NS2, the characteristics such as network traffic and delay of GOOSE network in the substation are quantitatively analyzed, and the consistent simulation results are obtained. Then, the shortcomings of the communication network simulation of smart substation by OPNET and NS2 are analyzed, which provides a reference for the future research of the performance analysis system of power system communication network.

Key words: smart substation; communication network; simulation technology

中图分类号: TM645.2 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)05-0034-04

网络仿真技术是进行网络技术研究的基本手段。在新技术的研究过程中使用实际的网络来研究代价成本太高,于是出现了各种网络仿真分析软件。网络分析技术在最初局域网技术开始发展的时候就已经出现了,其产生是与网络自身的发展息息相关的,并随着网络技术的发展而发展。本课题利用网络仿真软件 OPNET 和 NS2 变电站 GOOSE 网络进行仿真,并进行比较分析。

理论验证。

2) OPNET 采用离散事件驱动的模拟机理,比时间驱动的效率。OPNET 将基于统计的数学建模方法和基于包的的分析方法结合起来,这种混合建模机制既可得到细节的模拟结果,同时也提高了仿真效率。OPNET 可以直接收集常用的各个网络层次的性能统计参数,能够方便地输出仿真报告,具有丰富的统计量收集和分析功能。

1 OPNET 仿真软件

1.1 OPNET 仿真软件的特点

1) OPNET 仿真软件提供了三层建模机制,最底层为 Process 模型,以状态机来描述协议;其次为 Node 模型,由相应的协议模型构成,反映设备特性;最顶层为网络模型。三层模型全面反映了网络的相关特性,与实际的网络、设备、协议层次完全对应;OPNET 本身包含了比较齐全的网络模型库,包括:交换机、路由器、客户机、服务器、DSL、ATM、ISDN 等设备;OPNET 仿真软件能够方便地利用现有的流量数据和网络拓扑建立仿真模型,可以对仿真结果进行

2 NS2 仿真软件介绍

NS2 是一个用 C++ 语言和 TCL 语言编写,NS2 模拟器采用了面向对象的技术。NS2 模拟器支持 C++ 中类的编译层次结构,同时支持 OTCL 解释器中的解释层次结构。

模拟器使用两种语言来解决两种不同类型的事情。一方面,有些协议算法在执行的时候需要快速有效地控制字节和分组头,实现大规模数据的算法。这些协议算法不需要经常修改,只需要以模块形式保存在模拟器中,使用时调用相应的模块就可以了。协议算法的回转时间,包括执行模拟,找出修正错误,重新编译运行等过程所需要的时间相对而言不是那么重要了。C++ 能够快速执行算法,使其适用于具体协

基金项目: 本项目得到四川省科技支撑计划资助(2009CZ0155);四川省电力公司科技项目(09h0913)

议的实现。另一方面,当配置网络可变参数时,配置过程和场景都没有太大的变化,只有少量微小变化;当配置网络的时候,所需要的迭代时间即改变模式并重新运行的时间变得更加重要。因为配置网络只需要设置一次(在模拟开始的时候),C++部分的工作执行时间就不再那么重要了。OTCL执行得比较慢却可以以交互式的方式迅速地变化,使其成为模拟配置的理想对象。

NS2为同时满足了这两种需求使用了C++和OTCL两种语言。NS2通过TCLCL类提供了两种语言的对象和变量的纽带。NS2运行流程:TCL类提供了与解释器访问及通信的方法和接口,并且封装的是OTCL解释器真正的实例。

3 GOOSE网络的特点以及OPNET与NS2仿真的不足

GOOSE报文传输的通信过程与其他网络传输的过程不同^[8],GOOSE网络没有网络层和传输层,直接由应用层到数据链路层,因此没有主流TCP/IP网络的结构和协议复杂。GOOSE网络主要由发布方的GOOSE控制模块(GoCB)进行控制,发布方在发送端缓冲区填入需要发送的信息,接收方在接收端缓冲区读入自己需要的信息。整个过程由发布方的通用变电站事件控制类控制。

GOOSE网络传输的信息是GOOSE报文。GOOSE报文携带变电站IED设备的各种信息,这些信息让接收设备知道状态什么时候需要变位,什么时候需要跳闸,或者自上次状态变位以后的时间等等。接收设备可以设置相对于给定事件的当地计时器,这是根据上次状态变位以后的时间确定的,并产生相应的状态变化。

GOOSE网络中每一个激活的设备将发送当前数据(状态),这些激活设备包括合上电源和重新服务的IED设备,发送的当前数据状态被当作初始值的GOOSE报文。当状态没有发生变化时,发送GOOSE报文的周期较长,一般为5s左右,并且发送连续,当状态发生变化时,设备会以指数递增的方式,快速地发送GOOSE报文,指数增长的周期初始值一般为2ms;之后会以指数递减的方式,逐渐减慢发送报文的周期。

网络仿真软件OPNET和NS2有以下不同。①OPNET与NS2有免费和付费之分,NS2相比于OPNET最大的优势是免费的自由软件,因此NS2的普

及度较高。②OPNET的界面友好,功能强大,操作方便,只需对节点的属性进行修改就可以设置网络;但OPNET修改节点时不如NS2方便,需要多层编程建模。③NS2虽然功能强大,但用户有时不能仅仅通过NS2使用手册学习,还需要通过查看源代码了解,并自己编写脚本。由于NS2没有现成的节点框架,需要用C++编写想要的节点,操作上不是很方便。

结合变电站GOOSE通信网络的特点,通过OPNET与NS2仿真其网络,都存在如下不足,包括:①因为其所提供的模型库是有限的,现有的OPNET和NS2都没有GOOSE中的节点模型库。OPNET与NS2软件对某些特殊网络设备的建模必须依靠节点和过程层次的编程方能实现。②OPNET和NS2这些网络仿真软件提供的参数是标准规定的,往往和用户的需要不一致,同时现有的变电站IED提供商提供的网络协议模型与标准存在差异,所以当要使用某些特殊参数时,必须通过编程来实现。对于GOOSE网络的仿真,需要涉及底层编程,需要对协议及网络仿真软件复杂的建模机理掌握十分透彻。③OPNET的编程需要建立在其本身的仿真平台上,这是OPNET的一个局限性。

4 OPNET与NS2仿真比较分析

根据变电站通信网络的特点,设置NS2和OPNET仿真的拓扑结构如图1和图2所示。在变电站GOOSE网络中,数据包大小一般为400字节左右大小,发包的速率在一般为300~500kb。由于变电站

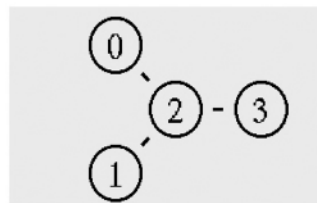


图1 NS2仿真拓扑图

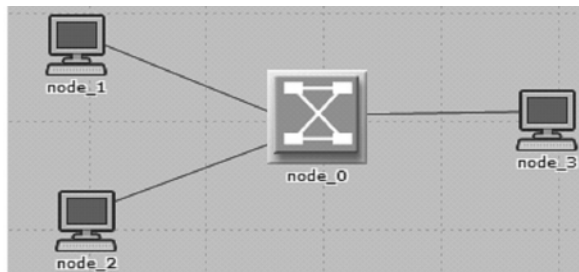


图2 OPNET仿真拓扑图

通信网络不是恒定的,有很多突发的情况,因此仿真参数采用相似的设置。

4.1 网络流量对比分析

(1) 在 OPNET 仿真中,设置的包产生速率是 400 kb,包大小为 500 字节,包格式为 uniform_int,此格式对应 NS2 应用中的 CBR。此时,每秒产生的包数目为 100 个,包间隔时间为 0.01 s,仿真时间设为 100 s,下图为 OPNET 仿真后得到的流量图。其中图 3 表示通过求时间平均之后流量图,图 4 表示的是瞬时的网络流量图。然后设置基于指数分布的包格式,图 5 和 6 分别表示指数分布时的平均网络流量和瞬时网络流量。

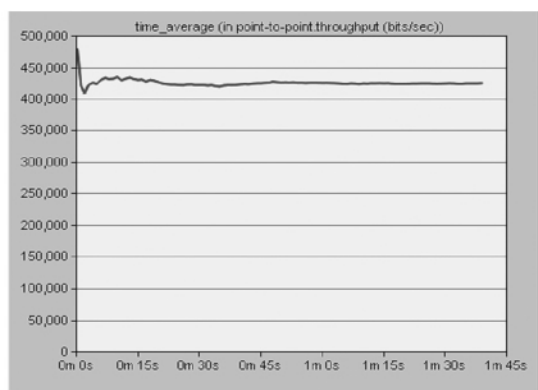


图3 OPNET uniform 时间平均流量图

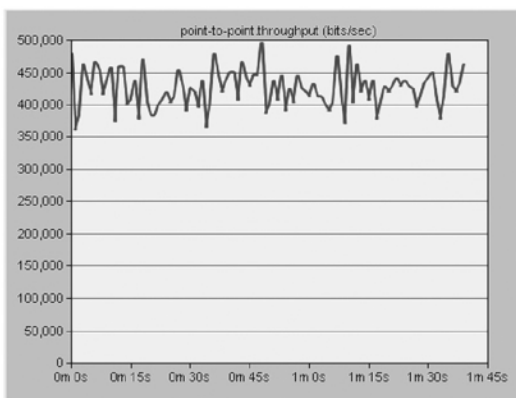


图4 OPNET uniform 时间瞬时流量图

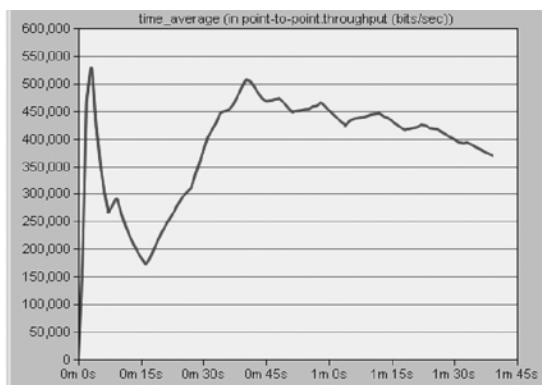


图5 OPNET 指数分布时间平均流量图

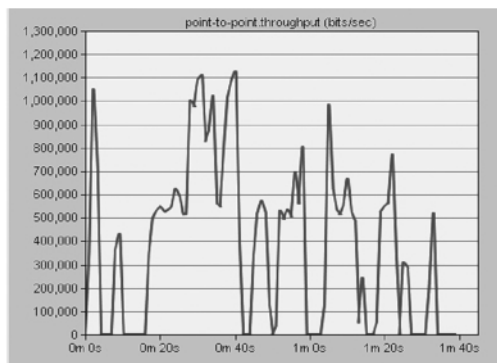


图6 OPNET 指数分布时间瞬时流量图

图 7 表示 NS2 仿真时固定比特率平均流量图,图 8 表 NS2 仿真时的指数分布比特率平均网络流量图,由于 NS2 中只取了其中时间平均流量,故只有两个仿真结果图。

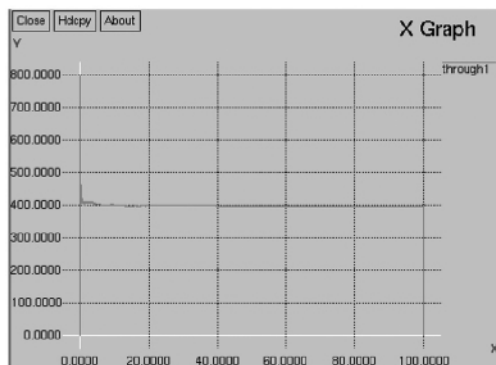


图7 NS2 CBR 平均流量图

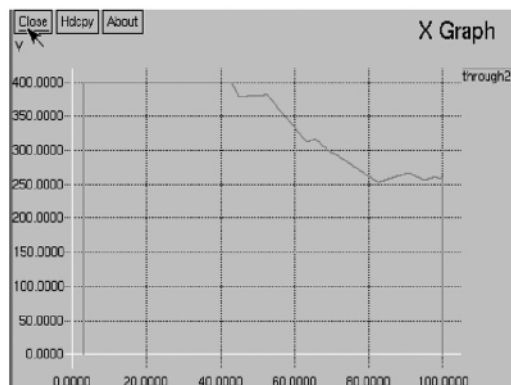


图8 NS2 指数分布平均流量图

由以上两幅图可以看出,OPNET 仿真算法和结果更接近真实网络流量,例如指数分布,NS2 也提供了 4 种流量发生器,NS2 中流量发生器产生包比较单一,不能仿真现行的数字化变电站中的 GOOSE 报文,需要自行添加协议模块和包。OPNET 在仿真网络流量时,各种网络流量可以任意选择。其中,OPNET 中提供了 ON/OFF 的建模机制,它比较逼近真实的网络业务,并作为一种数学上的分析模型。在

OPNET 中,还可以配置一般应用模型,这些模型已经被模块化到特殊物件拼盘(utilities)中,可以随时使用,作为图形化得界面使用十分方便,这点现行 NS2 无法做到。

4.2 网络延迟对比分析

在比较 OPNET 和 NS2 仿真局域网网络延迟时,由于 NS2 中没有交换机,只能设置为总线型局域网,而 OPNET 通过交换机设置局域网。在 OPNET 中,设置链路的长度为 100 m,链路延迟设为 0.002 s,仿真时间设为 100 s。图 9 表示的是瞬时的网络延迟,从图中可以看出,网络延迟略大于 0.002 s,为 0.0022 s 左右;其中的 0.002 s 为链路延迟,多出的 0.0002 s 为交换机处理延迟,符合实际网络中的情况。

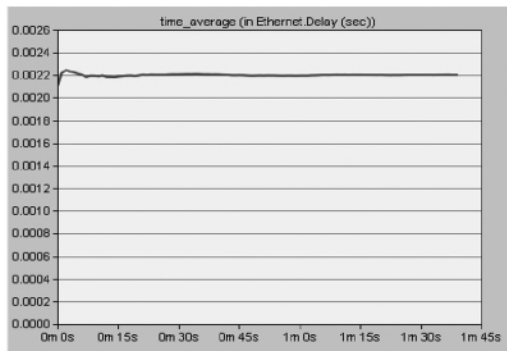


图 9 OPNET 时间瞬时延迟图

图 10 为设置同样的参数,通过网络仿真软件 NS2 仿真后,得到的网络延迟图。从图中可以看出,网络延迟的大小同样为 0.0022 s 左右。其中,0.0002 s 是网络链路延迟,是在仿真时自行设立的,同样,0.0002 s 是交换机处理延迟,同样符合真实网络情况。

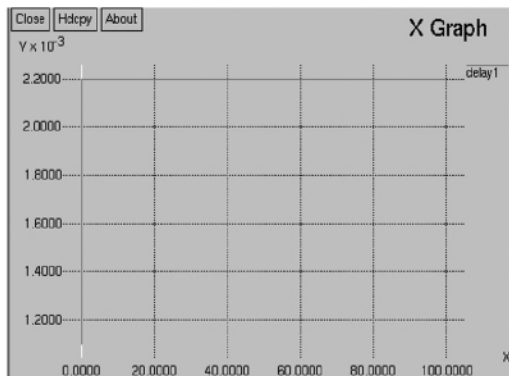


图 10 NS2 时间平均延迟图

通过以上 OPNET 和 NS2 仿真软件,对同样拓扑网络的仿真比较。得出 OPNET 和 NS2 仿真同样的网络拓扑,设置相同的链路延迟的时候,得到的网络延迟是相同的。不同的是,当仿真的时候,OPNET 的交换机延迟是通过交换机设置参数得到的,在 OP-

NET 中,除了可以设置交换机处理延迟外,还可以通过交换机和发送节点设置发送延迟和排队延迟,同时,OPNET 可以通过设置,同时显示时间平均延迟和瞬时延迟,给仿真带来了方便,这在 NS2 中是不能做到的,需要重新编写分析程序才能得到;在 NS2 中,由于没有交换机装置,通过网络节点代替交换机,设置的参数也是通过网络节点设置的,当设置交换机处理延迟时候,是通过设置链路带宽得到的交换机处理延迟,这与仿真不相符,于是,需要给 NS2 增加交换机模块,同时可以设置交换机的处理延迟等。

5 结 语

综上所述通过 NS2 和 OPNET 仿真对比分析,由于 OPNET 结合了众多厂家的设备和参数,OPNET 内部仿真算法比较接近网络真实情况,且界面上十分工整,修改属性和搭建网络过程比较简单。而 NS2 由于源代码公开,内部算法和逻辑节点可以自行修改。由于 NS2 和 OPNET 都没有现成的处理基于 IEC 61850 协议的智能变电站 GOOSE 网络模块,故都不能直接用于变电站通信网络的仿真。课题采用修改 NS2 源代码实现数字化变电站通信网络内部算法和逻辑结构,采用了 OPNET 相似的界面设计。这是后期的研究方向。

参考文献

- [1] 徐雷鸣,庞博,赵耀. NS 与网络模拟 [M]. 北京:人民邮电出版社,2003.
- [2] 杨路明,李谢华. 网络仿真软件比较分析及仿真过程探讨 [J]. 2002,21(4):65-70.
- [3] 雷擎,王行刚. 计算机网络模拟方法与工具 [J]. 通信学报,2001(9):84-90.
- [4] ReTurner, D 等. NS2 中文手册.
- [5] Introduction to Modeler [J]. OPNET Simulation Technology,2000.
- [6] 陈敏. OPNET 网络仿真 [M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [7] Tor Skeie, Svein Johannessen, Christoph Brunner. Ethernet in substation [J]. 2002 IEEE, 2002:43-51.
- [8] IEC 61850-7. Communication Networks and Systems in Substations Part 7: Basic Communication Structure for Substations and Feeder Equipment [S]. FDIS,2003.

(收稿日期:2011-08-30)

电力中长期负荷模糊优选组合预测方法的研究

何焱¹, 黄静²

(1. 西南电力设计院, 四川 成都 610021; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:传统中长期电力负荷组合预测方法在确定权系数时,由于没能充分考虑各单一预测模型拟合值与历史实际值之间的多种误差信息,而使预测结果不够理想。为此,选取多种误差作为评价单一模型优劣的指标,引入多目标系统模糊优选理论,结合熵权法客观分配各种误差指标的权重,在全面考虑多种误差信息的情况下,通过求取各单一模型预测精度对“优”的隶属度,确定组合预测模型的权系数。算例分析表明,该组合预测模型能够有效地提高预测精度。

关键词:中长期负荷; 组合预测; 多误差指标; 熵权法; 模糊优选

Abstract: Because the forecasting results and multiple estimation errors for single forecasting methods have not been considered deeply in traditional combination forecasting methods of middle and long term power load, the forecasting results can not meet the requirements. Therefore, multiple errors are used to be the measuring index for single forecasting method and the multiple objectives fuzzy optimization theory is introduced to determine the combination method. The entropy weight method is used to distribute the weights of errors. One power system is used to validate the proposed method. The forecasting results and the comparison with the existing methods show that this method is more precise and more effective.

Key words: middle and long term load; combination forecasting; multiple error index; entropy weight method; fuzzy optimization

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0038-05

0 引言

中长期负荷预测是电力系统规划、企业经营决策的基础,预测结果的准确性对电网投资与建设、社会经济和人民生产、生活等有重要影响^[1,2]。由于中长期负荷预测涉及的时间长,影响因素复杂,很多影响因素可获得的样本少,变化规律和对负荷的影响规律复杂,尤其对于经济持续、快速发展的中国,准确预测中长期负荷困难,因此,中长期负荷预测始终是电力企业和学者们关心和研究的重要课题。

现有预测方法总体上可分为单一预测法和综合预测法两大类。其中,单一预测法主要有:单耗法、趋势外推法、弹性系数法、回归分析法、模糊预测法、灰色模型法、人工神经网络法、专家系统法等^[3-9]。各种单一预测法都是对实际负荷系统的简化和抽象,分别从不同角度对负荷系统进行模拟,但其变量和参数均有一定的局限性。组合预测法通过对单一预测值进行加权综合得到预测值,能综合单一方法的优点,是中长期负荷预测的研究热点^[10-18]。但是,现有组

合预测模型在确定优组合权系数时,目标准则大多仅考虑了对某单一误差指标的改善,综合结果精度提高水平仅相对于给定的误差指标,而各种预测方法的预测值与真实值之间的误差中包含着预测方法的诸多信息,仅对某个误差指标进行考虑是不够的。

为了反映不同的误差指标对组合权重的影响,文献[3]提出利用熵权法构建多误差指标评价体系,使得组合预测的精度得到一定的提高。在前人的基础上,引入多目标系统模糊优选理论,将组合预测视为一个多目标决策问题,运用熵权法计算各误差评价指标的相对权重,在综合考虑各误差指标的情况下分析各单一模型拟合精度的优劣,根据其对概念“优”的隶属度确定其在组合预测中的权系数。仿真结果表明,该模型能够有效地提高预测精度,具有较好的预测效果。

1 组合预测模型与误差分析

设组合预测由 m 个单一预测模型组成,记 $(i = 1, 2, \dots, m; t = 1, 2, \dots, n)$ 表示第 i 种预测方法在

t 时刻的预测值, 则 m 中预测方法的组合预测值为

$$\hat{y}_t = \sum_{i=1}^m w_i \hat{y}_{it} \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

且 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$, 其中 w_i 是第 i 种预测方法的权系数。组合预测面临的主要问题就是预测权系数的确定, 其决定了单一模型在组合预测中的地位或比重。

实际上, 每种预测方法的预测值和真实值之间的误差本身就包含着该预测方法的诸多信息, 而取不同的预测误差, 其所反映预测方法的信息是不同的^[3]。如以误差平方最小为寻优目标, 当原始数据中存在奇异点时, 其残差值会被放大, 进而奇异点对可信度的影响也被放大, 而这时若以误差绝对值之和最小为寻优目标, 则不存在这种缩放影响^[4]。

为了全面研究各个单一预测方法及组合预测的预测效果, 须制定一套切实可行的误差指标, 按照预测效果评价原则和惯例, 这里选取如下评价指标作为参考^[9]。

(1) 平均绝对误差: 由于预测误差有正有负, 为了避免正负相抵消, 故取误差的绝对值进行综合并计算其平均数, 这是误差分析的综合指标法之一。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t| \quad (2)$$

式中, y_t 为实际值; $\hat{y}_t$ 为预测值。以下同。

(2) 平方和误差: 平方和误差是预测误差的平方之和, 它避免了正负误差不能相加的问题, 是误差分析的综合指标法之一。

$$SSE = \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2 \quad (3)$$

(3) 均方误差

$$MSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad (4)$$

(4) 平均绝对百分比误差

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|y_t - \hat{y}_t|}{|y_t|} \quad (5)$$

(5) 均方百分比误差

$$MSPE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{t=1}^n \left(\frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right)^2} \quad (5)$$

2 熵权法的基本原理

熵的概念源于热力学, 后被香农引入信息论。熵权法是一种依据各指标所包含的信息量的大小来确

定其权重的客观赋权法^[3,14]。按照信息论基本原理的解释, 信息是系统有序程度的一个度量, 熵是系统无序程度的一个度量; 如果指标的信息熵越小, 该指标提供的信息量越大, 在综合评价中所起作用理当越大, 权重就应该越高。

在组合预测中, 需要全面考虑 SSE、MAE、MSE、MAPE、MSPE 五种误差指标的相对权重, 可以根据各单一模型预测结果的实际数据来确定各指标所包含的信息, 并运用熵权法根据模型评价指标所包含信息量的大小确定其权重。

系统可能处于几种不同状态, 若每种状态出现的概率为 P_i ($i = 1, 2, \dots, m$), 则该系统的熵定义为

$$E = -k \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i \quad (7)$$

设组合模型中有 m 种单一预测方法、 n 个评价指标, 形成的原始指标数据矩阵为

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad (8)$$

式中, r_{ij} 为第 i 种预测方法在第 j 个指标下的值, $1 \leq i \leq m$; $1 \leq j \leq n$ 。

熵权法的计算步骤如下。

1) 由于各个指标的量纲不一致, 所以首先对原始指标数据矩阵都归一化, 即对原始指标数据矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 用线性比例变化作标准化处理, 得到标准化矩阵。

$$R' = (r'_{ij})_{m \times n} \quad (9)$$

所指的误差指标为逆指标, 即指标数据越小越好, 其标准化公式为

$$r'_{ij} = \min_j r_{ij} / r_{ij} \quad (10)$$

式中, $1 \leq i \leq m$, $1 \leq j \leq n$ 。

2) 计算第 j 个指标下第 i 个方案的指标值占全部方案取值之和的比重 P_{ij} 。

$$P_{ij} = r'_{ij} / \sum_{i=1}^m r'_{ij} \quad (11)$$

式中, $1 \leq i \leq m$, $1 \leq j \leq n$ 。

3) 计算第 j 个指标的熵值。

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (12)$$

式中取 $k = 1 / \ln m$, 则有 $0 \leq E_j \leq 1$ 。

4) 计算第 j 个指标的差异系数。

$$h_j = 1 - E_j \quad (13)$$

式中, $1 \leq j \leq n$ 。

5) 利用熵权法对指标赋值, 得到第 j 个指标的权

重,即

$$w_j = h_j / \sum_{j=1}^n h_j \quad (14)$$

式中, $1 \leq j \leq n$ 。

3 多目标系统模糊优选理论与模型

决策的优劣,在优选识别过程中并不存在绝对分明的界限,具有中介过渡性,属于模糊概念^[20,21]。多目标系统模糊优选理论是利用工程模糊集理论中的相关概念,分别求出各子目标相对于优的隶属度和决策相对于优的隶属度,进而对决策的优劣进行识别,已在各个领域得到了广泛的应用^[22-24]。

设多目标决策系统有满足约束条件可供优选的 n 个决策,有 m 个评价因素或指标组成对该决策集的评价指标集。每一个评价指标对 n 个决策的评价可用指标特征量表示,则有指标特征量矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} = (x_{ij}) \quad (15)$$

式中, x_{ij} 为第 j 个取值方案的第 i 个评价因素的指标特征量, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ 。

根据模糊集理论中的相对隶属度概念,由指标特征量矩阵求取各子目标的相对优属度矩阵。所谓相对优属度即是决策目标相对于优的隶属度,在优选与决策过程中,取决策集中目标的最大最小特征值作为上、下确界的相对值,构成参考极限的 2 个极值,避免绝对隶属度的主观任意性,体现了相对优的客观性。

$$\text{对越大越优型目标: } r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (16)$$

$$\text{对越小越优型目标: } r_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (17)$$

从而得到指标优属度矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{ij}) \quad (18)$$

根据优选的相对性,可由式(18)建立标准优等决策,作为优选比较的相对标准。优等决策 m 个指标的隶属度应是全体方案相应指标隶属度的最大值。于是以向量表示的优等决策表达式为

$$\vec{G} = (r_{11} \vee r_{12} \vee \cdots \vee r_{1n}, r_{21} \vee r_{22} \vee \cdots \vee r_{2n}, \cdots, r_{s1} \vee r_{s2} \vee \cdots \vee r_{sn})^T = (g_1, g_2, \cdots, g_s)^T \quad (19)$$

按照类似的考虑,劣等决策 m 个指标的隶属度应是全体决策相应指标隶属度的最小值。则劣等方案的表达式为

$$\vec{B} = (r_{11} \wedge r_{12} \wedge \cdots \wedge r_{1n}, r_{21} \wedge r_{22} \wedge \cdots \wedge r_{2n}, \cdots, r_{s1} \wedge r_{s2} \wedge \cdots \wedge r_{sn})^T = (b_1, b_2, \cdots, b_s)^T \quad (20)$$

式中, $\vee, \wedge$ 为取大、取小运算符。

第 j 个决策可用向量式表示为

$$\vec{R} = (r_{1j}, r_{2j}, \cdots, r_{sj})^T \quad (21)$$

于是第 j 个决策与优等取值决策的广义加权欧式距离为

$$\|\vec{W}(\vec{G}_j - \vec{B})\| = \sqrt{\sum_{i=1}^m [W_i(g_i - r_{ij})]^2} \quad (22)$$

与劣等决策的广义加权欧式距离。

$$\|\vec{W}(\vec{R}_j - \vec{B})\| = \sqrt{\sum_{i=1}^m [W_i(r_{ij} - b_i)]^2} \quad (23)$$

式(22)、式(23)中 W_i 为第 i 项指标在指标集中的权重。

建立如下最优准则:全体决策的权距优距离平方与权距次距离平方之总和为最小,即目标函数为

$$\min\{F(\mu_j) = \sum_{j=2}^n [\mu_j \|\vec{W}(\vec{G} - \vec{R}_j)\|]^2 + [(1 + \mu_j) \|\vec{W}(\vec{R}_j - \vec{B})\|]^2]\} \quad (24)$$

求目标函数式(24)的导数,且令导数为零,则得

$$\mu_j = \frac{1}{1 + \frac{\|\vec{W}(\vec{G} - \vec{R}_j)\|^2}{\|\vec{W}(\vec{R}_j - \vec{B})\|^2}} \quad (25)$$

μ_j 为第 j 个决策对概念“优”的隶属度。

由式(25)可知,若决策 j 的距优距离小于距劣距离,即

$\|\vec{W}(\vec{G} - \vec{R}_j)\| < \|\vec{W}(\vec{R}_j - \vec{B})\|$, 则其相对于优的隶属度 $\mu_j > 0.5$, 隶属于劣的相对隶属度 $\mu_j^c < 0.5$ 。

若决策 j 的距优距离大于距劣距离,即

$\|\vec{W}(\vec{G} - \vec{R}_j)\| > \|\vec{W}(\vec{R}_j - \vec{B})\|$, 则其相对于优的隶属度 $\mu_j < 0.5$, 隶属于劣的相对隶属度 $\mu_j^c > 0.5$ 。

4 基于模糊优选理论的中长期负荷组合预测模型及基本步骤

组合预测中,在对未来未知的情况下,各单一模型的权重系数可根据其对历史数据拟合的精度来确定,拟合精度高的权重系数大,拟合精度低的权重系数小。

然而,各种单一模型拟合精度的高与低,即其预测的优与次这一对立的观念,在划分过程中并不存在绝对分明的界限,它具有中介过渡性,是客观存在着的模糊概念。将组合预测视为一个多目标决策问题,选取能够全面评价各单一模型预测效果的多种误差指标作为优选理论的子目标,用熵权法确定各子目标的相对权重,计算各单一模型对模糊概念“优”的隶属度,进而得出其在组合预测中的权系数。其具体的计算步骤如下。

1) 单一模型的选择,并对历史值进行分析,选择合适的时间段进行预测。

2) 根据历史实际值和各单一模型对历史数据的拟合值得到5个误差指标下的指标特征量矩阵 $X = (x_{ij})$, x_{ij} 为第 j 个单一模型的第 i 个误差指标的指标特征量。

3) 将指标特征量矩阵转换为指标优隶属度矩阵 $R = (r_{ij})$ 。误差指标量 x_{ij} 是越小越优型指标,其相对隶属度公式为

$$r_{ij} = \frac{x_{imax} - x_{ij}}{x_{imax} - x_{imin}} \quad (26)$$

式(26)的含义是:对 n 个单一预测模型集,第 i 个误差指标最小值,其指标隶属度为1;第 i 个指标误差最大值,其指标隶属度为0;介于两者之间的指标值,相应的指标隶属度介于区间(0,1)之间。

4) 用熵权法计算各指标的权向量 $W(i)$ 。

5) 求取各单一模型对“优”的隶属度 μ_j 。

6) 根据隶属度集 $\mu = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_j]$, 确定各单一模型的权系数 w_i 。

$$w_i = \frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^j \mu_j} \quad (27)$$

7) 完成预测年的预测,并对预测结果进行分析,预测结束。

通过上述分析过程,基于模糊优选理论的中长期负荷组合预测方法的总体流程图如图1所示。

5 算例分析

5.1 原始数据

为了验证所提出的中长期电力组合预测方法的正确性,以某电网为例,并进行对比。

选用的3种单一预测模型分别为:线性回归模型(linear regression, LR)、灰色预测模型(GM(1,1))、

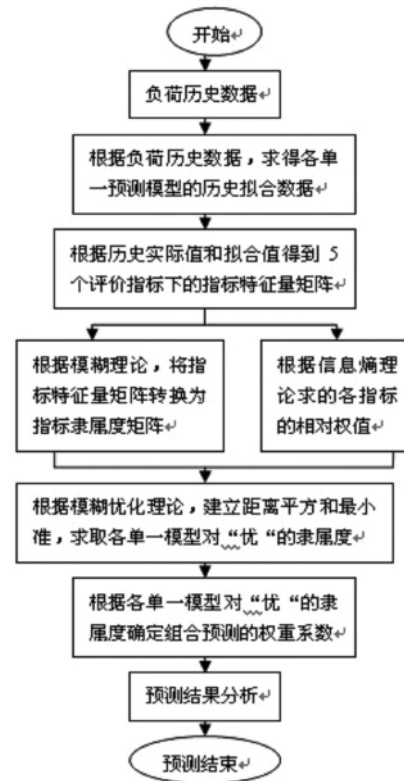


图1 基于模糊优选的中长期负荷组合预测流程图

正交信息修正偏最小二乘回归预测模型(orthogonal signal correction and partial least square, OSC-PLS)。

5.2 各单项预测模型和组合预测模型拟合效果

运用1999—2010年的数据作为建立预测模型所需数据,对该系统2011—2013年的年用电量进行预测,历史实际值和各单一模型历史拟合值见表1。

表1 该系统1990—2001年用电量历史值和各单一模型拟合值

年份	实际值 /GWh	LR/GWh	GM(1,1) /GWh	OSC-PLS /GWh
1999	1698.35	1830.42	1698.35	1755.663
2000	1883.65	1907.78	1969.62	1890.657
2001	2080.10	2014.40	2097.17	2026.738
2002	2284.39	2158.85	2232.98	2207.254
2003	2585.89	2353.17	2377.59	2417.613
2004	2585.89	2611.44	2531.56	2645.072
2005	2821.38	2743.95	2695.50	2764.141
2006	2838.18	2891.32	2870.06	2878.025
2007	3040.62	3054.74	3055.92	3027.847
2008	3077.72	3234.68	3253.82	3175.695
2009	3446.25	3430.53	3464.54	3363.538
2010	3788.16	3712.26	3688.90	3791.316

以表1中的数据为基础,采用所提出的组合预测方法对年用电量进行组合预测,同时采用等权平均组合预测方法(equal weight, EW)、方差-协方差组合优选预测方法(variance-covariance, MV)以及基于

信息熵(Entropy)的组合预测法进行对比。各组合预测方法拟合结果如表2所示

表2 各组合预测模型1990—2001年历史拟合值

年份	EW /GWh	MV(1,1) /GWh	Entropy /GWh	文中 /GWh
1999	1 759.71	1 755.97	1 761.28	1 746.67
2000	1 920.76	1 918.55	1 922.79	1 903.04
2001	2 044.05	2 046.44	2 046.23	2 037.79
2002	2 197.49	2 207.13	2 199.80	2 211.29
2003	2 380.40	2 395.69	2 382.81	2 411.33
2004	2 593.42	2 608.52	2 595.87	2 627.26
2005	2 731.79	2 743.23	2 734.44	2 753.37
2006	2 876.92	2 881.28	2 879.77	2 876.77
2007	3 043.12	3 044.28	3 046.17	3 032.25
2008	3 218.17	3 213.01	3 221.45	3 187.95
2009	3 416.11	3 409.18	3 419.61	3 379.38
2010	3 727.09	3 750.00	3 730.76	3 775.24

根据表2可绘制各组合预测模型的拟合效果图,如图2所示。

图2中的数据点表示各组合预测方法在拟合年份的平均绝对误差百分比。由图2和表2可以看出,所提出的组合预测模型拟合效果明显优于其余3种传统组合预测模型,能较好地模拟负荷的发展变化。

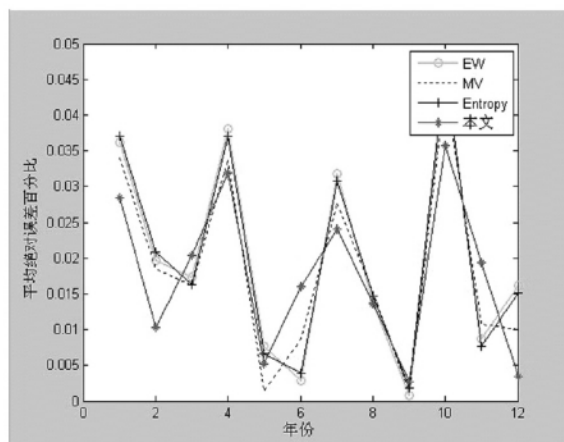


图2 各组合预测模型拟合效果图

5.3 预测效果分析

各单一预测方法对2011—2013年的预测值如表3所示。

表3 2011—2013年各单一预测方法预测结果

年份	实际值 /GWh	LR /GWh	GM(1,1) /GWh	OSC-PLS /GWh
2011	4 151.65	3 042.902	3 927.786	4 577.386
2012	4 818.41	3 689.413	4 182.146	4 763.683
2013	5 441.20	4 590.283	4 452.978	5 331.702

以表3数据为基础,EW、MV、Entropy以及所提

组合预测方法预测结果如表4。

表4 2011—2013年各组合方法模型预测结果

年份	EW /GWh	MV /GWh	Entropy /GWh	文中 /GWh
2011	3 845.5	4 089.2	3 850.3	4 475.4
2012	4 207.5	4 387.2	4 212.2	4 672.4
2013	4 786.8	4 937.4	4 791.1	5 193.8

由表4可知,其组合预测方法与实际值最为接近。现以MAE、SSE、MSE、MAPE、MSPE为评价指标对各模型的预测结果进行分析,如表5。

表5 各组合预测模型误差

	EW /GWh	MV /GWh	Entropy /GWh	文中 /GWh
MAE	523.78	332.42	519.18	239.05
SSE	89 8044.69	443 545.85	880 804.20	187 355.73
MSE	315.36	221.99	312.84	144.28
MAPE	0.106 9	0.065 7	0.106	0.051 3
MSPE	0.063 2	0.043 2	0.062 7	0.031 7

结果表明,相比于传统组合预测模型,所提的组合预测理论能显著减小预测误差,预测精度更高。

6 结论

提出了一种基于模糊优选理论的中长期电力负荷组合预测方法。选取MAE、SSE、MSE、MAPE、MSPE作为评价指标,运用多目标系统模糊优选理论对各单一模型的预测优、劣进行识别,根据各单一模型对“优”的隶属度确定其在组合预测中的权重。该方法充分考虑到了预测值和历史值之间的各种误差指标信息,从而弥补了用单一模型进行预测和单指标方法进行评价的不足。算例分析结果表明,所提出的方法能有效地提高电网中长期负荷总量预测的精度。

参考文献

- [1] 牛东晓,曹树华,赵磊,等. 电力负荷预测技术及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社,2009.
- [2] 康重庆,夏清,刘梅. 电力系统负荷预测[M]. 北京: 中国电力出版社,2007.
- [3] 康重庆,夏清,张伯明. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨[J]. 电力系统自动化,2004,28(17): 1-9.
- [4] 张友泉. 一种基于灰色系统理论的中长期电量预测模型[J]. 电网技术,1999,23(8): 47-50.
- [5] 王文圣,丁晶,赵玉龙,等. 基于偏最小二乘回归的年用电量预测研究[J]. 中国电机工程学报,2003,18(2): 17-21.

