

★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源期刊

●中国农村电气化信息网

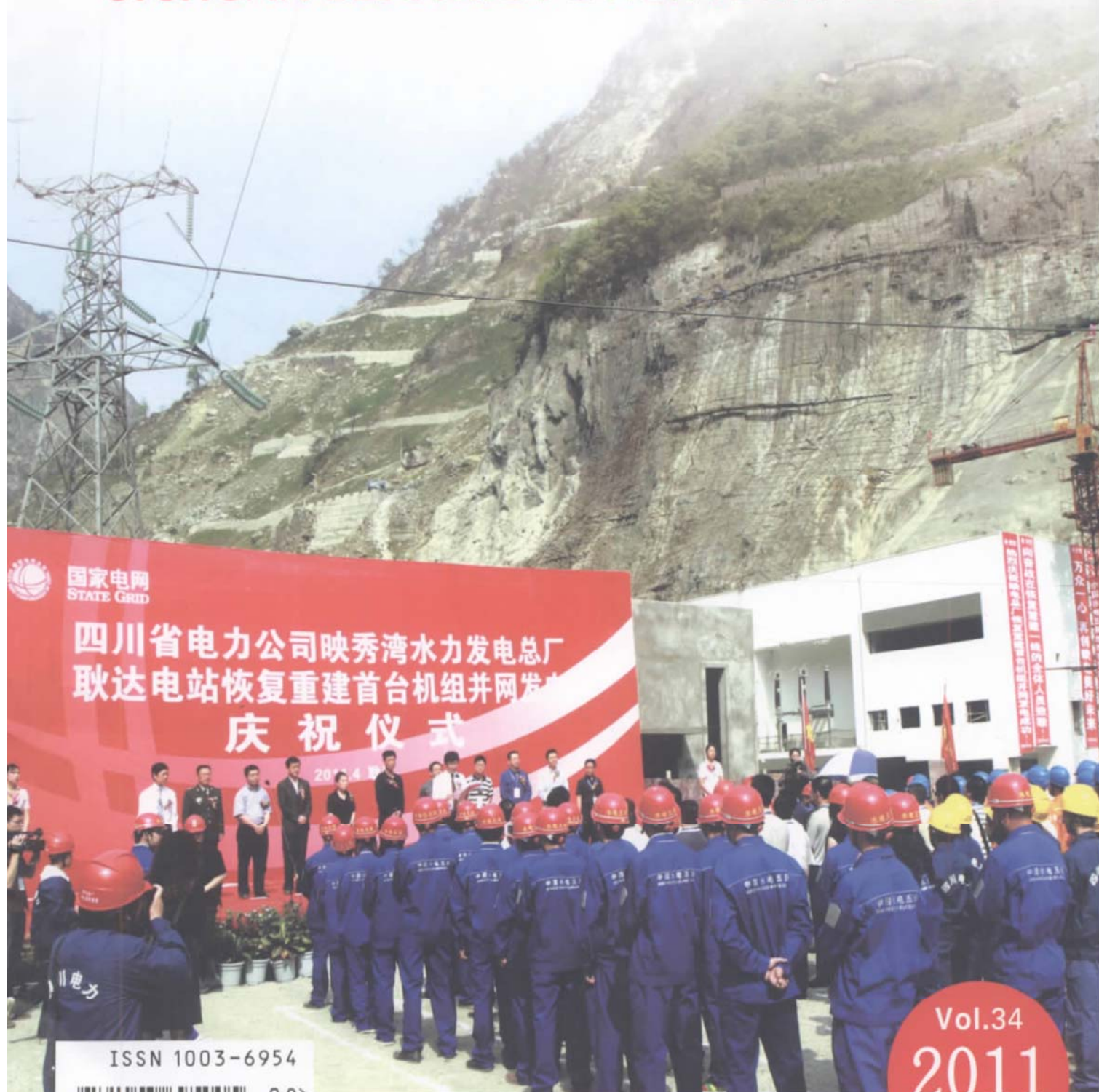
●重庆维普中文科技期刊数据库

●《超星数字图书馆》入网期刊

●《中国核心期刊(遴选)数据库》收录

四川電力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954



08>

四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

Vol.34
2011
No.4

《四川电力技术》
编辑委员会名单

主任委员 王 平

副主任委员 张 伟

刘俊勇

委 员

(按姓氏笔画为序)

方文弟 王 卓 白家棣

刘 勇 朱白桦 朱国俊

朱 康 邓亚军 鄢小端

李兴源 李建明 严 平

胡 灿 徐 波 唐茂林

韩晓言 谢 舫 甄 威

秘 书 李世平

吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978 年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN1003-6954
CN51-1315/TM

2011 年第 34 卷第 4 期(总 214 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:成都市清华路 24 号

邮政编码:610072 电话:(028) 87082037

传 真:(028) 87314278

E-mail:cdscdljs@163.com

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册 6.00 元

[期刊基本参数] CN51-1315/TM* 1978*

b* A4* 94* zh* P* ¥6.00* 4300* 25*

2011-08

目 次

• 智能电网专栏 •

智能电网地区调度支持系统框架研究 郝文斌 洪行旅 陈 立 等(1)

智能电网推动发电厂节能减排的策略研究 马 静 汪 颖(4)

智能电网促进节能减排的市场执行问题的探索 蒋荣华 胡 灿 汪 颖(9)

需求终端节能减排发展现状与效益分析 张弋宁 汪 颖 肖先勇(13)

智能配电网促进用电侧节能减排的政策与计划 汪 颖 陈 武(17)

市场参与者接入智能电网的能量端口及其特点 曹海权 孙晓璐 马 超(22)

TinyOS 感知节点在智能电网输电环节的应用 黄宏光 钟 俊 李国才(27)

用户友好配电系统规划方法的研究 刘旭娜 汪 颖 黄 静(30)

• 电网技术 •

双馈风电机组低电压穿越能力的研究 李鹏程 晁 勤(36)

连锁故障引发的电网灾难性事故风险评估 何 焱 冯 靖 催 振(40)

住宅小区公用电网的谐波及治理 黄冰心(45)

西藏昌都电网联网方案探讨 何志强 扎 西 郑 勇 等(48)

关联规则在输电网安全性评价中的应用 程 政 雷 霞 柏小丽 等(52)

风电变流器网侧 SVPWM 变换器的控制研究 胡文胜 赵 宇(55)

一起直流分压器故障导致直流系统闭锁事故分析 胡 翔(59)

• 高电压技术 •

单芯电费实时载流量计算方法研究 李 伟 曾 宏 杨 琳 等(61)

一起有载开关故障案例分析 胡 海(65)

因受潮引起 35 kV 开关柜事故的技术分析 湛天亮(67)

• 技术探讨 •

基于模糊综合评判的断路器可靠性状态评估 谢 伟 卢更生 谭 杰 等(69)

基于小波变换的变压器差动保护算法 高志勇 成建军 张 昕(72)

基于线路介数的多组同基最小断点集选取方法 张向亮 吕飞鹏 张新峰 等(75)

高压断路器非全相保护浅析 秦 川(79)

基于传统综合自动化变电站的程序化操作实现 李 杨 郭小龙 周建邦(83)

智能操作票系统完整解决方案 袁贵川 庞晓艳 张宏图 等(87)

二滩电站枯水期无功经济运行策略研究 郭玉恒 唐杰阳(91)

CONTENTS

Frame Research on Local Dispatch Support System for Smart Grid	Hao Wenbin Hong Xinglü Chen Li et al(1)
Strategy Study on Energy Conservation and Emission Reduction of Power Plants Promoted by Smart Grid	Ma Jing Wang Ying(4)
Research on Marketing Implementation of Energy Conservation and Emission Reduction Promoted by Smart Grid	Jiang Ronghua Hu Can Wang Ying(9)
Development Status and Benefit Analysis of Energy Conservation and Emission Reduction in Demand Terminal	Zhang Yining Wang Ying Xixao Xianyang(13)
Policy and Plan for Energy Conservation and Emission Reduction in Demand Side Promoted by Smart Distribution System ...	Wang Ying Chen Wu(17)
Energy Ports of Market Participants Accessing to Smart Grid and its Features	Cao Haiquan Sun Xiaolu Ma Chao(22)
Application of TinyOS Sensor Nodes to Transmission Line of Smart Grid	Huang Hongguang Zhong Jun Li Guocai(27)
Research on Programming Method of Customer Friendly Distribution Systems	Liu Xuna Wang Ying Huang Jing(30)
Research on Low Voltage Ride - through of Doubly - fed Wind Power Generating Set	Li Pengcheng Chao Qin(36)
Integrated Risk Assessment on Catastrophic Accident Caused by Power System Cascading Failure	He Yan Feng Jing Cui Zhen(40)
Harmonics in Utility Power Grid of Residential District and Its Elimination	Huang Binxing(45)
Discussion on Interconnection Schemes of Qamdo Power Grid in Tibet	He Zhiqiang Zha Xi Zheng Yong et al(48)
Application of Association Rules to Safety Evaluation of Transmission Network	Cheng Zheng Lei Xia Bai Xiaoli et al(52)
Research on Grid - side SVPWM Converter Control of Wind Power Converter	Hu Wensheng Zhao Yu(55)
Analysis on DC System Blocking Failure Resulting from DC Voltage Divider Fault	Hu Xiang(59)
Research on Real - time Calculation Method of Carrying Capacity of Single - core Cable	Li Wei Zeng Hong Yang Lin et al(61)
Case Analysis of On - load Tap - changer Fault	Hu Hai(65)
Technical Analysis on 35 kV Switchgear Cabinet Fault Caused by Dampness	Chen Tianliang(67)
State Assessment of Circuit - breaker Reliability Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation	Xie Wei Lu Gengsheng Tan Jie et al(69)
Differential Protection Algorithm in Power Transformer Based on Wavelet Transform	Gao Zhiyong Cheng Jianjun Zhang Xin(72)
Method for Selecting Minimum Break Point Set from Multi - MBPS with the Same Cardinal Number Based on Line Betweenness	Zhang Xiangliang Lü Feipeng Zhang Xinfeng et al(75)
Superficial Analysis in Open - phase Protection of High - voltage Circuit - breaker	Qin Chuan(79)
Realization of Programmed Operation Based on Traditional Integrated Automation Substation	Li Yang Guo Xiaolong Zhou Jianbang(83)
Complete Solution of Intelligent Operation Ticket System	Yuan Guichuan Pang Xiaoyan Zhang Hongtu et al(87)
Research of Reactive Power Economic Operation Strategy for Ertan Hydropower Plant in Withered Water Period	Guo Yuheng Tang Jieyang(91)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2011 Vol. 34 No. 4
(Jan. No. 214)

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

智能电网地区调度支持系统框架研究

郝文斌¹ 洪行旅¹ 陈立¹ 车嘉²

(1. 成都电业局 四川 成都 610021; 2. 沈阳供电公司 辽宁 沈阳 110001)

摘要: 提出了智能电网条件下地区级调度支持系统总体设计方案。该系统由网络基础平台及应用类组成,其中应用类包括实时监控与分析类、调度计划类和调度管理类,同时详述了实时监控与分析类、调度计划类的具体内容。该方案能够有效地满足智能电网地区调度支持系统的需求。

关键词: 智能电网; 调度支持系统; 电力系统

Abstract: The design scheme of local dispatch support system based on smart grid is put forward. The system is made up of the network basic platform and application class. The application class includes the on-line monitoring and analyzing class, dispatching scheme class and dispatching management class. Meanwhile, the on-line monitoring and analyzing class and dispatching scheme class are described in detail. The scheme can satisfy the technical demand of local dispatch support system for smart grid effectively.

Key words: smart grid; dispatch support system; power system

中图分类号: TM734 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)04-0001-03

随着第一条特高压电网试运行成功,标志着中国电网建设已经跨入了特高压时代。各大区域电网通过特高压直流和交流输电方式沟通,从而实现了全国电网的互联,优化了国内的资源分配,对国家的经济发展起了重要作用。但从电网控制的角度看,难度越来越大,对电网的调度统一协调控制提出新的更高的挑战。全国联网在物理链接上实现了一体化运行,各大电网的电气耦合程度越来越高,对一体化运行提出了新的要求^[1-11]。

从技术层面上,目前全国各地区级电网长期沿用的基于局部信息的电力系统分析和控制手段,将难以满足如此超大规模电网的安全稳定运行要求。作为地区级调度必须与上级及下级调度协调一致,统一考虑,因此必须加强系统平台及应用系统建设,使调度人员能够更加敏锐、综合、前瞻地了解电网的实际运行状况,并智能地实现电网的安全分析及评估,将电网的安全稳定掌握在自己的手中。必须积极建立坚强的地区级调度技术支持系统,实现信息的高度共享与集成,提高调度系统的自动化水平,加强电网与电源、用户友好互动和相互协调的要求。智能电网不仅要技术上实现统一协调,同时在管理上也要实现总体化管理模式,地区级调度管理系统的内部及与上下级调度之间在管理上还处于较为独立的状态,在先期

建设中所存在的一些缺陷逐渐显露出来。主要表现在系统缺少总体设计和统一的管理规范,系统的标准化水平较低,各单位的应用水平不平衡等,难以适应电网调度一体化运行的要求,迫切需要加强调度管理系统的标准化建设。

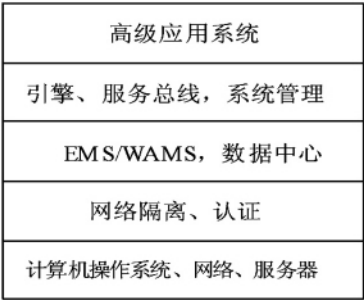


图1 调度支持系统结构图

1 智能电网地区级调度支持系统结构

网络平台包括调度中心和其他调度中心间及变电站设备(包括一次及二次设备等)通过网络平台实现调度中心之间及现场设备的高效通信,也同时实现EMS/WAMS数据采集。统一网络平台为实现设备的数据采集、检测、监视、控制、闭环计算管理成为可能。数据中心提供统一编码的数据资源,保证统一平台应用系统对数据资源的相互访问要求。数据中心的数

包括实时采集数据、非实时采集数据及关系数据等。数据中心提供各种数据引擎,其中主要为基本数据引擎、智能决策引擎及数据可视化引擎等。应用系统是调度支持系统的高级软件,其主要包括三大类,分别是实时监控与分析类、调度计划类和调度管理类。

2 应用分类

2.1 实时监控与分析类

实时监控与分类结构图如图2。

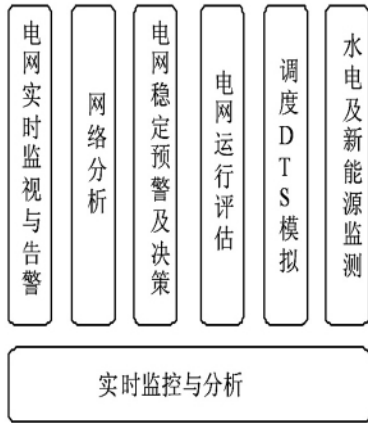


图2 实时监控与分类结构图

2.1.1 电网实时监控与告警

随着全球卫星定位系统(GPS)和相量测量单元(PMU)的发展,广域测量系统(WAMS)的建立为电力系统动态安全分析提供了新的契机。WAMS基于GPS高精度时钟同步采集广域电网的实时运行信息,并通过高速通信网络将分散信息汇集到调度中心,从而实现对电网动态过程的实时监控。基于广域测量技术的电力系统稳态和动态运行状况的监视系统,使电网调度人员能更及时、准确和全面地掌握电网的实际运行状况,提供全面和完善的监视控制手段和工具,保证电网的安全稳定经济运行。根据各专业人员不同的需要对各种暂稳态信息进行分析处理,从而实现在线智能报警和故障诊断。实时监控与智能告警功能主要包括:稳态、动态和暂态实时数据采集;电网运行稳态监控;电网运行动态监视;保护和自动装置在线监视;一次调频在线监视以及综合智能告警等。

2.1.2 网络分析

智能电网下,网络拓扑是各计算用高级应用模块的基础。传感技术及通信技术的发展,各计算模块的网络拓扑形成将实现网络拓扑的在线获取成为可能,在线获取的网络拓扑可实现共享。数据状态评估是

计算用数据基础,状态评估可实现在线对数据的前期处理,保证各种计算的准确性。网络分析功能主要包括:网络拓扑在线获取;状态评估;短路电流计算;在线外部等值接入。

2.1.3 电网稳定预警及决策

电网稳定预警及决策应用,具备在线的稳定计算及监控能力,给出电网在各种扰动下是否稳定的分析结果和量化的稳定裕度,对于会造成系统失去稳定性的扰动,给出能够使系统维持稳定运行的控制策略;智能电网稳定预警及决策应用能够在感知电力系统状态的基础上,实现自主运行,并且可以通过各级电网协作共同制定调度决策方案,主动为调度人员提供决策支持。提出包括调整电厂发电机出力、调整联络线功率、控制负荷等预防性控制措施或优化策略,及事故后需要采取的调整措施等,形成保障电网安全运行有效的稳定预警及决策支持。电网稳定预警及决策的主要功能包括:调度员潮流;灵敏度分析;稳定分析与预警;调度辅助决策与稳定裕度评估。其中稳定分析的内容可包括暂态稳定分析、静态电压稳定分析、小干扰稳定分析和静态安全分析。

2.1.4 电网运行评估

运行评估是对电网运行情况的分析和总结,对指导稳定经济运行起了至关重要的作用。实现对频率、电压、潮流、故障记录的监控要求,并对各种频率、电压等指标进行统计和分析考核。同时实现网损计算和统计实现网损计算、分析、统计与管理的功能,充分利用EMS和WAMS等资源,基于实时数据、状态估计、潮流计算结果和理论线损进行网损统计和计算,对系统网损进行综合分析和评估。

2.1.5 调度DTS模拟

调度专业人员的业务培训是调度工作的关键环节。因此需要一定的手段来对各类调度业务进行模拟,对不同专业人员进行培训,提高电网运行人员的技术水平。通过DTS系统模拟电力系统的运行环境,训练调度人员的正常工况操作和事故处理操作,检验调度员的电网正常操作水平和事故处理能力,也同时能够分时段进行反事故演习。

2.1.6 水电及新能源监测

智能电网下,小水电及新形式能源将以分布式上网,其中主要的新能源包括太阳能发电、生物能发电、风能发电、潮汐发电及地热发电等新能源技术。各种新形式能源的共性特点是发电一般为间歇性,不连续

的发电将对电网的潮流产生很大影响,甚至影响系统的稳定及继电保护的正常工作。一般情况下,小水电和新能源上网都在较低的电压等级上网发电,一般为 110 kV、35 kV 和 10 kV 等,这些电压等级一般为地级调度管辖范围。因此,智能电网地区级调度支持系统必须对小水电及新能源加以监测。

2.2 调度计划类

调度计划类结构图见图 3。

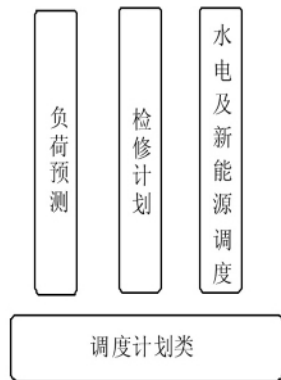


图 3 调度计划类结构图

2.2.1 负荷预测

负荷预测是水库调度和发电计划的重要依据,地调级的负荷预测是省调的负荷预测及发电计划基础。目前地调级调度负荷预测主要包括短期系统负荷预测(日负荷预测)。随着电网运行要求的不断提高,及分布式发电及微网发电的配电发电网络的形成,基本的短期负荷预测已经不能满足要求,必须加强超短期负荷预测。因此应该在调度计划环节不断提高短期负荷预测水平,以满足未来电网发展的形式需要。