(下转第53页)

整方向,迅速改进和转变,以满足电网各种运行工况的需求,此外,电网在规划设计方面也需要进行综合考虑,开展电磁环网解环研究、电源分区消纳研究、电源接入地方式研究,750 ~ 220 kV 电压控制专题研究等,建设坚强的各级电网,各级电网统一协调统筹发展,为电网运行提供坚强的物理保障。

作者简介:

常喜强(1976),男,硕士,高级工程师,从事电力系统安全稳定运行控制工作;

孙谊端(1974),女,硕士,高级工程师,从事电力系统安全稳定运行控制工作。

(收稿日期:2011-07-10)

(上接第25页)

- [5] 于继来,汤奕. 交流支路和节点的联合电气剖分 [J]. 中国电机工程学报,2007,27(16):37-42.
- [6] 王锡凡. 电网可靠性评估的随机网流模型 [J]. 电力系统自动化,2006,30(12):1-6,22.
- [7] 汤奕,于继来. 一种新的输电线路阻塞责任定量分析方法 [J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(4):98-103.
- [8] 汤奕,于继来,周苏荃. 电力网络源流路径电气剖分算法 [J]. 2006,30(22):28-33.

- [9] Baoding Liu, Uncertainty Theory [M]. Beijing: Uncertainty Theory Laboratory, 2010, <http://orsc.edu.cn/liu>.
- [20] 管霖,郑传材. 线路 $N-K$ 停运机理及其概率模型 [J]. 电力系统自动化学报,2009,21(4):115-119.
- [21] 宋毅,王成山. 双重故障模式下基于证据理论和功能组分解的 $N-K$ 事故辨识方法 [J]. 中国电机工程学报,2008,28(28):47-53.
- [22] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难 [J]. 电力系统自动化,2003,27(18):1-5.

(收稿日期:2011-04-10)

(上接第42页)

- [6] Kandil M S, El-Debeiky S M, Hasanien N E. Long-term Load Forecasting for Fast Developing Utility Using a Knowledge-based Expert System [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2):491-496.
- [7] 张民,鲍海,晏玲. 基于卡尔曼滤波的短期负荷预测方法的研究 [J]. 电网技术,2003,27(10):39-42.
- [8] 陈泽淮,张尧,武志刚. RBF神经网络在中长期负荷预测中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报,2006,18(1):15-19.
- [9] 钱卫华,姚建刚,龙立波,等. 基于短期相关性和负荷增长的中长期负荷预测 [J]. 电力系统自动化,2007,31(11):59-64.
- [10] 谢敬东,唐国庆,徐高飞,等. 组合预测方法在电力负荷预测中的应用 [J]. 中国电力,1998,31(6):3-5.
- [11] 吉培荣,张玉文,赵青. 组合预测方法在电力系统负荷预测中的应用 [J]. 三峡大学学报,2005,27(5):398-400.
- [12] 牛东晓,陈志业,邢棉,等. 具有二重趋势性的季节型电力负荷预测组合优化灰色神经网络模型 [J]. 中国电机工程学报,2002,22(1):29-32.
- [13] 李金超,牛东晓,李金颖,等. 基于熵权的中长期电力负荷组合预测 [J]. 华东电力,2005,33(8):27-29.
- [14] 李春生,王耀南. 基于条件熵的电力负荷组合预测模型 [J]. 电力系统及其自动化学报,2007,19(4):55-58.
- [15] 肖先勇,葛嘉,何德胜. 基于支持向量机的中长期电力负荷组合预测 [J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(1):84-88.

- [6] 丁巧林,潘学华,杨薛明. 最优组合预测方法在电力负荷预测中的应用 [J]. 电网技术,2008,32(增刊1):127-130.
- [7] 苗增强,武宏波,李婷,等. 基于最小一乘法的组合赋权法在中长期负荷预测中的应用 [J]. 电力系统保护与控制,2009,37(2):28-32.
- [8] 周凇,任海军,李健,等. 层次结构下的中长期电力负荷变权组合预测方法 [J]. 2010,30(6):47-52.
- [9] 孙见荆. 组合预测参数估计方法研究 [J]. 预测,1996,15(6):54-56.
- [20] 陈守煜. 系统模糊决策理论与应用 [M]. 大连:大连理工大学,1994.
- [21] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用 [M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [22] 陈守煜,赵瑛琪. 模糊优选(优化)理论与模型 [J]. 应用数学,1993,6(1):1-6.
- [23] 康海贵,刘艳,孙敏. 施工方案评价中的多级模糊优化及非结构性模糊决策分析 [J]. 四川建筑科学研究,2007,33(6):228-231.
- [24] 杨实俊,刘健夫. 模糊优选考核方法在企业人力资源管理中的应用 [J]. 华北电力大学学报,2007,34(4):110-112.
- [25] 王世儒,雷伟丽. 基于模糊数学的多级泵站老化评价 [J]. 甘肃水利水电技术,2009,45(1):22-23.
- [26] 李海龙. 基于熵权的多级模糊优选模型在软基处理中的应用 [J]. 西部探矿工程,2009(4):50-53.
- [27] 毛李帆,姚建刚,金永顺. 中长期电力组合预测模型的理论研究 [J]. 中国电机工程学报,2010,30(16):53-59.

(收稿日期:2011-04-28)

地区电网中环网短时合环操作分析研究

杨桂兴¹, 王维庆¹, 王 晟², 熊 波³, 王 堃⁴

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008; 2. 新疆克拉玛依电力调度所, 新疆 克拉玛依 834000;
3. 乌鲁木齐电业局, 新疆 乌鲁木齐 830011; 4. 奎屯电业局, 新疆 奎屯 833200)

摘 要:针对地区电网中存在的双电源或多电源供电网络结构, 分区供电方式下, 负荷转移过程中产生的电磁环网现象, 分析了电网短时合环操作过程中潮流变化情况以及对系统的影响。讨论了在合环操作过程中影响潮流分布和电压变化的因素, 给出了量化指标。提出了在满足电网安全稳定运行的前提下短时合环操作过程中需要关注的问题。最后以某石油电网为例, 通过仿真分析计算出了在各种外部条件下的潮流转移比以及合环后对电网的影响, 验证了相关结论, 得到了短时合环操作的边界条件, 对地区电网进行短时合环操作具有一定的参考意义。

关键词:短时合环操作; 供电可靠性; 潮流转移比; 地区电网

Abstract: Aiming at a network structure with double or more power sources in regional power grid and the electromagnetic loop network during load transfer, under the divisional power supply, the changing of power flow during short-time loop closing operation and its effects on system are analyzed. The factors that affect power flow and voltage variation in the process of loop closing operation are discussed. The quantitative indicators are given, and what to be concerned during loop closing operation on the premise of satisfying the safe and stable operation of power grid are proposed. Finally, taking an oil power grid for example, according to the simulation, the power flow transfer ratio is calculated as well as the effects on power grid after loop closing, the relevant conclusions are verified, and the boundary conditions of short-time loop closing operation are obtained. There is a certain reference value for short-time loop closing operation of regional power grid.

Key words: short-time loop closing operation; power supply reliability; power flow transfer ratio; regional power grid

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0043-03

0 引 言

随着电网的迅速发展, 网架结构的不断加强, 地区电网中主要变电站存在双电源或多电源供电的情况, 正常运行方式下, 均为单通道供电, 以避免与上级电网形成电磁环网, 同时也能降低本级电网运行时的复杂程度^[1,2]。但由于线路正常检修时需要对线路进行停电/送电操作, 在此过程中, 解环与合环的先后顺序往往是一个复杂的过程^[3,4]。目前对该问题的研究已得到电网运行部门的高度关注, 西北网调、浙江省调、河南省调、北京市调等均对此做了相应的工作和研究。这里立足于合环操作时应注意的问题, 以西北某电网为例, 分析研究地区电网合环时的操作条件和相关指标。

1 研究对象

以西北某电网为例, 该电网最高电压等级为 750

kV, 省级调度系统内主要电压等级为 220 kV, 地区调度最高电压等级为 110 kV。这里研究对象为: 在 220 kV 系统下研究地区电网 110 kV 系统的合环条件。

2 短时合环对电网的影响

电磁环网是指不同电压等级的输电线路通过变压器磁或电磁耦合构成的环形网络^[5], 电力系统正常运行方式下, 由于电磁环网合环运行的诸多弊端, 因此多偏向于开环运行, 特殊情况下, 尤其是设备检修时, 为保障供电可靠性, 需考虑电磁环网短时合环问题, 但应注意合环操作对电网的影响^[6]。

2.1 对潮流分布的影响

影响电力系统潮流分布的主要因素^[7,8]有: ①系统阻抗分布; ②电源和负荷分布; ③系统运行方式。电磁环网短时合环运行将使系统阻抗在短时间内发生变化, 如图 1 所示。

正常方式下, 系统 2 与系统 3 线路开断运行, 潮

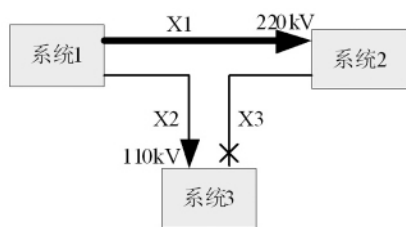


图1 正常运行方式

流流动方向如图1所示, $X_{12} = X_1$, $X_{13} = X_2$, 3个系统之间不形成高低压电磁环网, 若系统2与系统3合环运行, 则系统1与系统2之间的阻抗变为

$$X'_{12} = \frac{X_1 \times (X_2 + X_3)}{X_1 + X_2 + X_3} \quad (1)$$

由于合环操作对阻抗的影响, 系统潮流将可能出现两种情况, 如图2、3所示。

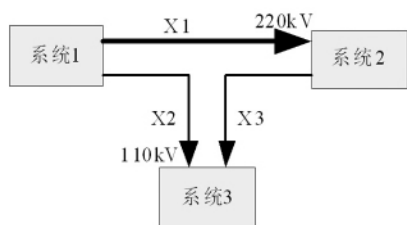


图2 合环操作对潮流的影响 a

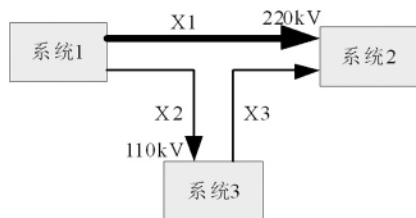


图3 合环操作对潮流的影响 b

2.2 对节点电压的影响

如图2所示, 系统3作为受端系统, 合环后, 形成双电源供电模式, 线路 L_{12} 潮流增加, 由公式(2)知, 系统2由于下网负荷的增加, 电压将随之发生波动, 式(2)具体描述了潮流中各电气量的关系。

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{\sum X} \quad (2)$$

式中, P 、 R 、 Q 、 X 分别为线路有功功率、无功功率、电阻、电抗; $\sum X$ 为系统阻抗。

若潮流如图3所示, 则在系统3中潮流的穿越功率增加, 系统3的电压将发生相应的波动, 同时, 线路 L_{13} 负荷增加, 稳定裕度降低。

3 合环操作条件

为保证供电可靠性, 在有备用电源的情况下对设

备进行检修, 可采用短时合环操作倒负荷的措施向负荷持续供电, 但应注意操作结果是否能够满足系统安全稳定条件。下面用潮流转移比和转移功率两个指标作为合环操作能否进行的判据。

潮流转移比(ε) 定义为合环后线路的有功功率变化量与合环前有功功率的比值。

转移功率(ΔP) 指合环前后线路潮流的变化量。

3.1 量化指标

两个指标分别量化了合环操作前的计算结果, 对实际操作有一定的借鉴意义。

设线路极限功率为该线路最大传输功率 P_L , 可以为热稳定极限或动稳定极限, 转移功率由式(3)给出。

$$\Delta P = P_L - P_0 \quad (3)$$

其中, P_0 为合环前线路功率, 线路潮流最大转移比由式(4)给出。

$$\varepsilon = \frac{P_L - P_0}{P_0} \quad (4)$$

如上式所示, 由于线路合环前功率具有随机性, 因此, ε 将随着 P_L 变化, P_0 取最小值时, 对线路极限功率而言对应着该方式下的最大潮流转移比, 若在合环过程中计算结果小于最大潮流转移比, 则合环操作可以进行。

将潮流转移比和转移功率作为合环操作的两个定量指标各有优点, 转移功率是对线路功率波动情况进行定量分析, 对功率变化情况进行直观描述。潮流转移比用来衡量潮流波动的幅度, 评价指标由横/纵坐标下的面积大小决定, 为了减小地区电网合环操作对主网潮流和运行方式的影响程度, 横/纵坐标的乘积应尽量小。

4 实际电网仿真分析

为了验证两个量化指标的可行性, 现以西北某地区电网为例进行仿真实验。

4.1 电网概况

算例中, 地区电网属于典型弱联电网, 现与主网通过两个 110 kV 通道联络, 网内装机容量约 360 MW, 年度运行最大下网负荷约 145 MW, 最小下网负荷约 50 MW, 基本不考虑功率上送情况。电网结构如图4所示。

KT B 为 220 kV 系统主要电源点, 潮流方向由

KTB至EB,最大潮流172 MW;地区电网内环网数多,正常方式下均解环运行,双回联络线传输极限由热稳定极限给出,约220 MW,如图4所示。

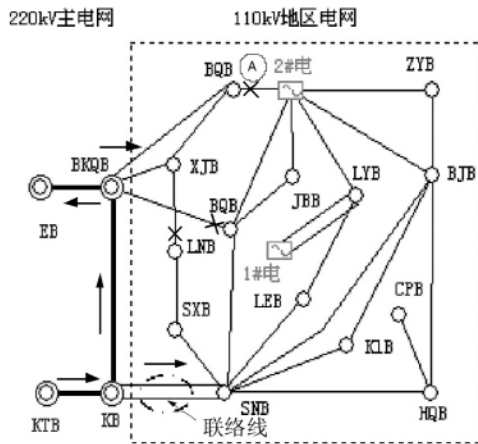


图4 某地区电网示意图

4.2 大方式下合环操作

按照电力系统考虑电网严重情况下对系统安全稳定进行分析,算例考虑大负荷期间的合环操作对电网的影响。

由式(4)计算出,在最大负荷方式下,潮流转移比

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\max} &= (P_L - P_{\min}) / P_{\min} \\ &= (220 \text{ MW} - 50 \text{ MW}) / 50 \text{ MW} \\ &= 3.4\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\min} &= (P_L - P_{\max}) / P_{\max} \\ &= (220 \text{ MW} - 145 \text{ MW}) / 145 \text{ MW} \\ &= 0.571\end{aligned}$$

实验在联络线各种不同下网功率的基础上对A点进行合环分析,得到联络线的合环操作曲线,如图5、图6所示。

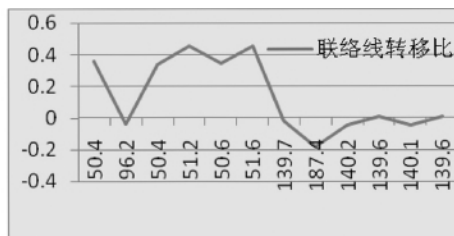


图5 地区电网联络线转移比分析

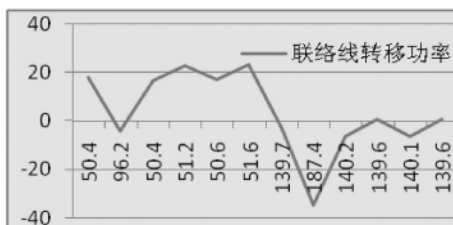


图6 地区电网联络线转移功率分析

如图5、图6所示,在地区联络线下网功率较少情况下进行短时合环操作,联络线转移功率较少,同时对应潮流转移比幅值也较小,但随着下网功率的增长,转移功率增加率也逐渐减小,说明在潮流转移比较小时进行合环操作安全性更大。经过与实际电网对比分析,在联络线功率较大时,地区电网可以通过短时合环操作转移负荷。

5 结 论

在电网迅速发展的背景下,尤其是高电压等级电网的不断发展,与下级电网之间形成的高低电压电磁环网成为电力系统安全稳定运行的隐患,而电磁环网开环运行降低了系统的供电可靠性,因此,在提高供电可靠性和排除电网安全隐患成为一对矛盾体,前面研究将满足安全运行要求、开环运行的电磁环网在短时间进行合环操作,可以避免在正常检修时进行短时停电,提高了供电可靠性,同时对合环操作指标的定义对地区电网进行方式安排具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] 王加庆,吴迪,叶彬,等.安徽电网2008—2015年电磁环网的解环方案[J].华东电力,2008(12):59-60.
- [2] 白宏坤,李干生.关于电磁环网弱开环方式的探讨[J].电力系统保护与控制,2010(2):60-63.
- [3] 张慧玲,张军.宁夏750 kV电网初期网架下电磁环网运行方式研究[J].宁夏电力,2009(21):7-10.
- [4] 杨勇,郑晶晶.甘肃330 kV、220 kV电网电磁环网解环研究[J].电网与清洁能源,2009(6):11-13.
- [5] 李旭霞.山西中部电磁环网解环研究[J].山西电力,2009(21):40-43,97.
- [6] 苏志扬.湖南西部电网高低电压电磁环网解环研究[J].电力建设,2002(7):35-37.
- [7] 王翠霞.关于110 kV电磁环网合环开关保护的应用及定值整定原则[J].电气传动自动化,2008,30(5):56-58.
- [8] 吴刚,李群英,吴祚江.吉林省电网500 kV/220 kV电磁环网解环研究[J].吉林电力,2009,37(2):1-5.

作者简介:

杨桂兴(1985),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护与风机控制;

王 晟(1974),男,工程师,主要从事方式保护专业。

(收稿日期:2011-06-01)

输配分离后电网调度管理模式研究

李莹雯¹, 周云峰²

(1. 绵阳电业局, 四川 绵阳 621000; 2. 四川省电力公司超(特)高压运检公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 输电与配电分离对于当前电力调度管理模式和电网调度安全影响巨大。在对国外的经验教训进行总结的基础上, 分析了输配电分离对电网运行稳定性的影响, 对新的市场环境下的电网调度管理模式进行了研究, 提出应坚持统一的调度管理, 加强电力调度的管理权力和管理力度, 按电网结构而不是以电网内的利益主体设立电力调度管理机构, 并给出相应的调度技术支持体系的总体结构。

关键词: 输配分离; 电力调度; 调度运行; 电力市场

Abstract: The impact of transmission and distribution separation on the current power dispatching management mode and the security of power grid dispatching is huge. Based on the summarization of the overseas experiences and lessons, the influence of transmission and distribution separation on the stability of power system operation is analyzed, and the management mode of power grid dispatching is studied in new market environment. Insisting on the centralized dispatching management, strengthening the management of power dispatching and establishing the power dispatching management agencies according to the structure of power grid instead of interest subject are proposed. Finally, the general structure of the corresponding dispatching technical support system is described.

Key words: transmission and distribution separation; power dispatching; dispatching operation; electricity market

中图分类号: TM734 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0046-04

0 引言

随着电力市场和电力工业改革的发展, 下一步电力体制改革的工作重点将是“稳妥实行输配分开”, 对电力行业, 特别是电网企业必然会带来新一轮冲击。对于电网输配分离的研究, 目前较多集中于分离策略、输配成本计算和激励机制的研究^[1-4], 而对于新模式下, 电网的安全运行模式研究则相对较少。

由于电网安全运行关系到社会稳定、国家安全和经济发展, 在当前电源与电网建设不协调、网架结构薄弱、各方利益主体之间的矛盾尚未得到有效协调和平衡的情况下, 进行输配分离改革, 对电网安全稳定运行可能会有一定负面影响, 大大增加了系统运行的不可预知性, 使电网运行特别是电网调度的安全压力增大。推进电力体制改革, 必须保证电网调度安全运行在改革过程中得到保证, 当电网实现“输配分离”后, 电网将处于一个完全不同的电力市场环境中, 目前市场中各个主体的角色和作用都将发生较大改变, 而电力系统的安全稳定运行问题不只是单单的技术问题, 其同时也是一个机制问题, 需要国家、电力市场

参与各方来共同维持。原来可通过行政命令来保证的电网安全管理体制和安全管理方式将发生根本性的改变, 如何在新的电力体制下确保电网安全的问题更为引人关注, 因此, 在推进输配分离的改革时更应该加强对电网调度运行和安全问题的研究。

1 国外经验教训

随着电力市场竞争机制的进一步发展, 要求输电网络必须向用户开放, 并有偿地提供输电服务。为实现电力市场的需要, 美国加州、纽约、新英格兰以及挪威的 StattNet 建立了以独立系统运营者(ISO)为中心的电力市场, 实现发电竞争、输电开放。ISO 的主要作用是电网运行控制和实时电力市场管理。它的基本功能包括: 实时自动发电控制、网络安全运行、拥挤管理、机组组合、电能现货市场、输电和辅助服务市场。在这种机制下, 电力系统的管理运行模式转变为多家参与的市场模式。由于在电力市场中扮演的角色各不相同, 必定会出现追逐各自市场利益最大化的倾向, 因此调度机构对潮流的预测会变得困难, 同时对于各个参与者之间的信息交流沟通协调能力也提

出了更高的要求,直接后果是电力系统保持安全稳定运行的充足性和安全性指标下降,美加“8.14”大停电以及2003年意大利电网大停电就是由于电力系统调度人员不能充分调节穿过不同输电公司及地区的潮流所引发。因此,建立ISO的模式不能充分满足现代大电网下电力系统管理运行实时性、复杂性、随机性的特点,要加强对输配电网、电厂、用户的安全管理,确保整个电网安全稳定运行,必须要有统一管理电网的机构,并由这个机构负责建立国家互联电网和区域间的电力调度。从根本上来说,就是必须以电网调度关系为纽带,坚持统一调度、分级管理、技术互助的原则。

2 输配电分离对电网运行稳定性影响

从市场机制上看,由于电力系统从传统的垂直管理运行模式转变为多家参与的市场模式,市场参与各方可分为:输电公司、发电公司、多家配电公司、大用户和普通用户,在今后还可能出现多家普通用户联合在一起推举代表进入电力市场代表他们利益的情况,由于在电力市场中扮演的角色和出发点各不相同,必定会出现追逐各自市场利益最大化的倾向,因此可以预见在输配分离后的电力市场中,由于各个市场参与者各自追逐自身最大市场利益、潮流难以统一协调控制、市场投资减缓从而导致发电侧、输电侧备用水平逐步下降,这些都将使电力系统的安全稳定成为一个突出问题。基于共同受益的原则,对于保证电网的安全稳定的职责应由市场参与各方共同承担,国家电力监管部门需要制定清晰的规则,对各方在承担电力系统安全稳定方面的职责进行详细描述,并要求强制执行,同时对市场参与各方,特别是发电公司、输电公司、配电公司的利益进行一定保证,以从机制上增加各方主动保持电网安全运行的积极性,减少电力系统运行的风险,使电力市场能够有效运行,从而保证国家能源安全。

就电网运行角度看,输配分离后,满足对用户的可靠供电问题由过去的仅由电网公司一家承担演化为市场中多个因素的相互作用,这可以从长期和短期两个方面来阐述。就长期而言,对用户的可靠供电要求维持电力系统的充足性,进而又可细分为发电能力的充足性、输电网络的充足性和电力市场的充足性。从短期方面来说主要是通过电网的安全稳定运行来达到。它们之间的相互关系可用图1来描述。但在潮流控制方面,在一个给定的时间内,输电线路对于

其中流过的电流有一定限制,作为发电公司和用户间的电能输送通道,输配电网在电力系统中处于非常重要的地位。对电网而言,大多存在着由于经济、环境的制约以及历史因素造成的一些网络上的薄弱环节,主要体现在其输送潮流的能力受稳定校核计算结果的限制,不得超过某一数值,因此电网不但存在着交通网、通信网那样的静态阻塞,而且还存在严重的动态阻塞,在竞争的电力市场环境下可能会表现得尤为明显。厂网分开、输配分离后,各发电公司之间与售电公司之间的竞争将加剧,发电公司希望发更多的电量,售电公司希望卖出更多的电量,这样就更加使得输配电网成为资源竞争的瓶颈,电网安全性有所下降,同时由于竞价机制的引入,供电合同更具多样性和多变性,市场经济下的系统运行工况将由市场需求来决定,电网潮流的分布将与以往调度部门所能掌控的方式不同,表现为多变而难以预测,从而使电网面临预想不到的运行方式,导致电网运行部门在控制输电网络潮流方面存在严重困难,增大电网运行风险。在这样的情况下,各级电网调度的作用更加重要,为了保证输电网络的安全可靠运行,必须对相关环节的潮流加以约束和限制,以防止线路潮流超过稳定极限要求,危及系统安全。若潮流控制不力,就可能会出现电网崩溃事件,引发大面积停电,给电力市场各参与方都带来损失。因此在输配分离后的电力市场中,规划、交易部门以及各市场参与方都需要加强与运行部门的沟通,以解决电力系统运行中的充足性和安全性问题,使电力系统在运行中有足够的备用来保证电力系统能保持长期的安全稳定可靠运行。

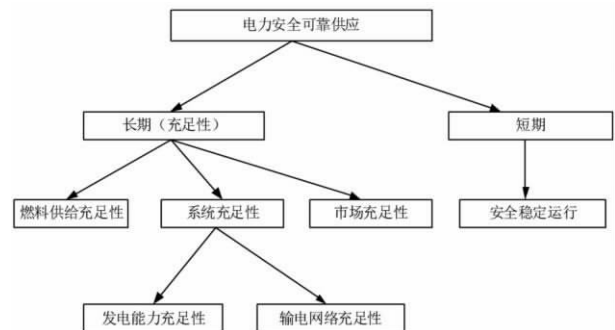


图1 电力安全可靠供应的相关因素

3 电网调度管理模式研究

电网调度机构是电网运行、指挥、指导和协调机构,依法在电网中行使调度权,这是电力生产的特点

决定的。电网企业必须加强电网调度系统管理,进一步加强调度的纽带作用,坚持统一调度,分级管理,全面提升电网调度运行管理水平,保障电网安全、稳定、优质、经济运行。在实现输配电分离后,鉴于国外在此方面的惨痛经验教训,在电网调度体制方面,必须有一个能够协调指挥整个电网的强有力电力调度机构,防止电网中的各个机构各自为政、自成体系、缺乏统一有效的管理,从而在管理方面造成电网安全运行管理的隐患。从另一方面来看,虽然纯粹以自由市场方式来运作有利于电力企业的发展,但是由于电能具有即发即用的特殊性,它不能储存,是发、输、变、配、用各环节同时进行的,因此,对电能的发、供、用一旦失去管制,失去统一的调度管理,就必然会存在较大的潜在不平衡风险,造成严重的后果。

同时,输配电分离会使得原先处于同一组织内的各输电机构、配电机构的行政隶属关系和资产关系发生一定变化,在以市场经济为主导的前提下,实行厂网分开、输配分离、竞价上网、引入竞争,使得供电关系和供电秩序也在逐步发生变化,调度运行人员面临更大的压力和更少的选择性,各参与方提供辅助服务的积极性和主动意识下降,一些新的矛盾也将逐步显现。由于各机构的角色和立足点发生转变,现有的有效协调沟通机制也将不适应外部环境的变化,在某种程度上为电力调度的安全管理造成了困难,所以必须要有一个强有力的电力调度体系。以美国为例,北美(含加拿大部分)电网分为150个左右的控制区,40多个独立调度中心各自只关心自身的局部利益,没有一个全系统性的调度中心,这样的体制下局部问题就很容易演变成全局性故障,从而造成大电网事故。在电力系统的网架结构方面,目前北美电网的互联互通性比中国强大很多,一般市场经济条件和电力市场化的条件也比中国好得多,但最大的电力事故却偏偏发生在北美,如1996年美国西部加州两次大停电,2003年8.14大停电事故,这些大停电事故都暴露出北美电网调度系统在体制和运行管理方面都存在着很多问题,如电力公司的调度协调机构缺乏有效的电网事故处理预案,调度员未采取措施减负荷(也没有手段减负荷,如果调度员擅自拉负荷,用户有权通过法律手段维权,调度人员可能因此而入狱),未通告相邻电力公司和协调机构等等,从而坐失良机,造成大面积停电的后果。因此面对新的市场环境和更多电网运行管理中的不确定性,对电力调度的管理权力

和管理力度只能加强不能削弱,电力调度机构的设立应按电网结构来确定,而不应该以电网内的利益主体来设立。区域电网、省级电网设地区配电网都应分别设立一级调度机构,配网调度以下根据配电网规模的需要情况设立集控中心和操作中心。所有调度机构在一个区域内都应在技术和调度业务上实现垂直管理。调度机构的主要任务如下。

(1) 对并网电气设备的运行依法实行调度运行权上的分级管理和运行控制;

(2) 电力市场交易过程中的安全校核、网络阻塞管理;

(3) 保证电能质量,进行无功电压调节和有功功率的实时平衡;

(4) 按分级管理的原则处理电网事故,必要时可采取切负荷等紧急控制手段。

此外,在电力市场环境下,电力电量交易特别是短期交易行为会造成电网潮流发生经常性的、大幅度的变化,对调度运行管理水平和实时处理能力提出了更高要求,同时,在市场环境下,电力生产的各环节分离,调度对全过程的控制能力弱化,调度命令的权威性受挑战,在这种情况下,更需要加强调度在电网运行中的管理作用,调度机构不再仅仅是电网运行的指挥协调中心,还将是电力市场的有机组成部分。

4 技术支持体系

在新的电力市场环境下,电网运行部门会面临大量的输电交易合同、不断增加的市场参与者、根据市场需要长距离输电、依赖电力市场来满足用户需要,并维持系统稳定、不断变化的市场运行准则和电力市场结构、不可预测的市场行为、系统备用的减少,使用原有的运行控制手段来控制新环境下的电力系统已变得不适合,因此,传统的离线分析、信息交换方式已不能够满足电网安全运行的要求,对电网运行部门而言,要采用新的技术手段使调度运行人员具备在线环境下进行电压分析和暂态稳定分析的能力,来保证电力系统安全稳定运行的目的,同时应满足如下要求:

(1) 使电网调度管理运行人员了解当前电力系统的状态和关键参数;(2) 智能化的在线动态安全分析;(3) 跟踪、辨识和记录不正常运行模式;(4) 不同层次、不同区域控制、信息系统之间的信息交换和决策的相互协调。

新的技术支持体系不仅能够为电网运行部门提供快速、直观的对电力系统健康状况的定量评价手段,系统在市场要求下趋近其极限时所冒的风险,还能够告知电网运行部门电网运行的薄弱环节和相应的校正手段,这些都可以通过如图2所示的基于广域测量系统的电力系统安全稳定决策系统来达到。



图2 电力系统安全稳定决策系统总体结构

其中输电合同安排主要包括阻塞管理、合同安排、辅助服务管理、可用输电能力计算等功能。其中阻塞管理主要用于减轻输电网络的阻塞。合同安排主要是根据输电网络运行情况来决定配电公司或发电厂的输电合同申请是否可以得到满足。辅助服务用于决定系统对辅助服务的要求及分析对各类辅助服务的满足手段。可用输电能力计算根据合同安排情况来计算剩余的输电系统可用能力并提供给电力市场参与各方。

输电系统安全稳定评价包括实时网络分析、负荷预测、实时暂态稳定分析和实时电压稳定分析等功能。实时网络分析包括网络拓扑分析、状态估计、调度员潮流分析、静态安全分析、有功及无功最优潮流分析。实时暂态稳定分析和实时电压稳定分析计算实时暂态和电压稳定极限以及控制所需的校正手段。

实时不平衡交易是用于保证电力系统发供处于实时平衡状态。电网调度人员可以根据计算结果调度能提供实时不平衡服务的资源,达到电力系统供需实时平衡。

数据储存是用于收集、打时标和维护系统动态和静态数据以便于分析和评价系统运行情况。主要包括实时数据存储和历史数据存储。

输配分离后,配电公司在服务区提供电力网络域内属于自然垄断,其与输电公司(或发电公司)的关系类似于目前电网公司与发电公司的关系,因此在配电公司的市场技术支持手段上可以采纳目前发电厂竞价上网的技术支持手段。

5 结 语

中国的电力体制改革不能脱离实际,盲目照搬外国经验。在输配分离后,电网的安全性和稳定性必须得到保持和提高,新环境下对调度运行人员的素质要求也将更高,调度运行人员不仅要熟悉电网调度运行业务,还要熟悉电力市场交易规则,熟悉技术支持系统,要具有相当的经济调度头脑,调度运行人员的责任更大,压力也更大。电网调度在电力市场化改革的道路上的作用越来越大,同时挑战也越来越大。要适应新形势对电网调度工作的要求,还有许多问题有待作更深入、细致的研究。

参考文献

- [1] 姚建刚,秦红三,王路,等. 电力市场中输电与配电分开的方略初探 [J]. 电网技术,2001,25(3):70-73.
- [2] 吴国丙,任震,黄雯莹. 基于潮流分解的输电成本分摊的改进方法 [J]. 继电器,2004,32(9):7-11.
- [3] 谢俊,陈星莺,廖迎晨,等. 激励性输配分开电力市场竞价机制的建模 [J]. 中国电机工程学报,2006,26(23):25-31.
- [4] 张少华,方勇,李渝曾. 电力市场中激励性机制设计 [J]. 电网技术,2003,27(1):52-56.
- [5] 陈星莺,谢俊. 计及风险的输配分离电力市场供电公司最优竞价策略 [J]. 电力系统自动化,2005,29(1):13-17.
- [6] 刘继春,武云霞,刘俊勇. 市场环境下的输电安全定价方法 [J]. 水电能源科学,2007,25(4):152-154.

(收稿日期:2011-06-21)

(上接第19页)

- [1] 李付亮. 电力二次系统存储备份方案分析 [J]. 继电器,2006,34(19):42-45.
- [2] 万继光,詹玲. 一种集群NAS网络备份系统的研究与实现 [J]. 小型微型计算机系统,2005,26(6):905-908.
- [3] 邱洪泽. 共享磁盘冗余阵列在SCADA双机系统中的应用 [J]. 电力系统自动化,2005,29(16):90-92.
- [3] 余静,麦绍辉,刘立东,等. 电力系统EMS数据备份方案 [J]. 电力系统自动化,2009,33(17):101-104.

- [4] 林其友,高振华,陈嘉庚. 调度自动化系统紧急容灾备份方案 [J]. 电力自动化设备,2009,29(12):98-100.
- [5] 王益民,辛耀中,向力,等. 调度自动化系统及数据网络的安全防护 [J]. 电力系统自动化,2001,21(1):5-8.
- [6] 王卓,殷国富. 基于多代理的智能ERP研究及其在电力营销系统的应用 [J]. 电力自动化设备,2008,28(12):88-92.

(收稿日期:2011-04-10)

西北新疆交流联网后新疆电网控制模式 变化机理及对策研究

常喜强¹, 孙谊娟¹, 姚秀萍¹, 梁 静², 赵明君¹

(1. 新疆电力调度通信中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 新疆电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要:通过对新疆西北联网后新疆电网内部稳定水平的分析、新疆控制模式变化情况的深入研究, 分析出控制模式变化的机理、关联因素, 提出控制模式调整的方向及措施, 为保证新疆电网安全稳定运行提出技术保障。

关键词:电网互联; 稳定水平; 控制模式; 对策

Abstract: Based on the analyses of internal stability level of Xinjiang Power Grid after its interconnection with Northwest Power Grid and the researches on the change of its control mode, the control mode change mechanism and the associated factors are analyzed, and the direction and measures to adjust the control mode are proposed, which provides the technical support to ensure the safe and stable operation of Xinjiang Power Grid.

Key words: grid interconnection; stability level; control mode; countermeasure

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0050-04

0 引 言

大区交流联网形成初期弱联系阶段, 原电网内部运行特性的变化一直是电网安全分析的焦点。该文深入分析研究了新疆西北交流联网后的电网特性变化, 影响机理, 梳理新疆 750/220 kV 电网运行控制模式, 确定了调整方向, 重点对电网电磁环网解环, 分区互供方式, 调度运行控制模式进行调整, 同时对区域稳定控制模式和优化方案等进行分析研究, 并提出了相应保证系统稳定运行的解决措施。

1 新疆电网内部稳定水平变化情况

新疆西北联网后, 新疆电网稳定性发生了变化, 呈现出“两个加强, 四个改善, 四个加剧, 三个新增, 三个不变”的特点。

两个加强体现在新疆与西北电网联网结构得到了加强(凤乌升压工程), 新疆南部电网网架结构得到了加强(吐巴工程)。

四个改善体现在送端“窝电”状况得到改善, 系统频率稳定性得到改善, 系统暂态稳定性得到了改善, 部分地区供电可靠性得到了改善。

四个加剧体现在电压控制难度加剧, 解网后的频率、电压稳定问题交织, 复杂程度加剧, 联络线控制与

风电控制难度加剧, 电网运行方式调整灵活, 安排配合复杂程度加剧。

三个新增体现在新增西北外送通道(750 kV 哈敦双线), 新增南疆 750 kV 送电通道(750 kV 吐巴通道), 新增动态稳定低频振动网间模式一个(新疆机组对西北主网机组模式)。

三个不变体现在新疆电网局部地区供大于求发电不平衡状况不变; 新疆电网基本潮流走向没有改变, 部分断面的稳定问题不变; 稳定极限基本不变。

2 控制模式变化分析

新疆与西北联网后, 新疆电网电压控制模式、电磁环网控制模式、调峰、调频控制模式、区域性电网稳定控制模式、调度管理模式均发生了较大的变化。

2.1 电压控制模式

750/220 kV 电压级差较西北主网 750/330 kV 以及国内其他地区 500/220 kV 或 1 000/500/220 kV 大, 且在国内无先例, 根据电压变化经验公式, 电压变化与联络线传输功率大小、潮流波动水平、线路阻抗以及母线短路容量相关。联网的 750 kV 线路充电功率大(百公里充电功率 280 Mvar, 是 500 kV 线路的 2.8 倍), 沿线网架结构较弱, 短路容量小, 接力送电的联网通道上, 潮流波动频繁并且幅度大, 从而导致联网通道近区 220 kV 母线电压波动较大。而 750 kV

电网缺少动态无功调节手段,采用高、低抗固定补偿,正常运行中电压控制较为困难。对联网通道近区 220 kV 电压控制要求苛刻。通过计算分析,若按 750 kV 母线电压不超过 800 kV 控制,需将近区 220 kV 母线运行电压控制在 230 ~ 238 kV 范围内,在现有调节手段下运行控制难度大。

由于新疆境内 750 kV 变电站均为单主变压器运行,轻潮流下,联网通道上 750 kV 母线初始电压偏高。主变压器 $N-1$ 故障后,电网将失去 220 kV 电网的电压钳制作用,同时失去 750 kV 主变压器低压侧低抗;同时失去低压补偿,导致 750 kV 母线出线运行过电压,需进行综合考虑电压调整和控制问题。

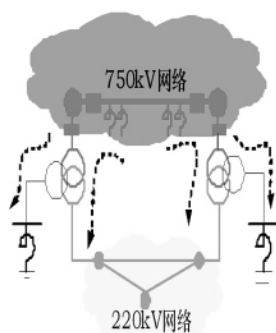


图1 750/220 kV 电磁环网示意图

乌北主变压器跳闸,乌北 750 kV 母线电压升高幅度约为 50 ~ 70 kV,为抑制部分主变压器特别是末端馈供主变压器跳闸后 750 kV 母线高电压,需联切 750 kV 线路,从而电网运行从 $N-1$ 问题升级为 $N-2$ 问题,还需要调控电压同时需控制各 750、220 kV 断面潮流,关联因素较多。

220 kV 电网面临正常小负荷方式下电压偏高需消化吸收 750 kV 系统未补偿的容性无功,750 kV 主变压器 $N-1$ 故障情况下,750 kV 系统变化的容性无功被切除,220 kV 系统因失去容性无功造成感性无功偏多,电压偏低,而 750 kV 设备又因为缺少的感性无功补偿而电压偏高,不论 750 kV 还是 220 kV 电网,电压反复波动问题突出。

此外,新疆电网内 750 kV 系统的电压水平与西北电网内 750 kV 系统的电压水平相关联,链式网络的电压调整随联络线传输功率变化而变化,并相互制约,使得电压调整控制延伸面扩大。

由于上述因素造成电压调整和控制关联因素增多,电压控制模式变化较大,需进行调整。

2.2 电磁环网控制模式

新疆电网出现多个大型电磁环网,分别为凤乌电

磁环网,乌吐电磁环网,吐哈电磁环网,吐巴电磁环网,电磁环网带来的是系统短路水平的不断上升,热稳定、动稳定、暂态稳定引起的控制问题。采取分区分片的运行方式是解决短路电流问题的发展趋势,但是在分区运行后需考虑设备检修、电力电量平衡、设备过载等问题,同时还带来不同情况下的运行方式多变,保护定值方案多套,事故支援能力变弱,运行方式调整困难、调度运行操作复杂等问题。

在环网方式下部分 220 kV 输电断面制约着 750 kV 系统送出功率,同时 750 kV 系统设备运行和停运也造成 220 kV 线路穿越潮流的变化。上述设备的检修需相互配合,相互兼顾。此外新疆电网因网架结构薄弱,疆内 750 kV 设备停运相互之间也影响较大,需统一考虑。

2.3 调峰、调频控制模式

新疆电网由孤网运行转为联网运行,由独立电网转为西北区域电网一部分。新疆电网调峰、调频控制模式将发生较大的变化,电网 AGC 控制模式需要调整。通常 AGC 有四个基本目标及其分别对应的四个控制模式。

(1) 负荷平衡控制模式:使整个互联系统的发电与负荷基本平衡。

(2) 定频率控制模式:保证电力系统的频率偏差在某一范围内,并使均值为零。

(3) 联络线控制模式:在各控制区域内调节发电出力,使联络线功率偏差积分值为零。

(4) 经济调度控制模式:控制本区域内的分配发电,使发电成本最小。

新疆电网在与西北电网联网后,采用联络线频率控制模式,但由于是联网设备均为单主变压器,还需考虑主变压器跳闸,解网方式下的定频率控制模式,解网方式还存在不同地区,不同机组参与,需要进行调整和改变,在两者之间切换。如:在 750 kV 哈敦双线断开,吐哈一二线断开,乌吐一二线断开方式下,天光电厂、察汗乌苏电厂、库车电厂等机组的 AGC 控制模式需做相应的调整。

AGC 控制模式复杂程度增加,控制模式多变,需要考虑和完善相关功能定义。

对于系统旋转备用容量的制定,电力、电量平衡、机组开机方式等均进行了多种情况的考虑。既要满足系统外送要求、又要满足联网通道故障后稳控切机要求,满足系统故障情况下的快速响应调节能力,负

荷变化、风电出力变化要求。

2.4 区域性电网稳定控制模式

联网后电网具有明显的区域性特征:乌北地区、吐鲁番地区、哈密地区局部电力系统各自由多个电源节点构成,分区内稳定性与分区内电源具有强相关性。对于这样的系统,其安全稳定控制,需综合考虑这些电源的运行状态,因而往往需要大量的远方信息传递。这样就使得区域性电力系统的安全稳定控制复杂程度增加,尤其是在各种情况下如何保证全套装置动作的可靠动作。

区域稳控控制模式也需适应多种情况进行调整优化,对于750 kV/220 kV,由原有的集中控制模式调整为采取750 kV/220 kV分层控制模式。形成以三个变电站六套装置为枢纽的108套系统分区分层进行控制。

2.5 调度管理模式

联网后,新疆省调调度管理由单一的孤网运行管理变为联网运行管理与孤网运行管理双重方式,需积极适应新的联网方式,将新疆电网在孤网运行过程中形成了一套适应新疆电网实际情况的调度管理模式进行优化、转型、转变,在调度运行、运行方式、调度计划、继电保护、通信、自动化专业的工作标准、工作制度、专业流程,标准、规程、制度,全面梳理。

对于调度运行方面,转变孤网运行管理,加强电网的负荷预测,合理安排系统旋转备用容量、事故备用容量、检修备用容量及其分布,要求具备相应的响应调节能力,对于电网稳定工作,联合网调、省调、地调制定协调一致的稳定规定,拉路限电序位表,制定紧急来路限电措施。调度运行人员及时准确调整有关调频厂,重视联网工程系统的过电压问题,保持发电机组自动电压调节在运行状态,采用快速励磁,合理使用并联电抗器,控制系统运行电压在正常范围内,对可能发生的各类严重故障,平时制定相应预案和反事故演习,在二次系统方面,加强网省继电保护的运行管理工作,完善规章制度,整定方案,整定原则,现场实施、定期检验、设备维护等环节。对电网第三道防线需统一考虑,对于重要设备的电网通信,调度自动化系统和各枢纽站的自动化设备、加强运行维护和管理。

3 提高电网安全稳定水平控制模式调整措施

为提高新疆电网联网后的安全稳定水平,在深入分析了电网稳定性变化情况,电网控制模式存在不足,提出以下控制模式调整措施。

3.1 针对电压控制

合理选择750 kV主变压器分接头档位,缩小变比,优化确定750 kV无载调压变压器分接头位置,做到750 kV、220 kV系统同时优化,联合调压。加强常规电源并网管理,充分发挥其调压能力。静态电压故障前做好控制预案和相应控制策略,故障情况下电压控制需稳控系统与人员控制相结合。

3.2 针对电磁环网

加快电网建设,为电磁环网方式解环提供条件,开展新疆电网规划网架及过渡期间电磁环网解环专题研究,优化电磁环网解环方案,优化电源分区互供,减少潮流迂回转供,减少电网相互制约因素。优化区域稳控策略的优化工作,增加相应的区域稳控策略。

3.3 针对调峰、调频

根据电网运行情况,针对电网故障解列孤网运行后不同AGC“挂起”措施。优化现有AGC策略,结合运行开展相关的优化。制定多种AGC控制模式。合理确定系统备用容量,将风电、水电、火电、联络线备用统筹考虑,充分发挥区域联网综合效益。将电源按AGC区域贡献率进行划分,与不同方式下频率调整控制进行关联。

3.4 针对区域稳控

研究切负荷执行站、切机执行站接入方式变更,切负荷功能闭锁程序优化,策略改进,做到“自适应”。

3.5 针对调度管理

尽快融入网省一体化运作,加强沟通,建立协作机制。建立统一和谐的调度协调机制。

4 结 论

新疆与西北电网联网后,可以充分发挥大电网、大机组、大容量远距离输电的规模经济效益,实现能源、电力资源的优化配置;可以实现水电、火电、核电、风电等不同特性电力资源的互补,实现更大的经济和安全效益。但电网大范围互联又会使电网事故影响范围扩大,如果处理不当,有造成大面积停电的风险。需要在电网运行控制各个方面的模式进行调整和转换,梳理新疆750/220 kV电网运行控制模式,确定调

整方向,迅速改进和转变,以满足电网各种运行工况的需求,此外,电网在规划设计方面也需要进行综合考虑,开展电磁环网解环研究、电源分区消纳研究、电源接入地方式研究,750 ~ 220 kV 电压控制专题研究等,建设坚强的各级电网,各级电网统一协调统筹发展,为电网运行提供坚强的物理保障。

作者简介:

常喜强(1976),男,硕士,高级工程师,从事电力系统安全稳定运行控制工作;

孙谊端(1974),女,硕士,高级工程师,从事电力系统安全稳定运行控制工作。

(收稿日期:2011-07-10)

(上接第25页)

- [5] 于继来,汤奕. 交流支路和节点的联合电气剖分 [J]. 中国电机工程学报,2007,27(16):37-42.
- [6] 王锡凡. 电网可靠性评估的随机网流模型 [J]. 电力系统自动化,2006,30(12):1-6,22.
- [7] 汤奕,于继来. 一种新的输电线路阻塞责任定量分析方法 [J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(4):98-103.
- [8] 汤奕,于继来,周苏荃. 电力网络源流路径电气剖分算法 [J]. 2006,30(22):28-33.

- [9] Baoding Liu, Uncertainty Theory [M]. Beijing: Uncertainty Theory Laboratory, 2010, <http://orsc.edu.cn/liu>.
- [20] 管霖,郑传材. 线路 $N-K$ 停运机理及其概率模型 [J]. 电力系统自动化学报,2009,21(4):115-119.
- [21] 宋毅,王成山. 双重故障模式下基于证据理论和功能组分解的 $N-K$ 事故辨识方法 [J]. 中国电机工程学报,2008,28(28):47-53.
- [22] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难 [J]. 电力系统自动化,2003,27(18):1-5.

(收稿日期:2011-04-10)

(上接第42页)

- [6] Kandil M S, El-Debeiky S M, Hasanien N E. Long-term Load Forecasting for Fast Developing Utility Using a Knowledge-based Expert System [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2):491-496.
- [7] 张民,鲍海,晏玲. 基于卡尔曼滤波的短期负荷预测方法的研究 [J]. 电网技术,2003,27(10):39-42.
- [8] 陈泽淮,张尧,武志刚. RBF神经网络在中长期负荷预测中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报,2006,18(1):15-19.
- [9] 钱卫华,姚建刚,龙立波,等. 基于短期相关性和负荷增长的中长期负荷预测 [J]. 电力系统自动化,2007,31(11):59-64.
- [10] 谢敬东,唐国庆,徐高飞,等. 组合预测方法在电力负荷预测中的应用 [J]. 中国电力,1998,31(6):3-5.
- [11] 吉培荣,张玉文,赵青. 组合预测方法在电力系统负荷预测中的应用 [J]. 三峡大学学报,2005,27(5):398-400.
- [12] 牛东晓,陈志业,邢棉,等. 具有二重趋势性的季节型电力负荷预测组合优化灰色神经网络模型 [J]. 中国电机工程学报,2002,22(1):29-32.
- [13] 李金超,牛东晓,李金颖,等. 基于熵权的中长期电力负荷组合预测 [J]. 华东电力,2005,33(8):27-29.
- [14] 李春生,王耀南. 基于条件熵的电力负荷组合预测模型 [J]. 电力系统及其自动化学报,2007,19(4):55-58.
- [15] 肖先勇,葛嘉,何德胜. 基于支持向量机的中长期电力负荷组合预测 [J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(1):84-88.

- [6] 丁巧林,潘学华,杨薛明. 最优组合预测方法在电力负荷预测中的应用 [J]. 电网技术,2008,32(增刊1):127-130.
- [7] 苗增强,武宏波,李婷,等. 基于最小一乘法的组合赋权法在中长期负荷预测中的应用 [J]. 电力系统保护与控制,2009,37(2):28-32.
- [8] 周凇,任海军,李健,等. 层次结构下的中长期电力负荷变权组合预测方法 [J]. 2010,30(6):47-52.
- [9] 孙见荆. 组合预测参数估计方法研究 [J]. 预测,1996,15(6):54-56.
- [20] 陈守煜. 系统模糊决策理论与应用 [M]. 大连:大连理工大学,1994.
- [21] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用 [M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [22] 陈守煜,赵瑛琪. 模糊优选(优化)理论与模型 [J]. 应用数学,1993,6(1):1-6.
- [23] 康海贵,刘艳,孙敏. 施工方案评价中的多级模糊优化及非结构性模糊决策分析 [J]. 四川建筑科学研究,2007,33(6):228-231.
- [24] 杨实俊,刘健夫. 模糊优选考核方法在企业人力资源管理中的应用 [J]. 华北电力大学学报,2007,34(4):110-112.
- [25] 王世儒,雷伟丽. 基于模糊数学的多级泵站老化评价 [J]. 甘肃水利水电技术,2009,45(1):22-23.
- [26] 李海龙. 基于熵权的多级模糊优选模型在软基处理中的应用 [J]. 西部探矿工程,2009(4):50-53.
- [27] 毛李帆,姚建刚,金永顺. 中长期电力组合预测模型的理论研究 [J]. 中国电机工程学报,2010,30(16):53-59.

(收稿日期:2011-04-28)

西宁—日月山 750 kV 同塔双回线路接地开关选择研究

钟 蓉

(湖南省送变电建设公司, 湖南 长沙 410007)

摘 要:简要分析了同塔双回线路感应电流和电压的产生原理,结合西宁至日月山 750 kV 同塔双回线路工程实际,应用 ATP 仿真软件进行了建模仿真计算,其计算结果表明同塔双回线路接地开关的电容、感应电压等参数可能超出 IEC 标准的 B 类开关限值,对类似工程设计具有重要参考意义。

关键词:750 kV 同塔双回线路; 接地开关; ATP

Abstract: The occurring principle of the induced current and voltage of double circuit transmission lines on the same tower is analyzed briefly. Based on the parameters of 750 kV Xining - Riyueshan project, the modeling and simulation calculation are carried out by ATP. According to the calculation results, the parameters of earthing switch in double circuit transmission lines on the same tower such as capacitance, induced voltage et al, may exceed the requirements of the switches of type B in IEC standards. It gives a reference for the design of the similar projects.

Key words: 750 kV transmission lines on the same tower; earthing switch; ATP

中图分类号: TM75 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)05-0054-04

0 引 言

西宁—日月山 750 kV 输电线路工程是西宁—日月山—乌兰—格尔木 750 kV 输变电工程的一部分,也是青藏联网工程的配套项目。本工程是为了贯彻落实党中央、国务院实施“西部大开发”的战略目标,缓解海西电网近期缺电局面,满足远期海西地区社会经济对电力发展的要求,对于提高海西电网的供电可靠性,加快海西地区经济、社会发展,增进民族团结,具有重要的经济及政治意义。

西宁—日月山段线路位于青海省经济发达的海东地区,线路沿线村落密集,道路纵横交错,为节约走廊资源,西宁—日月山段线路按同塔双回线路设计^[1]。对于同塔双回线路中一回线运行,另一回线停运时,在停运线路上将感应产生较高幅值的电压和电流。这主要是由于两回线路的静电耦合和电磁耦合产生的。该现象将给停运线路的检修工作以及两站拉合地刀的操作带来不利的影响,停运线路两端接地开关需要合理选择,使其具有开合感应电流、感应电压的能力。

结合西宁—日月山 750 kV 输变电工程实际,从研究模型、原理分析及仿真计算等方面对 750 kV 同塔双回线路的接地开关参数进行了研究,其相关结论

对 750 kV 同塔双回线路接地刀选择有重要参考意义。

1 研究模型

近距离的两回线路之间通过电感、电容耦合可相互感应,这种感应不会影响线路的正常运行,但当有一回线路检修、一回正常运行时,检修线路中将产生感应电流和感应电压。

对于高压输电线路,需要对其配置线路接地开关,配置此类接地开关的主要目的,是为了在线路停电检修时,确保检修人员的人身安全。所以,相关标准要求接地开关必须在主回路与大地之间提供合适可靠的电气连接。

通常,接地开关只有在被连接的主回路隔离开关分闸后才操作。因此,在输电线路正常情况下,它是不需要开、合电流的。

研究中考虑线路接地开关的 3 种工况,即线路两端接地;线路一端接地、另一端不接地;线路两端均不接地。

停运线路中产生的感应电流和电压的计算工况描述如下。

1) 工况 1

在检修过程中,检修线路两端的刀闸是接地的,

系统模型可用图1来表示。此时Ⅱ回线因电磁感应,将沿回路1形成感应电流(见图1)。当检修完成后,首先断开的接地刀闸需切断回路1的感应电流。在该工况下,由于电磁耦合而产生的电磁感应电流最大。

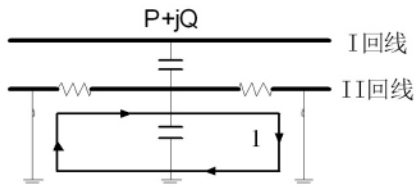


图1 检修线路两侧接地刀闸合闸

2) 工况2

当一侧接地刀闸断开后,系统模型可用图2来表示。由于同杆双回线路间的静电耦合作用,将沿回路2形成感应电流;同时,Ⅱ回线由于一侧断开,由于电磁耦合作用,将在断开端形成较高的感应电压。在该工况下,将感应产生较大的电磁感应电压和静电感应电流。

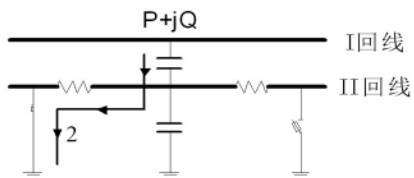


图2 检修线路一侧接地刀闸打开

3) 工况3

在两侧的接地刀闸均断开后,系统模型可用图3来表示。此时因同杆双回线路间的静电耦合作用,将在Ⅱ回线路上产生较高的感应电压。在该工况下,因静电耦合而产生的静电感应电压最大。

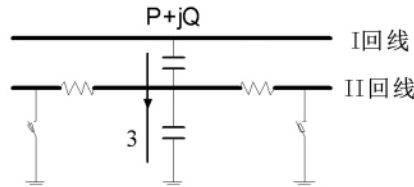


图3 检修线路两侧接地刀闸打开

一般而言,线路两端接地时,对应的感应电流为感性电流(电磁感应电流);线路一端接地,另一端不接地时,对应的感应电流为容性电流(静电感应电流),不接地端的感应电压为感性电压(电磁感应电压);线路两端均不接地时,对应的感应电压为容性电压(静电感应电压)。详细定义如下。

电磁感应电流,是当不带电的输电线路的另一端

接地,且通过电流的带电线路与此接地线路平行和邻近,接地开关在不带电的输电线路的一端使线路接地或不接地时,接地开关能够开合的感性电流。

电磁感应电压,是当不带电的输电线路的另一端接地,且通过电流的带电线路与此接地线路平行和邻近,接地开关在不带电的输电线路的一端使线路不接地时,接地开关上的电压。

静电感应电流,是当不带电的输电线路的另一端开路,且通过电流的带电线路与此接地线路平行和邻近,接地开关在不带电的输电线路的一端使线路接地或不接地时,接地开关能够开合的容性电流。

静电感应电压,是当不带电的输电线路的两端开路,且通过电流的带电线路与此接地线路平行和邻近,接地开关上的电压。

输电线路接地刀主要依据以上4个参数的计算值进行选择。

2 原理分析

从前面对感应电压和感应电流的产生模型分析,电磁感应主要与停运线路周围的磁场有关,交变的磁场在停运线路上感应出电压和电流。因为停运线路周围的交变的磁场大小与另一回运行线路的负荷电流(或者说传输功率)大小密切相关,所以停运线路的电磁感应电压和电流与运行线路的负荷电流大小有关。

静电感应主要与停运线路周围的电场有关,因为电场的存在,运行线路对地保持一定的电势,停运线路处于运行线路的电场中,感应后而获得对地电压。所以静电感应电压与线路运行线路电压,线路两端接地情况联系密切。

根据感应电压和感应电流的形成机理,对影响感应电流和感应电压的主要因素归纳如下。

运行线路的线路电压,负荷电流,平行线路长度,相间及回路间距离、导线高度,线路的换位方式,线路高压电抗器配置情况,线路两端接地情况,导线的相序排列,运行线路操作的影响等。

2.1 线路两端接地情况

停运线路接地线电阻大小和接地位置对感应电压大小影响较大。当停电检修的线路两端都不接地时,带电回路在停电回路上感应的电压较高;当停电检修的线路一端接地时,带电回路在停电回路上感应

的最高电压显著降低。

停运线路两端悬浮时,不仅存在静电感应还存在电磁感应,静电感应电压远远大于电磁感应电压,静电感应起决定因素。线路输送功率的大小对静电感应电压几乎没有影响。当停电线路一端接地时,线路输送的功率大,带电回路在检修回路上感应的电压也会增大。这是因为两端都不接地时,静电耦合占主导作用,而一端接地时,则静电耦合影响减弱,电磁耦合影响相对增强。

感应电压受潮流方向和大小影响不大,主要取决于接地状态,双侧不接地时最大,单侧接地时另一侧感应电压明显降低,两侧接地后接地点无电压,接地点感应电流随潮流增大而增大。

2.2 相间及回路间距离、导线高度

电磁感应电压主要由运行线路的电流产生,其值的大小与塔型尺寸的关系较小。但是,静电感应电压的大小与塔型尺寸关系较大,这是因为后者是一个电容分压的效果。当导线高度越高、运行线路与停运线路间的相间距离越小,则停运线路对地容抗与对运行线路容抗值的比值越大,则分压越多,静电感应电压越大。

2.3 线路长度

静电感应电流大小与线路长度有关,基本呈正比例关系。静电感应电压大小与线路长度关系不大。电磁感应电流大小与线路长度基本无关。电磁感应电压大小与另一回线路长度有关,基本呈正比例关系。

2.4 负荷电流

电磁耦合主要与电流有关,运行线路带载时,沿线电流较大,运行线路空载时,沿线电流逐渐减小,末端电流为零。

当停运线路两端悬浮时,静电感应起主要作用。由于运行线路空载时的沿线电压一般较负载时的沿线电压高,因此在运行线路空载时停运线路沿线的感应电压比在运行线路负载时停运线路上的感应电压略大。

停运线路一端接地时,电磁感应起主要作用,因此在运行线路空载时停运线路上的感应电压比运行线路在负载时停运线路沿线的感应电压小。

静电感应电流大小与另一回线路输送的功率基本无关。静电感应电压大小与另一回线路输送的功率的关系也不大。电磁感应电流大小与另一回线路

输送的功率有关,基本呈正比例关系。电磁感应电压大小与另一回线路输送的功率有关,基本呈正比例关系。

2.5 运行线路电压

静电耦合主要与电压有关。当运行线路的电压水平较高,如线路空载运行,或线路处于电网的送端时,对停运线路感应的电压水平比较高。

2.6 高压电抗器配置的影响

带高压电抗器的同杆双回线间的稳态和瞬态耦合作用明显强于不带高压电抗器的同杆双回线路。感应电压和电流的大小一般随线路高压电抗器的补偿度增大而增大,补偿度高的线路感应电压和电流也大。当线路高压电抗器的小电抗选择不合适时,停电线路甚至可能会产生危险的谐振过电压。

当同杆双回线路带有高压电抗器时,线路对地的容抗增大,从静电耦合的角度来看,停运线路在运行线路与地之间的分压比增大,两回路之间静电感应更为加强,因此有人称带高压电抗器的同杆双回线路为强联系的双回线。

2.7 导线排列的影响

现在,一般同杆双回路架设的线路都是鼓型排列, L_1 、 L_2 、 L_3 三相垂直分布。无论是正相序排列还是逆相序排列,最高感应电压基本相同且均出现在上相,因为上层导线对带电回路对称性差,且对地电容较小,所以感应的静电电压最大。线路换位,可以略微改善停运回路上的静电感应电压。

2.8 运行线路操作的影响

当对运行线路进行操作,停运线路全线不接地时,无论从运行线路的哪一侧切运行线路,在停运线路上都会产生相当高的衰减拍频振荡电压,沿线电流也很大,而当停运线路一端或两端接地时,则可大大降低感应电压。

3 相关标准

IEC 62271-102 标准^[4] 接地开关额定参数限值如表1所示。其中A类开关主要为满足一般单回路接地需要,而B类开关则面向同塔双回线路接地需要。事实上,根据不同系统条件,在同塔双回线路设计中,相关感应电压、电流是有可能超过该标准限值的,因此,结合具体工程实际,通过对不同工况的仿真计算,给出相应的接地开关限值要求是必要的。

表1 IEC 标准接地开关额定参数表(有效值)

额定电压 /kV	电磁耦合				静电耦合			
	感性电流		感性电压		感性电流		感性电压	
	/A	/kV	/A	/kV	/A	/kV	/A	/kV
	A类	B类	A类	B类	A类	B类	A类	B类
800	80	160	2	20	3	25	12	32

4 仿真计算

4.1 计算条件

西宁—日月山段线路位于青海省经济发达的海东地区,地形主要为一般山地,海拔在2 420~2 960 m之间。线路沿线村落密集,道路纵横交错,有省道及多条乡间公路可供利用,交通条件较为便利。西宁—日月山段线路按同塔双回线路设计,线路航空距离为23 km,推荐路径长36 km,线路曲折系数为1.57。

西宁—日月山线路段土壤电阻率约600 Ω·m,双回路导线按逆相序排列。同塔双回线路的塔头尺寸如图4所示。导线采用6分裂LGJ-500/45钢芯铝绞线,分裂间距400 mm,全线一根地线采用JLB20A-185铝包钢绞线,另一根地线采用OPGW-175(36芯)。

采用ATP仿真软件^[8]对该段线路进行建模,并计算各种工况下系统可能出现的感应电压、电流。

4.2 计算结果

根据实际运行中,可能存在各种运行工况,本报告对以下3种典型工况进行了计算。

工况1: I回线路空载带电运行,II回线路两端都不接地。

工况2: I回线路运行,II回线路停运,II回线

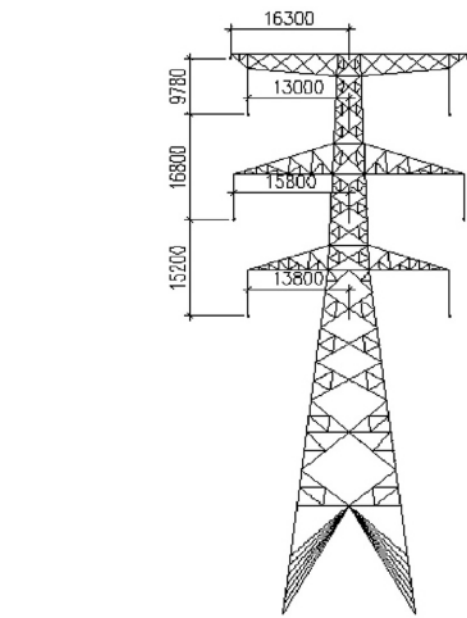


图4 典型杆塔示意图

路一端接地;

工况3: I回线路运行,II回线路停运,II回线路两端接地。

在计算中考虑以下两种运行方式。

方式1: 线路输送潮流按规划可能出现的最大潮流2 500 MW左右考虑,带电运行线路西宁侧母线电压按750 kV考虑。

方式2: 西宁侧母线运行电压按780 kV考虑。

ATP仿真计算结果如表2,3所示。

综合上述计算结果,经整理得到西宁—日月山750 kV线路接地开关参数最低限值要求如表4所示,也即该线路所选择的接地开关应满足投切以下电流和电压的限制要求。

表2 方式1 感应电压、电流计算结果表

运行工况	项目	西宁市侧			日月山侧		
		L ₁ 相	L ₂ 相	L ₃ 相	L ₁ 相	L ₂ 相	L ₃ 相
工况1	电压/kV	13.4	8.0	33.6	13.4	8.0	33.6
	电流/A	-	-	-	-	-	-
工况2	电压/kV	2.02	0.75	1.12	-	-	-
	电流/A	-	-	-	4.36	0.66	2.39
工况3	电压/kV	-	-	-	-	-	-
	电流/A	121	24	159	121	24	159

表3 方式2 感应电压、电流计算结果表

运行工况	项目	西宁市侧			日月山侧		
		L ₁ 相	L ₂ 相	L ₃ 相	L ₁ 相	L ₂ 相	L ₃ 相
工况1	电压/kV	13.9	8.3	35.1	13.9	8.3	35.1

(下转第79页)

轮值分时工作,当1号机开始工作时,1号机投入平衡桥,当电压平衡时1号机断开平衡桥退出转为待机模式(即退出公共接地点:直流系统公共接地点退出时直流正、负母线对地电压是悬浮的),其余装置工作过程与之类似。这样就存在系统并机时,当前一台机器平衡桥退出到下一台机器平衡桥投入时存在时间差,即该时间段直流系统内没有平衡桥(即没有公共接地点),6台装置的循环投入和退出也就是公共接地点的循环投入和退出,从而导致直流系统正、负母线对地电压循环波动。

2 改进措施及效果

由于直流系统正、负母线对地电压循环往复的持续波动对分析直流系统故障原因带来困难,无法正确判断直流系统是否有绝缘降低或接地,一旦投运将会严重危及系统安全运行。

为了确保系统安全稳定运行,调试人员向厂家提出修改设计原理,避免6台绝缘监测设备间因轮值工作间隙退出平衡桥而丢失公共接地点导致直流系统电压波动的工作模式,避免直流系统绝缘降低时由于投入各装置的不平衡桥导致直流系统电压被深度拉

偏的工作模式。厂家也接受该建议,现场立即着手修改软件,变更了出厂的设计原则,修改了平衡桥的运行方式:即退出所有不平衡桥,取消每段直流母线6台直流绝缘监测装置轮值分时工作模式,改为永久投入6台装置平衡桥(即公共接地点永久存在)的工作模式。经过厂家现场反复修改软件和试验检测,最终有效解决了直流系统正、负对地电压波动问题,遂宁变电站220 V直流系统已投入系统运行,性能稳定,状况良好。

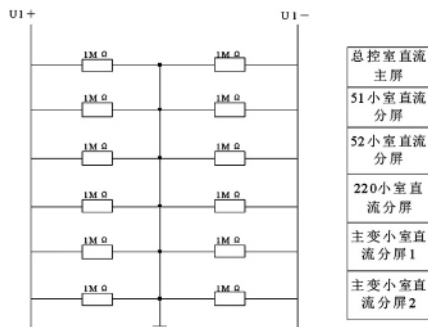


图4 遂宁变电站改进后220 V I段直流系统等效回路简化图

遂宁变电站220 V直流系统厂家设计程序改进后等效回路简化工作原理如图4所示(注:II段与I段完全一致)。

(收稿日期:2011-06-16)

(上接第57页)

表4 接地开关参数计算结果汇总

电容电压 /kV	电容电流 /A	电感电压 /kV	电感电流 /A
35.1	4.42	2.02	159

5 结 论

(1) 对于同塔双回线路中一回线运行,另一回线停运时,在停运线路上将因静电耦合和电磁耦合感应产生较高幅值的电压和电流。线路两端接地开关需要合理选择,使其具有开合感应电流、感应电压的能力。

(2) 静电感应电流大小与线路长度有关,基本呈正比例关系。静电感应电压大小与线路长度关系不大。电磁感应电流大小与线路长度基本无关。电磁感应电压大小与另一回线路长度有关,基本呈正比例关系。静电感应与运行线路电压有关,而与负载电流关系不大;电磁感应与运行线路负载电流有关而与运行电压关系不大。

(3) 参照IEC标准选择的B类接地开关参数不一定能满足750 kV同塔双回线路的要求,往往需要结合具体工程条件,经仿真计算提出接地开关参数设计要求。

(4) 根据接地开关参数计算结果,建议西宁—日月山双回750 kV线路两端接地开关都选容性电压大于35.1 kV的超B类接地开关。

参考文献

- [1] 750 kV 西宁—日月山—乌兰输电线路工程设计计划[R]. 西安:西北电力设计院,2009.
- [2] IEC 62271-102 High-voltage Switchgear and Controlgear - Part 102: Alternating Current Disconnectors and Earthing Switches [S]. IEC,2001.
- [3] Rule Book Alternative Transient Program.

作者简介:

钟蓉(1968),女,工程师,长期从事电力系统输变电工程建设。

(收稿日期:2011-05-23)

基于电压稳定裕度的低压减载方案研究及其工程实践

刘柏私¹, 颜伟²

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

摘要:首先对电压稳定仿真方法进行了介绍和分析, 进而对低压减载方案和策略进行了对比。针对当前工程实际情况, 提出了一种基于电压稳定裕度的低压减载方案, 并对其工程实践进行了简单的阐述。

关键词:电压稳定; 低压减载

Abstract: At first, the simulation methods of voltage stability are introduced and analyzed. Then, the low-voltage load shedding schemes and strategies are compared. Aiming at the actual engineering, a low-voltage load shedding scheme based on voltage stability margin is proposed. At last, the engineering practice of the proposed method is described briefly.