2.2.2 检修计划

检修计划是根据检修申请,考核需求预测和电网安全,以指定的目标安排计划周期内各设备检修计划,对检修计划进行裕度评估和安全评估,并对检修计划的执行进行跟踪分析。在地区级调度系统一般可不进行安全校核。

2.2.3 水电及新能源调度

在智能电网情况下,小水电及新能源对能源的合理利用起到积极的作用,有效安排的小水电和新能源的上网能够优化电能配置,避免远距离大范围能源的输送,减少能量的线路损耗;同时,合理的调度安排对系统的稳定运行起到积极意义。

2.3 调度管理类

调度管理类是智能电网地区级调度技术支持系

统的重要组成部分,主要为调度机构日常调度生产管理作支撑,主要包括:方式管理、调度运行管理、继电保护定值管理、自动化管理、通信管理和综合管理。其中综合管理贯穿前面的专业管理及生产运行管理,对各种信息进行分析加工综合评估。具体见图 4。

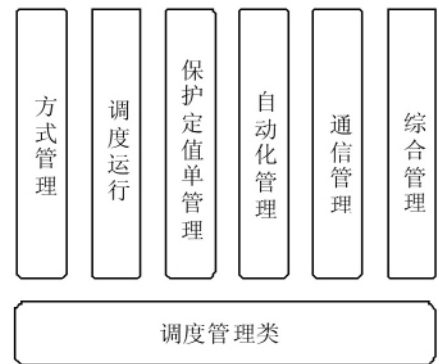


图 4 调度管理类结构图

3 系统数据逻辑关系

3.1 应用类间数据交换

各高级应用类间在数据方面是相互耦合,不可分割的。监控分析类模块所需数据:负荷预测和检修计划(调度计划类数据)、设备参数(调度管理类数据)。调度计划类模块所需数据:系统实时和历史数据(监控分析数据)、设备参数和检修申请及限额信息(调度管理类数据)。调度管理类模块所需数据:系统实时和历史数据(监控分析数据)、负荷预测和检修计划(调度计划类数据)。具体数据逻辑关系见图 5。

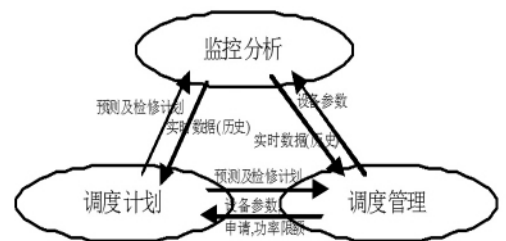


图 5 类间数据流结构图

3.2 与上级应用类间数据流

地区级调度支持系统应用类与上级调度间在数据方面也存在耦合关系。监控分析类模块之间:外部模型等值及控制指令(下行);模型、图形、参数及相关信息(上行)。调度计划类模块之间:负荷预测及相关检修计划(上行)。调度管理类模块之间:检修计划、分析、评估和统计(下行);相关设备参数、检修

(下转第 8 页)

电力技术 2008 (1) : 24 - 29.

- [6] 刘琨,刘念,冉立,等. 发电厂电力拖动系统的节能研究[J]. 四川电力技术 2009 32(2): 88 - 91.
- [7] 胡炫,朱虎,杨志. 高压变频器在发电厂引风机上的应用与节能分析[J]. 电机与控制应用 2010 37(2): 37 - 39.
- [8] Natchpong Hatti, Kazunori Hasegawa, Hirofumi Akagi. A 6.6 kV Transformerless Motor Drive Using a Five - Level Diode - Clamped PWM Inverter for Energy Savings of Pumps and Blowers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 796 - 803.
- [9] Kalyana S. Bandara, W. G. L. Karunarathne, Arulampalam. Energy Saving by Controlling the Inlet Air Flow of a Oil Fired Boiler Using a VSD Driven Blower Fan - Case Study [C]. TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference, 2008: 1 - 5.
- [10] Kao Chen, Melvin C. Unglert, Richard L. Malafa. Energy

- Saving Lighting for Industrial Applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1978, IA - 14 (3): 242 - 246.

- [11] Jun Zhao. Greenhouse Gas Abatement Analysis of the Energy Saving Retrofit in Pulverized Coal Power Plants [C]. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010: 1 - 4.
- [12] Triet Hung Ho, Kyoung Kwan Ahn. Saving Energy Control of Cylinder Drive Using Hydraulic Transformer Combined with An Assisted Hydraulic Circuit [C]. ICROS - SICE International Joint Conference 2009, Japan. 2009: 2115 - 2120.
- [13] 国网公司“坚强智能电网体系研究”技术综合组. 坚强智能电网综合研究报告[Z]. 2009.

(收稿日期: 2011 - 02 - 10)

(上接第 3 页)

申请、分析、评估、统计(上行)。具体数据逻辑关系见图 6。

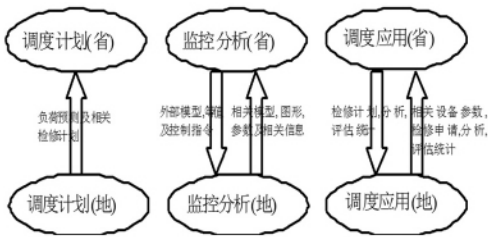


图 6 与上级类间数据流结构图

4 结 语

基于智能电网条件下,从未来电力调度支持系统的发展趋势出发,提出了智能电网地区调度支持系统框架结构,并阐述了总体结构、应用分类及系统数据逻辑关系等关键技术环节,指出了智能电网下调度支持系统的系统构成要求,形成具有主动思考能力的智能电网地区调度支持系统。

参考文献

- [1] 康重庆,陈启鑫,夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术, 2009 33(2): 1 - 7.
- [2] 王明君. 自愈电网与分布式电源[J]. 2007 31(6): 1 - 7.
- [3] 余贻鑫,栾文鹏. 智能电网[J]. 电网与水力发电进展. 2009, 25 (1): 7 - 11.
- [4] 辛耀中. 新世纪电网调度自动化技术发展趋势[J]. 电网技术, 2001 25 (12): 1 - 10.

- [5] 谢开,刘永奇,朱治中,等. 面向未来的智能电网[J]. 中国电力 2008 41 (6): 19 - 22.
- [6] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架(二) 广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J]. 电力系统自动化, 2006 30(2): 1 - 10.
- [7] 张伯明,孙宏斌,吴文传. 3 维协调的新一代电网能量管理系统[J]. 电力系统自动化 2007 31 (13): 1 - 6.
- [8] EPRI. IntelliGrid: Smart Power for the 21st Century. Palo Alto, CA, USA: EPRI, 2006.
- [9] JIANG Zhenhua, LI Fangxing, QIAO Wei, et al. A Vision of Smart Transmission Grids// Proceedings of IEEE PowerEngineering Society General Meeting, July, 2009, Calgary, Alberta, Canada.
- [10] U. S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. Modern Grid Initiative A Vision for Modern Grid [EB/OL] (2007 - 03 - 01) [2008 - 10 - 10] http://www.netl.doe.gov/modern-grid/.
- [11] European Commission. European Technology Platform Smart Grids: Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of Future [EB/OL].

作者简介:

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

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

陈立(1967) 男,博士,高级工程师,主要研究方向为变电所综合自动化、电力系统继电保护及调度管理系统等;

车嘉(1979) 女,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期: 2011 - 03 - 01)

智能电网推动发电厂节能减排的策略研究

马 静¹, 汪 颖^{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: 提高发电环节的能源效率是全面推进“坚强智能电网”发展规划的必要环节, 提高发电厂的能源效率, 是每个发电企业应遵守的起码道德标准和基本社会责任, 也是实现企业经济效益的必由之路。分析了智能电网背景下发电厂的节能技术, 包括电动机节能技术、照明节能技术、空调和热水的节能减排技术等。在智能电网方案下, 通过环境监测与评估, 应用传感器和通信系统优化发电厂的运行性能, 能更好地提高电厂的管理和维护水平。

关键词: 智能电网; 发电厂; 厂用电; 节能技术; 能源效率

Abstract: Improving the energy efficiency of power plants is the necessary part of constructing "a strong smart grid". It is the minimum ethical standards and the basic social responsibility of every power generation enterprise to enhance the energy efficiency of power plant. It is also the only way to achieve the economic efficiency of the plants. The energy conservation technologies of power plant are analyzed in the smart grid, including the energy conservation technologies of motors and lighting, the energy conservation and emission reduction technology of air conditioning and hot water and so on. Under the scheme of smart grid, sensors and communication system are used to optimize the running performance by means of environmental monitoring and assessment, which will improve the management and maintenance level of power plant better.

Key words: smart grid; power plant; service power; energy conservation technology; energy efficiency

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)04-0004-05

0 引言

国家电网公司 2009 年 5 月 21 日首次公布“坚强智能电网”的发展规划。国家电网公司副总经理舒印彪说,“中国的智能电网包含电力系统的发电、输电、变电、配电、用电和调度共 6 个环节, 具有信息化、数字化、自动化、互动化的‘智能’技术特征。”提高发电环节的能源效率是全面推进“坚强智能电网”发展规划的必要环节, 提高发电厂的能源效率, 实现清洁、文明生产, 也是每个发电企业应遵守的起码道德标准和基本社会责任, 更是企业自身获得可持续发展的必备条件。

智能电网中高效发电的一个基本要素与环境监测评估有关。大多数发电厂都采取了一些形式的运行状态监测。在美国, 许多电厂运行人员赞成采用商业化数据服务的方式对发电厂的运行状态数据等进行监测, 这样可将单个电厂的运行特性与中央数据库的数据进行比较, 许多发电厂的运行人员致力于数据采集和监测。在现有监测和数据采集的基础上, 进一步利用传感器技术、通信技术和计算能力, 是实施智能电网战略的重要组成部分。

真正的智能电网应包括整个电力生产、输送和使用等各环节。下面针对发电厂厂用电的特点, 分析智能电网背景下的发电厂厂用电节能减排技术。发电厂厂用电主要有几种方式, 包括电动机提供动力, 驱动泵、风扇和输煤带; 其他用途包括信息技术设备(如计算机、通信与办公设备)、楼宇照明、加热、生活热水等。发电厂厂用电率是电厂在发电过程中的厂用电量占总发电量的百分比, 是厂用电消耗水平的具体反应。通过节能降耗, 降低发电成本, 提高上网电价的竞争力, 已成为各发电企业提高经济效益的重要手段^[1]。如何实现节能降耗, 提高发电厂的经济效益和社会效益, 是发电企业始终面临的实际问题。

1 厂用电主要节能技术

中国火力发电厂厂用电机的耗电量约占厂用电的 80% 以上, 其中, 各种风机耗电总量约占厂用电的 20% ~ 30%, 各种水泵、油泵耗电总量约占厂用电的 50% 以上, 提高厂用电机的节能降耗效果, 是降低厂用电率的最佳选择^[5]。

目前, 在发电厂的各种动力设备中, 风机、水泵类

负载多,负荷变化范围很大,所以必须实时调节风机、水泵等的流量。目前调节流量的方法多为节流阀调节,由于这种调节方法仅仅改变了通道的通流阻抗,而驱动源的输出功率并没有改变,所以浪费了大量的能源。采取变频调速技术对这些辅机设备进行改造是比较适合的,节能效果明显^[4]。文献[6]针对发电厂电动机的改造,提出更换磁性槽楔、采用节能型风扇、采用新的绝缘材料增大导线截面积等方法,来减少发电厂厂用电中电力拖动系统的损耗。引风机的风量需要随着发电负荷的变化而改变,采用高压变频技术能减少能源消耗,同时控制实时变化的风量,电厂引风机的变频改造在工程实践中证明了节能效果明显^[7]。文献[8]推荐了一种6.6 kV无变压器五电平逆变器脉宽调制晶闸管变频调速装置,电动机采用该装置,能为泵机运行节约能量。文献[9]提出了在风机上采用VSD的方法,验证结果证明比传统节能技术更有效。文献[11]提出了一种清洁发展机制CDM(clean development mechanism),在中国北方某热电厂验证了节能效率。文献[12]结合了两种传统液压变压器再生电路,为液压变压器设计了一种新的液压回路,相比于传统变压器,可以提高整体能效。针对复杂多元的、非线性、时变的复合体涡轮机,文献[2]提出在涡轮机上使用模糊推理和自动调谐技术,文献[3]将使用神经网络识别器的模糊假设规律应用到涡轮机上,来降低涡轮机的能耗。

照明领域的节能策略,主要源于更高效电灯的使用,如高压钠灯和金属卤化物灯等^[10]。随着照明技术的发展,新技术已经在众多电厂得到应用。

在智能电网建设的大背景下,发电厂中针对电动机、照明等环节的节能措施,已经越来越得到关注。提高发电厂能源效率,不仅要通过电动机等的设备研发,还包括更高效的环境监测与评估,将传感器和通信系统用于监测电厂的性能、校正历史数据的特性、建立相应的理论模型、比较电厂性能,其目的是为了优化发电厂的运行性能,提高电厂的管理和维护水平。

2 发电厂照明技术的提高

许多老电厂仍使用水银灯或旧式金属卤化物照明系统。新式金属卤化物系统能从根本上改进照明,减少能量需要。电厂的办公室、实验室和控制室等大量采用高效荧光灯,锅炉房和汽轮机室一般采用高压

钠灯、金属卤化物灯和其他高强度放电灯。在发电厂的照明中,发光二极管(light-emitting diodes, LEDs)正在很多地方得到应用,如出口标志、指示仪表,可以改进照明水平的范围包括:能量效率、灯的质量、美观性、自动化、寿命、方便性以及波形因数等。

照明系统的效率是几个因素的函数,照明系统效率取决于发光源的效率(用每单位瓦输入功率输出的光通量来度量)、向希望区域发射的发光效力,以及调节发光水平的控制水平或能力。发光水平可用一些参数表示,如光照位置、日照、安全性和个人喜好指数等,照明效率的最大化就是对这些参数进行最优化,此外,综合控制是对智能电网的扩展。

灯泡必然会经历逐步老化的过程——灯泡连续使用的时间越长,每瓦特电所产生的亮度越少。灯的亮度的降低是决定需进行维护的部分因素,这是进行灯泡发光计算和照明设计时需考虑的重要一步,灯泡输出亮度的变化通常与灯的亮度保持水平有关,新的照明技术提高了灯的亮度维持系数(lumen maintenance factor)。

在发电厂里,照明技术必须在一个或更多特性上体现出相应的进步,以满足电厂运行人员对照明的要求和期望(如发光效率、光线质量、美观性、自动化水平、灯泡寿命、波形系数、方便性等),可用于发电厂以减少电能消耗的一些照明技术:感应灯、多光子发射荧光粉荧光灯、T-5型荧光灯、金属卤化高强度气体放电灯、高压钠高强度气体放电灯。

3 发电厂空调和生活热水技术的提高

3.1 空调和生活热水的应用与能量的损耗

电能广泛应用于发电厂的空调和生活热水方面。在空调领域,主要用途是制热、制冷、除湿、增湿以及提供空气混合和通风。为达到上述功能,还需采用一些电力驱动装置,如风机、空调、冷却器、冷却塔、泵、增湿机、抽湿机、电阻加热器、热泵和电锅炉等,电力也用于为空调设备的各种控制器提供动力。在提供生活热水方面,电力用于电阻热水器、热泵热水器、泵和其他一些新设备如微波热水器。

发电厂的空调系统可采用屋顶式或地面装配式方式,或采用中央空调。发电厂空调设备的电力消耗主要是用于制冷设备而非制热设备,电厂最一般的空调系统是一体化空调系统,而不是单机系统或独立式

空调系统。在美国的发电厂中,需要空调设备用以制冷的空间,占了发电厂总空间的2/3。对于发电厂内大量的办公大楼,可采用直接蒸发冷却系统、吸收冷却器或厂用中央冷却器等。

传统的电热水器内配置了一个或两个浸没式加热器,每个加热器的额定功率为2~6 kW,具体功率取决于水箱的大小,这些热水系统在水箱内储存热水,以保证在被需要时可使用,智能电网下的新型热水系统则按实际需要量产生热水。

在过去几十年里,在空调器和热水器的能量效率的提高方面已取得了巨大进步。在空间制冷设备领域取得的进步最为明显——主要是采用蒸汽压缩技术进行制冷。在空间制冷设备的能源效率方面的进步,对于有重要办公室和实验室的发电厂的厂用电量有很大的影响,因为这些空调设备的用电量占整个发电厂用电量的很大一部分。空间制冷技术的许多进步得益于美国联邦标准,这些标准对新空调系统的最低效率作出了明确规定。虽然机械制冷空间的范围在扩大,相应增加的电量消耗已被空调系统的效率提高和建筑物热隔离技术所抵消。

在大型办公室空调系统中,制冷机组是最大的单个电力用户,因此,提高办公室空调系统的制冷效率,对于节约办公用电量有很大的影响。空调的制冷效率用产生每吨冷气所消耗的功率来度量。无论带满负荷或部分载荷,一般都根据空调系统所带负荷的情况来度量其性能。满空调系统负荷时,制冷机负荷量最大,且相对稳定(即制冷机的底线),满负荷效率也用来度量制冷机组性能,而空调系统仅带部分载荷的情况更为普遍,制冷机的负荷是可变的,仅带部分载荷时的能量效率用来衡量制冷机组的性能,更具实际意义。所选择的压缩机和冷凝机都会影响制冷器的总效率,一些制冷机使用空气冷却压缩机,但更多大型空调机采用蒸汽冷却塔,采用冷却塔的优点在于,借助于环境空气中的干球温度与露点温度差,通过水与空气之间的热湿交换来获取冷却量,防止热量向低温区传递,因此,空气冷却压缩机需要更高的冷却温度,降低了冷凝器的能量效率。在空调系统带满负荷时,空气冷却空调需要消耗1~1.3 kW/t或更大的功率,而冷却塔在满负荷时消耗的功率为0.4~0.9 kW/t。由于空气冷凝机的保养频率比冷却塔低,维护费用也更少,所以,空气冷凝机也得到一定范围的使用。基于此,在水资源稀缺的地区,或水处理费用

很高的地区,人们一般不会采用水处理方式,空气冷凝机在这些地区很受青睐。

热水器的效率用能量系数EF(energy factor, EF)值来度量,EF值越大,热水器的效率就越高。电阻热水器的EF值范围大约为0.7~9.5,天然气热水器能量系数值EF范围是0.5~0.8,燃油热水器的能量系数值EF是0.7~0.85,热泵热水器的能量系数值EF是1.5~2.0(Smith等,2008)。因为,电热水器的火焰或堆积损耗,影响电热水器效率的主要因素是存储热水用的箱体壁和管道上的热量损失,热量损耗的多少与箱体和周围环境的温度差成比例,新的水热系统可按需求量产生相应的热水,减少了存储热水的箱体和管道损耗,从而达到了提高能源效率的目的。