Key words: voltage stability; low-voltage load shedding

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0058-02

0 引言

电力系统电压稳定长期以来一直是电力公司所极为关注的问题。近年来, 电压失稳事故在全世界的不同电力系统中均有发生, 且造成了系统的大停电事故^[1]。因而, 国内外电压稳定问题成为了关注的热点之一。近几年来, 电力系统日益向大机组、大电网、超高压和远距离输电发展, 加上经济增长等因素导致负荷的不断增长, 当某些线路传输功率超过其传输能力时, 就会引发电压失稳, 从而被迫切除很多负荷造成很大的经济损失, 甚至系统瓦解。因此对电压稳定性的研究势在必行。

1 仿真方法

1.1 连续潮流法

1.1.1 连续潮流的模型

现有文献研究中提出了很多种连续潮流模型, 有负荷型连续潮流、支路型连续潮流、故障型连续潮流、控制型连续潮流等^[2]。此处重点介绍负荷型连续潮流模型, 如下极坐标系统下的常规潮流方程可写成

$$P_{Gi} - P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (1)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$$P_{G0}(1+t) - P_{L0}(1+t) - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (4)$$

式中, P_{Gi} 、 Q_{Gi} 为发电机出力; U_i 、 θ_i 为节点 i 的电压幅值和相角; P_{Li} 、 Q_{Li} 为节点 i 的负荷; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点导纳矩阵第 (i, j) 个元素的实部和虚部; n 为节点数目。

若以参数 t 来表示发电机和负荷的增长, 则有

$$P_{Gi} = P_{G0}(1+t) \quad (5)$$

$$P_{Li} = P_{L0}(1+t) \quad (6)$$

$$Q_{Li} = Q_{L0}(1+t) \quad (7)$$

$$0 \leq t \leq t_{cr} \quad (8)$$

其中, 参数 $t=0$, 对应基本的发电机出力 and 负荷水平; $t=t_{cr}$ 表示临界点的出力 and 负荷水平。

将变化的出力和负荷的表达式代入潮流方程, 得到新的潮流方程。

用矩阵和向量形式表示, 则为

$$H(X, t) = 0 \quad (0 \leq t \leq t_{cr}) \quad (9)$$

新的潮流方程的状态变量为 $[X, t]^T$, 即 $[U, \theta, t]^T$ 。由上式可以看出, 连续潮流方程类似于常规潮流方程, 只是把负荷增加作为参数加进方程中。随着负荷的增加, 相应增加发电机的发电量, 重新形成新的潮流方程。

1.1.2 连续潮流的算法

图1是连续潮流法的基本实现过程。

从初始潮流点出发, 随负荷的增加, 不断用预测/校正算子来连续求解潮流(系统的运行点), 得到负荷增长过程中一系列状态的潮流解, 包括鼻尖点附近以及越过鼻尖点的一系列状态。与常规的分析静态

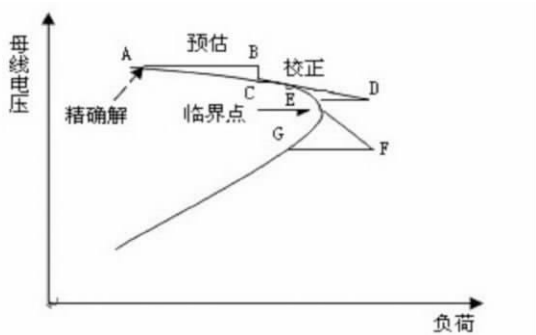


图1 连续潮流计算的预测-校正图

电压稳定性的潮流方法相比,连续潮流方法的优点在于能充分考虑系统的非线性以及参数对系统静态电压稳定性的影响,提供比常规潮流更丰富的信息,克服常规潮流在鼻尖点附近由于雅可比矩阵奇异导致的不收敛问题。当求得临界状态的潮流解后,也就得到了系统距离鼻尖点的裕度。连续潮流法是目前求取临界值比较有效的方法。

1.2 ELSI 指标分析方法

利用文献[6]提出的一个新的局部性电压稳定指标——扩展线路电压稳定指标 ELSI (extended line stability index), 以及该指标的计算方法及其在实时环境中实施的应用技术。

该新方法的理论基础是在任何复杂输电系统中,只要有一条线路(支路)的负载水平超过其最大传输容量,系统就会失去电压稳定。在某一系统状态下,线路的最大传输容量可通过如下准则来进行确定:在送端节点电压存在的情况下,由于足够大的线路载荷水平以及线路阻抗而使得受端节点电压不存在数值解的话,则该线路载荷水平达到了线路的最大传输容量。也就是说,如果任一条线路失去电压稳定,则整个系统就会在该状态发生电压崩溃。

该理论认为,如果系统中某一线路的 ELSI 指标在数值上接近于 1.0,则认为该系统处于静态电压失稳的临界状态。

1.3 低压减载策略

1.3.1 常规低压减载策略

该策略包含低电压装置启动门槛值判断及其对应的切负荷整定方案。首先,系统对装设了减负荷装置的母线电压进行判断。如果电压没有低于门槛值,则装置不动作。如果电压达到装置启动的门槛值,则执行切负荷过程。在切负荷过程当中,每切除一轮负荷以后,就进行一次潮流计算。例如:若某一站点电压低于装置的第一轮启动值 0.85,则装置动作一轮,

然后计算潮流。若此时电压高于装置第二轮启动值 0.82,则装置停止动作;若此时电压低于第二轮启动值 0.82,则装置动作第二轮,然后计算潮流,以此类推。若三轮动作完后电压还不能满足要求,停止切负荷操作。

1.3.2 裕度指标判断+低电压判断+低电压减负荷整定方案

该策略(后称“策略1”)仍然设3个基本轮,每轮的切负荷量和电压门槛值设置都同低压减载策略,ELSI 指标门槛值为 1.05。该策略同时考虑了低电压判据和裕度指标判据两个判据,只要任一判据低于门槛值,则装置开始动作切负荷,直到电压和指标值都满足要求,则停止切负荷。若装置动作三轮,此时不管电压和指标是否都已满足要求,装置都会停止切负荷。

1.3.3 裕度指标判断+低电压判断+裕度指标整定方案

在该策略(后称“策略2”)中,同时考虑了低电压判据和裕度指标判据两个判据,其中低电压判据的动作方案同现有的低压减载策略,ELSI 指标门槛值设为 1.05。指标判据的动作方案是一旦出现指标值低于门槛值,则切除站点所带负荷量的 10%,若还不满足要求,则继续切除剩余负荷的 10%,以此类推,直到指标值满足要求则停止切负荷。

1.3.4 裕度指标判断+低电压判断+裕度指标切负荷量+低电压减负荷整定方案

在该策略(后称“策略3”)中,装置的启动门槛值为:ELSI 小于 1.05,母线电压根据低电压策略的门槛值。策略整定方案的切负荷轮次按照现有低电压减负荷装置整定方案执行,即设置3个基本轮,每轮的可切负荷量按低压减载策略执行。但每次切除的负荷量至少为站点剩余负荷的 10%,即每次切除的负荷总量要达到站点剩余负荷的 10%。例如:若某站点指标值低于门槛值,则计算该站剩余负荷的 10%,假如为 10 MW,而整定方案中每轮的切负荷量分别为 7 MW,此时按多切原则,同时切掉一轮和二轮,的 $7+7=14$ MW 负荷。

1.3.5 3种策略的特点

低压减载策略只有低电压判据,一旦有安控装置的地点的电压幅值低于电压门槛值,则装置开始动作切负荷。

“策略1”同时考虑了低电压判据和裕度指标判

(下转第 83 页)

由于微电源的发电成本高于售电价格低于购电价格,因而在此期间有微电源满足负荷的需求,超出部分再购电;在峰段期间,由于微电源的发电成本低于售电价格,因此在此期间,各微电源按额定功率发电,超出负荷的部分,售出给主电网。此时微电源的出力情况与图 6 相符。当 $\alpha:\beta=1:1$ 时,即运行成本与环境治理成本以 1:1 加权,通过优化算法计算后,其微电源出力情况与图 5 相符。

4 结 论

主要研究了在满足负荷需求与分布式电源出力限制的前提下,同时考虑发电成本与有害气体排放成本,提出了微电网环保经济调度的数学模型。针对发电成本与排放成本的不同权重,运用遗传算法进行优化调度,并用实例验证了所建立模型的合理性。

参考文献

- 由于微电源的发电成本高于售电价格低于购电价格,因而在此期间有微电源满足负荷的需求,超出部分再购电;在峰段期间,由于微电源的发电成本低于售电价格,因此在此期间,各微电源按额定功率发电,超出负荷的部分,售出给主电网。此时微电源的出力情况与图 6 相符。当 $\alpha:\beta=1:1$ 时,即运行成本与环境治理成本以 1:1 加权,通过优化算法计算后,其微电源出力情况与图 5 相符。

4 结 论

主要研究了在满足负荷需求与分布式电源出力限制的前提下,同时考虑发电成本与有害气体排放成本,提出了微电网环保经济调度的数学模型。针对发电成本与排放成本的不同权重,运用遗传算法进行优化调度,并用实例验证了所建立模型的合理性。

参考文献

 - [1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述 [J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
 - [2] 李胜,张建华,李春叶. 微网(Microgrid)的并网运行方式探讨 [J]. 太原理工大学学报,2009,40(2):184-187.
 - [3] Haziargyriou N, Asano H, Iravani R, et al. Microgrids [J]. IEEE, Power & Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
 - [4] 郑漳华,艾 芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景 [J]. 电网技术,2008,32(16):27-31.
 - [5] 陈达威,朱桂萍. 微电网负荷优化分配 [J]. 电力系统自动化,2010,34(20):45-49.
 - [6] 艾欣,崔明勇,雷之力. 基于混沌蚁群算法的微网环保经济调度 [J]. 华北电力大学学报,2009,36(5):2-6.
 - [7] Mohumed F A, Koivo H N. SvsLern Modeling and On-line Optimal Management of Microgrid Using Multi-objective Optimization [C]. International Conference on Clean Electrical Power, 2007(5):148-153.
 - [8] Pudjianto D, Strbac G. Investigation of Regulatory Commercial Economic and Environmental Issues in Microgrid [J]. International Journal of Distributed Energy Resources, 2006, 2(3):245-259.
 - [9] 丁明,包敏,吴红斌. 分布式功能系统的经济调度 [J]. 电力科学与技术学报,2008,23(1):13-17.
 - [10] 周明,孙树洞. 遗传算法原理及应用 [M]. 北京:国防工业出版社,1999:18-31.
 - [11] 雷英杰,张善文,李续武,等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005:11-30.
 - [12] 邱晓燕,夏莉丽,李兴源. 智能电网建设中分布式电源的规划 [J]. 电网技术,2010,34(4):7-10.

作者简介:
王 彪(1985),男,硕士,四川省电力科学研究院,研究方向为电力系统运行与控制,从事工作为电网分析;
陈光堂(1986),男,硕士研究生,研究方向为微电网经济运行。

(收稿日期:2011-08-10)

(收稿日期:2011-08-10)

(上接第 59 页)

据两个判据,能够保证当系统某处出现静态电压稳定问题而电压值还较高时,装置能及时地进行切负荷操作。切负荷轮次,每轮切负荷量也完全按照现有的低压减载策略执行,具有很强的可操作性。

“策略2”同时考虑了低电压判据和裕度指标判据两个判据,此策略中指标判据没有切负荷轮次以及总的切负荷量的限制,这与实际情况是不相符的。做这个策略的目的是为了清楚地知道当某个站点现有安控装置3个基本轮的负荷量全被切掉后,指标值还不能恢复 >1.05 的情况下,这个站点到底要切掉多少负荷才能使指标值恢复到 1.05 以上。

“策略3”同时考虑了低电压判据和裕度指标判据两个判据,按不少切除原则能保证一次性切除足够的负荷量。且切负荷轮次、每轮切负荷量完全按照现有的低压减载策略执行,具有很强的可操作性。

2 结 论

对低压减载研究中常用的仿真方法及减负荷策略等进行了综述、对比及分析,指出了各方法的优劣,并对基于电压稳定裕度的低压减载方案及其工程实践进行了分析,拓宽了当前工程中低压减载的思路和方法,具有工程指导意义。

参考文献

- [1] 周双喜,朱凌志. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京: 中国电力出版社,2004.
- [2] 王锡凡,万方良,杜正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社,2003.
- [3] 李文沅,余娟,汪洋,等. 通过辨识电网薄弱环节实时识别电网电压稳定性的方法 [P]. 中国专利: 200710092710.1,2008-02-06.

(收稿日期:2011-07-05)

负荷静态特性对PV曲线的影响

李 林, 钟亨君

(德阳电业局, 四川 德阳 618000)

摘 要:以单负荷无穷大系统为研究对象, 负荷采用幂指数静态负荷模型, 通过数学理论分析了负荷静态特性对PV曲线的影响, 并分析了不同负荷模型的 λV 曲线和PV曲线的变化趋势及对系统电压稳定性进行了比较。分析结果表明: 只有在恒功率负荷的模型下 λV 曲线的鼻端对应于PV曲线的鼻端, 非恒功率负荷的模型下 λV 曲线的鼻端对应于PV曲线的下半支, 和恒功率负荷最易失去稳定性, 而恒阻抗负荷不存在不稳定的问题。最后通过仿真验证了理论分析的结果。

关键词:电压稳定; 负荷静态特性; PV曲线

Abstract: Taking the single load infinite bus system as the investigated subject, the exponential static load model is used. The influence of load static characteristics on PV curves is analyzed according to mathematical theory. The change trend of λV curves and PV curves of different load models is analyzed, and the voltage stability of the system is compared. The analysis results show that the nose of λV curves corresponds to the nose of PV curves only in constant power load model, the nose of λV curves corresponds to the second half of PV curves in non-constant power load model, and the constant power load loses the stability easily, while the constant impedance load does not exist the problem of instability. The simulation results verify the theoretical analysis at last.

Key words: voltage stability; load static characteristics; PV curve

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0060-04

随着电力市场化的改革以后, 市场参与者要求增加电网输送能力和稳定限额, 将使电力系统的运行条件变得更为紧张, 很容易出现电力系统电压稳定性问题^[1]。电压稳定性在很大程度上受负荷特性的影响^[2-4]。Taylor C. W. 甚至指出, 电压稳定性问题实质上就是负荷稳定性问题^[5]。在潮流计算中负荷的模型一般都取恒定功率模型^[6], 这必然会引起一定的误差。因为恒定功率负荷, 电压的稳定极限对应于最大功率传输点, 然而对于恒定功率、恒定电流和恒定阻抗负荷来说, 电压失稳的条件发生了变化, 负荷曲线也发生了相应的变化。

文献[7]通过静态负荷模型和潮流雅可比矩阵的结构和特点进行了分析, 得出根据PV曲线拐点或常规潮流雅可比矩阵的奇异性来判断系统的电压稳定性, 则所得的结果既可能保守, 也可能冒进; 文献[8]考虑了不同的负荷静态特性对电压稳定性的影响, 得出恒功率负荷模型比恒电流负荷、恒阻抗负荷模型更易失去稳定性, 使用恒功率负荷模型进行系统分析, 所得的结论会偏保守。这两篇文章都只分析了负荷不同模型对PV曲线的影响, 没有对比 λV 曲线

与PV曲线的不同。下面从数学公式推导出不同负荷模型对 λV 曲线与PV曲线的影响, 并比较了两者的不同, 最后通过仿真曲线验证了得出的结论。

1 负荷模型

1.1 负荷静态模型

负荷静态模型有两种, 即幂函数模型和多项式模型^[9]。

(1) 幂函数模型

$$\begin{cases} P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{p_v} \\ Q = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{q_v} \end{cases} \quad (1)$$

式中, U_0 为负荷额定电压; P_0 、 Q_0 表示在额定电压下 $U = U_0$ 时负荷所消耗的有功功率和无功功率; p_v 、 q_v 是负荷模型电压特性指数, 其值决定了负荷的类型。

特别是当 p_v 、 q_v 的值都等于 0、1、2 时, 表示的负荷模型分别为恒功率负荷模型、恒功率负荷模型和恒阻抗负荷模型。当 p_v 、 q_v 的值等于其他数值可以表

示不同类型负荷元件的综合特性。

(2) 多项式模型

由于实际电力系统仿真计算中所需要的通常是系统各节点的综合负荷特性。因此将恒阻抗负荷、恒电流负荷和恒功率负荷按一定比例的组合,即负荷的多项式模型,也叫 ZIP 负荷模型。

$$\begin{cases} P = P_0 [a_p (U/U_0)^2 + b_p (U/U_0) + c_p] \\ Q = Q_0 [a_q (U/U_0)^2 + b_q (U/U_0) + c_q] \end{cases} \quad (2)$$

式中, a_p 、 b_p 、 c_p 分别为恒定阻抗、恒定电流、恒定功率负荷的有功功率占总功率的百分比,并且 $a_p + b_p + c_p = 1$; a_q 、 b_q 、 c_q 分别为恒定阻抗、恒定电流、恒定功率负荷的无功功率占总无功功率的百分比,并且 $a_q + b_q + c_q = 1$ 。

1.2 负荷动态模型

负荷动态模型按照它是否以实际物理元件的数学模型为基础分为非机理性动态模型和机理性动态模型两类^[4]。由于这里主要分析的是负荷的静态特性对电压稳定 PV 曲线的影响,所以对动态负荷模型就不在叙述,详情请参考文献 [1-13]。

2 负荷静态特性对 PV 曲线影响的数学模型

由于负荷特性对电力系统的电压稳定性有着极其重要的影响,而 PV 曲线反映了负荷功率和电压之间的关系,因此定性地分析 PV 曲线具有重要的意义。为了能从机理方面研究负荷特性对电压稳定性的影响,可将复杂网络简化为如图 1 所示的单负荷无穷大系统。

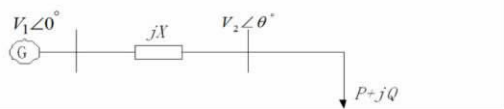


图1 单负荷无穷大系统

$E \angle 0$ 为无穷大系统的电压; $U \angle \theta$ 为负荷母线电压; X 为网络的等效电抗; $P + jQ$ 为系统负荷功率。根据潮流计算有如下表达式。

$$\begin{cases} P = \frac{EU \sin \theta}{X} \\ Q = \frac{EU \cos \theta - U^2}{X} \end{cases} \quad (3)$$

设系统初始运行状态负荷功率为 P_0 、 Q_0 , 初始运行电压为 U_0 , 负荷增长因子为 λ ($\lambda \geq 0$), 负荷模型选幂函数模型, 即

$$\begin{cases} P = (1 + \lambda) P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{p_v} \\ Q = (1 + \lambda) Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{q_v} \end{cases} \quad (4)$$

联立式(3)和式(4)可得

$$[(1 + \lambda) P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{p_v}]^2 + \left[\frac{U^2}{X} + (1 + \lambda) Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{q_v} \right]^2 = \left(\frac{EU}{X} \right)^2 \quad (5)$$

3 理论分析及仿真

分析负荷静态特性对系统电压稳定 PV 的影响, 对图 1 采用连续潮流进行分析, 图中参数 $E = 1$, $X = 0.2$, $P_0 = 0.8$, $Q_0 = 0.2$, $U_0 = 1$ 。

3.1 恒功率负荷对 PV 曲线的影响

当式(4)中 $p_v = q_v = 0$ 时, 即为恒功率负荷模型。

式(5)可以等效为

$$(P_0^2 + Q_0^2) X^2 (1 + \lambda)^2 + 2 Q_0 X U^2 (1 + \lambda) + (U^4 - E^2 U^2) = 0 \quad (6)$$

上式方程两边同时对 U 求导可得

$$\frac{d\lambda}{dU} = \frac{U [E^2 - 2U^2 - 2Q_0 X (1 + \lambda)]}{(P_0^2 + Q_0^2) X^2 (1 + \lambda) + Q_0 X U^2} \quad (7)$$

式(7)中分母是大于零的, 电压幅值也是大于零的, 因此只需要讨论分子中括号里面式子的大小关系。

当 $U^2 < [E^2 - 2Q_0 X (1 + \lambda)] / 2$ 时, $d\lambda/dU > 0$, 对应的 λV 曲线成增函数趋势。

当 $U^2 > [E^2 - 2Q_0 X (1 + \lambda)] / 2$ 时, $d\lambda/dU < 0$, 对应的 λV 曲线成减函数趋势。

当 $U^2 = [E^2 - 2Q_0 X (1 + \lambda)] / 2$ 时, $d\lambda/dU = 0$, 对应的 λV 曲线达到负荷最大值。

因此, 负荷为恒功率负荷模型时, 对应的 λV 曲线由两条单调曲线合成, 根据潮流多解理论, 这两条单调曲线分别是两个可行解的运行轨迹, 当到达曲线的 $d\lambda/dU = 0$ 处, 此时两个潮流解重合。对应的最大负荷因子 $\lambda_{\max}$ 和临界电压 U_{cr} 的计算过程如下。

把 $U^2 = [E^2 - 2Q_0 X (1 + \lambda)] / 2$ 代入到式(6)可得

$$1 + \lambda = \frac{E^2 (-Q_0 \pm \sqrt{P_0^2 + Q_0^2})}{2XP_0^2} \quad (8)$$

由于 $1 + \lambda > 0$, 式(8)分子括号中只能取正, 则有

$$1 + \lambda_{\max} = \frac{E^2 (-Q_0 + \sqrt{P_0^2 + Q_0^2})}{2XP_0^2} \quad (9)$$

把式(9)代入 $U^2 = [E^2 - 2Q_0 X (1 + \lambda)] / 2$, 由于电压幅值只能为正, 则有

$$U_{cr} = \frac{E}{\sqrt{2P_0}} (P_0^2 + Q_0^2 - Q_0 \sqrt{P_0^2 + Q_0^2})^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

绘制负荷的 λV 曲线和 PV 曲线如图2所示。

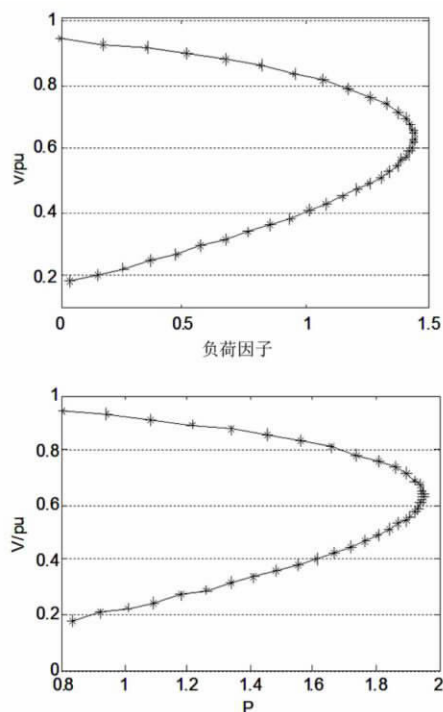


图2 恒功率负荷模型时的 λV 曲线和 PV 曲线

恒功率负荷模型时,负荷增长因子 λ 与负荷的功率 P 是成正比关系,所以绘制出的 λV 曲线和 PV 曲线形状是一样的,并且 PV 曲线的拐点与潮流雅可比矩阵奇异和最大负荷功率点一致。从图2可以看出,曲线是由增函数曲线和减函数曲线在 $\lambda_{\max} = 1.44$ 即最大负荷功率 $P_{\max} = 1.952$ 处合成一条曲线。因此,只有在上半支曲线运行时系统才是稳定的。

3.2 恒电流负荷对 PV 曲线的影响

当式(4)中 $p_v = q_v = 1$ 时,即为恒电流负荷模型。

式(5)可以等效为

$$\frac{(P_0^2 + Q_0^2) X^2}{U_0^2} (1 + \lambda)^2 + \frac{2Q_0 X U}{U_0} (1 + \lambda) + (U^2 - E^2) = 0 \quad (11)$$

上式方程两边同时对 U 求导可得

$$\frac{d\lambda}{dU} = - \frac{U + \frac{Q_0 X}{U_0} (1 + \lambda)}{\frac{(P_0^2 + Q_0^2) X^2}{U_0^2} (1 + \lambda) + \frac{Q_0 X U}{U_0}} \quad (12)$$

从式(12)中易知 $d\lambda/dU < 0$, 对应的 λV 曲线成单调减函数趋势。根据潮流多解理论,这条单调曲线是一个可行解的运行轨迹,即恒电流负荷模型对应一个潮流可行解。

绘制负荷的 λV 曲线和 PV 曲线如图3所示。

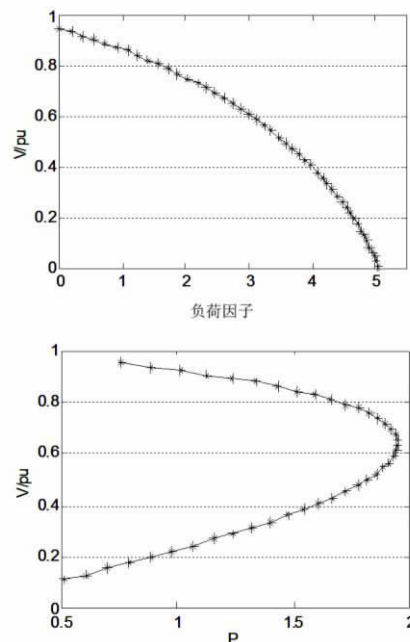


图3 恒电流负荷模型时的 λV 曲线和 PV 曲线

从图3可以看出,恒电流负荷模型时的 λV 曲线和 PV 曲线的形状不一样,这是由于负荷增长因子 λ 与负荷的功率 P 的关系中计及了节点电压的幅值。 λV 曲线正如公式分析一样,是一条单调递减的曲线。此时 $\lambda_{\max} = 5.05$ 并不对应 PV 曲线的拐点,而在 PV 曲线的下半支。因此,在 PV 曲线的下半支运行时系统也可能是稳定的。

3.3 恒阻抗负荷对 PV 曲线的影响

当式(4)中 $p_v = q_v = 2$ 时,即为恒阻抗负荷模型。

式(5)可以等效为

$$\frac{(P_0^2 + Q_0^2) X^2 U^2}{U_0^2} (1 + \lambda)^2 + \frac{2Q_0 X U^2}{U_0} (1 + \lambda) + (U^2 - E^2) = 0 \quad (13)$$

上式方程两边同时对 U 求导可得

$$\frac{d\lambda}{dU} = - \frac{\frac{(P_0^2 + Q_0^2) X^2}{U_0^2} (1 + \lambda)^2 + \frac{2Q_0 X}{U_0} (1 + \lambda) + 1}{\frac{(P_0^2 + Q_0^2) X^2 U}{U_0^2} (1 + \lambda) + \frac{Q_0 X U}{U_0}} \quad (14)$$

式(14)中分母为正,因此只需要讨论分子的大小关系。

分子关于 $1 + \lambda$ 的一元二次方程,其函数图像是开口向上的抛物线,并且有

$$\Delta = - \left(\frac{2P_0 X}{U_0} \right) < 0 \quad (15)$$

所以,分子也为正,则 $d\lambda/dU < 0$, 对应的 λV 曲线也成单调减函数趋势。根据潮流多解理论,这条单调曲线也是一个可行解的运行轨迹,即恒阻抗负荷模

型也对应一个潮流可行解。

绘制负荷的 λV 曲线和 PV 曲线如图4所示。

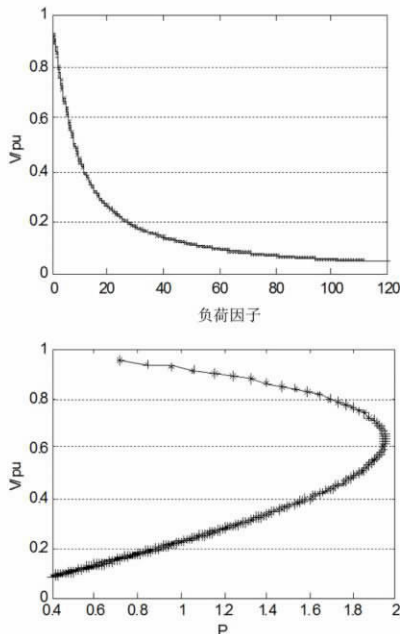


图4 恒阻抗负荷模型时的 λV 曲线和 PV 曲线

从图4可以看出,恒阻抗负荷模型时的 λV 曲线和 PV 曲线的形状也不一样, λV 曲线也是一条单调递减的曲线,但是曲线不存在负荷因子的最大值 $\lambda_{\max}$ 。因此,恒阻抗负荷模型不存在系统稳定性问题。

3.4 混合负荷对 PV 曲线的影响

当式(4)中 $0 < p_v = q_v < 1$ 及 $1 < p_v = q_v < 2$ 时,即为混合负荷模型。此时由于公式比较复杂,下面通过 λV 曲线图分别做简要的分析。

1. $0 < p_v = q_v < 1$

此时的负荷模型相当于是恒功率、恒电流和恒阻抗负荷混合模型,且恒功率负荷所占比例较大。图5描述了 $p_v = q_v = 0.3$ 、 $p_v = q_v = 0.6$ 、 $p_v = q_v = 0.8$ 的 λV 曲线。

从图5可以看出,当 $p_v = q_v = 0.3$ 、 $p_v = q_v = 0.6$ 时,系统始终存在两个解(增函数曲线轨迹和减函数曲线轨迹),而当 $p_v = q_v = 0.8$ 时,在负荷因子 λ 的初始取值的情况下只有一个潮流解,随着 λ 增大到一定程度时系统开始出现两个潮流解。并且随着负荷因子 λ 的增长,系统都存在 λ 取值极限,对应潮流极限,并且在潮流极限点两个解重合,对应的负荷因子的最大值 $\lambda_{\max}$ 逐渐增大。

2. $1 < p_v = q_v < 2$

此时的负荷模型也相当于是恒功率、恒电流和恒阻抗负荷混合模型,且恒阻抗负荷所占比例较大。图6描述了 $p_v = q_v = 1.3$ 、 $p_v = q_v = 1.6$ 、 $p_v = q_v = 1.9$ 的 λV 曲线。

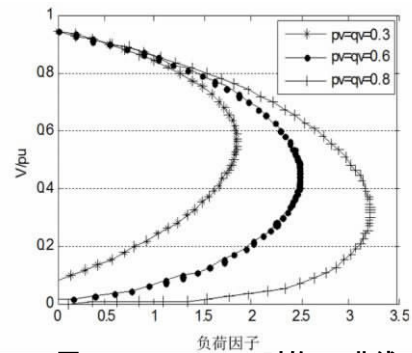


图5 $0 < p_v = q_v < 1$ 时的 λV 曲线

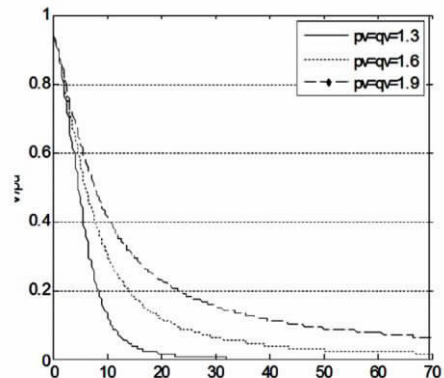


图6 $1 < p_v = q_v < 2$ 时的 λV 曲线

从图6可以看出,只要 $p_v = q_v > 1$ 所对应的 λV 曲线都是单调递减变化的。随着 p_v 、 q_v 的增加, λV 曲线从存在负荷因子的最大值 $\lambda_{\max}$ 到不存在 $\lambda_{\max}$ 。即随着恒阻抗负荷成分的增加,系统的稳定性增强。

4 结 论

通过对单负荷无穷大系统的研究,采用幂指数静态负荷模型,从数学理论分析了负荷静态特性对 PV 曲线的影响,并分析了不同负荷模型的 λV 曲线和 PV 曲线的变化趋势,同时通过仿真分析了负荷特性对电压稳定性的影响,从而验证了数学理论分析的结果。

参考文献

- [1] 李林,康积涛,张学群,等. 感应电动机参数对小干扰电压稳定影响[J]. 四川电力技术,2010,33(3):68-70.
- [2] Pal M. K. Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics[J]. IEEE Trans. on power systems,1992,7(1):243-249.
- [3] Milosevic B.,Begovic M. Voltage Stability Protection and Control Using a Wide-area Network of Phasor Measurements[J]. IEEE Trans. on Power Systems,2003,18(1):121-127.

(下转第88页)

(3): 222 - 226.

- [7] 杨宗麟. 华东电网负荷特性分析预测 [J]. 华东电力, 2008, 36(5): 50 - 52.
- [8] 张吉军. 模糊一致判断矩阵3种排序方法的比较研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(11): 1370 - 1372.
- [9] 葛少云, 闫大威, 董智. 基于模糊综合评判的城市电网电缆化改造 [J]. 现代电力, 2005, 22(3): 37 - 40.
- [10] 霍成军. 电力系统负荷特性分析研究 [D]. 天津: 天津大学电气与自动化工程学院, 2007.
- [11] 仲伟宽. 数据挖掘技术在负荷特性分析中的应用 [J]. 南京: 东南大学电气工程学院, 2006.
- [12] 杜海文, 孟领坡, 马洪斌. 防空导弹制导雷达综合抗干扰能力评估 [J]. 火力与指挥控制(Fire Control & Command Control), 2004, 29(5): 54 - 56, 61.

- [13] 张江, 应俊, 王琼, 等. 基于FAHP的电力变压器系统的脆性分析 [J]. 控制理论与应用, 2004, 23(7): 9 - 12.
- [14] 沈又幸, 范艳霞, 谢传胜. 基于FAHP法的风电项目后评估研究 [J]. 电力需求侧管理, 2008, 10(6): 16 - 18.
- [15] 高会生, 冉静学, 孙逸群. 基于改进的FAHP电力通信网风险评估 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, (3): 133 - 138.

作者简介:

徐飞(1987), 男, 硕士研究生, 主要从事调度自动化及计算机信息处理方面的研究工作;

周步祥(1965), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统自动化、计算机应用等方面的研究和教学工作;

林楠(1973), 女, 硕士, 讲师, 从事电力系统自动化、计算机应用的研究和教学工作.

(收稿日期: 2011 - 07 - 18)

(上接第63页)

- [1] Overbye T. J. Effects of Load Modeling on Analysis of Power System Voltage Stability [J]. International Electrical Power Energy System, 1994, 16(5): 329 - 338.
- [2] Carson W. Taylor. Power System Voltage Stability [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [3] M. H. Haque. On-line Monitoring of Maximum Permissible Loading of a Power System Within the Voltage Stability Limits [J]. IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(1): 107 - 112.
- [4] 孙倩薇, 杨兴华. 负荷特性对静态电压稳定性的影响 [J]. 黑龙江电力, 2005, 27(6): 413 - 416.
- [5] 侯明. 不同负荷模型对电压稳定性分析的影响研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2007.
- [6] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

- [7] 李超, 马幼捷, 周雪松, 等. 负荷动态特性及模型对分析电压稳定性影响的综述 [J]. 自动化与仪表, 2005(7): 17 - 20.
- [8] 段献忠, 江馥英, 何仰赞, 等. 负荷建模研究现状综述 [J]. 电力系统自动化, 1994, 18(5): 60 - 68.
- [9] 周文, 贺仁睦, 章健, 等. 电力负荷建模问题研究综述 [J]. 现代电力, 1999, 16(2): 83 - 89.
- [10] Ohtsuki H., Yokoyama A., Sekine Y.. Reverse Action of On-load Tap Changer in Association with Voltage Collapse [J]. IEEE Trans. on Power System, 1991, 6(1): 300 - 306.

作者简介:

李林(1984), 男, 硕士, 主要从事电力系统稳定运行与控制的研究.

(收稿日期: 2011 - 06 - 01)

(上接第70页)

地断开故障主变压器保留非故障主变压器, 最大限度地保留负荷.

3 结 论

通过运行人员调整综合回路法所述的相关硬压板和装置的软压板, 利用备自投装置的广义进线自投逻辑和广义桥备投逻辑, 实现对所有运行方式备自投控制策略. 该方法对运行方式没有限制, 并可以节省一台备自投装置及其相关回路的投资. 实验证明, 这是一种有效、简单、经济、实用的方法, 对备自投的分析研究及电网安全、稳定、可靠、经济的运行具有重要的现实意义.

参考文献

- [1] 崔凤亮, 周家春. 远方备用电源自动投入装置 [J]. 电力自动化设备, 2002, 22(9): 61 - 62.
- [2] 国电南瑞科技股份有限公司, NSR600RF 系列保护测控装置技术说明书 [J]. 南京, 2008.
- [3] 汤大海. 基于双电源扩大内桥的备自投解耦控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 103 - 106.
- [4] 郁家麟. 扩大内桥接线的备用电源自动投入的探讨 [J]. 电力建设, 2007, 28(1): 34 - 38.

作者简介:

张建军(1983), 男, 硕士, 助理工程师, 从事继电保护工作;
姚越兰(1977), 女, 大学本科, 助理工程师, 从事变电运行管理工作.

(收稿日期: 2011 - 06 - 16)

城市地下变电站相关问题探讨

荀旭丹

(成都城电电力工程设计有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 由于中心城区变电站选址、变电站运行的相关环境影响等一系列外部因素的改变, 地下变电站是今后城区站的发展方向已经成为必然, 分析了地下变电站的形式、要求和特点, 并对地下变电站的特殊问题进行了一定探讨。

关键词: 中心城区; 地下变电站; 难点; 处理措施

Abstract: As a series of external factors of environmental impacts related to the site selection of downtown substation and substation operation have changed, it is inevitable that the underground substation would be the future development direction of urban stations. The type, the requirements and the characteristics of the underground substations are analyzed, and the specific issues of the underground substation are discussed in a certain extent.