3.2 空调和热水的节能减排技术

由于环境方面的压力,人们对空调系统和生活用热水系统已进行了一系列改造。如传统的制冷技术依靠蒸汽压缩循环,使用的是臭氧制冷剂,如CFCs、氟利昂和替代氟利昂的过渡产品氢氯氟碳化合物HCFCs,这些制冷剂将被逐步淘汰(在很多发达国家,CFCs氟利昂最多可合法生产到1995年;HCFC制冷剂最多可生产到2030年)。《京都协议书(Kyoto Protocol)》大力提倡采用对环境更友好的空气制冷技术,这类技术已在日本、斯堪的纳维亚(Scandinavia)等国得到了应用。在未来,制冷技术将更多依靠与环境友好的纯天然制冷剂(一个可能的替代物是二氧化碳),或采用一种全新的制冷技术(磁制冷技术或热隧道技术)。

现有暖气系统和热水系统主要是依靠石化能源的燃烧释放热量,在未来,这些燃料也会被清洁能源所替代。电能不仅是一种高效能源,还是目前所使用的能源中最清洁的能源,可用于驱动空气调节系统和生活热水系统的热泵,也可用于诸如微波热水器等新型加热装置。

表1列出了一些发电厂空调系统和生活热水系统中用以提高能源效率的技术。

4 电动机节能技术的提高

发电厂内由电动机驱动的生产过程所消耗的电量通常占整个电厂厂用电量的80%。由泵或风机所驱动的生产过程,通常通过进口导向叶片、节流阀或

表 1 空调和生活热水系统技术列表

空气调节	电热窗
干燥剂连续循环先进除湿技术	电热层
液体循环加热干燥层	民用两级炉内气体冷凝
冷凝机加热先进除湿技术	智能温控
基于斯特林发动机的制冷技术	主动可再生磁制冷
冷气机绕组的紫外线辐射杀菌	斯特林发动机
需求控制通风口	生活热水
微波水热系统和净化系统	集中太阳能
生活用热水与空气调节	二氧化碳制冷制空调和 /或热水
热泵热水/空调	

液态离合器等进行机械式的控制,电动机按固定速度转动,实际上,这样的控制不可能在整个被控制范围内达到最优的运行效率,如果采用变速驱动装置,可以通过改变电动机的转速来改变系统的机械输出,这样可以实现节能、降低二氧化碳和其他污染物的排放量,并最小化设备运行成本。

电动机可通过采用变频调速装置 (adjustable speed drives , ASDs) ,提高生产过程的生产效率,提高热耗比(heat rate) ,通过改进生产过程的控制、减少污染物排放和降低维护成本,ASDs 可提高设备的可用性和灵活性。ASDs 在发电厂可用作锅炉给水泵、冷却水、循环水泵、强制通风(forced draft , FD) 和进气通风(induced draft , ID) 等设备的控制装置,在燃气轮机发电厂,ASDs 也被广泛地应用于各生产环节,如燃气轮机(gas turbine , GT) 的驱动器、增压泵的驱动器、锅炉余热蒸汽发生器(heat recovery steam generators , HRSG)、供水泵和冷却水泵等。

由于风机和泵等通常仅带部分负载,通过采用变频调速装置来控制电动机的转速,可达到节能的目的,转速的很小降低,能减少很多电能消耗,风机或泵,对比其半速运行与全速运行时的电能消耗,半速运行的能耗仅是 1/8 ,如根据 ABB 公司(www. abb. com) 发布的信息,采用有离心力的风机或泵来驱动可调变速,而不采用进口导向叶片或节流阀,能量消耗可降低 60% 。

虽然已有大量 ASD 技术被应用于商业化大型电动机上,但在残酷的竞争中,美国提出了 3 项技术,这 3 项技术为: ①电流型逆变器; ②改进负载换流逆变器(modified load commutated inverter , modified LCI) ; ③电流源型门极可关断脉宽调制晶闸管(GTO - PWM) 。

在这 3 项技术中,后两项技术已被成功地应用于大型电动机(如 2000 马力或更大的电动机) ,电流源

系统已被证明具有很多突出的性能,当采用 12 脉波输入/输出时,有很好的谐波抑制能力,不需配置输出滤波电容器,且可用于全反馈制动模式。

改进负载换流逆变器,电流源技术的另一种形式,提供了一种低成本的 ASD 系统,已证明,这样的系统在带电子速度控制的很多电动机中应用,可节省发电厂的燃料成本。通过整流器、逆变器采用相同的元件,使改进负载换流逆变器系统得到了简化,当输出滤波电容对驱动电机不再提供励磁时,直流链接分换器可提供逆变器触发,使 LCI 运行。该系统已与电力电子器件的水冷系统进行封装,这样简化了整个冷却系统。对于很多发电厂来说,当空气被煤炭和灰烬污染时,水冷是非常重要的。

5 结 论

建设中国特色坚强智能电网,是中国可预见的未来电网,甚至是电力系统全部环节的必然趋势。围绕中国智能电网的核心理念,研究电力资源的开发、输送、存储、转换(发电) 、输电、配电、供电、售电、服务等各环节的关键问题具有重要意义。故提出了智能电网背景下的发电厂的节能减排技术,包括电动机节能技术、照明节能技术、空调和热水的节能减排技术等。在智能电网方案下,通过环境监测与评估,应用传感器和通信系统优化发电厂的运行性能,能更好地提高电厂的管理和维护水平,推动发电厂节能减排。

参考文献

[1] 李晓玲. 昆明发电厂厂用电节能改造研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.

[2] Shaoyuan Li , Hongbo Liu. A New Coordinated Control Strategy for Boiler - Turbine System of Coal - Fired Power Plant[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology , 2005 , 13 (6) : 943 - 953.

[3] S. Pourmohammad , Ali A. Afzalian. Extracting Fuzzy If - Then Rules Using a Neural Network Identifier with Application to Boiler - Turbine System [C]. 18th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2009 IEEE Multi - conference on Systems and Control Saint Petersburg , Russia , 2009: 1580 - 1585.

[4] 黄波. 变频调速技术简介及其在电厂中的应用[J]. 山西建筑, 2010 , 36 (10) : 163 - 164.

[5] 叶国华. 电动机调速在厂用电节能中的应用[J]. 山东

电力技术 2008 (1) : 24 - 29.

- [6] 刘琨,刘念,冉立,等. 发电厂电力拖动系统的节能研究[J]. 四川电力技术 2009 32(2): 88 - 91.
- [7] 胡炫,朱虎,杨志. 高压变频器在发电厂引风机上的应用与节能分析[J]. 电机与控制应用 2010 37(2): 37 - 39.
- [8] Natchpong Hatti, Kazunori Hasegawa, Hirofumi Akagi. A 6.6 kV Transformerless Motor Drive Using a Five - Level Diode - Clamped PWM Inverter for Energy Savings of Pumps and Blowers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 796 - 803.
- [9] Kalyana S. Bandara, W. G. L. Karunarathne, Arulampalam. Energy Saving by Controlling the Inlet Air Flow of a Oil Fired Boiler Using a VSD Driven Blower Fan - Case Study [C]. TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference, 2008: 1 - 5.
- [10] Kao Chen, Melvin C. Unglert, Richard L. Malafa. Energy

- Saving Lighting for Industrial Applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1978, IA - 14 (3): 242 - 246.

- [11] Jun Zhao. Greenhouse Gas Abatement Analysis of the Energy Saving Retrofit in Pulverized Coal Power Plants [C]. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010: 1 - 4.
- [12] Triet Hung Ho, Kyoung Kwan Ahn. Saving Energy Control of Cylinder Drive Using Hydraulic Transformer Combined with An Assisted Hydraulic Circuit [C]. ICROS - SICE International Joint Conference 2009, Japan. 2009: 2115 - 2120.
- [13] 国网公司“坚强智能电网体系研究”技术综合组. 坚强智能电网综合研究报告[Z]. 2009.

(收稿日期: 2011 - 02 - 10)

(上接第 3 页)

申请、分析、评估、统计(上行)。具体数据逻辑关系见图 6。

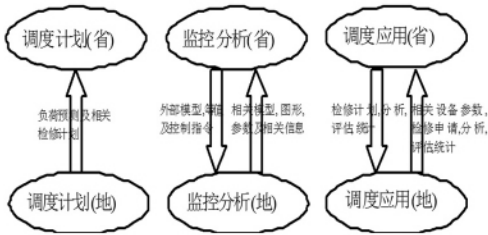


图 6 与上级类间数据流结构图

4 结 语

基于智能电网条件下,从未来电力调度支持系统的发展趋势出发,提出了智能电网地区调度支持系统框架结构,并阐述了总体结构、应用分类及系统数据逻辑关系等关键技术环节,指出了智能电网下调度支持系统的系统构成要求,形成具有主动思考能力的智能电网地区调度支持系统。

参考文献

- [1] 康重庆,陈启鑫,夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术, 2009 33(2): 1 - 7.
- [2] 王明君. 自愈电网与分布式电源[J]. 2007 31(6): 1 - 7.
- [3] 余贻鑫,栾文鹏. 智能电网[J]. 电网与水力发电进展. 2009, 25 (1): 7 - 11.
- [4] 辛耀中. 新世纪电网调度自动化技术发展趋势[J]. 电网技术, 2001 25 (12): 1 - 10.

- [5] 谢开,刘永奇,朱治中,等. 面向未来的智能电网[J]. 中国电力 2008 41 (6): 19 - 22.
- [6] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架(二) 广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J]. 电力系统自动化, 2006 30(2): 1 - 10.
- [7] 张伯明,孙宏斌,吴文传. 3 维协调的新一代电网能量管理系统[J]. 电力系统自动化 2007 31 (13): 1 - 6.
- [8] EPRI. IntelliGrid: Smart Power for the 21st Century. Palo Alto, CA, USA: EPRI, 2006.
- [9] JIANG Zhenhua, LI Fangxing, QIAO Wei, et al. A Vision of Smart Transmission Grids// Proceedings of IEEE PowerEngineering Society General Meeting, July, 2009, Calgary, Alberta, Canada.
- [10] U. S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. Modern Grid Initiative A Vision for Modern Grid [EB/OL] (2007 - 03 - 01) [2008 - 10 - 10] http://www.netl.doe.gov/modern-grid/.
- [11] European Commission. European Technology Platform Smart Grids: Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of Future [EB/OL].