Key words: downtown; underground substation; difficulty; treatment measure

中图分类号: TM633 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)05-0064-03

随着城市经济的不断发展和城市规模的不断扩大, 尤其是近年来在国民经济高速增长的背景下, 许多大城市正在进行跨越式的经济大发展和更深层次的基本建设, 城区尤其是中心城区, 变电站的建设也面临一些新的变化。

1) 由于城市负荷的迅猛增长, 之前的变电站布点已经不能满足负荷的需求; 更由于负荷密度的加速增长, 变电站的供电区域在逐步收缩, 也意味着需要建设更多的站点覆盖各供电区域。

2) 城市规模的进一步扩展, 使得数目更多的变电站成为中心城区变电站。

3) 城市用地趋于紧张, 变电站选址工作难度逐年递增, 即使有可用地块, 常常面积也非常小且极不规整, 建设难度进一步增大。

4) 城市征地拆迁费用越来越昂贵, 地块的代价可能远远高于变电站本体, 致使变电站的造价进一步上升。

5) 中心城区往往为繁华的商业用地, 具有极高的商业价值, 在土地资源十分有限和宝贵的情况下, 如仅建1座3~4层的变电站, 则土地得不到充分利用, 是一种极大的资源浪费。

6) 中心城区变电站对防火、防爆、防噪声以及与周围环境协调的要求特别高。

鉴于外部条件的变化, 即使是现在运行的全户内变电站也不能完全满足全方位的要求, 因此对变电站

进行设计时, 就必须综合考虑, 全面衡量各方面的利与弊。借鉴国内外大城市的先进经验, 在地下建设变电站, 可充分利用土地资源, 地面上可做其他开发, 地下站成为目前解决问题的现实方案。

1 地下变电站的几种形式

目前, 国内的地下变电站主要集中在北京和上海, 北京于1969年投运了第一座35 kV地下变电站, 上海的第一座地下变电站35 kV锦江变电站于1989年建成投运, 除此以外, 少数大城市(如广州、天津等)近两年来建成投运了首座地下变电站, 西南地区目前尚未建设地下变电站。

地下变电站按布置类型分为半地下站和全地下站两种。

1.1 半地下站

半地下变电站是指变电站以地下建筑为主, 部分建筑在地上, 主变压器或其他主要电气设备部分布置于地下建筑内。北京、上海均有一定数量半地下站, 由于部分设备布置在地面上, 特别是主变压器布置于地面, 大大减轻了通风、消防两大难题的处理, 而且主设备的运行巡视、检修条件都大为改观; 同时由于地下建筑的深度降低, 地基在设计和施工过程中的难度也大为降低, 但地面建筑体积较大, 若周围环境有较高要求时难以实现。

1.2 全地下变电站

全地下变电站是指变电站主建筑建于地下,主变压器及全部电气设备均装设于地下主建筑内,地上只建有变电站通风口和设备及人员出入口等少量建筑,以及有可能布置于地上的大型主变压器的冷却设备或主控制室等。全地下变电站又分为单体独立和与其他建筑相结合的形式,与半地下形式相比,由于地下建筑较深,设计、建设的难度较大,运行维护条件较差,但地面以上有条件综合利用,对外部条件响应较好。

从地下变电站运行几十年的情况来看,全地下变电站的综合效果特别是社会效应更理想,因此近年来新建变电站以全地下形式为主。

2 基本技术原则

与地面布置的变电站相比,地下变电站在诸多方面都具有其特殊性,尤其在部分基本原则需特别关注。

2.1 站址选择

根据《35~220 kV 城市地下变电站设计规定》的要求,地下变电站的设计应以10年及以上电网规划为基础,依据电网结构、变电站性质等要求确定变电站最终规模,土建工程应一次建成。地下变电站的设计必须与城市规划和地面上总体规划紧密结合、统筹兼顾,综合考虑工程规模、变电站总体布置、地下建筑通风、消防、设备运输、人员出入以及环境保护等因素,由此确定全地下或半地下的形式。同时站址选择还应与市政规划部门紧密协调,统一规划地面道路、地下管线、电缆通道等,以便于变电站设备运输、吊装和电缆线路的引入与引出,并避免选择在地上或地下有重要文物的地区。站区外部设备运输通道的转弯半径、运输高度对站址选择有一定限制,其临近地区运输道路地下设施的承载能力也应充分校核。地下变电站选址综合因素要求更高。

2.2 电气主接线

目前城市地下变电站多为终端站,在满足电网规划和可靠性要求的条件下,宜减少电压等级和简化接线,选用断路器较少的接线。多年的运行表明这一做法是成功的,不仅可以节省投资,且可减少占地面积。

2.3 设备选择

根据《35~220 kV 城市地下变电站设计规定》规

定,“地下变电站的设备选择要坚持适度超前、安全可靠、技术先进、造价合理的原则,注重小型化、无油化、自动化、免维护或少维护的技术方针,选择质量优良、性能可靠的定型产品”。

2.3.1 无油化原则

目前地下变电站变压器主要采用常规油浸变压器和 SF_6 气体绝缘变压器。气体变压器的特点是可节省消防设备购置、占地及运行维护费用等,且可免除火灾危险性,保证运行安全,但其价格昂贵,生产厂家数量不多,设备的运行维护可能对厂家依赖性较强,不利于降低运行维护费用。北京、上海两地均在较早时选用气体变压器,近年来又恢复油浸式变压器的选用。其他设备遵循无油化原则进行选择。

2.3.2 小型化原则

设备选型宜小型化,以减少占地面积,使整体布置趋于紧凑合理,节约投资,同时便于设备运输、安装就位、运行维护。

2.4 简化总体布置

尽量减少挖方量,减少设备布置层数,以方便运输和安装,简化消防、通风系统,同时为将来的运行维护创造良好的条件。

二次应按照最新智能变电站的建设标准,并建设功能完备齐全、自动化程度高的智能辅助系统,适应地下变电站运行的特殊性,最大限度保障变电站的安全运行。

3 地下变电站的设计、建设难点及相应处理措施

3.1 基坑支护

独立的地下变电站基坑开挖在地下14 m至17 m左右,基坑护壁难度较大,关系到工程的整体安全,为保证基础施工顺利进行,基础施工前应进行专门降水设计,可采用管井降水措施。成都地区组成边坡的土体主要是人工填土、粉质粘土、粉土、砂土层及卵石层,抗剪强度均不高,为深基坑开挖的不稳定因素,因此基坑开挖时必须采取适当的支护措施,以保证施工安全及基坑四周已有建筑的安全。根据中心城区基坑距已有建筑物距离短及施工时场地狭小的特点,可采用挖孔排桩+预应力锚拉的方式进行坑壁支护,以控制基坑变形;在施工过程中,还应根据现场基坑变形监测结果的实际情况决定是否增加水平钢支撑。另外应特别注意,在施工前应联合有关机构对周边房

屋的现状进行调查取证,做好证据保全工作,以应对不必要的法律风险。

3.2 地基及抗浮处理

成都地区目前地下常年水位在地下7 m至9 m左右,在周边建设停止降水后正常最高潜水位为地下2.0 m,而地下变电站埋深均超过地下10 m有余(大大超过一般高层建筑的基坑深度),主体结构基础长期位于稳定的地下水位以下,长期承受浮力,须采取措施平衡地下变电站承受的巨大浮力。如结构进行抗浮稳定计算;适当加大结构截面尺寸增加结构自重(如加大外围护墙厚度、加大筏板厚度等)抵抗浮力;利用护壁桩结合地下室顶板的结构梁作反压梁以抵抗浮力。

3.3 抗渗、防潮及防涝

根据地下变电站规范,其防水应遵循“防、排、截、堵相结合,刚柔相济,因地制宜,综合治理”的原则。变电站防水等级均为一级。抗渗、防潮的重点是外围护墙,地下外墙宜采用自防水和外包防水相结合的方法,并在施工过程中采取特殊的方法和材料达到预期的效果。

地下变电站与管线通道的连接处是防水防潮的重点部位,应特别注意变电站排水方式的处理,处理好变电站外管沟底部与变电站的孔洞高差,做好管沟穿越变电站处的封堵工作,将防火封堵和防水封堵相结合,防止水从此处进入变电站。

3.4 暖通

地下变电站由于建筑条件限制,无法实现自然通风,大都采用自然进风、机械排风的通风方式,进风口兼作大设备吊装口,排风由设置在各设备间的低噪音风机机械排出。每个配电装置的通风量均通过热平衡计算确定。

由于地下变电站烟气无法自然排出,火灾时疏散困难,需要保证疏散通道安全,并进行事故后排风,保证设备正常维护。

地下变电站通风条件差,需要根据人员及设备发热、污染情况进行通风补充新风,保证室内环境满足人员活动要求。

此外,主控制室须就地布置冷暖空调机,夏季供冷风,使室内温度控制在26~28℃之间;冬季供热风,提高室内温度。

3.5 设备运输

设备的吊装方式对建设期设备的安装就位及后

期的运行检修至关重要,应结合变电站周围的具体情况,做好临永结合方案。地下变电站宜分别设置大、小吊装口。大吊装口供变压器等大型设备吊装使用,小吊装口设置在变电站主入口处,供常规检修使用。吊装口也可以与进风口合并使用。吊装口处应具备大型运输设备起重车辆的工作条件,有条件时最好布置在主要运输通道旁。

3.6 消防

按照国家消防相关技术标准、电力行业消防规范及变电站内保护区的特点,为早期发现火情和扑灭初期火灾,设置有火灾自动报警系统,并进行常规灭火器材、消火栓等配置。对于主变压器,需根据其型式,经过详细的技术经济方案的对比,慎重选择安全可靠稳妥可行的方案。

结合全站通风的情况设置消防排烟系统。

消防电源取自从站用配电盘消防专用接口。

3.7 给排水

给水从市政给水管道引入,并满足相应技术参数

的要求,使供水安全性和可靠性得到有效的保障。由于地下电站事故时地下设备房间容易积水,因此应将积水及时排除站外。可于地下室下标高层设事故排水集水坑,用以排除事故积水,同时配置潜水泵两台,一用一备。平时两台潜水泵轮流启动,避免长时间闲置而生锈,不能正常启动。

对选用油浸式变压器的变电站,主变压器有火情时,消防废水和主变压器油汇集在油池内,经过油池的油水分离后,主变压器内的油留在油池内,以便回收,消防废水排入废水池内,经污水提升泵排入站外市政污水管网。

室内消火栓系统采用消防泵房加压供水。各层均设置消火栓,消火栓间距按要求设置,保证两个灭火水龙到达同着火点。

室内消火栓给水管采用环状给水管网,并在环状管网上设置水泵接合器一座,以保证消火栓系统供水安全。

主变压器消防采用细水喷雾的变电站,室内水喷雾系统采用消防泵房加压供水,在泵后设置一套过滤设备,以净化水喷雾用水,并设置一套稳压设施,以保证水喷雾管网中的日常高压状态。室内喷雾系统雨淋阀前给水管采用环状给水管网,并在环状管网上设置水泵接合器二座,以保证系统供水安全。

(下转第94页)

5 结 语

此次异常,由于设备本身安装原因,故障原因非常隐蔽,发现问题较困难,不能通过现有油位计确定其脏油室油位,进而判断出回油滤网堵塞,由此给机组运行带来较大安全隐患,通过加装该脏油室油位计,同时完善相应技术措施,巡视人员可以非常直观、清晰地了解主油箱脏、净油室油位,及时发现设备异常情况。同时,由于该项目具有投入经费少、施工简单等优点,也在存在类似问题的机组中实施,据统计,

(上接第66页)

根据变电站的布置特点,还应充分考虑变电站清洁用水的要求,配置相应设施。

3.8 噪声治理

优先选用符合环保要求的低噪声设备,如变压器噪声值不超标、配电装置采用GIS设备等。变电站布置时,所有电气设备均设置于地下,所有通风设备均采用高效低噪音风机箱,并安装采用减震措施,风管安装消声器,风机出口设置阻抗复合式消声器,进出风口采用消声百叶,独立风机房内设置吸音孔板,通过一系列措施有效降低机房内噪声,并防止设备噪声向外界传播,尽可能地将噪声源与外界隔绝,将对周围环境的噪声影响降至最低。

3.9 电磁辐射

变电站电磁环境影响主要是工频电场、工频磁场和无线电干扰,地下变电站采用有钢筋砼的外墙、底板和顶板,有利于屏蔽电磁辐射。站内电气设备安装接地装置;金属构件尽量做到表面光滑,避免毛刺出现;所有设备导电元件接触部位均连接紧密,减少因接触不良产生的火花放电。采取多种措施后,根据同类工程监测分析,可将变电站产生的电磁环境影响水平控制在允许范围内。

3.10 变电站节能

变压器的空载损耗和短路损耗直接影响到变压器运行时的有功功率损耗,短路阻抗和空载电流的大小将直接影响到变压器运行时的无功功率损耗。为节省不必要的能源浪费,在主变压器的选择上,尽可能地降低变压器的空载损耗,适当降低变压器的负载损耗。同样合理计算站用电负荷,选择低损耗站用变压器。

照明灯具选择上采用绿色照明技术,选择高效率

改造两年来,该厂汽轮机油系统未发生跑油事件,消除机组潜在隐患,确保机组安全、稳定运行。

参考文献

- [1] 东方汽轮机厂. 润滑油系统说明书 [M].
- [2] 东方汽轮机厂. 集装油箱使用说明书 [M].

作者简介:

郑能伟(1979),男,本科,工学学士,四川广安发电有限责任公司,集控运行主值班员。

(收稿日期:2011-05-17)

照明灯具和长寿命光源。

建筑节能设计,可优化建筑体型系数、选用保温性能较好的墙体材料,对通风系统管道、阀门及系统组织进行综合考虑,在满足系统功能前提下减小阻力,设备采用高效节能产品,合理布置管路系统,降低系统阻力。

3.11 接地装置

地下变电站基础埋深较深,可充分利用埋设在主建筑底板下及四周的地网,形成呈笼形布置,同时建筑物各层楼板的钢筋焊接成网,并和室内敷设的接地母线相连;为降低接地电阻,变电站地网与地下建筑结构部分钢筋以及建筑地下桩基可靠连接。

考虑接地网的抗腐蚀要求以及无法更换等因素,主地网优先采用铜质材料接地网,室内接地母线及设备接地线可采用热镀锌扁钢。

3.12 保安电源

地下站多处于市中心,供电性质重要,根据规程要求,宜另引接一回站外电源,供全站停电时通风、消防等负荷使用。工程中可考虑将施工电源在施工完毕后,转为正式电源,作为站用变电站第三电源,供消防、通风、应急照明等重要负荷。

4 结 语

地下变电站的建设能提高对土地的综合利用,改善城市景观,优化城市环境,同时有效解决噪声污染、电磁辐射等问题,但其本身也面临诸多技术问题,对施工工艺、建设周期等方面也提出了很高的要求。只有全方位综合考虑,政府与企业共同扎实做好前期准备工作,才能最大限度发挥其社会、经济效益。

(收稿日期:2011-08-10)

基于 110 kV 扩大内桥接线的备自投控制策略

张建军¹, 姚越兰²

(1. 宁夏中卫供电局, 宁夏 中卫 755000; 2. 四川龙泉驿供电局, 四川 成都 610100)

摘要:在分析了 110 kV 内桥接线和扩大内桥接线方式下的备自投逻辑的基础上, 提出了一种基于扩大内桥接线备自投装置二次回路接线改造的综合回路法。该方法利用广义进线备投逻辑和广义桥备投逻辑来完成不同运行方式下的备自投动作逻辑。实验证明, 该方法能满足扩大内桥接线不同方式下的逻辑需求, 实现简单, 适应性强。

关键词:扩大内桥接线; 备自投; 综合回路法; 广义进线备投逻辑; 广义桥备投逻辑

Abstract: Based on the analyses of logic conditions of spare power automatic switching in 110 kV internal bridge and expanded internal bridge main connection, a comprehensive circuit method based on the connection reform of secondary circuit of automatic throw-in equipment of reserve power supply in expanded internal bridge main connection is proposed. The action logic of spare power automatic switching is completed under different operation mode by using logic condition of generalized incoming line backup switching equipment and generalized bridge back-up switching equipment. The experiment shows that the proposed method can meet the logic demand of different operation mode in expanded internal bridge main connection, and it is simple and adaptable.

Key words: expanded internal bridge main connection; spare power automatic switching; comprehensive circuit method; logic condition of generalized incoming line backup switching equipment; logic condition of generalized bridge back-up switching equipment

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0067-04

0 引言

近年来, 由于经济的飞速发展, 电力负荷日益增加, 本地区原有容量无法满足高速增长的负荷需求, 因此必须对变电站进行扩容。为了既节省投资又能最大化地提高供电可靠性, 将 110 kV 变电站改造成扩大内桥接线的情况越来越多, 为了提高供电可靠性, 对已具备两回线及以上的多回供电线路, 安装备自投装置来提高供电可靠性。

目前, 备自投装置通常用于主接线为内桥接线、单母分段接线和单母线接线的变电站^[1]。当变电站采用扩大内桥接线时, 传统的备自投逻辑就不能满足扩大内桥接线方式的实际运行需要, 下面通过对 110 kV 扩大内桥接线的分析, 给出在不同运行方式及异常情况下备自投的解决方案。

1 内桥接线备自投逻辑^[2]

内桥接线如图 1 所示。

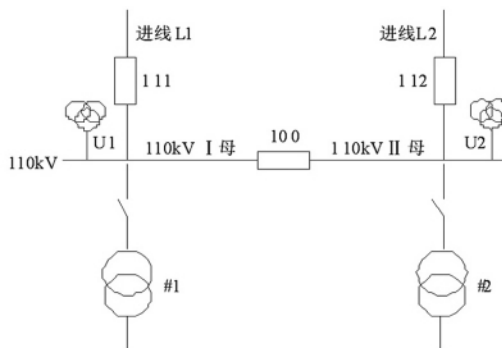


图 1 内桥接线

该接线方式下备自投主要有两种方式: ①桥备投; ②进线备投。

1.1 桥备投

如图 1 所示, 根据 I 母失压或是 II 母失压的不同, 桥备投有两种动作方式。

方式 1: 进线断路器 111 和进线短路器 112 处于合位, 且为合后, 桥断路器 100 处于跳位, II 母满足无压条件, I 母满足有压条件, 进线 L2 无流, 跳断路器 112, 合断路器 100, 构成方式 1。

方式 2: 进线断路器 111 和进线短路器 112 处于合位, 且为合后, 桥断路器 100 处于跳位, I 母满足无

压条件, II 母满足有压条件, 进线 L1 无流, 跳断路器 111, 合断路器 100, 构成方式 2。

方式 1 和方式 2 是相互对称的, 现以方式 1 进行说明。

(1) 充电条件: ①断路器 111 和断路器 112 处于合位, 且为合后; ②断路器 100 为跳位; ③桥备自投的软、硬压板处于投入位置; ④无闭锁备自投条件; ⑤ I 母、II 母均满足有压条件。

(2) 放电条件: ①断路器 111 或断路器 112 经人工断开; ②备用电源断路器 100 合上; ③在备自投过程中有短路器拒跳或拒合; ④有闭锁备自投条件; ⑤ I 母和 II 母满足无压条件, 且持续时间大于放电时间。

(3) 动作逻辑: 当备自投充电完成后, II 母无压、I 母有压、进线 L2 无流条件皆满足时, 桥备投方式 1 启动, 跳断路器 112, 在确认 112 开关跳开后, 合断路器 100。

1.2 进线备投

根据自投的断路器不同, 进线自投有两种方式。

方式 1: 进线 112 处于合位且合后, 100 断路器合位, 进线 111 断路器分位, I 母和 II 母满足无压, 进线 L2 无流, 进线 L1 满足有压条件, 跳 112 断路器, 合 111 断路器。

方式 2: 进线 111 处于合位且合后, 100 断路器合位, 进线 112 断路器分位, I 母和 II 母满足无压, 进线 L1 无流, 进线 L2 满足有压条件, 跳 111 断路器, 合 112 断路器。

方式 1 和方式 2 是相互对称的, 现以方式 1 进行说明。

(1) 充电条件: ①断路器 112 处于合位, 且为合后; ②断路器 100 为合位; ③断路器 111 为合位; ④进线备自投的软、硬压板处于投入位置; ⑤无闭锁备自投条件; ⑥ I 母、II 母均满足有压条件。

(2) 放电条件: ① I 母、II 母有一线电压低于母线有压定值, 且持续时间大于放电时间; ②断路器 112 经人工断开; ③在备自投过程中有短路器拒跳或拒合; ④有闭锁备自投条件; ⑤备用电源断路器 111 合上; ⑥分段断路器保护跳 100。

(3) 动作逻辑: 当备自投充电完成后, I 母、II 母无压, 进线 L2 无流, 进线 L1 有压条件皆满足时, 备投方式一启动, 跳断路器 112, 在确认 112 开关跳开后, 合断路器 111。

1.3 闭锁条件

一般应考虑: ①手动断开工作电源, 备自投不应动作; ②备自投停用; ③主变压器保护闭锁; ④为防止自投在故障上, 内部故障时应闭锁备自投, 应考虑备用电源进线开关的相邻原件保护出口闭锁备自投。

2 扩大内桥接线

2.1 运行方式分析

以某 110 kV 变电站的特殊扩大内桥主接线进行分析, 如图 2 所示, 各主变压器间通过内桥开关连接, 以减小多台主变压器跳闸的概率。为防止形成电磁环网, 一般要求 2 个电源不能长时间并列运行, 任意 2 台变压器的低压侧不允许并列运行, 因此 111、112、100、100A 4 个开关不能同时运行, 至少有一个处于备用状态。

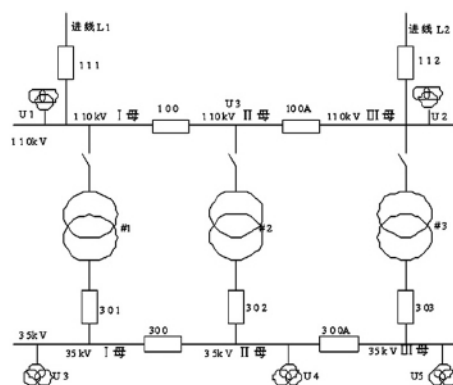


图2 扩大内桥主接线

通过分析可知这种特殊扩大内桥接线备自投可能的运行方式有 10 种, 如表 1 所示。

2.2 扩大内桥备自投配置策略

通过对表 1 的分析, 对扩大内桥接线的备自投控制策略进行研究。

2.2.1 双备自投配置

有与扩大内桥接线的 110 kV 母线具有两个桥开关, 因此最简单的办法就是对每一个桥开关配置一个备自投装置。

(1) 自然数法

利用一次接线对上述 10 种备投逻辑进行控制, 该方法能够全面地完成 10 种运行方式。但缺点是运行方式多, 逻辑复杂, 无法记忆, 接线繁杂, 设计的环节较多。

(2) 广义内桥法^[4]

表 1 扩大内桥接线的 10 种可能运行方式

运行方式	运行开关	备投开关	动作过程
1	111	100、100A、112	电源 L1 失电,跳 111,合 100、100A、112
2	112	100、100A、111	电源 L2 失电,跳 112,合 100、100A、111
3	111、100	100A、112	电源 L1 失电,跳 111,合 100A、112
4	112、100A	100、111	电源 L2 失电,跳 112,合 100、111
5	111、112	100、100A	电源 L1 失电,跳 111,合 100、100A 电源 L2 失电,跳 112,合 100、100A
6	111、100、100A	112	电源 L1 失电,跳 111,合 112
7	112、100、100A	111	电源 L2 失电,跳 112,合 111
8	111、100、112	100A	电源 L1 失电,跳 111,合 100A 电源 L2 失电,跳 112,合 100A
9	111、100A、112	100	电源 L1 失电,跳 111,合 100 电源 L1 失电,跳 111,合 100
10	全部停运	无	无

通过对表 1 的分析,不难看出,可以将扩大内桥接线看成由两广义的内桥接线构成,即 111、100、112 构成一个广义内桥,由备投 1 完成相关控制策略,111、100A、112 构成另一个广义内桥,由备投 2 完成相关控制策略(运行方式 1 和 2、3 和 4、6 和 7、8 和 9 对称,因此这里只介绍运行方式 1、3、5、6、8),如表 2 所示。

通过以上分析可以看出,组合法在两台备自投装置中配置简单而相似的备投逻辑,可以完全实现扩大内桥接线的 10 种不同运行方式。缺点 2 台备自投装置逻辑间有相互联系,2 台装置控制 4 台断路器,二次接线比较繁杂,相互间的连线也比较复杂。

2.2.2 单备自投配置

(1) 组合法^[4]:该方法利用 110 kV II 母电压 U_3 失压为备自投动作逻辑, U_3 可通过扩大内桥接线的电压切换及并列回路实现。将 111 和 100 看成一组开关,将 112 和 100A 看成一组开关,这样认为内桥就没有分段开关。只要 U_3 失压备自投就动作,定义备自投动作是跳闸跳一组开关的线路开关,合闸合一组开关的全部开关。控制策略如表 3 所示(运行方式 1 和 2、3 和 4、6 和 7、8 和 9 对称,因此这里只介绍运行方式 1、3、5、6、8)。

表 2 广义内桥法控制策略

运行方式	运行开关	备投开关	备投 1 动作过程	备投 2 动作过程	说明
1	111	100、100A、112	电源 L1 失电,跳 111,合 100、112	电源 L1 失电,跳 111,合 100A、112	111 跳两次,112 合两次
3	111、100	100A、112	电源 L1 失电,跳 111,合 100、112 电源 L1 失电,跳 111,合 100A、112	多合一次 100	
5	111、112	100、100A	电源 L1 失电,跳 111,合 100、112 电源 L2 失电,跳 112,合 100、111	电源 L1 失电,跳 111,合 100A、112 电源 L2 失电,跳 112,合 100A、111	111 跳两次,112 合两次 112 跳两次,111 合两次
6	111、100、100A	112	电源 L1 失电,跳 111,合 100、112	电源 L1 失电,跳 111,合 100A、112	多合一次 100、100A、112 合两次
8	111、100、112	100A	电源 L1 失电,跳 111,合 100、112 电源 L2 失电,跳 112,合 100、111	电源 L1 失电,跳 111,合 100A、112 电源 L2 失电,跳 112,和 100A、111	111 跳两次,多合一次 100、112 合两次 112 跳两次,多合一次 100、111 合两次
10	全部停运	无	不动作	不动作	无

通过以上分析可以看出,组合法不能满足扩大内桥接线的所有运行方式。

(2) 综合回路法:通过对以上各种方法的深入分析,提出一种综合的回路分析法。以国电南瑞的 NSR641RF 进线/桥备自投保护测控装置为例进行充分介绍。

现利用进线备投和桥备投的逻辑原理,将表 1 所示的 10 种运行方式归类到进线备投逻辑或桥备投逻辑,运行方式 5、8、9 属于桥备投,称为广义桥备投,运行方式 1、2、3、4、6、7 属于进线备投,称为广义进线备投,利用装置的备自投动作出口接点实现只要备投动作就去合 100 和 100A 开关的功能,因此装置的桥开关合闸出口回路可以不接。下面结合逻辑对装置的输入进行相关的改造。

表 3 组合法控制策略

运行方式	运行开关	备投开关	备投动作过程	说明
1	111	100、100A、112	不动作	U_3 无压, 备自投放电
3	111、100	100A、112	电源 L1 失电, 跳 111, 合 100A、112	正确动作
5	111、112	100、100A	不动作	U_3 无压, 备自投放电
6	111、100、100A	112	电源 L1 失电, 跳 111, 合 100A、112	多合一次 100A
8	111、100、112	100A	电源 L1 失电, 跳 111, 合 100A、112 电源 L2 失电, 跳 112, 合 100、111	多合一次 112 错误动作, 100A 没有合
10	全部停运	无	不动作	无

利用 3 个南京澳德斯电气有限公司提供的 UEG/A-4H2D 型继电器的接点实现装置的输入电压 U_I 和 U_{II} , 如图 3 所示, 630 和 640 分别为 U_I 和 U_2 经电压切换装置切换后从电压小母线取的电压。

当运行方式为广义进线备投时, 投入 1LP 压板, 3YQJ 动作, 装置两路电压并列, 通过 UEG/A-4H2D 1 和 UEG/A-4H2D 2 继电器实现了电压在装置侧根据需求并列, 在母线侧反应电压一次真实情况的要求, 断开 2LP 压板, 则装置的桥开关 TW 开入量开路, 满足进线备投充电条件。

当运行方式为广义桥备投时, 断开 1LP 压板, 装置两路电压取相应的母线电压 U_I 和 U_2 , 投入 2LP 压板, 则装置的桥开关 TW 开入量取两个桥开关的常闭节点(两个桥开关都在合位时 TW 开入量开路), 满足桥备投充电条件。如图 3 所示。

综合回路法控制策略如表 4 所示(运行方式 1 和 2、3 和 4、6 和 7、8 和 9 对称, 因此这里只介绍运行方式 1、3、5、6、8)。

可以看出, 综合回路法完全可以满足扩大内桥接线的全部运行方式, 节省了一台备自投装置, 二次接线比较简单, 具有很好的实用性。

2.3 备自投闭锁回路

备自投闭锁条件仅考虑主变压器保护。通过分析, 可以在备自投 100 合闸回路中串入 1 号主变压器差动及高后备保护动作接点, 只要 1 号变压器相应保护动作, 备自投 100 合闸回路断开。同样在备自投

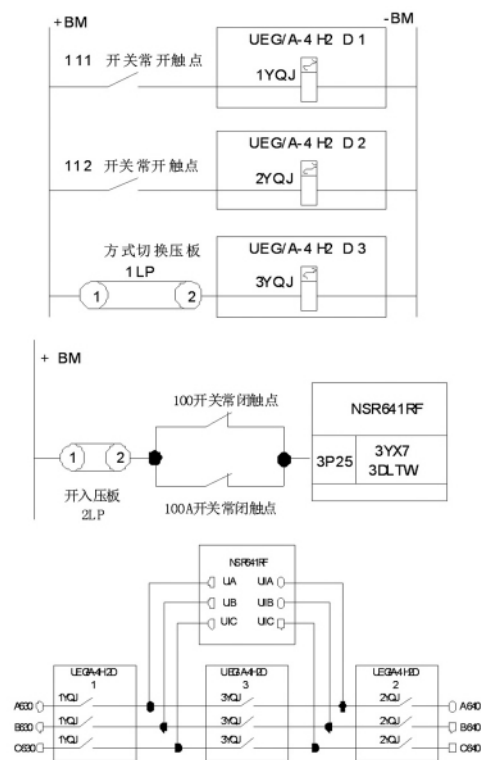


图 3 电压及开入回路示意图

表 4 综合回路法控制策略

运行方式	运行开关	备投开关	备投动作过程	说明
1	111	100、100A、112	L1 失电, 跳 111, 合 112、100、100A	广义进线备投逻辑
3	111、100	100A、112	L1 失电, 跳 111, 合 112、100、100A 广义进线备投逻辑, 100 多合一次	
5	111、112	100、100A	L1 失电, 跳 111, 合 112、100、100A L2 失电, 跳 112, 合 111、100、100A	广义桥备投逻辑 广义桥备投逻辑
6	111、100、100A	112	L1 失电, 跳 111, 合 112、100、100A	广义进线备投逻辑
8	111、100、112	100A	L1 失电, 跳 111, 合 112、100、100A L2 失电, 跳 112, 合 111、100、100A	广义桥备投逻辑 广义桥备投逻辑
10	全部停运	无	不动作	无

100A 合闸回路中串入 3 号主变压器差动及高后备保护动作接点, 只要 3 号变压器相应保护动作, 备自投 100A 合闸回路断开。2 号主变压器差动及高后备动作, 跳 100、100A 断路器, 备自投不满足动作条件不动作。这样在不需要对备自投进行闭锁情况下, 正确

(下转第 88 页)

(3): 222 - 226.

- [7] 杨宗麟. 华东电网负荷特性分析预测 [J]. 华东电力, 2008, 36(5): 50 - 52.
- [8] 张吉军. 模糊一致判断矩阵3种排序方法的比较研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(11): 1370 - 1372.
- [9] 葛少云, 闫大威, 董智. 基于模糊综合评判的城市电网电缆化改造 [J]. 现代电力, 2005, 22(3): 37 - 40.
- [10] 霍成军. 电力系统负荷特性分析研究 [D]. 天津: 天津大学电气与自动化工程学院, 2007.
- [11] 仲伟宽. 数据挖掘技术在负荷特性分析中的应用 [J]. 南京: 东南大学电气工程学院, 2006.
- [12] 杜海文, 孟领坡, 马洪斌. 防空导弹制导雷达综合抗干扰能力评估 [J]. 火力与指挥控制(Fire Control & Command Control), 2004, 29(5): 54 - 56, 61.

- [13] 张江, 应俊, 王琼, 等. 基于FAHP的电力变压器系统的脆性分析 [J]. 控制理论与应用, 2004, 23(7): 9 - 12.
- [14] 沈又幸, 范艳霞, 谢传胜. 基于FAHP法的风电项目后评估研究 [J]. 电力需求侧管理, 2008, 10(6): 16 - 18.
- [15] 高会生, 冉静学, 孙逸群. 基于改进的FAHP电力通信网风险评估 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, (3): 133 - 138.

作者简介:

徐飞(1987), 男, 硕士研究生, 主要从事调度自动化及计算机信息处理方面的研究工作;

周步祥(1965), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统自动化、计算机应用等方面的研究和教学工作;

林楠(1973), 女, 硕士, 讲师, 从事电力系统自动化、计算机应用的研究和教学工作.

(收稿日期: 2011 - 07 - 18)

(上接第63页)

- [1] Overbye T. J. Effects of Load Modeling on Analysis of Power System Voltage Stability [J]. International Electrical Power Energy System, 1994, 16(5): 329 - 338.
- [2] Carson W. Taylor. Power System Voltage Stability [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [3] M. H. Haque. On-line Monitoring of Maximum Permissible Loading of a Power System Within the Voltage Stability Limits [J]. IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(1): 107 - 112.
- [4] 孙倩薇, 杨兴华. 负荷特性对静态电压稳定性的影响 [J]. 黑龙江电力, 2005, 27(6): 413 - 416.
- [5] 侯明. 不同负荷模型对电压稳定性分析的影响研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2007.
- [6] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

- [7] 李超, 马幼捷, 周雪松, 等. 负荷动态特性及模型对分析电压稳定性影响的综述 [J]. 自动化与仪表, 2005(7): 17 - 20.
- [8] 段献忠, 江馥英, 何仰赞, 等. 负荷建模研究现状综述 [J]. 电力系统自动化, 1994, 18(5): 60 - 68.
- [9] 周文, 贺仁睦, 章健, 等. 电力负荷建模问题研究综述 [J]. 现代电力, 1999, 16(2): 83 - 89.
- [10] Ohtsuki H., Yokoyama A., Sekine Y.. Reverse Action of On-load Tap Changer in Association with Voltage Collapse [J]. IEEE Trans. on Power System, 1991, 6(1): 300 - 306.

作者简介:

李林(1984), 男, 硕士, 主要从事电力系统稳定运行与控制的研究.

(收稿日期: 2011 - 06 - 01)

(上接第70页)

地断开故障主变压器保留非故障主变压器, 最大限度地保留负荷。

3 结 论

通过运行人员调整综合回路法所述的相关硬压板和装置的软压板, 利用备自投装置的广义进线自投逻辑和广义桥备投逻辑, 实现对所有运行方式备自投控制策略。该方法对运行方式没有限制, 并可以节省一台备自投装置及其相关回路的投资。实验证明, 这是一种有效、简单、经济、实用的方法, 对备自投的分析研究及电网安全、稳定、可靠、经济的运行具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 崔凤亮, 周家春. 远方备用电源自动投入装置 [J]. 电力自动化设备, 2002, 22(9): 61 - 62.
- [2] 国电南瑞科技股份有限公司, NSR600RF 系列保护测控装置技术说明书 [J]. 南京, 2008.
- [3] 汤大海. 基于双电源扩大内桥的备自投解耦控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 103 - 106.
- [4] 郁家麟. 扩大内桥接线的备用电源自动投入的探讨 [J]. 电力建设, 2007, 28(1): 34 - 38.

作者简介:

张建军(1983), 男, 硕士, 助理工程师, 从事继电保护工作;
姚越兰(1977), 女, 大学本科, 助理工程师, 从事变电运行管理工作.

(收稿日期: 2011 - 06 - 16)

断路器机构与自适应重合闸的配合

郭又华¹, 赵俊¹, 朱雨²

(1. 四川省电力公司超(特)高压运行检修公司, 四川 成都 610041;

2. 成都电业局继电保护所, 四川 成都 610021)

摘要:超高压电网快速发展,同塔双回输电线逐步推广使用,断路器机构与自适应重合闸的配合必须重视。论述了同塔双回输电线自适应重合闸的基本策略,分析了某液压机构断路器的合闸回路及合闸低油压闭锁回路,提出了该断路器液压机构与自适应重合闸配合方面存在的问题,详细分析了自适应重合闸动作失败的原因,并提出了相关解决方案。

关键词:断路器; 自适应重合闸; 配合

Abstract: The cooperation of circuit breaker and adaptive recloser should be taken into consideration seriously due to the fast development of extra-high voltage power grid and the gradual promotion of double circuit lines on the same tower. The basic strategies of adaptive recloser in double circuit lines on the same tower are discussed, the closing circuit and the low oil pressure blocking circuit of circuit breaker of a hydraulic mechanism are analyzed, and the existing problems which may be caused by the cooperation of hydraulic mechanism of this kind breaker and adaptive recloser are proposed. The causes of adaptive reclosing failure are analyzed in detail, and the corresponding solutions are put forward.

Key words: circuit breaker; adaptive recloser; cooperation

中图分类号: TM862 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)05-0071-03

0 引言

大容量机组或电厂由于种种原因通常位于远离负荷中心的地方,这就需要将产生的大量电能进行长距离传输,并且要求很高的输电电压^[1]。部分地区为了缓解输送容量增加和输电线路通道资源减少的矛盾,同时控制建设成本,逐渐较多地使用500 kV同塔双回输电线路。500 kV同塔双回输电线路断面潮流大,需要采取多种措施以提高电网稳定运行水平。就继电保护而言,目前同塔双回输电线路多采用自适应重合闸技术,以提高重合闸成功率,尤其是减小同塔双回输电线路跨线故障以及相间故障对系统的影响。从国内外的研究情况来看,已经基本解决了断路器机构与常规重合闸的配合问题^[2,3]。而随着自适应重合闸技术的广泛应用,已经发现有断路器二次回路与自适应重合闸配合不当发生重合闸误动的行为发生,因此断路器机构如何与自适应重合闸逻辑配合应引起关注。

某变电站500 kV一次设备为HGIS配电装置,采用液压机构断路器。因多回出线为同塔双回线路,根

据同塔双回输电线使用自适应重合闸的要求,配置了南京南瑞继保公司的RCS-931E线路保护、RCS-921C断路器保护以及CZX-22R型操作箱。

在变电站工程验收调试中发现500 kV断路器液压机构与自适应重合闸配合不当,导致一些情况下断路器不能按自适应重合闸的逻辑正确动作。下面就该问题产生的原因做一下分析,并提出解决方案,该方案的可行性在变电站得以验证。

1 自适应重合闸的基本策略

自适应重合闸逻辑位于线路保护RCS-931E中,因此断路器与自适应重合闸配合更多地是跟RCS-931E线路保护配合。

当RCS-931E保护定值中控制字“投自适应重合闸”投入,RCS-921C保护定值中控制字“投自适应重合闸”投入且RCS-921C保护屏“投自适应重合闸”压板投入时,重合闸方式为自适应重合闸方式。RCS-931E实现自适应重合闸的全部逻辑,RCS-921C负责接受来自RCS-931E的分相合闸命令后,仅完成重合闸出口功能。当RCS-931E出现

通道异常、TV 断线等情况时, RCS - 931E 线路保护自动转为常规重合闸方式。RCS - 931E 常规重合闸方式可整定为单相重合闸或三相重合闸, 此时 RCS - 921C 并不受其影响, 仍接受 RCS - 931E 合闸命令且仅完成重合闸出口功能。

若将 RCS - 921C 的“投自适应重合闸压板”退出, 或者虽重合闸方式为自适应重合闸, 但发生开关偷跳, 以及 3/2 断路器接线中发生非同塔双回线跳闸时, RCS - 921C 转入预先设定的常规重合闸方式^[4], 不再等待 RCS - 931E 发出的合闸命令。常规重合闸方式并不是这里讨论的范围, 但必须指出即便 RCS - 931E 与 RCS - 921C 都转入常规重合闸方式时, 二者能互相配合, 不会发生二次重合问题。

简单说来, 自适应重合闸就是要实现分相结合无严重故障顺序重合。无严重故障重合是指判别是否发生了出口附近永久性故障, 如果是出口附近的严重故障, 则采取远故障侧先重合, 重合于故障对侧三跳, 本侧不再重合, 若重合成功本侧接着重合, 避免了重合于出口单相故障对系统的冲击。分相顺序重合是指两回线同时只有一相重合, 如果有多相需要重合, 则按一定顺序分别重合, 避免了重合于多相永久故障给系统带来的冲击。当发生同塔双回输电线相间非严重故障, 若双回线各自的健全相仍能构成准三相运行, 则线路相间故障不必跳该线路三相断路器, 应允许重合以保持功率的连续性, 从而提高系统的稳定性。分相顺序重合具体如下^[5]。

1) 如果同塔双回输电线有同名相故障, 同名相优先重合且可以同时重合, 尽快恢复缺相的运行;

2) 如果同塔双回输电线无同名相故障时, 按两回线超前相优先重合。

显然分相顺序重合要求相间非严重故障时超前相重合成功后滞后相能够继续重合。断路器机构和二次回路必须能够满足分相顺序重合这一要求。

2 断路器合闸低油压闭锁回路及合闸回路

断路器合闸低油压闭锁回路示意图如图 1 所示。断路器机构三相储能正常时, 断路器各相储能电机行程开关到位, 各相断路器储能电机行程开关合闸低油压闭锁接点 S1 都处于闭合状态, 断路器合闸低油压闭锁中间继电器 HYJ 承受电压动作。

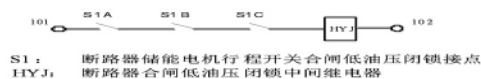


图1 断路器合闸低油压闭锁回路示意图

断路器合闸回路示意图如图 2 所示。断路器合闸低油压闭锁接点 HYJ 串联在 A、B、C 三相合闸回路中。当合闸储能到位时, 串接在图 2 合闸回路中的 HYJ 接点闭合, 故电能够到达合闸线圈。若此时断路器处于跳闸位置, 断路器三相均储能到位, 断路器允许合闸。当断路器 A、B、C 三相中任意一相合闸压力降低到需要闭锁合闸时, 该相断路器储能电机行程开关合闸低油压闭锁接点 S1 断开, 导致 HYJ 继电器失电, HYJ 接点返回, 断路器三相合闸回路都被断开, 此时断路器三相均不允许合闸。

根据以上分析, 该站 500 kV 断路器为任一相断路器合闸压力降低同时闭锁断路器三相合闸回路设计。

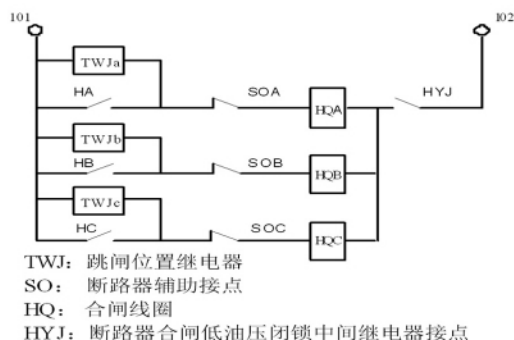


图2 断路器合闸回路示意图

3 断路器机构与自适应重合闸的配合

3.1 断路器误动行为

同塔双回输电线之间发生跨线单相故障时, 例如 I 线 A 相对 II 线 B 相短路, 超前相为 I 线 A 相, 按照分相顺序重合的要求, I 线 A 相先合, II 线 B 相后合。同塔双回输电线之中某一回线发生单相短路或双回线之间发生上述跨线单相短路时断路器都能够正确动作重合。

同塔双回输电线之中某一回线发生相间短路, 该线故障相之超前相重合成功后, 滞后相重合出口但开关拒动, 造成滞后相断路器重合失败, 断路器机构非全相继电器动作跳开该线断路器三相。

同塔双回输电线发生跨线的相间短路时, 例如 I 线 A 相对 II 线 BC 相短路, 按照分相顺序重合的要求, 超前相为 I 线 A 相, I 线 A 相先合, 然后再合 II 线 B 相, B 相重合成功最后合 C 相。试验结果为 I

线 A 相重合成功,接着 II 线 B 相重合成功,C 相断路器拒动,最后 II 线断路器机构非全相继电器动作跳开 II 线三相断路器。如果跨线相间短路包含同名相,例如 I 线 AB 相对 II 线 AC 相短路,按照分相顺序重合的要求两条线路应同时先合同名相 A 相, B 相合闸成功后再由 I 线合 B 相,最后 II 线再合 C 相。动作结果为 I 线、II 线各自 A 相重合成功后 I 线 B 相断路器、II 线 C 相断路器分别拒动,各自断路器机构非全相继电器动作跳开双回线六相断路器。

试验发现只要某线路发生相间短路,其滞后相断路器必然拒动,分析原因认为这都与断路器机构合闸回路和合闸低油压闭锁回路有关。

3.2 断路器误动原因分析

该站断路器为油压机构,开关跳、合闸都要释能。当故障超前相断路器重合闸动作出口后,该相储能释放,合闸储能不到位,该相储能电机行程开关低油压闭锁接点 S1 打开,合闸低油压闭锁中间继电器 HYJ 返回,断路器合闸回路中的 HYJ 接点因此断开,导致三相合闸回路不通。由图 1 可见,合闸回路断开后,三相跳闸位置继电器返回,但这并非重合闸立即放电的充要条件,重合闸继续动作合滞后相。由于电机运转打压对超前相重新储能需要一定时间,在此期间断路器合闸回路一直不通,断路器不能动作。同样由于合闸回路被断开,跳闸位置继电器返回,虽然故障超前相已经重合成功,断路器此时处于非全相状态,但 $TWJa = 0$ 、 $TWJb = 0$ 、 $TWJc = 0$ 、RCS-921C 认为断路器三相都处于合位,当非全相整定时间到达时,机构非全相继电器动作跳开三相断路器而不是 RCS-921C 非全相保护动作跳开该断路器。这就是为什么单相短路或双回线跨线单相短路情况下断路器能够正确重合,而只要发生相间短路,相间短路线路之滞后相断路器必然拒动,最终由发生相间短路的线路机构非全相继电器动作跳开其三三相断路器的原因。

对常规重合闸而言,如果投入单相重合闸,当发生相间短路时,保护三跳不重,如果投入三相重合闸,任何短路故障保护装置都三跳三重,重合闸动作后断路器合闸压力降低对线路保护与断路器机构二者之间的配合并无影响。

3.3 解决方案

解决该断路器机构与 RCS-931E 自适应重合闸的配合问题,需将断路器机构合闸低油压闭锁回路由一相合闸压力降低闭锁三相合闸回路更改为分相闭

锁回路。如图 3,各相新增一电压型继电器 HYJa、HYJb、HYJc,串接于各自的储能电机行程开关合闸低油压闭锁接点 S1A、S1B、S1C 中,然后将各相低油压闭锁中间继电器接点 HYJa、HYJb、HYJc 分别串接于各相合闸回路,如图 4 所示。这样当超前相重合闸动作后,该相断路器合闸低油压发生,但只断开本相合闸回路,不影响滞后相继续重合,实现断路器与自适应重合闸的正确配合。

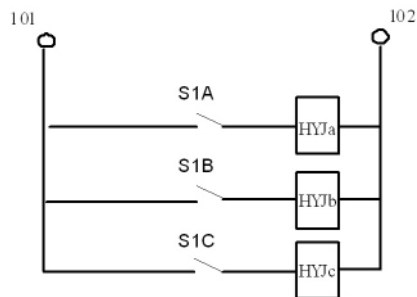


图3 断路器分相合闸低油压闭锁回路示意图

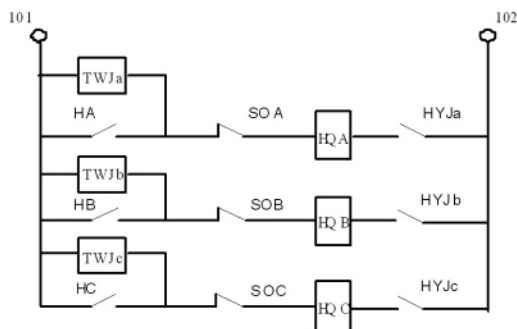


图4 改进的断路器合闸回路示意图

4 结 论

推广使用同塔双回输电线自适应重合闸,最大限度地维持了故障期间系统间的联系,在避免了对系统严重冲击的前提下,大大增加了重合的机会和重合成功率,从稳定的角度使双回线的输送能力进一步提高,带来了直接的经济效益。断路器机构有弹簧储能机构、液压机构等,每种机构在储能和释能的特性上可能有所不同。如果把断路器跳闸、重合闸、再加速跳闸称为断路器的一个工作循环,有些机构储满只能满足一个工作循环,有些机构却能满足一个以上的工作循环。另外,不同断路器二次回路也有一些差别。因此在断路器机构与自适应重合闸配合方面,就要针对不同断路器的实际情况具体分析,不能照搬常规重合闸的经验。前面针对该站断路器机构与自适应重

(下转第76页)

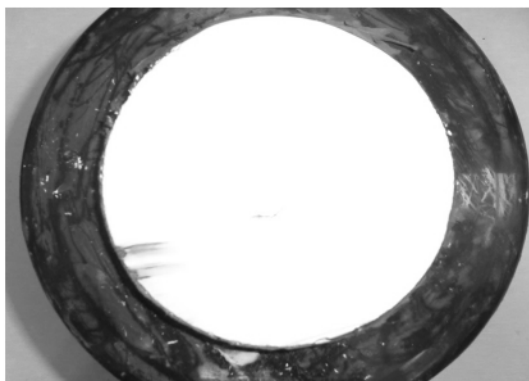


图7 瓷瓶横向剖切图(瓷瓶底部区域)

1.4 试验结果分析

在试验时存在两种现象,一是耐压时,随着电压的升高,发热区域从瓷瓶顶部由上到下,从内而外,逐渐扩散,且耐压装置的二次电流、电压剧烈变化。二是耐压后,瓷瓶绝缘电阻极低,只有 $1.5 \text{ M}\Omega$,但过一段时间后绝缘又恢复到耐压前。

为了解释这两种异常现象,先建立缺陷瓷瓶的等效电路模型,如图7, C_i 为瓷裙间的分布电容, R_i 为瓷瓶电阻, G_i 为存在裂纹的地方的等效气隙。

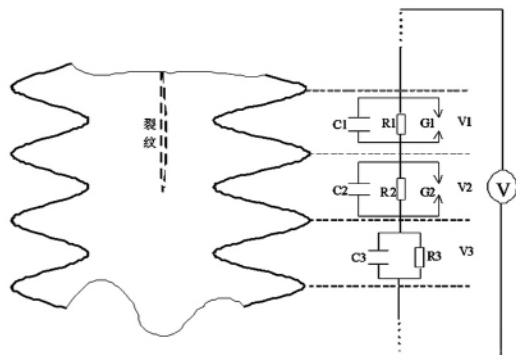


图7 瓷瓶横向剖切图(瓷瓶底部区域)

(上接第73页)

合闸的配合问题进行了分析,指出了该断路器不能正确重合闸的原因并提出了解决方案,能较有效地避免同塔双回输电线自适应重合闸误动作对电网造成的危害。

参考文献

- [1] Rakosh Das Begamudre. 超高压交流输电工程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] 杜书平, 吴俊芳, 赵敏, 等. SF₆ 弹簧操作机构断路器与重合闸配合问题的浅析 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 122 - 123.

耐压时瓷瓶内部气隙在高压下击穿放电, 放电导致试验电压降低, 放电终止, 瓷瓶内部气隙绝缘得以恢复, 试验电压回升, 当试验电压回升到放电电压值时, 气隙又被击穿, 又开始新一轮放电。因此, 耐压设备二次电流、电压也相应地剧烈波动。放电导致瓷瓶内部温度升高, 尤其是在瓷瓶顶部气隙越多的地方, 放电越强烈温度越高, 当试验电压升高时放电向瓷瓶下部气隙较小的区域扩散。相应地, 从红外图谱上也反映出发热区域从瓷瓶顶部由上到下, 从内而外, 逐渐扩散。

从绝缘电阻的变化可以看出瓷瓶内部裂纹和外部环境存在联通通道, 第一次耐压后, 联通通道变得更大, 使外部潮气进入瓷瓶内部, 在第二次耐压时, 瓷瓶温度升高, 将瓷瓶干燥, 排出潮气, 绝缘又恢复到第一次耐压时状况。

2 结 语

通过这次缺陷处理及分析, 说明了红外测温对设备隐患排查具有重要意义, 利用红外测温及图谱分析的手段可以发现设备存在的绝缘缺陷。

参考文献

- [1] 李建明, 朱康. 高压电气设备试验方法 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

作者简介:

罗 飞(1979), 男, 硕士研究生, 从事变电检修及高压试验工作。

(收稿日期: 2011-07-15)

- [2] 张赞, 张斌, 吴祖升. 浅析 110 kV 线路保护与 SF₆ 断路器配合时的重合闸问题 [J]. 继电器, 2007, 35(20): 77 - 78.
- [3] RCS-921C 型断路器失灵保护及自动重合闸装置技术说明书.
- [4] RCS-931E 型超高压线路成套保护装置技术说明书.

作者简介:

郭又华(1979), 男, 硕士, 工程师, 从事继电保护、电测仪表工作;

赵 俊(1984), 男, 硕士, 助理工程师, 从事继电保护工作;

朱 雨(1978), 女, 学士, 工程师, 从事继电保护工作。

(收稿日期: 2011-06-01)

一起隔离开关瓷瓶缺陷案例分析

罗 飞

(德阳电业局, 四川 德阳 618000)

摘 要:通过红外测温发现隔离开关瓷瓶可能存在重大隐患,经过试验、分析找到导致缺陷的原因,并对试验中的异常现象给出了解释。

关键词:红外热像图谱; 绝缘电阻; 测温

Abstract: The possible hidden defects in porcelain insulator of disconnected switch can be detected by infrared temperature measurement. Through the test, the reasons caused the defects are found and analyzed, and the explanation of abnormal phenomena in the test is given.

Key words: infrared thermal image; insulation resistance; temperature measurement

中图分类号: TM855 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)05-0074-03

0 前 言

2010年10月8日在德阳电业局鄢家站的一次专业巡查中通过红外测温发现35 kV斑鄢线避雷器隔离开关5198号C相瓷瓶存在温度异常的情况,温度较高的部位已达31.6℃(见图1),隔离开关瓷瓶而正常部位的温度为26.1℃,温差达5.3℃。经过反复测试和分析确定隔离开关存在危急缺陷,立即将该只隔离开关退出运行,并更换了新隔离开关。

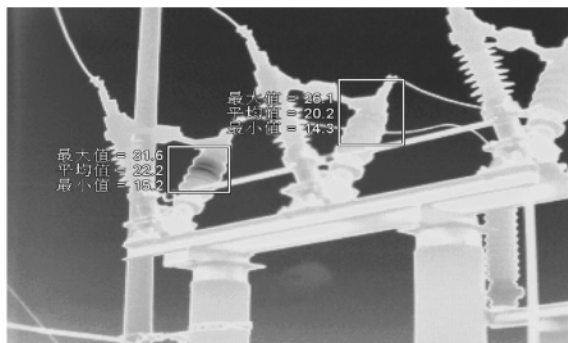


图1 缺陷隔离开关红外热像图

1 试验结果及分析

1.1 绝缘试验

从红外热像图谱中可以看出,隔离开关瓷瓶最上面的两片瓷裙存在温度异常的情况,可能是由于表面脏污引起,也有可能是内部缺陷所致^[1]。

1.1.1 绝缘电阻测试

为了找到缺陷原因,首先对瓷瓶进行了绝缘电阻测试。在试验前先对瓷瓶进行常规检查,发现瓷瓶表面脏污,但未见裂纹或其他异常情况。采用数字兆欧表对其进行绝缘测试,试验接线见图2。

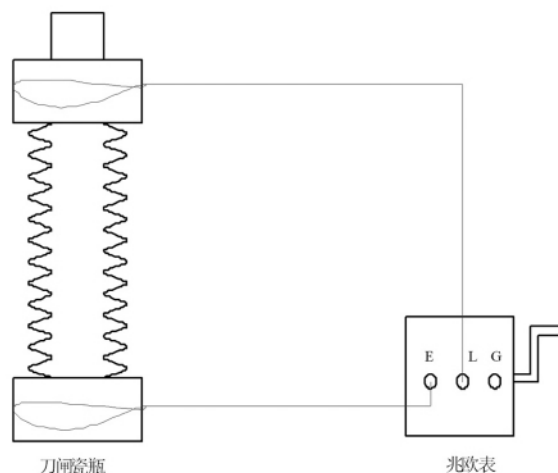


图2 绝缘电阻测试

表1 绝缘测试结果

试验分类	缺陷瓷瓶绝缘电阻	正常瓷瓶绝缘电阻
	/MΩ	/GΩ
瓷瓶清洁前	58.6	106
瓷瓶清洁后	51.3	

1.1.2 耐压试验

对清洁后的瓷瓶进行耐压试验(见表2、表3),同时用红外热像仪观察温度变化情况,耐压时红外热像图见图3。

表 2 耐压试验结果

试验瓷瓶	试验电压	耐压装置二次电流、电压情况
正常瓷瓶耐压	72 kV/1 min 通过	电流几乎为零,电压稳定。
发热瓷瓶耐压	72 kV/1 min 未通过	电流在 0 ~ 12 A 剧烈波动,电压不稳定,放电声音较大。

表 3 第一次耐压前后绝缘测试结果

试验分类	缺陷瓷瓶绝缘电阻 /MΩ
耐压前	43
耐压后	52

一天后对瓷瓶再次耐压,试验数据见表 4。

表 4 第二次耐压前后绝缘测试结果

试验分类	缺陷瓷瓶绝缘电阻 /MΩ
耐压前	1.5
耐压后	51

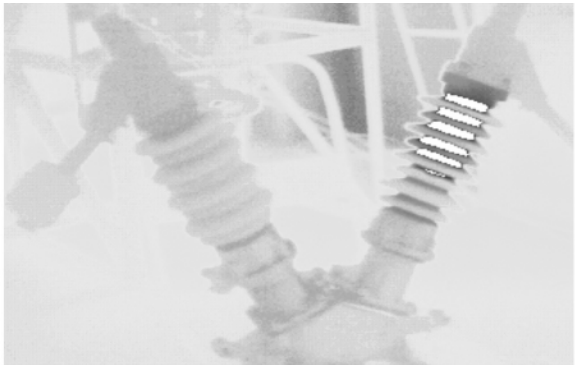


图 3 耐压时红外热像图

第二次耐压前,绝缘电阻极低,但经过耐压后绝缘电阻又恢复到第一次耐压时的水平。

1.1.3 绝缘电阻分解测试

从耐压试验时的红外热像图可以看出,瓷裙温度较低,越靠近瓷瓶内部,温度越高,说明缺陷很有可能在瓷瓶内部。因此有必要对瓷瓶绝缘进行分解测试,根据实际情况,设计了图 4 所示的测试方法,以确定缺陷的具体部位。

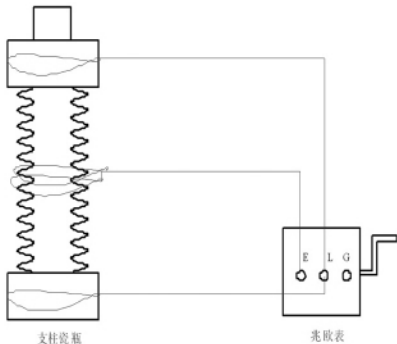


图 4 绝缘电阻分解测试

通过图 4 所示的方式测得的绝缘电阻高达 103 GΩ。

1.2 试验数据分析

从常规绝缘电阻测试发现绝缘很低,可能存在贯穿性的低阻通道。通过对瓷瓶表面进行清洁、处理,绝缘电阻仍然很低,但也不能就此排除表面的原因。耐压试验时,二次电流、电压波动很大,说明了瓷瓶存在间歇性放电现象。

瓷瓶绝缘电阻分解测试时可以认为内部电阻和外部电阻并联的模型,如图 5。

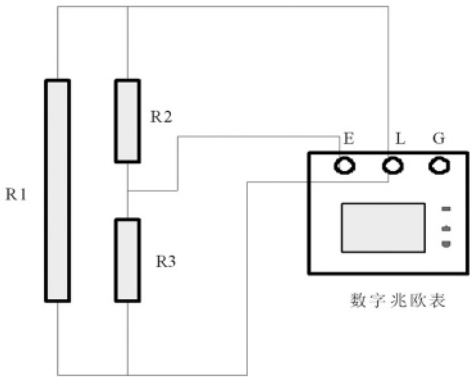


图 5 绝缘电阻分解测试原理图

R1 为内部电阻,R2、R3 为表面电阻,从图 5 可以看出,R1 被短接旁路,测试结果仅为 R2、R3 的并联电阻。从试验数据可以看出表面绝缘电阻高达 103 GΩ,说明了表面绝缘正常,因此,通过排除法,确定缺陷应该在瓷瓶内部,并且是贯穿性的低阻通道。从耐压时的红外热像图也间接证实了缺陷来自瓷瓶内部。

1.3 分析结果验证

为了验证试验分析,采用切割机对瓷瓶进行纵向剖切,其剖切断面如图 6。

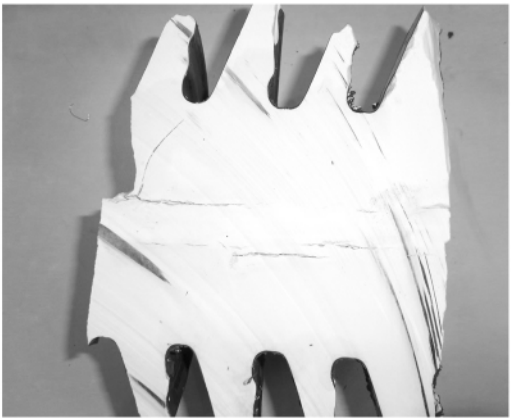


图 6 瓷瓶纵向剖切图(温度异常区域)

从剖切图可以看到在瓷瓶中心确实存在多条裂纹,越靠近瓷瓶温度异常区域,裂纹越多。这和试验分析结果是一致的。

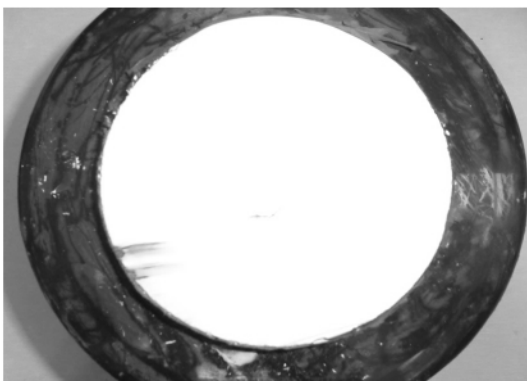


图7 瓷瓶横向剖切图(瓷瓶底部区域)

1.4 试验结果分析

在试验时存在两种现象,一是耐压时,随着电压的升高,发热区域从瓷瓶顶部由上到下,从内而外,逐渐扩散,且耐压装置的二次电流、电压剧烈变化。二是耐压后,瓷瓶绝缘电阻极低,只有 $1.5 \text{ M}\Omega$,但过一段时间后绝缘又恢复到耐压前。

为了解释这两种异常现象,先建立缺陷瓷瓶的等效电路模型,如图7, C_i 为瓷裙间的分布电容, R_i 为瓷瓶电阻, G_i 为存在裂纹的地方的等效气隙。

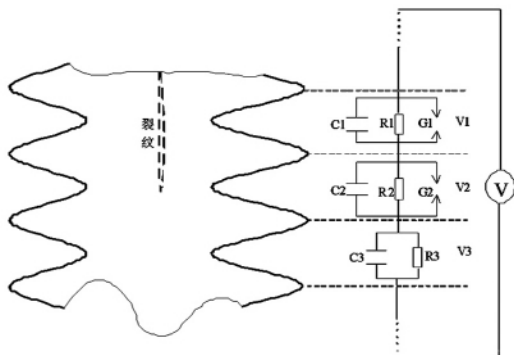


图7 瓷瓶横向剖切图(瓷瓶底部区域)

(上接第73页)

合闸的配合问题进行了分析,指出了该断路器不能正确重合闸的原因并提出了解决方案,能较有效地避免同塔双回输电线自适应重合闸误动作对电网造成的危害。

参考文献

- [1] Rakosh Das Begamudre. 超高压交流输电工程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] 杜书平, 吴俊芳, 赵敏, 等. SF_6 弹簧操作机构断路器与重合闸配合问题的浅析 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 122 - 123.

耐压时瓷瓶内部气隙在高压下击穿放电, 放电导致试验电压降低, 放电终止, 瓷瓶内部气隙绝缘得以恢复, 试验电压回升, 当试验电压回升到放电电压值时, 气隙又被击穿, 又开始新一轮放电。因此, 耐压设备二次电流、电压也相应地剧烈波动。放电导致瓷瓶内部温度升高, 尤其是在瓷瓶顶部气隙越多的地方, 放电越强烈温度越高, 当试验电压升高时放电向瓷瓶下部气隙较小的区域扩散。相应地, 从红外图谱上也反映出发热区域从瓷瓶顶部由上到下, 从内而外, 逐渐扩散。

从绝缘电阻的变化可以看出瓷瓶内部裂纹和外部环境存在联通通道, 第一次耐压后, 联通通道变得更大, 使外部潮气进入瓷瓶内部, 在第二次耐压时, 瓷瓶温度升高, 将瓷瓶干燥, 排出潮气, 绝缘又恢复到第一次耐压时状况。

2 结 语

通过这次缺陷处理及分析, 说明了红外测温对设备隐患排查具有重要意义, 利用红外测温及图谱分析的手段可以发现设备存在的绝缘缺陷。

参考文献

- [1] 李建明, 朱康. 高压电气设备试验方法 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

作者简介:

罗 飞(1979), 男, 硕士研究生, 从事变电检修及高压试验工作。

(收稿日期: 2011-07-15)

- [2] 张赞, 张斌, 吴祖升. 浅析 110 kV 线路保护与 SF_6 断路器配合时的重合闸问题 [J]. 继电器, 2007, 35(20): 77 - 78.
- [3] RCS-921C 型断路器失灵保护及自动重合闸装置技术说明书.
- [4] RCS-931E 型超高压线路成套保护装置技术说明书.

作者简介:

郭又华(1979), 男, 硕士, 工程师, 从事继电保护、电测仪表工作;

赵 俊(1984), 男, 硕士, 助理工程师, 从事继电保护工作;

朱 雨(1978), 女, 学士, 工程师, 从事继电保护工作。

(收稿日期: 2011-06-01)

变电站直流系统安全隐患的排查和处理

邓明燕

(四川电力送变电建设公司, 四川 成都 610051)

摘要:遂宁 500 kV 变电站投运前两段 220 V 直流系统母线电压一直处于波动状态,直接影响到遂宁变电站的投运,通过现场排查发现导致直流系统母线电压循环波动原因:6 台直流母线绝缘监测装置轮值分时工作循环投入和退出平衡桥公共接地点造成。改进措施:退出绝缘监测装置不平衡桥和轮值分时工作模式,永久投入平衡桥和公共接地点,有效解决了直流系统电压波动问题。

关键词:220 V 直流系统; 母线电压波动; 安全隐患; 现场排查; 改进措施

Abstract: The two segments of bus voltage of 220 V DC system are always in a situation of fluctuation in Suining 500 kV Substation, which directly impacts on the substation being put into operation. Through the on-site investigation, the reasons led to the cyclical fluctuations of bus voltage of DC system are found, that is, the rotating time division mode of 6 sets of DC bus insulation monitoring device has been put into use repeatedly and the common grounding point of the balance bridge has been exited. The improvement actions are proposed, that is, to exit the unbalance bridge and rotating time division mode of insulation monitoring device, and to put the balance bridge and the common grounding point into operation permanently, which can effectively solve the voltage fluctuations of the DC system.

Key words: 220 V DC system; bus voltage fluctuation; security risk; site investigation; improvement action

中图分类号: TM645 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)05-0077-03

0 概述

2010 年 3 月底,新建遂宁 500 kV 变电站投产在即,但由于遂宁变电站两段 220 V 直流系统电压均一直处于波动状态,在各直流绝缘接地巡检装置液晶屏上显示的正、负对地电压幅值虽然有拉偏但还稳定,用万用表直接监测 I、II 段直流系统正、负母线对地电压幅值既不平衡也不稳定,正极对地电压和负极对地电压一直持续往复波动,正、负对地电压幅值波动范围相对应地从 43.0 V 升到 177.0 V 然后又降至 43.0 V,周而复始,几乎不到一分钟就循环往复一次,用专业术语表述为典型的“乒乓效应”,此时正、负母线之间电压幅值一直稳定在 220 V,如图 1 所示遂宁 500 kV 变电站 220 V 直流系统电压波动图(注: II 段直流系统电压波动图与 I 段完全一致)。

1 原因排查

遂宁 500 kV 变电站 220 V 直流系统配置为两段,各自独立工作,没有电气联系,各段采用分布式辐

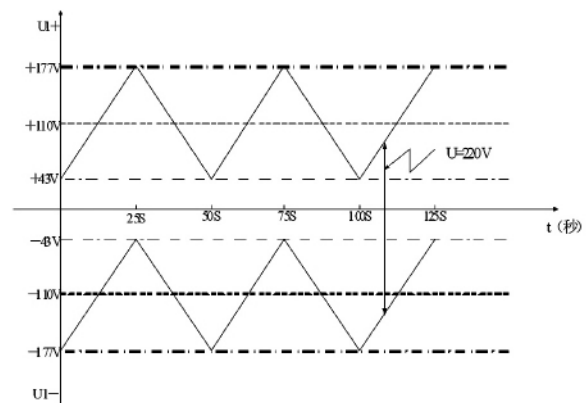


图 1 遂宁 500 kV 变电站 220 V I 段直流系统电压波动图
射网络供电,各直流屏均配置一台哈尔滨光宇公司生产的 DIM5A 型分布式微机绝缘监测装置来进行直流系统接地巡检工作,该装置采用平衡桥和不平衡桥相结合的方式(该设计原理是该公司推出的新技术,遂宁变电站是首个使用),完成正负母线对地电压、正负母线对地电阻的监测;支路检测不需要外加信号,根据电流差原理对支路因接地产生的对地漏电流进行在线无接触测量,从而实现各支路正负对地电阻监测以及接地故障的选线定位,其工作原理结构简图如图 2 所示。

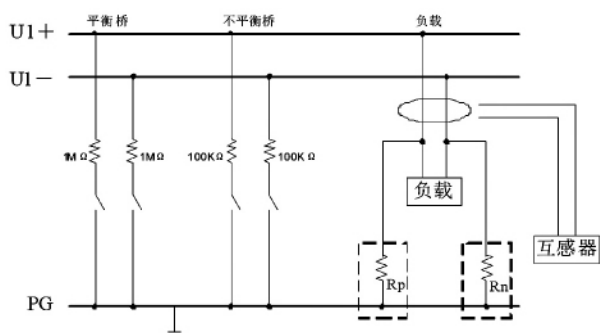


图2 DIM5A 分布式微机绝缘直流系统接地
巡检仪原理结构简图

1.1 直流系统工作原理

本站有一个主控楼和4个保护小室,其中主控楼220V直流总控室有2段直流母线2台直流绝缘接地巡检装置,主变压器小室及220kV小室有6个分屏6台直流绝缘接地巡检装置,2个500kV小室每个小室各有2个分屏、2台直流绝缘接地巡检装置。

每段直流母线各带6台直流绝缘接地巡检装置运行,其工作原理为6台绝缘监测装置采取并机运行方式,轮值分时工作,当工作令牌到达哪个绝缘监测装置时,此绝缘监测装置开始工作,首先投入平衡桥,该平衡桥臂 K_p 开关自动合上,投入1MΩ平衡桥实时监测直流正、负母线对地电压状况,当监测到母线出现绝缘降低后,绝缘监测装置根据预先设好的定值来判断直流电压拉偏情况而决定是否投入该装置不平衡桥臂 K_b 开关,即是否投入100kΩ不平衡桥;当母线电压对地拉偏值超过绝缘降低预期设定值后,这时绝缘监测系统会根据检测到电压的情况启动支路检测方案,绝缘监测系统投入不平衡桥进入母线及支路对地阻值检测程序从而实现接地故障的选线定位,而此时由于绝缘降低被拉偏的直流母线电压会因为绝缘监测装置不平衡桥的投入导致被拉偏的直流母线电压更加深度拉偏。

遂宁变电站220V直流系统改进前等效回路简化工作原理如图3所示(注:II段与I段完全一致)。

1.2 电压波动原因分析

通过现场绝缘检测发现遂宁500kV变电站现场绝缘状况不是很理想,因为抢工期土建和电气安装施工交叉严重,房屋门窗未安装,墙面未粉刷,二次设备均安装就位,导致保护屏盘及端子积灰严重;220kV户外GIS装置特别是开关和隔离开关机构箱,一下雨绝缘就整体明显下降。但即使如此,也只会导致直流系统电压拉偏,而不是造成直流系统电压循环波动。