作者简介:

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

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

陈立(1967) 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为变电所综合自动化、电力系统继电保护及调度管理系统等;

车嘉(1979) 女, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期: 2011 - 03 - 01)

智能电网促进节能减排的市场执行问题的探索

蒋荣华¹ 胡 灿^{2,3} 汪 颖^{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;
3. 四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 可市场化是发展智能电网的重要内容。在国家大力发展低碳经济, 强调社会的可持续发展的背景下, 建设和推广具有中国特色的坚强智能电网, 已成为中国国民经济发展的必然趋势和必然选择。围绕智能电网促进节能减排的市场执行问题开展研究, 重点阐述了智能电网促进节能计划的市场执行的相关内容, 在综合分析现有市场执行方法的基础上, 研究了进一步规划市场执行的方式, 最后给出了智能电网背景下促进节能减排的市场执行情况的监测和评估方案等。

关键词: 智能电网; 节能减排; 低碳经济; 需求响应; 市场执行; 监督与评估

Abstract: Marketization is an important part of smart grid development. In the context of developing low-carbon economy and focusing on sustainable development, constructing and generalizing smart grid with Chinese characteristics has become the inevitable trend and choice of national economy development in China. It focuses on the related contents about marketing implementation of energy conservation and emission reduction promoted by smart grid. Based on the comprehensive analysis of the existing marketing implementation methods, the further planning mode of marketing implementation is discussed. In the end, the supervision and evaluation programs of marketing implementation are proposed.

Key words: smart grid; energy conservation and emission reduction; low-carbon economy; demand response; marketing implementation; supervision and evaluation

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)04-0009-04

0 引 言

能源资源短缺、气候异常、环境恶化等一系列问题的出现, 发展低碳经济实现节能减排已成为全世界人民的共同心声。电力企业对节能减排具有生死攸关的作用, 可再生能源是当前电力企业解决节能减排问题的主要手段^[1]。一方面, 以满足用户能源需求为核心的传统电网结构, 存在不能支持分布式电源接入且输电损失巨大和用户间无法互动等问题; 另一方面, 各种可再生能源具有不同的特点, 还存在部分技术瓶颈问题。事实上, 提高能效利用率和需求响应计划是降低排放的最佳途径。

以“智能、高效、安全、绿色”为特点的智能电网已在欧美等多个国家得到实施^[2-4], 中国也于2009年5月在北京召开的“2009 特高压输电技术国际会议”上正式提出建设坚强智能电网^[5]。2010年3月5日, 温家宝总理在政府工作报告中提出, 积极应对气候变化, 大力开发低碳技术, 推广高效节能技术, 积极

发展新能源和可再生能源, 加强智能电网建设。

提高电网资产利用率和用户用电效率实现节能是智能电网的目标之一^[5]。文献[6]从系统规划的角度, 对提高电力能效的各种方法进行了综述, 主要介绍了电力系统的硬件设施优化规划方法和电力终端需求及节能规划对电力能效的影响。文献[7]对影响电力能效的因素进行了分析, 并指出通过提高终端用电效率和改善用电方式, 在完成同样用电功能的同时, 减少电量消耗和电力需求, 达到节约能源和保护环境的目。与此同时, 作为需求侧管理在竞争性电力市场中的最新发展——需求响应也受到了各专家、学者的密切关注, 需求响应计划在国外已经得到了大量的应用, 并取得了较为显著的节能效果^[8]。因此, 智能电网所指的节能计划不仅包括传统节能方式, 还包括了需求响应^[9]。

智能电网已引起各电力企业和科研院所的研究热潮^[10-13]。当前, 智能电网的研究热点主要集中于电网基础设施的规划、分布式能源的引入等问题, 而对其节能计划研究较少^[14], 必将影响低碳经济的发

展模式。因此,在认识现有电网节能技术的基础上,进一步研究包括需求响应计划的节能技术对实现智能电网的高效性能和经济的发展很有必要。下面首先概述了常见的节能计划市场执行方法,并对每种方法的适用环境进行了介绍;其次描述了为达到智能电网的节能目标所进行的市场执行规划方案;最后,介绍了节能计划市场执行的检测和评估方法。

1 节能计划的市场执行方案

节能计划能否实现其目标很大程度上取决于其市场渗透能力,影响用户采纳和接受节能计划的常用市场执行方式主要有以下六种。

(1) 用户培训

许多供电商和政府部门都采用某种形式的用户培训来提高用户对计划的全面认识。广泛采用的用户培训方式有:宣传册、广告植入、资料袋、信息交流中心、培训课程和直接邮寄等。用户培训是可选择的最基本的市场执行方法,常与其他一种或多种方法结合起来使用,使其效益最大化。

用户培训的主要优势是通过影响用户意见而后购买决策,提供了一种更微妙的营销形式。

(2) 直接接触用户

直接接触用户是指使用户与供电商或政府代表进行面对面沟通,以鼓励用户更好地接受节能计划。供电商在一定时间内雇佣营销代表和客户服务代表专门负责为用户提供咨询,其内容包括:设备选择和运行、制热/制冷系统的规模、照明设计,甚至家庭经济状况分析等。

直接接触用户可通过供电方案设计、特定用电服务(如设备维修)、信息和设备展示平台、工场、展览、现场检修等方式完成,这些方法的主要优点是执行者能直接得到用户反馈信息,从而更好地识别和响应多数用户所关心的问题,还能更多地进行个性化营销,对于提升用户兴趣和控制节能成本有较大作用。

(3) 贸易联盟合作

贸易联盟的合作和相互支持极大地促进了很多节能计划的成功实施。贸易联盟是指任何能影响供电商和用户或执行者与用户之间交易行为的组织。贸易联盟的主要群体包括:住宅建筑商与承包商、专业协会的地方分会、技术/产品的贸易组织、电气设备和家用电器的零售商与零售商代表等。由贸易联盟

负责展开广泛的服务包括标准和程序开发、技术转让、培训、认证、市场营销/销售、安装、维护和修理等。一般来说,如果贸易联盟认为节能计划对他们有利(或至少不影响其原有业务),他们会支持该计划。

要实现贸易联盟合作的优势最大化,执行者必须对有关产品的可用性、认证要求、文书工作、费用报销、合作广告/宣传推广、培训需求等问题愿意达成妥协并相互能兼容。

(4) 广告与促销

供电商和政府能源机构已开始采用各种广告和促销技术。广告利用不同媒体将供电方的信息传递给用户,以达到告知和说服用户的目的。适用于节能计划的广告媒体包括:广播、电视、杂志、报纸、户外广告、购买地点广告等。促销通常包括:新闻稿、个人销售活动、展示、演示、优惠券和竞赛/设奖等。有的人喜欢使用报纸或互联网,有的人则认为电视广告更有效。

广告和促销最大的特点是具有广泛的适用性,但缺点是可能会受到国家或政府监管部门对其内容的限制。

(5) 选择性定价

定价作为影响市场的重要因素,通常具有以下三个功能。

①供电商将提供的电力产品与服务价值的信息传递给发电厂和电力用户;

②鼓励其采用最有效的生产和消费方式;

③决定不同用户能承担的电力价格。

这三个功能密切相关,选择性定价,通过创新计划,能成为用户推动需求侧选择的重要执行方式,如鼓励特定用电模式的费率激励通常与其他策略(如正向激励)相结合,以达到电力企业需求侧管理的目标。电价结构包括:用电时间率、转化率、季节率、可变服务水平、促销率、非高峰期率等。需求响应计划具体表现可选择定价策略。

与其他运行方法相比,可选择定价方案的主要优点是供电商所需的现金成本很少或没有现金费用,用户得到经济奖励,经过数年后,执行者能够从其收益中获得。选择性定价方式也可能产生一些不利的影响,如使用时间比和需求电量比,此外计量成本高,有时单位计量设备安装成本可以达数百美元。

(6) 正激励

正激励是通过减少购买者的设备购置净现金费

用或缩短投资回收期(如提高回报率)来增加成本控制/用户选择的短期市场渗透力,使得投资更具吸引力。在没有验证那些可能改变居住环境和生活方式的特性或选择的情况下,激励也减少了用户对选择的抵触。正激励包括:现金折扣、返还、回购计划、计费信贷和低息或无息贷款等。另一种正激励方式是免费或超额提供补贴、设备安装或维修,这种方式与直接从电力或需求影响中获利方式相比,供电方的成本更高,但能迅速增加用户数,收集到有价值的经验性数据。

正激励措施广泛用于鼓励用户参与大量需求侧管理计划中。各种类型的正激励措施主要用于进行成本控制或选择特定计划的许多用户,它们通常混合使用,以提高用户的接受度。但在开展正激励计划过程中,计划实施者应意识到潜在的公平贸易或反垄断问题。

根据市场执行方法和用户的不同特点,电力公司和供电商可以选择其中的一种或多种方法相结合来实现市场执行。

2 市场执行方法的规划

一旦选定了特定的市场执行方法,就需要进一步规划市场执行方式,规划内容包括:一组明确定义、可衡量的和可完成的目标;编制可用于识别用户对计划的响应到计划完成的整个实施进程的规划逻辑图。规划市场执行方法主要包括以下步骤。

(1) 计划管理

计划执行过程涉及许多不同的功能化实体,需要有周密的管理以确保有效的执行。管理如此广泛的活动,必须全面理解和协调计划目标并明确职能权力和责任。

正在进行的计划管理也相当重要,需进行成本计算、监控员工工作效率和强调质量保证和采用必要的激励措施,严格控制计划成本,不管什么原因,定期的状态报告是必须的,报告内容必须包含准确的输入数据和关键绩效指标。

(2) 计划保障

计划的保障支持包括人员、设备、工具和培训要求等。计划执行手册是提供必要政策和计划指导的有用工具,在执行计划的职责样本列表中提供了一个包括类似活动的手册。

配合大众媒体和推广活动(如传单插入和使用直接邮件)的用户采纳计划应仔细地综合到执行计划中。通常与用户建立和谐关系非常重要,在计划规划和执行的各阶段,用户关心的问题都应引起重视。

(3) 执行过程

与“执行”供电侧计划有关的所有步骤,包括开发、安装和运行一个供电系统,需花很多年进行规划和设计、严格分析建模、计算有关可靠性与维修、严格的施工安排等。执行需求侧选择同样需要严格方法。在执行过程中涉及很多参与者,这就需要各部分之间进行认真协调。

执行过程可分几个阶段进行,这些阶段可能包括成立一个执行项目小组,去完成先期试点和示范,最后扩展到全系统范围内执行。这个“时间顺序”过程可大大减少执行过程中存在的问题,因为试点方案可用以解决全系统范围内执行计划之前的问题。

3 市场执行方法的监测和评估

正如有必要监测供电侧性能一样,也有必要监测节能计划的市场执行情况。该监测计划的最终目的是查明业绩与预期的偏离情况,改善现有和规划的节能计划。监测和评估计划也可作为用户行为和系统影响的主要信息来源,包括节能计划中的先进规划和组织,提供检验制定计划的管理。

3.1 监测内容

在需求侧管理计划性能监测中,有两个问题需强调:①计划是否在按计划执行?②计划是否达到预期目标?