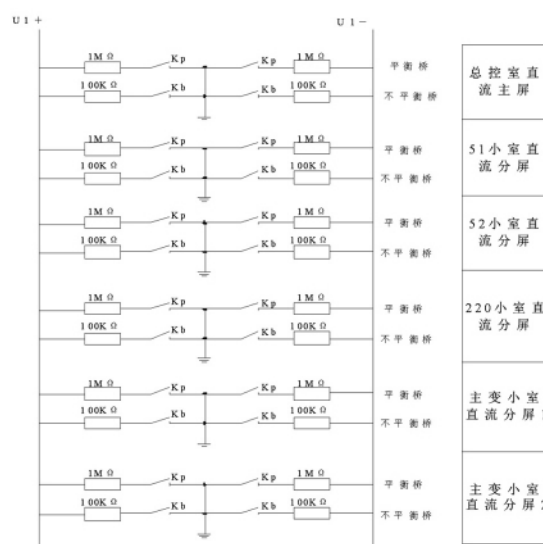


图3 遂宁变电站直流系统改进前220V I段
直流系统等效回路简化图

为了准确判断遂宁500kV变电站220V直流系统电压波动的真实原因,调试人员首先将总路和各支路计6台直流绝缘接地巡检装置全部退出运行,将各支路桥臂接地解开,同时退出外部所有直流负载支路,在正极和负极母线对地之间各外接一只100kΩ电阻平衡桥臂,确保直流系统正、负对地母线电压完全平衡, $U_+ = 110V$, $U_- = 110V$,然后逐一投入各负载支路。

这期间发现由于500kV遂洪线高抗本体和高抗保护屏未安装完毕,导致5052断路器和5053断路器支路绝缘偏低,暂时退出直流;由于220kV遂桐I、II线保护屏未搬迁到场,二次电缆未完成接线导致支路绝缘偏低,也暂时退出直流;对全站保护屏盘及接线端子进行除灰和吸潮处理;对220kV户外GIS装置机构进行加热器烘干处理,同时对受潮严重的接线端子和接点进行更换。

通过以上方法对遂宁变电站直流系统进行绝缘排查后,两段220V直流系统正、负对地母线电压相对平衡,直流系统正、负母线对地电压分别为107.0V和113.0V,符合规程要求,整个过程没有电压波动情况发生。

此时再将1台直流绝缘接地巡检装置接入直流系统,直流系统正、负母线电压没有发生波动,但当接入6台直流绝缘接地巡检装置后,直流系统正、负母线电压波动情况再次发生,通过反复试验最终发现,造成220V直流系统正、负母线电压波动的根本原因是:每段直流母线6台直流绝缘监测装置运行方式是

轮值分时工作,当1号机开始工作时,1号机投入平衡桥,当电压平衡时1号机断开平衡桥退出转为待机模式(即退出公共接地点:直流系统公共接地点退出时直流正、负母线对地电压是悬浮的),其余装置工作过程与之类似。这样就存在系统并机时,当前一台机器平衡桥退出到下一台机器平衡桥投入时存在时间差,即该时间段直流系统内没有平衡桥(即没有公共接地点),6台装置的循环投入和退出也就是公共接地点的循环投入和退出,从而导致直流系统正、负母线对地电压循环波动。

2 改进措施及效果

由于直流系统正、负母线对地电压循环往复的持续波动对分析直流系统故障原因带来困难,无法正确判断直流系统是否有绝缘降低或接地,一旦投运将会严重危及系统安全运行。

为了确保系统安全稳定运行,调试人员向厂家提出修改设计原理,避免6台绝缘监测设备间因轮值工作间隙退出平衡桥而丢失公共接地点导致直流系统电压波动的工作模式,避免直流系统绝缘降低时由于投入各装置的不平衡桥导致直流系统电压被深度拉

偏的工作模式。厂家也接受该建议,现场立即着手修改软件,变更了出厂的设计原则,修改了平衡桥的运行方式:即退出所有不平衡桥,取消每段直流母线6台直流绝缘监测装置轮值分时工作模式,改为永久投入6台装置平衡桥(即公共接地点永久存在)的工作模式。经过厂家现场反复修改软件和试验检测,最终有效解决了直流系统正、负对地电压波动问题,遂宁变电站220 V直流系统已投入系统运行,性能稳定,状况良好。

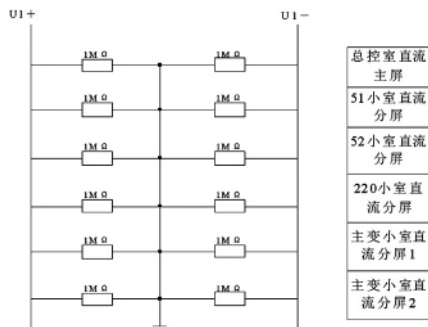


图4 遂宁变电站改进后220 V I段直流系统等效回路简化图

遂宁变电站220 V直流系统厂家设计程序改进后等效回路简化工作原理如图4所示(注:II段与I段完全一致)。

(收稿日期:2011-06-16)

(上接第57页)

表4 接地开关参数计算结果汇总

电容电压 /kV	电容电流 /A	电感电压 /kV	电感电流 /A
35.1	4.42	2.02	159

5 结 论

(1) 对于同塔双回线路中一回线运行,另一回线停运时,在停运线路上将因静电耦合和电磁耦合感应产生较高幅值的电压和电流。线路两端接地开关需要合理选择,使其具有开合感应电流、感应电压的能力。

(2) 静电感应电流大小与线路长度有关,基本呈正比例关系。静电感应电压大小与线路长度关系不大。电磁感应电流大小与线路长度基本无关。电磁感应电压大小与另一回线路长度有关,基本呈正比例关系。静电感应与运行线路电压有关,而与负载电流关系不大;电磁感应与运行线路负载电流有关而与运行电压关系不大。

(3) 参照IEC标准选择的B类接地开关参数不一定能满足750 kV同塔双回线路的要求,往往需要结合具体工程条件,经仿真计算提出接地开关参数设计要求。

(4) 根据接地开关参数计算结果,建议西宁—日月山双回750 kV线路两端接地开关都选容性电压大于35.1 kV的超B类接地开关。

参考文献

- [1] 750 kV 西宁—日月山—乌兰输电线路工程设计计划[R]. 西安:西北电力设计院,2009.
- [2] IEC 62271-102 High-voltage Switchgear and Controlgear - Part 102: Alternating Current Disconnectors and Earthing Switches [S]. IEC,2001.
- [3] Rule Book Alternative Transient Program.

作者简介:

钟蓉(1968),女,工程师,长期从事电力系统输变电工程建设。

(收稿日期:2011-05-23)

微电网并网时的环保经济调度

侯国彦¹, 王 彪², 丁理杰², 陈向宜², 陈光堂³, 邱晓燕³

(1. 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072;

3. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:针对微电网中太阳能光伏发电、风力发电等分布式发电的特点,考虑到不同类型、容量的微电源所消耗的燃料、效率、运行和维护费用、微电网与主电网功率交互价格、有害气体的排放量不同以及太阳能光伏发电、风力发电的特殊性提出了一种综合考虑发电成本与排放成本的微电网环保经济调度的数学模型。对发电成本与排放成本的不同权重采用改进遗传算法对其进行数值求解,并通过算例验证了所建立的模型与优化算法的有效性与合理性。

关键词:微电网; 遗传算法; 发电成本; 排放成本

Abstract: According to the characteristics of distributed generation in microgrid, such as solar photovoltaic power generation and wind power generation, and considering the fuels, the efficiency, the operation and maintenance costs consumed by different micro power sources, the price of power between main grid and microgrid, the emission level of harmful gas, the particularity of solar photovoltaic power generation and wind power generation, a novel mathematical model of environmental - protection and economic dispatch of grid - connected microgrid is presented considering power generation cost and emission cost. Based on the calculation of the different weights of power generation cost and emission cost by genetic algorithm, the simulation results show the validity and rationality of the established model and the optimal algorithm.

Key words: microgrid; genetic algorithm; power generation cost; emission cost

中图分类号: TM734 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2011)05 - 0080 - 04

0 引 言

微电网对分布式电源的有效利用及灵活、智能的控制特点,使其在解决电能质量、能源和环保等方面出现的问题时表现出极大的潜能,是许多国家未来若干年电力发展战略的重点之一^[1-4]。

微电网的调度除了可以借鉴传统高压电网的发电机组调度之外还有其自身独特的特点^[5-9]: ①分布式电源中的太阳能、风能等可再生能源是不可调的,而且不同季节、不同时段的外环境温度、日照强度、风力都有很大变化,因此太阳能光伏发电风力发电机组的输出功率随机性很大; ②由于太阳能光伏发电、风力发电的发电成本较低,而且几乎无温室气体排放,因此应优先安排其最大限度地发电; ③不同类型、容量的微电源所消耗的燃料、效率、运行和维护费用、温室气体的排放量均不同。

微电网的环保经济调度^[6-9]是指在满足负荷需求的条件下,合理有效地安排各台微电源的出力使得

整个微电网的发电成本、排放成本或总成本最低。

下面主要提出了微电网的环保经济调度模型,考虑了微电源的电力系统运行约束条件与负荷需求、微电源的燃料消耗及维护成本、微电网与主电网之间的购电及售电价格,以及对各种微电源排放的有害气体的处理费用。利用改进遗传算法对所建立的模型进行优化计算,通过实例验证了所建立的模型与优化算法的正确性与有效性。

1 微电网环保经济调度模型

对于风能发电与光伏发电系统,虽然其环境效益好,运行成本低,但是长期以来,其安装成本很高,使其综合经济效益无法与其他形式发电相竞争。同时,其受天气影响较大,不受人工调度。因而中国目前电力行业的管理方式是风能发电与光伏发电享受优先调度权和电量被全额收购的优惠。该文的研究也是以此为前提。

1.1 目标函数

$$\min F = \alpha C_{\text{gen}} + \beta C_{\text{emission}} \quad (1)$$

基金项目: 四川省电力公司科技项目资助, 四川省科技厅支撑项目 (2011GZ0036)

式中,

$$C_{gen} = \sum_{t=1}^{T_1} \left(\sum_{i=1}^N (C_{f,i}(P_{i,t}) + M^i(P_{i,t})) + C_{buy,t}P_{buy,t} - C_{sell,t}P_{sell,t} \right) \quad (2)$$

$$C_{emission} = \sum_{t=1}^{T_1} \left(\sum_{k=1}^M 10^{-3} \alpha_k \left(\sum_{i=1}^N \beta_{i,k} P_{i,t} + \beta_{grid,k} P_{buy,t} \right) \right) \quad (3)$$

其中, α, β 分别表示经济运行成本所占的比例; C_{gen} 表示微电网的经济运行成本; $C_{emission}$ 环境排放处理费用; T_1 表示微电网的调度周期(取1天); N 表示可调度微电源的总数; $C_{f,i}(P_{i,t})$ 表示可调度微电源 i 能耗成本; $M^i(P_{i,t})$ 表示可调度微电源 i 的维护成本; $P_{buy,t}$ 表示微电网在 t 时刻从主网买进的功率; $P_{sell,t}$ 表示微电网在 t 时刻售出给主网的功率; $C_{buy,t}$ 表示微电网在 t 时刻从主网购电的价格; $C_{sell,t}$ 表示微电网在 t 时刻向主网售电的价格; k 表示污染物($\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x$ 等)的编号; α_k 表示治理污染物 k 所需要的费用; $\beta_{i,k}$ 表示微电源 i 对应的各种污染物排放系数; $\beta_{grid,k}$ 表示主网对应的各种污染物排放系数。

1.2 约束条件

①功率平衡限制

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + P_{w,t} + P_{s,t} + P_{batt,t} + P_{buy,t} - P_{sell,t} = P_{D,t} \quad (4)$$

其中, $P_{i,t}$ 表示在时段 t 的微电源 i (除风能发电机、光伏发电系统和储能装置) 的输出功率; $P_{w,t}$ 表示在时段 t 时风能发电机的输出功率; $P_{s,t}$ 表示在时段 t 时太阳能光伏发电系统的输出功率; $P_{D,t}$ 表示在 t 时段负荷的需求功率。

②发电机的运行限制

$$P_{Gut}^{\min} \leq P_{Gut} \leq P_{Gut}^{\max} \quad (5)$$

其中, $P_{Gut}^{\max}, P_{Gut}^{\min}$ 分别表示微电源 i 的输出功率的上、下限。

③储能装置的限制^[9]

$$P_{d,t,i}^{\min} \leq P_{d,t,i} \leq P_{d,t,i}^{\max} \quad (6)$$

$$P_{c,t,i}^{\min} \leq P_{c,t,i} \leq P_{c,t,i}^{\max} \quad (7)$$

$$P_{i,t} = P_{d,i,t} - P_{c,i,t} \quad (8)$$

$$E_{i,t} = E_{i,t-1} + [E_i P_{c,i,t} (1-d) - d \frac{P_{d,i,t}}{\zeta_i}] t_L \quad (9)$$

$$E_{i,t}^{\min} \leq E_{i,t} \leq E_{i,t}^{\max} \quad (10)$$

式(6)~(10)中 $i=1, 2, \dots, N$, N 表示储能装置的数量; $P_{d,t,i}, P_{c,t,i}$ 分别表示蓄电池第 i 台储能装置 t 时段的放电功率和充电功率; $P_{d,t,i}^{\max}, P_{d,t,i}^{\min}, P_{c,t,i}^{\max}, P_{c,t,i}^{\min}$ 分别表示第 i 台储能装置的放电功率的上下限与充电功率的上下限; $P_{i,t}$ 表示第 i 台储能装置 t 时段的向微电网注入的功率, 当电池处于放电状态时, 充电功

率 $P_{c,i,t} = 0$, 当储能装置处于充电状态时, 放电功率 $P_{d,i,t} = 0$; $E_{i,t}$ 表示第 i 台储能装置在 t 时段的容量; τ, ζ 为储能装置的充放电效率, 一般小于1; t_L 为一段优化时间; d 为储能装置在时间段 t 内放电时间所占的比例, 且有 $0 < d < 1$; $E_{i,t}^{\max}, E_{i,t}^{\min}$ 表示第 i 台储能装置的上、下限, 且有 $E_{i,t}^{\min} > 0$ 。

④微电网与主网允许交互的功率约束

$$P_{buy, \min} \leq P_{buy,t} \leq P_{buy, \max} \quad (11)$$

$$P_{sell, \min} \leq P_{sell,t} \leq P_{sell, \max} \quad (12)$$

2 优化算法

针对所建立的微电网环保经济调度模型是一个多变量、带约束、非线性的组合优化问题, 采用遗传算法来进行优化计算。

遗传算法(genetic algorithm, GA) 是模拟生物进化过程的一种计算方法, 起源于自然界生物优胜劣汰的进化规则, 在一定的环境限制下, 在父代种群的基础上, 通过选择、交叉和变异等遗传操作产生下一代, 只有适应性强的个体才能生存下来, 并将优良特性往下一代传^[10-12]。所采用的改进遗传算法流程图如图1所示。

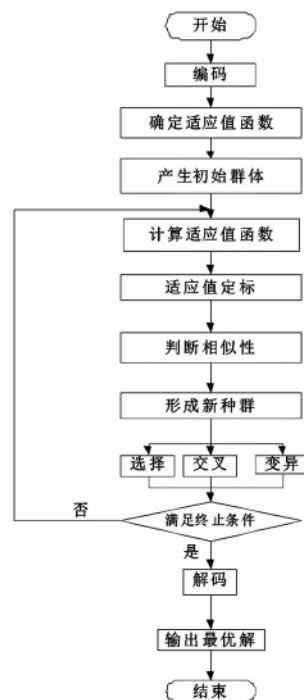


图1 改进遗传算法流程图

从图1中可以看出改进遗传算法的主要步骤如下。

Step 1: 编码产生初始种群, 并将个体按适应度值大小排序;

Step 2: 求平均适应度值, 以此作为阈值, 选择适应度值大于平均适应度值的个体;

Step 3: 判断相似程度, 以最高适应度值为模板, 去除相似个体;

Step 4: 重复 Step 3 逐次以适应度值高的个体为模板, 选择不同模板的个体组成群体;

Step 5: 判断是否达到群体规模。如果是, 则进行下一步交叉、变异等遗传操作; 否则重复 Step 4 如果不能得到足够的群体规模, 则去除的个体按适应度值大小顺序顺次补足群体所缺数量;

Step 6: 判断是否满足结束要求。如果是, 则结束, 否则转到 Step 1。

3 算例分析

选取某地区的具体微电网设计案例进行分析, 其结构如图 2 所示。整个微电网相对外部电网来说是一个整体, 通过一个静态开关和上级电网的变电站相联系。微电网内包括风力发电与光伏发电等可再生能源发电、微型燃气轮机、清洁能源发电和传统的柴油机发电以及储能元件。该地区的日负荷需求以及一天中风电、光伏发电输出功率情况如图 3 所示。

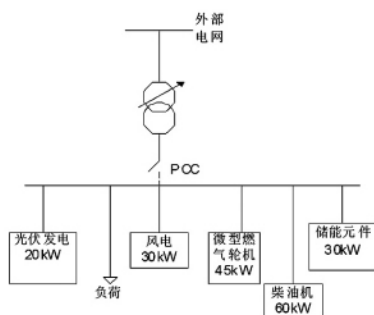


图2 某地方微电网系统结构

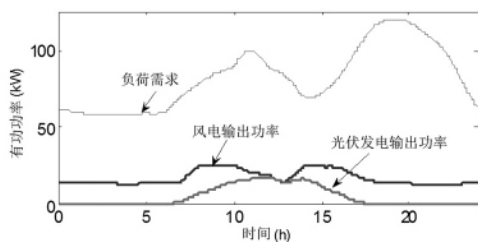


图3 日负荷需求及风电、光伏发电日输出功率

文中的算例实行三段式电价政策, 峰段时间为 10:00—14:00、19:00—22:00; 平段时间为 7:00—10:00、14:00—17:00 和 22:00—23:00; 谷段时间为 23:00—7:00。分时电价见表 1 所示。微电源污染物排放系数及其治理费用如表 2 所示。

表1 购电和售电电价

项目	价格/(元/kWh)		
	峰段	平段	谷段
购电	1.15	0.9	0.3
售电	1	0.75	0.2

表2 污染物治理费用及排放系数

污染物类型	治理费用/(元/kg)	污染物排放系数/(g/kWh)			
		微型燃气轮机	柴油机	主网	储能元件
CO ₂	0.210	724.6	649	889	0
SO ₂	14.842	0.004	0.206	1.8	0
NO _x	62.964	0.2	9.890	1.6	0

假设微电网与外部电网交互功率上限为 15 kW, 通过所提到的算法进行优化计算, 得出 α, β 分别取不同值时微电源的出力情况, 分别如图 4、图 5、图 6 所示。

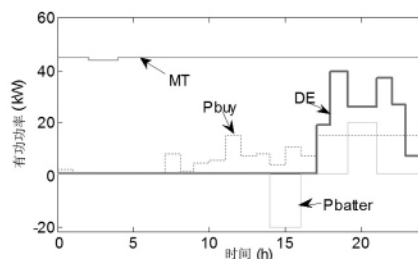


图4 当 $\alpha:\beta=0:1$ 时微电源出力情况

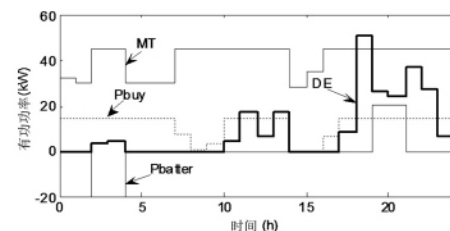


图5 当 $\alpha:\beta=1:1$ 时微电源出力情况

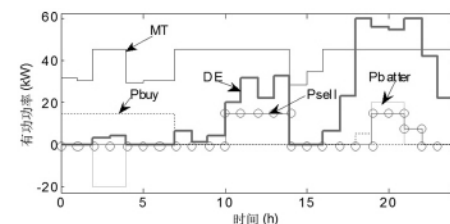


图6 当 $\alpha:\beta=1:0$ 时微电源出力情况

由表 2 得知, 由于柴油机发电过程中放出的氮氧化物 (NO_x) 比较多, 因此处理其排放的污染物费用较大。当 $\alpha:\beta=0:1$, 即仅考虑了环境治理费用, 因而优先考虑微型燃气轮机, 同时由于储能元件在一个周期内充放电功率守恒的影响, 其一周内只能完成充放电一次。此时微电源的出力情况与图 4 相符。当 $\alpha:\beta=1:0$, 即仅考虑运行成本情况, 由于在谷段期间购电价格低于微电源的发电成本, 故优先考虑购电, 达上限后, 剩余的负荷功率由微电源提供; 在平段期间,

由于微电源的发电成本高于售电价格低于购电价格,因而在此期间有微电源满足负荷的需求,超出部分再购电;在峰段期间,由于微电源的发电成本低于售电价格,因此在此期间,各微电源按额定功率发电,超出负荷的部分,售出给主电网。此时微电源的出力情况与图 6 相符。当 $\alpha:\beta=1:1$ 时,即运行成本与环境治理成本以 1:1 加权,通过优化算法计算后,其微电源出力情况与图 5 相符。

4 结 论

主要研究了在满足负荷需求与分布式电源出力限制的前提下,同时考虑发电成本与有害气体排放成本,提出了微电网环保经济调度的数学模型。针对发电成本与排放成本的不同权重,运用遗传算法进行优化调度,并用实例验证了所建立模型的合理性。

参考文献

- [1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述 [J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
- [2] 李胜,张建华,李春叶. 微网(Microgrid)的并网运行方式探讨 [J]. 太原理工大学学报,2009,40(2):184-187.
- [3] Haziargyriou N, Asano H, Irvani R, et al. Microgrids [J]. IEEE, Power & Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [4] 郑漳华,艾 芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景 [J]. 电网技术,2008,32(16):27-31.

- [1] 陈达威,朱桂萍.微电网负荷优化分配[J].电力系统自动化,2010,34(20):45-49.
- [2] 艾欣,崔明勇,雷之力.基于混沌蚁群算法的微网环经济调度[J].华北电力大学学报,2009,36(5):2-6.
- [3] Mohamed F A, Koivo H N. SvsLern Modeling and On-line Optimal Management of Microgrid Using Multi-objective Optimization[J]. International Conference on Clean Electrical Power, 2007(5):148-153.
- [4] Pudjianto D, Strbac G. Investigation of Regulatory Commercial Economic and Environmental Issues in Microgrid[J]. International Journal of Distributed Energy Resources, 2006,2(3):245-259.
- [5] 丁明,包敏,吴红斌.分布式功能系统的经济调度[J].电力科学与技术学,2008,23(1):13-17.
- [6] 周明,孙树洞.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社,1999:18-31.
- [7] 雷英杰,张善文,李续武,等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2005:11-30.
- [8] 邱晓燕,夏莉丽,李兴源.智能电网建设中分布式电源的规划[J].电网技术,2010,34(4):7-10.

作者简介：

王 彪(1985),男,硕士,四川省电力科学研究院,研究方向为电力系统运行与控制,从事工作为电网分析;

陈光堂(1986),男,硕士研究生,研究方向为微电网经济运行。

(收稿日期:2011-08-10)

(上接第 59 页)

据两个判据,能够保证当系统某处出现静态电压稳定问题而电压值还较高时,装置能及时地进行切负荷操作。切负荷轮次,每轮切负荷量也完全按照现有的低压减载策略执行,具有很强的可操作性。

“策略2”同时考虑了低电压判据和裕度指标判据两个判据,此策略中指标判据没有切负荷轮次以及总的切负荷量的限制,这与实际情况是不相符的。做这个策略的目的是为了清楚地知道当某个站点现有安控装置3个基本轮的负荷量全被切掉后,指标值还不能恢复 >1.05 的情况下,这个站点到底要切掉多少负荷才能使指标值恢复到 1.05 以上。

“策略3”同时考虑了低电压判据和裕度指标判据两个判据,按不少切除原则能保证一次性切除足够的负荷量。且切负荷轮次、每轮切负荷量完全按照现有的低压减载策略执行,具有很强的可操作性。

2 结 论

对低压减载研究中常用的仿真方法及减负荷策略等进行了综述、对比及分析,指出了各方法的优劣,并对基于电压稳定裕度的低压减载方案及其工程实践进行了分析,拓宽了当前工程中低压减载的思路和方法,具有工程指导意义。

参考文献

- [1] 周双喜,朱凌志. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京: 中国电力出版社,2004.
- [2] 王锡凡,万方良,杜正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社,2003.
- [3] 李文沅,余娟,汪洋,等. 通过辨识电网薄弱环节实时识别电网电压稳定性的方法 [P]. 中国专利: 200710092710.1,2008-02-06.

(收稿日期:2011-07-05)

基于灰色关联的季不均衡系数的分析方法与应用

徐 飞¹, 周步祥¹, 林 楠²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072)

摘 要:季不均衡系数是年负荷特性的重要参数之一,掌握影响季不均衡系数的主要因素,就能够比较准确地把握一个地区的年负荷特性,对于制定电网的年度运行计划具有较大的帮助。提出了一种基于灰色关联的季不均衡系数的分析方法,结合历史年份的具体数据,定量地区分了季不均衡系数各影响因素的权重,并且指出了影响季不均衡系数的主要因素。并给出了相应的算法,通过实际应用表明,该算法具有较大的实用价值。

关键词:季不均衡系数; 负荷特性; 灰色关联度分析; 负荷预测; 算法

Abstract: The seasonal unbalance coefficient is one of the important parameters in annual load characteristics. It can make certain the annual load characteristics in a region more accurately by grasping the main factors affecting the seasonal unbalance coefficient, which is helpful for formulating the annual operating plan of power grid. An analysis method of the seasonal unbalance coefficient based on gray correlation is proposed. The weights of each influencing factor of seasonal unbalance coefficient can be quantitatively differentiated combined with the detailed data of historical years, and the results of this analysis shows the main factors affecting the seasonal unbalance coefficient. The corresponding algorithm is given and the practical application shows that the method has great practical value.

Key words: seasonal unbalance coefficient; load characteristic; gray relational degree analysis; load forecasting; algorithm

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0084-05

0 引 言

在年负荷特性中,季不均衡系数(又称季不均衡率 ρ)^[1]与年负荷曲线的波动性和年最大负荷出现的时间有关,而影响年负荷曲线形状的主要因素是负荷的季节变化、用电设备的大修及负荷在年内的增长。

文献[2]~[4]分别对广州、汕头、固原、南京、上海等地的负荷特性进行了详细的分析和说明,指出了各个地方负荷特性的影响因素和负荷特性的发展趋势,符合当地的实际情况,但是,没有定量地说明负荷特性的主要影响因素,并且分析过程不易推广到其他地区或城市。

这里引入了灰色关联度分析^[5]理论用来定量分析各影响因素的权重,并在此基础上预测该地区未来季不均衡系数的发展趋势。通过实际应用,该算法能够很好地切合实际情况,并且计算过程比较容易推广。

1 季不均衡系数分析

1.1 影响因素

影响季不均衡系数的主要因素可以总结为3个方面。

(1) 经济结构

经济结构因素包括: GDP(亿元)、GDP增长率(%)、第一产业GDP比重(%)、第二产业GDP比重(%)和第三产业GDP比重(%)等。

如第二产业比重占主导地位,年负荷特性曲线波动较平缓,季不均衡系数较大,相应的最大负荷利用小时数也较大;如第三产业比重占主导地位,则相反,年负荷特性曲线波动较剧烈,季不均衡系数较小,相应的最大负荷利用小时数也较小。

(2) 用电结构

用电结构因素包括: 第一产业用电量比重(%)、第二产业用电量比重(%)、第三产业用电量比重(%)、居民生活用电量比重(%)等。

如第二产业用电量比重占主导地位,年负荷特性曲线波动较平缓,季不均衡系数较大,相应的最大负荷利用小时数也较大;如第三产业用电量和居民生活用电量的比重占主导地位,则相反,年负荷特性曲线波动较剧烈,季不均衡系数较小,相应的最大负荷利用小时数也较小。

(3) 社会影响因素

社会影响因素包括: 人均国内生产总值(元)、城镇居民人均可支配收入(元)等。

随着城市的发展, 人均国内生产总值和城镇居民人均可支配收入的增加, 居民生活用电增加, 年负荷特性曲线波动加剧, 季不平衡系数减小。

1.2 加权关联度确定

灰色关联度分析^[10]是基于行为因子序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密, 曲线越接近, 相应序列之间的关联度就越大。它是确定因子间影响程度或因子对主行为的贡献程度而进行的一种分析方法。灰色关联分析的目的是寻找各因素间的主要关系, 能够确定哪些是不可忽视的相关行为因素, 从中找出各相关影响因素对主行为的关联程度, 从而掌握事物发展的主要矛盾。因此, 它特别适合数据有限、没有原型、复杂而且具有不确定性问题的分析和评价。

灰色关联度分析弥补了采用数理统计方法作系统分析所导致的缺陷。它对系统样本量的多少和样本有无规律都同样适用, 而且计算量小, 十分方便, 更不会出现量化结果与定性分析不符的情况。为此, 在季不平衡系数影响因素中引入灰色关联度分析理论来对其进行综合定量分析。

1.2.1 序列矩阵

季不平衡系数的影响因素序列(子序列)不止一个, 可将季不平衡系数用 ρ 表示, 相关因素子序列用 $X_0, X_1, \dots, X_i$ 来表示, 所构成的序列矩阵为

$$(\rho, X_0, X_1, \dots, X_i) = \begin{bmatrix} \rho(0) & x_0(0) & \cdots & x_i(0) \\ \rho(1) & x_0(1) & \cdots & x_i(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho(t) & x_0(t) & \cdots & x_i(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, ρ 列表示季不平衡系数各年的数值; X_i 列表示影响因素序列各年的数值。

1.2.2 初值像矩阵

不同序列, 数值可能相差甚远, 甚至量纲不具有可比性, 因此首先要经过规范化处理。采用首归一化处理, 以便于比较, 计算公式如下。

$$x'_i(t) = \frac{x_i(t)}{x_i(0)} \quad i=0, 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$\rho'(t) = \frac{\rho(t)}{\rho(0)} \quad (3)$$

初值(无量纲化)矩阵为

$$(\rho', x'_0, x'_1, \dots, x'_i) = \begin{bmatrix} \rho'(0) & x'_0(0) & \cdots & x'_i(0) \\ \rho'(1) & x'_0(1) & \cdots & x'_i(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho'(t) & x'_0(t) & \cdots & x'_i(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2.3 差序列矩阵

若将系统因素集合中的各个因素视为空间的点, 将每个因素对于不同时刻、不同指标、不同对象的观测数据视为点的坐标, 就可以在特定的 n 维空间中研究各因素之间或因素与系统特征之间的关系, 得出差序列的计算公式如下。

$$\Delta_i(t) = |\rho'(t) - x'_i(t)| \quad (5)$$

差值矩阵为

$$\Delta_i = \begin{bmatrix} \Delta_1(0) & \Delta_2(0) & \cdots & \Delta_i(0) \\ \Delta_1(1) & \Delta_2(1) & \cdots & \Delta_i(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_1(t) & \Delta_2(t) & \cdots & \Delta_i(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

求两级最大差与最小差为

$$M = \max_i \max_t \Delta_i(t), m = \min_i \min_t \Delta_i(t) \quad (7)$$

1.2.4 关联系数矩阵

关联系数主要是计算季不平衡系数与影响因素子序列之间在不同时间段的关联性, 计算公式如下。

$$\lambda_i(t) = \frac{m + C \cdot M}{\Delta_i(t) + C \cdot M} \quad (8)$$

式中, $C \in (0, 1)$ 为分辨系数, 通常取 0.5。通过公式(8)计算出各年份的季不平衡系数与影响因素子序列的关联系数, 形成关联系数矩阵为

$$\lambda_i = \begin{bmatrix} \lambda_1(0) & \lambda_2(0) & \cdots & \lambda_i(0) \\ \lambda_1(1) & \lambda_2(1) & \cdots & \lambda_i(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_1(t) & \lambda_2(t) & \cdots & \lambda_i(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

1.2.5 确定各个年份权重的具体步骤

设系统有待进行重要性比较的指标集 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, f_i 为第 i 个指标, $i = 1, 2, \dots, n$ 。 n 为指标总数。

为了解决 AHP 中判断矩阵的一致性, 将 AHP 中构造判断矩阵变成构造模糊一致判断矩阵, 即采用模糊层次分析法(FAHP)^[12-15], 其可作如下表述。

(1) 建立优先关联矩阵

$$F = \sqrt{f_{ij}} = \begin{cases} 0.5, s(i) = s(j) \\ 1.0, s(i) > s(j) \\ 0.0, s(i) < s(j) \end{cases} \quad (10)$$

其中 $s(i)$ 和 $s(j)$ 分别表示指标 f_i 和 f_j 的相对重要性程度。

(2) 将优先关系矩阵 F 改造成模糊一致矩阵 A , 即先对 F 按行求和, 记为

$$a_i = \sum_{k=1}^n f_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

然后作变换得

$$a_i = \frac{a_i - a_j}{2n} + 0.5 \quad (12)$$

由此建立的判断矩阵可以保证模糊一致性。

(3) 权重值 ω_i 的计算公式

$$\omega_i = \frac{1}{n} - \frac{1}{2\alpha} + \frac{1}{n\alpha} \sum_{k=1}^n \alpha_{ik} \quad (13)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$; α 满足 $\alpha \geq (n-1)/2$ 的参数。当阶数 n 比较大时, 将参数 α 取值为 $\alpha = (n-1)/2$, 有助于提高对元素 $f_1, f_2, \dots, f_n$ 的相对重要程度的分辨率。

1.2.6 加权关联度

为了计算主特征序列与影响因素子序列间的关联度, 必须将各个时间段的关联系数进行加权求和, 得出它们之间的关联度, 计算公式如下。

$$r_i = \sum_{t=0}^6 \omega(t) \lambda_i(t) \quad (14)$$

式中, $\omega(t)$ 为各个年份的权重。

2 算法分析

通过以上的分析, 可以建立相应的算法, 该算法在历史数据的基础上, 经过数据处理得到各影响因素对季不均衡系数的加权关联度, 找出季不均衡系数的

主要影响因素。计算结果用于分析历史年负荷特性和指导未来年负荷特性的预测。

(1) 输入数据

该算法的输入数据为季不均衡系数和各影响因素的分年度数据。这些数据来源于一个地区的统计年鉴、政府工作报告和电网规划报告。

(2) 假设条件

计算各年份权重的计算中, 以“远小近大”的原则, 假设近期年份的重要性程度大于远期年份的; 公式(13)中参数 α 取值为 $\alpha = (n-1)/2$ 。

(3) 输出数据

该算法的输出数据为各影响因素对季不均衡系数的加权关联度, 定量地区分了各影响因素对季不均衡系数的影响程度。

综上所述, 具体流程框图如图 1 所示。

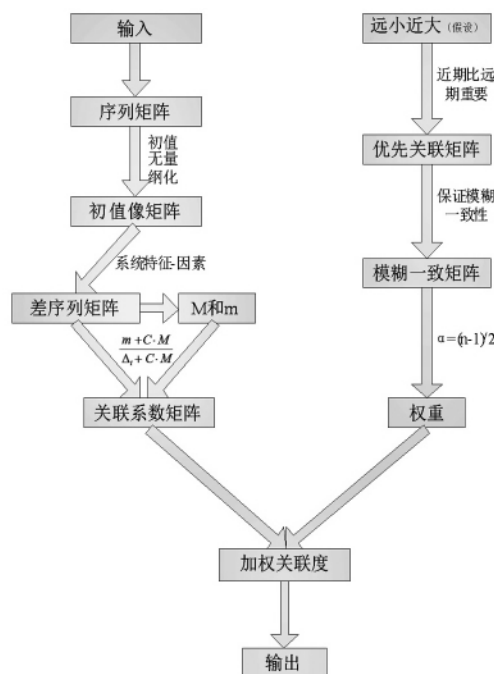


图 1 流程框图

表 1 基础数据列表

年份	ρ	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
2003	0.880	238.18	13.6	11	33.5	55.5	2.56	28.93	53.44	15.13	14 454	8 350
2004	0.844	253.01	13.2	8.36	32.63	59.01	2.69	28.36	53.5	15.07	17 928	8 981
2005	0.759	301.35	12.1	7.7	27.6	64.7	2.69	29.01	53.3	14.18	17 418	9 740
2006	0.851	350.06	12.9	7.4	29.2	63.4	2.52	33.21	53.58	12.24	19 980	10 712
2007	0.846	396.4	12.6	7.4	28.1	64.5	2.66	33.17	51.98	12.22	21 343	12 289
2008	0.888	443.18	10.4	7	25.6	67.4	2.39	34.89	50.24	12.54	25 011	14 150
2009	0.881	489.55	10.8	7	24.5	68.5	2.42	30.91	52.63	14.05	26 366	15 237

注: ρ 为季不均衡系数; X_0 为 GDP(亿元); X_1 为 GDP 增长率(%); X_2 为第一产业 GDP 比重(%); X_3 为第二产业 GDP 比重(%); X_4 为第三产业 GDP 比重(%); X_5 为第一产业用电量比重(%); X_6 为第二产业用电量比重(%); X_7 为第三产业用电量比重(%); X_8 为居民生活用电量比重(%); X_9 为人均国内生产总值(元); X_{10} 为城镇居民人均可支配收入(元)。

3 实际应用

针对一实际系统,根据收集到的相关数据,利用以上算法,得到了各影响因素对季不均衡系数的加权关联度。

为验证算法的正确性,选取表1中的两组数据来进行对比分析。

①取2002~2009年数据,分析季不均衡系数的主要影响因素;

②取2003~2010年数据,分析季不均衡系数的主要影响因素。

根据算法的具体流程计算如下。

(1) 输入数据

表1中的统计数据来自一旅游城市政府工作报告和电网规划报告。

(2) 利用“远小近大”的原则和公式(10)~(13)来确定各时间段的权重,权重为

$$\omega(t) = (\omega_0, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6) \\ = (0.405, 0.429, 0.452, 0.476, 0.500, 0.524, 0.548)$$

(3) 输出数据

根据公式(14),加权关联度矩阵为

$$r_i = \sum_{t=0}^6 \omega(t) \lambda_i(t) \\ = (1.859, 2.938, 2.328, 2.777, 2.521, 2.952, \\ 2.758, 3.090, 2.831, 1.911, 2.034)$$

$$r_{(2002 \sim 2009 \text{年})i} = \sum_{t=0}^7 \omega(t) \lambda_i(t) \\ = (1.870, 2.628, 2.487, 2.921, 2.780, 2.983, \\ 2.768, 3.113, 2.913, 2.345, 2.176)$$

$$r_{(2003 \sim 2010 \text{年})i} = \sum_{t=0}^7 \omega(t) \lambda_i(t) \\ = (1.924, 2.898, 2.454, 2.802, 2.631, 2.987, \\ 2.845, 3.095, 2.945, 2.006, 2.117)$$

(4) 结果分析

根据两组数据计算结果,第三产业用电量比重对季不均衡系数影响均最大,各影响因素与季不均衡系数的加权关联度如图2所示。

计算表明:第三产业用电量比重对季不均衡系数影响最大,这与该旅游城市的性质相一致。根据实际调研,该城市第三产业用电量比重连年在50%左右,且在今后发展中保持在较高水平,使得年负荷特性曲线波动加剧,对季不均衡系数影响最大。

第三产业的不断增长,导致第三产业用电量比重进一步加大,在各影响因素中仍占主导地位。在未

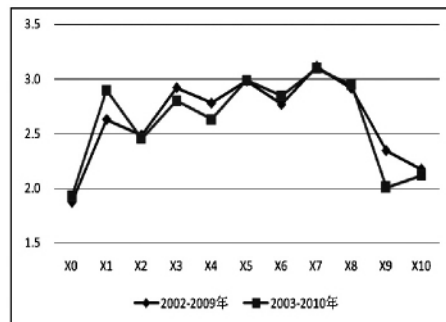


图2 结果分析图

来几年,该地区年负荷特性曲线波动将不断加剧,季不均衡系数逐步减小。

该算法得出了季不均衡系数的主要影响因素,与该城市的实际情况相吻合,为负荷特性的历史分析和未来预测提供了依据。

4 结论

(1) 对季不均衡系数影响因素的关系进行了研究,运用灰色关联度分析理论来区分各影响因素的权重,找出一个地区季不均衡系数的主导影响因素,并且该分析过程较易推广到其他地区。

(2) 对季不均衡系数的研究可以运用在地区电网规划中,对现状年负荷特性进行分析,并对年负荷特性的预测提供指导意义。不同负荷的特性制定相应的分时电价措施,可最大限度地达到削峰填谷的作用,提高电网经济运行效益。

(3) 灰色关联度分析法还可以用于其他参数的分析,如平均日负荷率 γ 、平均月负荷率 σ 等。通过参数的分析,可以掌握一个地区日负荷曲线和年负荷曲线的主要影响因素,从而指导负荷特性的预测。

参考文献:

- [1] 赵希正,周小谦,姜绍俊. 中国电力负荷特性分析与预测 [M]. 北京: 中国电力出版社,2002.
- [2] 陈健,刘明波,樊亚亮,等. 广州电网负荷特性分析 [J]. 电力系统及其自动化学报,2009,21(6): 78-83.
- [3] 叶刚健,蒋金良. 汕头电网负荷特性分析与预测 [J]. 电力系统及其自动化学报,2004,16(6): 55-59.
- [4] 赵永良,易武,谢开贵. 固原电网负荷特性分析 [J]. 电网技术,2007,31(2): 230-232.
- [5] 姜勇. 南京市居民夏季用电负荷特性分析 [J]. 继电器 (Relay),2003,31(4): 24-26.
- [6] 徐方龙,谢国栋,黄苏融,等. 上海市区供电局电力负荷特性分析 [J]. 上海大学学报(自然科学版),2000,6

(3): 222 - 226.