一旦采用常规监测系统,第一个问题可能会比较容易回答。跟踪和审查计划成本、用户接受程度和计划转折点,可以帮助确定需求侧管理计划是否已按计划实施。

第二个问题可能更难回答。如前所述,根据负荷形状变化,能更好描述需求侧计划目标。

因此,计划成功性的评估开始于度量计划对负荷形状的影响,但是,这种度量可能会很困难,因为与需求侧计划无关的其他因素对用户负荷的影响也很大。

3.2 监测和评估方法

在监测和评估需求侧计划的过程中,可以采用两种通用方法。

①描述性方法——基本监测包括计划成本文件、

已完成的活动、已提供的服务、接受度和计划参与特点;

②实验性方法——采用对比与控制团队的方法,确定计划参与者或非参与者的不同结果,或两者同时参与的分析。

这两种监测方法往往针对不同的群体,因此,有必要将这两种方法纳入到计划设计中。根据行政手续和目标人群的特点,用描述性方法,执行者应了解项目的基本性能指标。单个计划的服务成本、需求侧设备的安装频率、参与者类型(单户家庭或其他人口群体),以及用户投诉数量的信息有助于评估需求侧计划是否相对成功。记录的保存和报告系统可帮助完成描述性评价。

描述性评价不足以充分评估系统需求侧计划对负荷形状的影响。为了评估负荷形状的影响,需要一个参考基准用于判定需求侧管理改变的负荷形状,该基准反映了这些负载的形状变化是“自然产生的”,也就是说,这些变化与需求侧计划本身无关,这就是实验性方法。

3.3 监测计划的有效性

监测计划试图达到两方面的成效:内部有效性和外部有效性。内部有效性是指能对需求侧管理计划参加者自身效果进行准确衡量的能力;外部有效性是指试验结果推广到所有人群的能力。例如,控制水热技术可能减少某个参与者的高峰负荷,但不能保证对所有用户能产生类似效果。

影响监测有效性的因素通常有两类:与随机性有关的问题和与复杂影响因素有关的问题。随机性是指用户样本正确反映需求侧计划涉及的所有群体的程度,也可以是指定用户与试验和控制群体的偏离程度。

复杂影响因素是指与计划无关的变化,这些变化可能会增加或减少需求侧计划的影响。在某些情况下,这些与计划无关的变化因素可能大于需求侧计划的影响。潜在的复杂影响是巨大的,包括天气、通货膨胀、个人收入的变化、工厂开业与关闭等。

3.4 数据和信息要求

数据和信息要求涉及数据采集、管理、验证和监测与估计过程中的数据分析等全过程。数据采集成本可能是评价过程最昂贵的部分,通过适当的预先规划和足够的历史记录以及报告制度可降低数据采集成本。评价数据的来源包括计划记录、电费单、电网

计量和现场调查,通常情况下,电话调查用以完成实地调查。这些数据必须是有效的和可靠的。

3.5 管理问题

监测和评估计划需要重视管理问题,在监测计划的管理过程必须克服一些主要障碍,这些障碍包括:

①确保有充分先进的规划,在需求侧活动中建立和执行监测与评估计划;②认识到监测和评估计划是数据密集型和费时的的工作,因此,评估计划的费用必须与收益保持平衡;③为了规范和指导计划执行,需建立明确的责任和问责制度;④组织和报告评估计划的结果,在清晰理解这些成果的基础上进行管理;⑤建立一个强大的组织委员会,正确地规划、协调和投资监测计划。

4 结 语

节能计划对解决资源紧缺、环境问题和经济发展都具有至关重要的意义。目前,包括需求响应的智能电网节能计划已在多个国家获得实施,并取得了显著的节能效果。中国智能电网的建设正在如火如荼地进行,但对于其节能计划的关注还不够,为此,特对智能电网节能计划的市场执行方法、规划和监测评估进行了综述,为智能电网节能计划的实施提供一定的建议。事实上,智能电网节能计划的实施不仅要求良好的市场运行方案还包括高效的用电技术等,其本身是一项复杂工程,需要进一步深入研究。

参考文献

- [1] 昊坤. 电力能效对减排生死攸关[J]. 电气技术, 2009 (12): 1.
- [2] European Commission. European Technology Platform Smart Grids: Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future [EB/OL]. [2008-10-10] http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf.
- [3] Research Reports International Understanding the Smart Grid [R]. Research Reports International 2007.
- [4] U. S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. Modern Grid Benefits [EB/OL]. (2007-08-05) [2008-10-10]. <http://www.netl.doe.gov/moderngrid/docs/>.
- [5] 常康, 薛峰, 杨卫东. 中国智能电网基本特征及其技术进展评述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 10-15.

(下转第29页)

WSN的信道工作频率为2.4 GHz,在使用中,WSN的通信单元可以在IEEE 802.15.4的信道内调整,典型数据如M2110'的Atmel通信单元,信道数为11~26,对应频率为2.405~2.480 GHz,每信道带宽为5 MHz。由于发信功率是WSN节点的能量消耗的主要部分,对其进行优化控制是能量控制中的有效方法,在应用中,射频发信功率可通过编程控制,以减少能量消耗,表3给出了典型的控制接口和功率的对应关系。

利用控制接口,射频发信功率的编程控制范围是3~-17.2 dBm。在输电线实用中,通过编程控制,利用适当低的发信功率可有效地减少通信部分的能量消耗,也利于降低干扰。

3 地址分配

应用中,同信道的信息通过8比特的组ID来区别。实现WSN中的簇划分,在消息头中,通过16比特的目的地节点地址,地址格式为IP,如12.11.13.230,在应用中,两个数字126和255由网络内部使用。

输电线应用中,簇划分及节点地址的分配视具体应用而定,可按标准进行分配。

4 用于输电线路监测的调度机制

调度策略研究给出不同的技术路线^[3]。TinyOS 2.x任务调度模型如图3所示^[1-2],一个任务若需要执行多次,可在任务结束的代码处添加将自己再次投递入队的代码即可。这种方式可避免出现任务队列已满而无法通知分相事件结束的问题,实现一个任务

只占任务队列的一个位置^[4]。

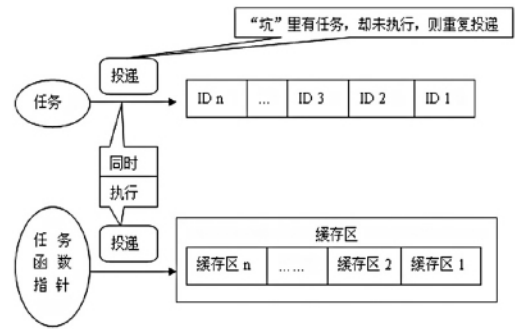


图3 TinyOS 2.x任务调度模型

输电线中线路的状态监测按状态监测、前端故障诊断、前端在线预警分解为TinyOS下的任务,利用函数指针进行投递调度,调度方式在Cygwin下用nesC编程实现。

5 结论

智能电网输电线路状态监测装置目前有不同的研究方案,基于TinyOS构建WSN实现线路的状态监测,可实现数据和图像的采集。目前,整个实现有了初步的结果,正进行进一步的研究和开发实现中。

参考文献

- [1] TEP 106: Schedulers and Tasks: at <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x>.
- [2] TEP 119 Collection at <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x>.
- [3] 尹震宇,赵海,林恺,等.无线传感器网络操作系统调度策略[J].计算机工程,2007,33(17):77-79.
- [4] 钟雷,武泽旭,章正辰,等.TinyOS 2.x的调度策略及协议分析[J].通信与信息技术,2010(3):66-69.

(收稿日期:2011-02-10)

(上接第12页)

- [6] 侯建朝,谭忠富,王绵斌.提高我国电力产业能效的系统规划方法研究[J].华北电力大学学报(社会科学版),2008(4):1-5.
- [7] 米建华.“十一五”电力能效影响因素分析[J].中国电力企业管理,2006(4):31-33.
- [8] 张钦,王锡凡,王建学,等.电力市场下需求响应研究综述[J].电力系统自动化,2008,32(3):97-106.
- [9] Clark W, Gellings P. E. The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response [M]. Fairmont Press, 2009.
- [10] 余贻鑫.智能电网的技术组成和实现顺序[J].南方

电网技术,2009,33(2):1-5.

- [11] 余贻鑫,栾文鹏.智能电网[J].电网与水力发电进展,2009,25(1):7-11.
- [12] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等.智能电网技术综述[J].电网技术,2009,33(8):1-7.
- [13] 王蓓蓓,李扬,高赐威.智能电网框架下的需求侧管理展望与思考[J].电力系统自动化,2009,33(20):17-22.
- [14] 张钦,王锡凡,付敏,等.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.