- [7] 杨宗麟. 华东电网负荷特性分析预测 [J]. 华东电力, 2008, 36(5): 50 - 52.
- [8] 张吉军. 模糊一致判断矩阵3种排序方法的比较研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(11): 1370 - 1372.
- [9] 葛少云, 闫大威, 董智. 基于模糊综合评判的城市电网电缆化改造 [J]. 现代电力, 2005, 22(3): 37 - 40.
- [10] 霍成军. 电力系统负荷特性分析研究 [D]. 天津: 天津大学电气与自动化工程学院, 2007.
- [11] 仲伟宽. 数据挖掘技术在负荷特性分析中的应用 [J]. 南京: 东南大学电气工程学院, 2006.
- [12] 杜海文, 孟领坡, 马洪斌. 防空导弹制导雷达综合抗干扰能力评估 [J]. 火力与指挥控制(Fire Control & Command Control), 2004, 29(5): 54 - 56, 61.

- [13] 张江, 应俊, 王琼, 等. 基于FAHP的电力变压器系统的脆性分析 [J]. 控制理论与应用, 2004, 23(7): 9 - 12.
- [14] 沈又幸, 范艳霞, 谢传胜. 基于FAHP法的风电项目后评估研究 [J]. 电力需求侧管理, 2008, 10(6): 16 - 18.
- [15] 高会生, 冉静学, 孙逸群. 基于改进的FAHP电力通信网风险评估 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, (3): 133 - 138.

作者简介:

徐飞(1987), 男, 硕士研究生, 主要从事调度自动化及计算机信息处理方面的研究工作;

周步祥(1965), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统自动化、计算机应用等方面的研究和教学工作;

林楠(1973), 女, 硕士, 讲师, 从事电力系统自动化、计算机应用的研究和教学工作.

(收稿日期: 2011 - 07 - 18)

(上接第63页)

- [1] Overbye T. J. Effects of Load Modeling on Analysis of Power System Voltage Stability [J]. International Electric Power Energy System, 1994, 16(5): 329 - 338.
- [2] Carson W. Taylor. Power System Voltage Stability [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [3] M. H. Haque. On-line Monitoring of Maximum Permissible Loading of a Power System Within the Voltage Stability Limits [J]. IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(1): 107 - 112.
- [4] 孙倩薇, 杨兴华. 负荷特性对静态电压稳定性的影响 [J]. 黑龙江电力, 2005, 27(6): 413 - 416.
- [5] 侯明. 不同负荷模型对电压稳定性分析的影响研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2007.
- [6] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

- [7] 李超, 马幼捷, 周雪松, 等. 负荷动态特性及模型对分析电压稳定性影响的综述 [J]. 自动化与仪表, 2005(7): 17 - 20.
- [8] 段献忠, 江馥英, 何仰赞, 等. 负荷建模研究现状综述 [J]. 电力系统自动化, 1994, 18(5): 60 - 68.
- [9] 周文, 贺仁睦, 章健, 等. 电力负荷建模问题研究综述 [J]. 现代电力, 1999, 16(2): 83 - 89.
- [10] Ohtsuki H., Yokoyama A., Sekine Y.. Reverse Action of On-load Tap Changer in Association with Voltage Collapse [J]. IEEE Trans. on Power System, 1991, 6(1): 300 - 306.

作者简介:

李林(1984), 男, 硕士, 主要从事电力系统稳定运行与控制的研究.

(收稿日期: 2011 - 06 - 01)

(上接第70页)

地断开故障主变压器保留非故障主变压器, 最大限度地保留负荷。

3 结 论

通过运行人员调整综合回路法所述的相关硬压板和装置的软压板, 利用备自投装置的广义进线自投逻辑和广义桥备投逻辑, 实现对所有运行方式备自投控制策略。该方法对运行方式没有限制, 并可以节省一台备自投装置及其相关回路的投资。实验证明, 这是一种有效、简单、经济、实用的方法, 对备自投的分析研究及电网安全、稳定、可靠、经济的运行具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 崔凤亮, 周家春. 远方备用电源自动投入装置 [J]. 电力自动化设备, 2002, 22(9): 61 - 62.
- [2] 国电南瑞科技股份有限公司, NSR600RF 系列保护测控装置技术说明书 [J]. 南京, 2008.
- [3] 汤大海. 基于双电源扩大内桥的备自投解耦控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 103 - 106.
- [4] 郁家麟. 扩大内桥接线的备用电源自动投入的探讨 [J]. 电力建设, 2007, 28(1): 34 - 38.

作者简介:

张建军(1983), 男, 硕士, 助理工程师, 从事继电保护工作;
姚越兰(1977), 女, 大学本科, 助理工程师, 从事变电运行管理工作.

(收稿日期: 2011 - 06 - 16)

基于工程模型的光伏建模与输出特性仿真

郭立, 晁勤, 袁铁江, 吐尔逊·伊不拉音, 袁建党
(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要:基于光伏电池的工程模型,在 Matlab/Simulink 仿真环境下,搭建了光伏阵列仿真模型,可模拟仿真给定光伏模块参数、光伏阵列串并联方式、外界环境变化下的光伏阵列特性曲线,并具有最大功率跟踪功能,其中采用考虑外界环境因素变化的恒电压控制方法,方法简单易行。该模型有较好的通用性,为光伏发电系统的研究提供了仿真模型和平台。

关键词:光伏模型; MPPT; Simulink 建模; 输出特性

Abstract: Based on the engineering model of photovoltaic battery, the simulation model of photovoltaic array is established on Matlab/Simulink environment. The model can simulate the given parameters of photovoltaic module, the series and parallel connection mode of photovoltaic array, and the characteristic curves of photovoltaic array during the variation of external environment, and has the tracing function of maximum power in which it uses the constant voltage control method considering the variation of external environment factor, and is simple and practicable. The model has a better commonality, and it provides the simulation model and platform for the research of photovoltaic power generation system.

Key words: photovoltaic model; MPPT; Simulink modeling; output characteristics

中图分类号:TK511 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2011)05-0089-03

光伏发电系统是运用太阳能电池半导体材料的光伏效应,将光照辐射的能量直接转换为电能的一种新型能源发电系统。由于光伏电池成本较高,实际实验困难,所以计算机模拟仿真成为研究这类领域的主要方式^[1]。在实际情况中,光照强度不稳定,同时太阳能电池易受外界温度等因素影响,因此需要对光伏阵列特性进行建模,实现光伏发电系统的动态仿真。

搭建光伏阵列数学模型总体上有3种思路:(1)是将光伏阵列直接看成直流电压源,该方法虽然简易,却不能反映光照强度、外界温度变化及光伏阵列参数的变化,即不能反映光伏阵列随外界条件变化的特性;(2)是使用光伏阵列I-V外特性,对相应的参数修正拟合,从而使得该模型特性近似接近于实际光伏阵列,但对于光照强度、环境温度等参数的设定较为复杂;(3)是根据光伏电池本身的物理特性提出光伏阵列数学模型,即环境条件的变化与光伏阵列其内部特性的关系式,该模型的建立需要大量的实验和时间,且十分复杂和困难。因国内外所研究的光伏模型具有针对性和局限性,所以不具备一定的通用性。

基于 Matlab/Simulink 仿真软件,根据光伏工程数学模型,搭建光伏阵列仿真模型,采用厂家所提供的光伏电池参数,并能模拟外界环境的变化模拟其特性的影响。

1 光伏工程数学模型

任意太阳光照强度 $G(W \cdot m^{-2})$ 和环境温度 T_a ($^{\circ}C$) 条件下,太阳能电池温度 T_c ($^{\circ}C$) 为

$$T_c = T_a + t_c \cdot G \quad (1)$$

式中, t_c 由试验测得大量数据取为 $0.03^{\circ}C \cdot m^2 / W$ 。

设在参考条件下, I_{sc} 为短路电流, V_{oc} 为开路电压, I_m 、 V_m 为最大功率点电流和电压,则当光伏阵列电压为 V ,其对应点电流 I 为

$$C_2 = \left(\frac{V_m}{V_{oc}} - 1 \right) / \ln \left\{ \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right\} \quad (2)$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) e^{\frac{-V_m}{C_2 V_{oc}}} \quad (3)$$

$$I = I_{sc} \left(1 - C_1 \left(e^{\frac{V}{C_2 V_{oc}}} - 1 \right) \right) \quad (4)$$

考虑太阳辐射变化和温度影响时,

$$DT = T_c - T_{ref} \quad (5)$$

$$DV = -\beta \cdot DT - R_s \cdot DI \quad (6)$$

$$DI = \alpha \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) DT + \left(\frac{G}{G_{ref}} - 1 \right) \cdot I_{sc} \quad (7)$$

$$I = I_{sc} \left(1 - C_1 \left(e^{\frac{V-DV}{C_2 V_{oc}}} - 1 \right) \right) + DI \quad (8)$$

式中, G_{ref} 、 T_{ref} 分别为太阳辐射和电池温度参考值,一般分别取 $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ 和 $25^{\circ}C$; α 为在参考日照下的电

流变化温度系数, $\text{Amps}/^{\circ}\text{C}$; β 参考日照下的电压变化温度系数, $\text{V}/^{\circ}\text{C}$; R_s 为光伏阵列的串联电阻。

2 光伏阵列最大功率跟踪控制

在一定的环境温度和光照强度下, 光伏电池有唯一的最大功率点, 当太阳电池工作在该点时, 能输出当前温度和日照条件下的最大功率。恒定电压控制 (CVT) 由于在日照强度较高时, 大多数太阳能电池板的最大功率点位于其开路电压的 $(78 \pm 2)\%$ 处^[3], 从而简化了 MPPT 的控制设计, 且考虑外界温度和光照强度对开路电压及短路电流的影响。

当日照强度和电池温度均有变化时, 重新计算 V_{oc-new} 为

$$DG = \frac{G}{G_{ref}} - 1 \quad (9)$$

$$V_{oc-new} = V_{oc} (1 - cDT) (1 + bDG) \quad (10)$$

$$V_{ref} = (0.76 \sim 0.80) \% V_{oc-new} \quad (11)$$

式(10)中, 系数 α, c 采用典型值: $\alpha = 0.0025/^{\circ}\text{C}$; $c = 0.00288/^{\circ}\text{C}$; $k = 0.76 \sim 0.80$; 系数 b 使用优化后的参数值: $b = -0.1949 + 7.056 \times 10^{-4} \times G$; V_{ref} 为工作在最大功率点时输入给定电压; k 为 MPPT 恒压控制调节系数。

3 光伏阵列仿真模型

依据光伏电池工程数学模型, 在 Matlab/Simulink 环境下, 搭建了光伏阵列的仿真模型, 如图1所示。

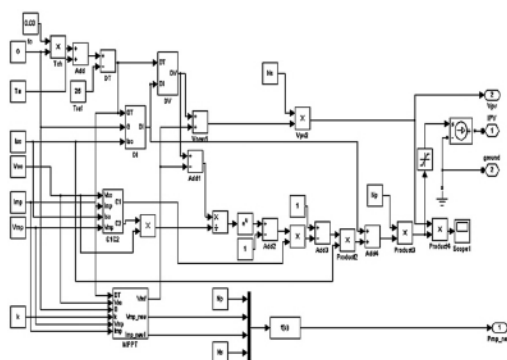


图1 光伏阵列的仿真模型图

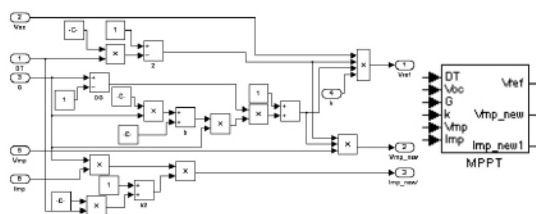


图2 最大功率点控制封装模型

最大功率点控制模型如图2示, 采用恒电压控

制, 考虑了外界条件变化对开路电压和短路电流的影响, 从而使得模型更加精确。

运用 Simulink 封装技术将模型进行封装处理^[4], 如图3示。

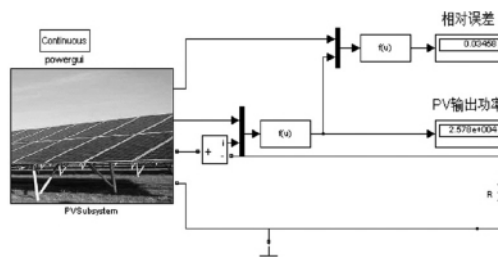


图3 光伏阵列的封装仿真模型

由厂家 Kyocera Corporation 提供型号为 KC40T-1(多晶)的参数如表1所示, 将厂家参数设置于模型用户参数设置界面中, 如图4所示。同时还可设定外界温度、光照强度、串并联方式等参数来模拟仿真光伏 $I-V$ 、 $P-V$ 特性曲线。

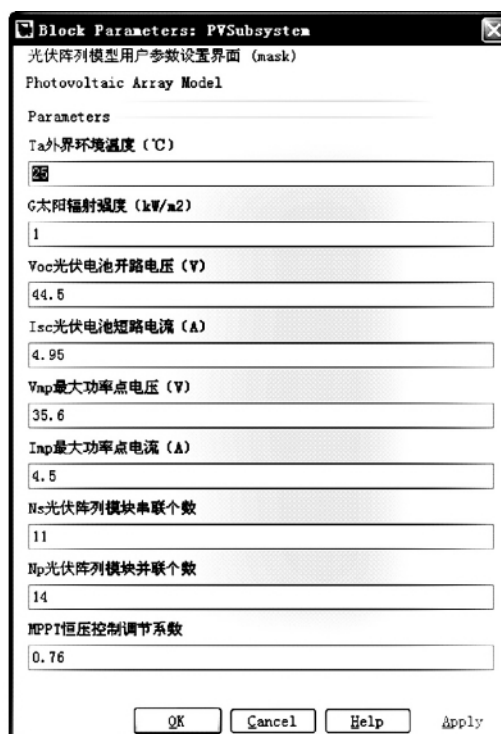


图4 光伏阵列模型用户参数设置界面

表1 KC40T-1(多晶)的参数表

型号: KC40T-1(多晶)	参数
额定功率/W	43
开路电压/V	21.7
短路电流/A	2.65
最大功率点电压/V	17.4
最大功率点电流/A	2.48
尺寸大小/(mm × mm × mm)	52.6 × 65.2 × 5.4

使用该模型模拟外界条件的变化下的光伏 $I-V$ 、 $P-V$ 特性曲线, 由曲线图5可知当环境温度一定

时,光照强度降低,光伏阵列的短路电流和功率也随之下降,而对光伏阵列的开路电压影响较小;由曲线图6可知当光照强度一定时,随着环境温度的降低,光伏阵列的开路电压和功率升高,却对光伏阵列的短路电流几乎没有影响。

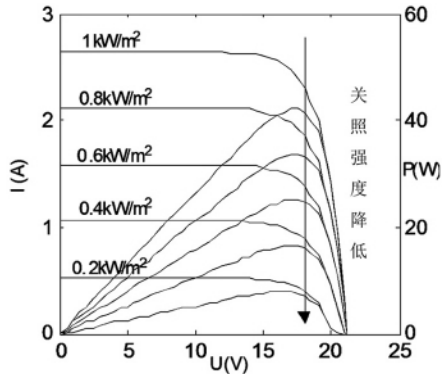


图5 25℃,不同光照强度下的 $I-V$ 和 $P-V$ 特性曲线

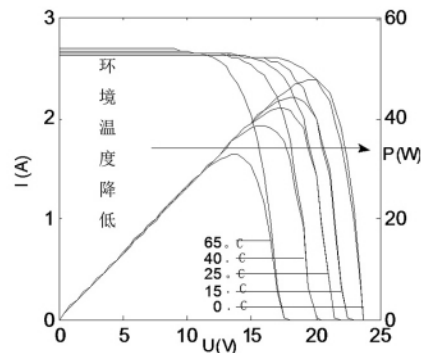


图6 1 kW/m²,不同环境温度下的 $I-V$ 和 $P-V$ 特性曲线

在环境温度一定时,曲线图7表示,不同的光照强度下光伏阵列功率输出,在 $t=12\text{ s}$ 时刻,光照强度由 0.8 kW/m^2 变化为 1 kW/m^2 ,输出功率上升为 45 W ;在 $t=16\text{ s}$ 时刻,光照强度变化为 0.9 kW/m^2 ,光伏阵列输出功率下降。图8则表示,在光照强度一定时,由不同的环境温度下光伏阵列功率输出曲线可知,分别在 $t=12\text{ s}$ 和 $t=16\text{ s}$ 时刻,外界温度变化为 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $20\text{ }^\circ\text{C}$,功率输出发生了相应的变化,同时该模型能够有效、快速地跟踪最大功率点。

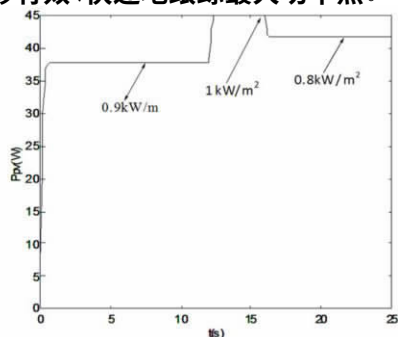


图7 不同光照强度下的光伏阵列功率输出曲线

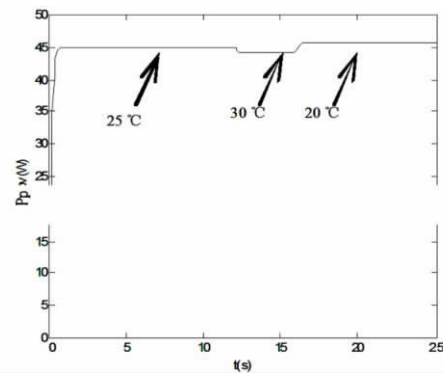


图8 不同环境温度下的光伏阵列功率输出曲线

4 结论

依据光伏电池的工程数学模型,并结合最大功率跟踪数学模型,搭建了光伏阵列 Matlab 通用仿真模型。由厂家提供给定型号和参数,该模型就能够模拟各种外界条件组合下的 $I-V$ 及 $P-V$ 特性曲线,从而也验证了光伏阵列是一个与许多参量相关的高度非线性电源。MPPT 恒压控制简单易行,仿真时间较短,能够迅速、准确地动态跟踪。仿真计算表明,该光伏阵列模型可以动态跟踪外界温度、光照强度等参数地变化,从而为光伏发电系统研究提供了光伏阵列工程数学模型依据和动态仿真平台。

参考文献

- [1] 冯焱生. 太阳能发电原理与应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [2] 孙自勇, 宇航, 严干贵, 等. 基于 PSCAD 的光伏阵列和 MPPT 控制器的仿真模型 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 61-64.
- [3] 郭美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [4] 王长江. 基于 MATLAB 的光伏电池通用数学模型 [J]. 电力科学与工程, 2009, 25(4): 11-14.
- [5] YUSHAIZAD Y, SITHS, MUHAMMAD A L. Modeling and Simulation of Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic System [C]. National Power & Energy Conference, 2004, (29-30): 88-93.

作者简介:

郭立(1984),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期:2011-08-10)

300 MW 机组回油滤网堵塞导致主油箱油位下降原因分析及处理

郑能伟

(四川广安发电有限责任公司, 四川 广安 638000)

摘要:某厂一 300 MW 机组,在开机过程中发现主油箱油位持续下降,但润滑油压、各轴系温度未见异常,检查发现主油箱回油滤网部分堵塞,导致脏油室回油不畅使油位高于主油箱溢流口,部分回油经该溢流口排至事故油坑,而现有油位计因接于回油滤网后,仅能反映净油室油位而不能反映脏油室油位。因此决定在现有油位计旁增设一玻璃管油位计,连接于回油滤筒底部,用于反映脏油室油位,通过两油位(即脏油室、净油室油位)差即可判断回油滤网是否脏污,避免因回油不畅,脏油室油位过高而从溢流口跑油,危及机组安全,甚至发生汽轮机断油烧瓦之类的恶性事件。

关键词:回油滤网; 堵塞; 油位计; 改进

Abstract: The main oil tank level of 300 MW unit is found decreasing continuously during the starting up in a power plant, but is found no abnormality in the lubrication pressure and the temperature of various shafting. Through the inspection, it is found that the returned oil strainer of main oil tank is blocked, resulting in the unsmooth returned oil in the dirty oil tank, which causes the oil level higher than the overflow vent of main oil tank, through which some returned oil is discharged to the accidental oil pit. After a further inspection, it is found that the existing oil level indicator can only reflect the oil level of purified oil but can not reflect that of dirty oil because it is connected with the back of the returned oil strainer. Therefore, it is decided to add a glass tube oil level indicator next to the existing oil level indicator. The new oil level indicator is connected at the bottom of returned oil filtering cartridge, which is used to reflect the oil level of dirty oil. Whether the returned oil strainer is dirty can be judged through the difference between the two oil levels (the oil level of dirty oil and purified oil), which can avoid the oil leakage from the overflow vent when the dirty oil level is over high caused by the unsmooth returned oil to endanger the security of the unit, and the accident of oil cut-off and burn-out of bearing shoe in steam turbine.

Key words: returned oil strainer; blockage; oil-level indicator; improvement

中图分类号:TK263.8 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2011)05-0092-03

容量为 30.6 m^3 。

1 润滑油系统概述

汽轮机润滑油系统采用主油泵-射油器供油方式。主油泵由汽轮机主轴直接驱动,器出口压力油驱动射油器投入工作。润滑油系统主要用于向汽轮发电机组各轴承及盘车装置提供润滑油,向调节系统、保安系统提供部分用油,向发电机氢密封系统提供密封用油油源,为主轴顶轴系统提供充足的油源,向汽轮发电机组转子联轴器提供冷却油,并具有回油排烟功能。其中,主油箱采用集装方式,将润滑油系统中的大量设备,如交流润滑油泵、直流事故油泵、单舌止回阀、双舌止回阀、油烟分离器、油位指示器、射油器、电加热、溢油阀以及内部管道集中布置在油箱内,方便运行及监视,简化布置,便于防火,正常运行时油箱

2 异常情况介绍

此前该机组因调令停机,6月30日因调令开机启动交流润滑油泵后,主油箱油位由 1.997 m 降至 1.600 m 左右,此处油位下降属于正常现象,7月2日凌晨,主油箱油位降至 1.480 m ,机组冲转后发现油位仍有继续下降趋势,立即组织人员查找原因,经查找,A侧冷油器水侧排空门排水未见油花,B侧冷油器水侧排空仅有少许油花,润滑油压正常且高于冷却水压力,密封油真空油箱、回油扩大槽、浮子油箱油位正常,发电机无进油现象,各油水探测器也未见进油及相应报警,与小机油箱间无相互窜油,同时,其余相关区域也未见漏油现象,初步判断为主机B冷油器

漏油,于7:44将其水侧和油侧隔离,并安排检修人员对该冷油器进行查漏。在此过程中,主油箱油位下降到1.260 m,8:03机组并网,为了保证机组安全运行,防止事件进一步扩大,立即安排相应人员由主厂房外储油箱向该主油箱补油,8:40,补油至1.400 m,因储油箱油位低,输油泵无法进油而停止补油,由于机组处于开机过程中,就地人员观察油位基本稳定并和集控人员进行DCS远传油位校对正常后离开,约半小时后,集控人员发现油位仍有下降趋势,立即联系巡检人员,经就地确认油位确实下降了约3 cm,同时,检修人员回话对B冷油器查漏后未见异常,将此情况汇报相应专业工程师,并增派人员继续查找油位下降原因。经逐一排查,10:38,就地人员检查,怀疑主油箱溢流管有润滑油流动迹象,通过进一步检查,发现主油箱回油滤网内滤筒堵塞,导致回油不畅,部分回油通过主油箱溢流管向事故油坑排放,使主油箱油位异常下降。

3 异常原因分析

(1) 主油箱回油滤网内筒堵塞导致主机润滑油回油不畅,主油箱脏油室油位高,部分回油通过溢流管排至事故油坑,造成主油箱跑油,油位下降,是本次油位异常的根本原因。

(2) 因主油箱油位计接于回油滤网后,仅能反映净油室油位而不能反应脏油室油位,在整个事故处理过程中,该油位一直低位运行,并低于主油箱溢流口,同DCS超声波油位也能正常对应,在一定程度上“干扰”了巡视人员的视线。

(3) 广安电厂机组自投运以来,从未因回油滤网堵塞发生类似异常事件,系统内也未曾见过类似事故报道,无相关事故处理经验,使巡视人员疏忽了对溢流管路的排查,最终导致油位异常未能及时发现。

(4) 该回油滤网未列入机组“逢停必检、逢停必清”项目,机组长期运行,使得滤网脏污,回油不畅。

4 异常情况处理

原因查明后,立即采取措施以下措施。

①考虑到当前主油箱油位,为确保机组正常运

行,临时对溢流口进行封堵,并要求检修人员完全打开主油箱检修口,前期将该滤网拉出少许,使部分回油不经滤网直接回到净油室,脏油室油位迅速下降,油箱不再溢流,同时观察主油箱净油室油位开始回升。

②经持续观察,主油箱油位逐步稳定,随即要求检修人员对该滤网进行更换,约15:30,检修人员将该滤网内筒更换完毕,回油正常。

③由于前期溢流较多,此时油位已低至1.050 m,为确保机组安全、稳定运行,安排相应人员由临机倒油至该机主油箱,净油室油位达1.600 m后停止倒油。至此,该隐患得以消除,并逐步恢复此前隔离的相关设备。

④经分析论证,利用机组停运机会,在现有油位计旁增设一只玻璃管油位计,与回油滤网外筒底部相连(如图1所示),即脏油室油位计,便于监视主油箱脏、净油室油位,解决基建遗留问题,目前,该项目已顺利实施,并达到了预期效果。

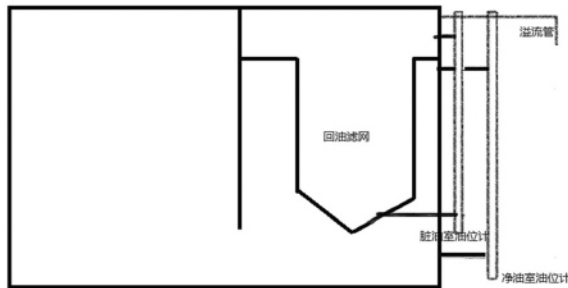


图1 改造后示意图

经试验确定,以脏、净油室油位差100 mm作为衡量回油滤网脏污的依据,同时,要求每个班对主油箱油位计进行核实,确保各油位计显示油位正确,超声波远传DCS油位和就地油位指示相符,油位差若超过20 mm,要求热工人员对其进行校验。若主油箱脏油室和净油室油位差达100 mm,应通知检修人员对滤网内筒进行清洗或更换,定期检查脏油室油位,确保其低于主油箱溢流管口,定期开启溢流管后的事故检漏门检查,机组停运,条件具备时,要求检修人员对滤网进行清洗。通过以上措施,能够及时发现因回油滤网脏污等原因,导致主油箱腔室回油不畅,净油室油位下降,脏油室油位过高,从溢流口跑油,造成主油箱净油室油位过低,若发现处理不及时,甚至可能导致各油泵无法进油,并引发汽轮机断油烧瓦等恶性事件。

5 结 语

此次异常,由于设备本身安装原因,故障原因非常隐蔽,发现问题较困难,不能通过现有油位计确定其脏油室油位,进而判断出回油滤网堵塞,由此给机组运行带来较大安全隐患,通过加装该脏油室油位计,同时完善相应技术措施,巡视人员可以非常直观、清晰地了解主油箱脏、净油室油位,及时发现设备异常情况。同时,由于该项目具有投入经费少、施工简单等优点,也在存在类似问题的机组中实施,据统计,

(上接第66页)

根据变电站的布置特点,还应充分考虑变电站清洁用水的要求,配置相应设施。

3.8 噪声治理

优先选用符合环保要求的低噪声设备,如变压器噪声值不超标、配电装置采用GIS设备等。变电站布置时,所有电气设备均设置于地下,所有通风设备均采用高效低噪音风机箱,并安装采用减震措施,风管安装消声器,风机出口设置阻抗复合式消声器,进出风口采用消声百叶,独立风机房内设置吸音孔板,通过一系列措施有效降低机房内噪声,并防止设备噪声向外界传播,尽可能地将噪声源与外界隔绝,将对周围环境的噪声影响降至最低。

3.9 电磁辐射

变电站电磁环境影响主要是工频电场、工频磁场和无线电干扰,地下变电站采用有钢筋砼的外墙、底板和顶板,有利于屏蔽电磁辐射。站内电气设备安装接地装置;金属构件尽量做到表面光滑,避免毛刺出现;所有设备导电元件接触部位均连接紧密,减少因接触不良产生的火花放电。采取多种措施后,根据同类工程监测分析,可将变电站产生的电磁环境影响水平控制在允许范围内。

3.10 变电站节能

变压器的空载损耗和短路损耗直接影响到变压器运行时的有功功率损耗,短路阻抗和空载电流的大小将直接影响到变压器运行时的无功功率损耗。为节省不必要的能源浪费,在主变压器的选择上,尽可能地降低变压器的空载损耗,适当降低变压器的负载损耗。同样合理计算站用电负荷,选择低损耗站用变压器。

照明灯具选择上采用绿色照明技术,选择高效率

改造两年来,该厂汽轮机油系统未发生跑油事件,消除机组潜在隐患,确保机组安全、稳定运行。

参考文献

- [1] 东方汽轮机厂. 润滑油系统说明书 [M].
- [2] 东方汽轮机厂. 集装油箱使用说明书 [M].

作者简介:

郑能伟(1979),男,本科,工学学士,四川广安发电有限责任公司,集控运行主值班员。

(收稿日期:2011-05-17)

照明灯具和长寿命光源。

建筑节能设计,可优化建筑体型系数、选用保温性能较好的墙体材料,对通风系统管道、阀门及系统组织进行综合考虑,在满足系统功能前提下减小阻力,设备采用高效节能产品,合理布置管路系统,降低系统阻力。

3.11 接地装置

地下变电站基础埋深较深,可充分利用埋设的主建筑底板下及四周的地网,形成呈笼形布置,同时建筑物各层楼板的钢筋焊接成网,并和室内敷设的接地母线相连;为降低接地电阻,变电站地网与地下建筑结构部分钢筋以及建筑地下桩基可靠连接。

考虑接地网的抗腐蚀要求以及无法更换等因素,主地网优先采用铜质材料接地网,室内接地母线及设备接地线可采用热镀锌扁钢。

3.12 保安电源

地下站多处于市中心,供电性质重要,根据规程要求,宜另引接一回站外电源,供全站停电时通风、消防等负荷使用。工程中可考虑将施工电源在施工完毕后,转为正式电源,作为站用变电站第三电源,供消防、通风、应急照明等重要负荷。

4 结 语

地下变电站的建设能提高对土地的综合利用,改善城市景观,优化城市环境,同时有效解决噪声污染、电磁辐射等问题,但其本身也面临诸多技术问题,对施工工艺、建设周期等方面也提出了很高的要求。只有全方位综合考虑,政府与企业共同扎实做好前期准备工作,才能最大限度发挥其社会、经济效益。

(收稿日期:2011-08-10)



国家电网公司科技期刊第二审读组 2011年审读会议

2011年9月6日，在成都召开了国家电网公司电力科技期刊第二审读组期刊审读会议。该会议由《四川电力技术》期刊编辑部承办。

参加会议的有四川省电力公司副总工程师韩晓言、四川省电力公司科技信息部副主任胡灿、四川省电机工程学会副秘书长方文弟、四川电力科学研究院副院长罗涛、国家电网公司信息通信有限公司期刊学术中心主任郭维莹、《中国电力》编辑部主任张重实及其他电力科技期刊编辑部代表。

会议由四川省电力公司科技信息部副主任及《四川电力技术》主编胡灿主持。

会上，四川省电力公司副总工程师韩晓言首先代表四川省电力公司欢迎各电力科技期刊编辑部人员的到来。他谈到了电力科技期刊在科研生产及电力建设中

的重要作用，希望通过审读会，能促进电力科技期刊的进一步发展。

四川电力科学研究院副院长罗涛代表东道主四川电力科学研究院，介绍了四川电力科学研究院近年来的发展情况，向代表们推荐了成都的名胜古迹。

国家电网公司信息通信有限公司期刊学术中心主任郭维莹介绍了国家电网公司期刊学术中心旗下数本期刊的办刊情况。

各审读员及各期刊编辑部的参会代表，根据国家对科技期刊的质量要求、评估标准及《国家电网公司科学技术期刊出版管理规定》等有关电力科技期刊审读的要求，审读了参会代表所在期刊的出版情况，对今年抽取样刊的办刊方针、先进性及实用性、基金论文比、报道及时性、报道容量、编辑加工水平等方面进行了评比和审读。同时，各编辑部



参会代表，还探讨了新形势下电力科技期刊的工作，进行了充分的交流。各期刊编辑部代表纷纷表示，电力科技期刊审读会议，对进一步提高电力科技期刊的办刊质量，起到了良好的推动作用。

会上讨论了明年国家电网公司电力科技期刊的审读工作计划。