(收稿日期:2011-06-17)

需求终端节能减排发展现状与效益分析

张弋宁^{1,2}, 汪颖¹, 肖先勇¹

(1. 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065;
3. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:需求侧作为系统资源,已越来越引起人们的重视。智能电网的核心理念之一是提高电能转换和传输效率,节能减排。加强智能电网建设,推广高效节能技术是推进低碳经济的必由之路。在分析智能电网背景下终端节能技术发展现状的基础上,对新的电力价值链上能源的供应与传输行业、运输行业、居民住宅和商业建筑物、工业、农业、林业、废弃物管理业等的各环节节能减排技术进行了分析,同时分析了国际能源署和联合国基金会针对各行业的节能效益进行的评估方法,对中国的节能减排综合性工作方案及目标进行了探索。

关键词:智能电网; 用户终端; 节能效益; 节能技术; 发展现状

Abstract: As the system resource, the demand side has been attached more importance. One of the core concepts of smart grid is to improve the efficiency of electrical energy conversion and transmission to save energy and reduce emission. To strengthen the construction of smart grid and promote the efficient energy conservation technologies are the only way to develop the low-carbon economy. Based on the development status of terminal energy conservation technologies under smart grid, the energy supply of the new electricity value chain and the energy conservation technologies of all links including transmission industry, transportation industry, residential and commercial buildings, industry, agriculture, forestry and waste management industry are analyzed, and the evaluation methods of energy conservation benefits by International Energy Agency and the United Nations Foundation are analyzed simultaneously. Finally, the comprehensive programs and objectives of energy conservation and emission reduction in China are investigated.

Key words: smart grid; customer terminal; energy conservation benefit; energy conservation technology; development status

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)04-0013-04

2010年3月5日,温家宝总理在政府工作报告中提出,积极应对气候变化,大力开发低碳技术,推广高效节能技术,积极发展新能源和可再生能源,加强智能电网建设。代表委员们热议的智能电网首次写入政府工作报告,这将极大推动这项庞大节能低碳减排工程的建设并促进中国低碳经济发展^[1-2]。智能电网具有低碳节能特性。据测算,通过发展智能电网,到2020年,中国每年可减少煤炭消耗 4.7×10^8 t标准煤,减排二氧化碳 13.8×10^8 t,有利中国实现2020年温室气体减排目标。

推动全球节能发展的主要原因,可分以下四方面:①包括发达国家和发展中国家在内的人口增长和单位产值的能耗增长;②石化燃料资源是有限的,降低成本,以环境友好的方式利用这些有限资源已变得越来越重要;③对非本国资源的依赖性威胁着很多国家的国家安全;④恶劣的环境问题是资源开采、转换和使用的结果。

不仅各国政府出台了节能措施,世界上多个国家也都采用了节能自愿协议的政策措施,来激励企业自觉节能和提高能效。日本经济组织联盟(凯单仁)由代表1 011个日本公司的37个工业协会组成。凯单仁主要由大公司组成,占日本全部工业能源耗费的80%~90%。凯单仁自愿行动计划有许多工业部门参加,包括建筑、外贸及其他部门。美国政府开展了能源之星、气候智星、绿色照明、废物能、电机挑战等许多由公司或公众自愿参加的节能环保项目。德国的自愿协议命名为德国工业气候保护宣言,是由公司单方面做出的,并不是公司与政府之间正式的约束性协议,但也要与政府协商。荷兰是自愿协议应用最早、覆盖面最广、实施效果最好的国家之一。1992年,荷兰签署了第一轮自愿协议即长期协议(LTA),共签署了44份,涉及29个工业部门,大部分协议于2000年到期。2000年,荷兰大部分耗能工业部门又与政府签署了新的协议——基准协议,以应对国际新

变化^[9-11]。

智能电网背景下的用户终端节能技术已经越来越受到政府、电力公司、电力用户、研究机构等多方的关注。不同行业的用户采用不同的终端节能技术。国际能源署和联合国基金会等针对能效的改进措施,对未来几十年电能终端消耗的效益进行了分析。中国也提出了适合中国国情的节能减排综合性工作方案及目标^[4-6]。

1 节能的成本效益

从工业用户的角度来看,采取节能措施所能得到的期望结果取决于很多因素,所以就必须进行节能的成本效益分析。节能的成本效益问题同时取决于正考虑的节能计划和电网特征两方面因素,节能计划和(或)节能行动是电网所特有的,每个节能计划都必须根据其所处特定电网的实际情况进行经济性评估。对于一些电力系统而言,采取节能措施也许是最便宜的,但是,每个节能行动必须根据节能计划能达到的节能能力,以及可能产生的环境影响和其他可用节能措施进行综合评估,由于气候特征、负荷特征、燃料成本、发电机组等情况的变化,节能计划的总体经济性可能会发生变化。如果实施节能计划,电力系统的收益不能达到足以弥补节能成本时,节能计划的实施结果可能使节能成本更高^[8,12-13]。

在评估电力需求侧节能行动的效益和成本时,一个可用的有效指标是节能计划对总成本的影响。由于终端电力用户的节能行动可能会影响很多方面的成本,因此,通常采用的评估方法是通过建模技术来完成,可通过建立相应模型,分别模拟用户平均电价和参与节能计划的电价等。

2 智能电网背景下终端节能技术现状

2.1 能源供应与传输行业

对能源供应与传输行业而言,最重要的抑制措施由以下几部分组成:发电/输电/配电效率的提高、燃料转换效率、加大核能发电所占的比例、可再生能源发电、发电机组中的先进煤燃烧技术、碳捕获与储存技术等。可再生能源发电包括水电、风电、生物能源、地热能等。碳捕获和储存技术可望用于天然气与燃煤混合燃料电厂。

2.2 运输行业

运输行业的策略主要包括提高道路机动车辆、海运船只、铁路运输以及飞机的燃油效率,还包括提高不同运输方式的运行效率(如与交通运输调度和载客量相关的因素)。由于公路运输所产生的移动尾气排放占整个运输行业内污染排放的很大部分,因而备受关注。适用于公路运输的措施包括采用低温室气体排放的制冷剂、使用生物质能源、或采用混合动力汽车、采用插电式混合动力电动汽车、使用氢动力燃料电池汽车、或纯电动汽车,鼓励从原来使用的单一动力模式向使用混合动力模式的方向发展,这是运输行业提高能源利用效率的另一种选择。

2.3 居民住宅和商业建筑物

居民住宅和商业建筑物的减排策略,可分为三个一般性领域,即:楼宇建筑与系统节能、燃料切换、控制非二氧化碳温室气体的排放。提高建筑物的能源效率有很多种技术措施,其范围涉及从大楼外装饰到内部配置的各种系统,如照明系统、热水系统、空气加热系统、空气制冷系统、通风系统、冷藏系统以及其他设备等。

2.4 工业

工业领域的减排措施包括提高工厂和生产过程的能源效率、燃料替代、能量回收(如热电联产)、使用可再生能源、循环使用废料、废物最小化和控制其他(其他非二氧化碳温室气体)温室气体的排放,碳捕获和储存是大型工业设备可行的减排方式。

2.5 农业

农业领域减排途径同样有多种选择,涉及能源与土地利用效率的提高、牲畜与肥料的能效管理、开发和利用生物质燃料等,是横向缓减农村能源供应的一个策略。另外,使用厌氧消化池来进行肥料处理也是一种有效措施,该方法也可应用于废气废水处理等行业。

2.6 林业

林业的减排策略是旨在减少污染排放物和防止水土流失等方面的策略,具体减排策略包括保持或增加森林面积、本地碳密度和地区范围碳密度,增加外地植树碳储备,生物能和燃料替代等。

2.7 废弃物管理业

废弃物管理业的减排策略由降低温室气体排放和避免污染物排放等技术组成。减排的措施主要包括回收和利用甲烷、改进垃圾填埋方法、废水管理、生产并使用厌氧消化池燃气。避免污染物排放的措施

包括控制堆置肥料、加强焚化、扩大环保范围以及废料最小化、加强循环和再利用。

3 节能效益分析

3.1 国际能源署的评估

国际能源署 (International Energy Agency, IEA) 在其出版的《世界能源了望 2006 (World Energy Outlook 2006, WEO)》一书中, 讨论了世界能源未来发展的两方面潜在的设想: 参考性设想和可选择的政策设想 (见《世界能源了望 2006》)。参考性设想考虑了从 2006 年到 2030 年, 未来能源使用模式的发展趋势、所有已颁布或采用的政府能源与气候政策和测度, 该设想没有考虑未来政策、措施和/或新技术的发展。另一方面, 可选择的政策设想考虑了现在已考虑的所有与能源和气候有关的政策与措施, 因此, 其内容刻画了如果立即实施 2006 年提出的政策和措施所能达到能源目标, 在可选择的政策设想中, 新的措施包括未来节能技术发展、更多非石化燃料、纯能源进口国内石油和天然气的维持等, 但是, 可选择的政策设想没有考虑现已商业化应用的技术, 仅看到了与参考性设想比较, 现有技术更好地执行、提高和快速突破的可能性, 没有包括可能出现的重大技术突破。

在可选择的政策设想中, 能源效益的改进对应于全球 2004—2030 年能源密度 (单位 GDP 能源消耗) 减少率, 采用的能源减少率为 2.3%, 而在参考性设想中该减少率为 1.7%。在参考性设想中的许多发展是在发展中和转型经济体上获得的, 这些经济体对于能源效率提高更有潜力。

表 1 对比了所选择的区域内以上两种设想情况下 2030 年的电力需求量, 对于参考性设想, 需求量下降最大的情况发生在巴西、欧洲、中国、拉丁美洲, 就实际节能数量而言, 中国在相对参考性政策设想下的节能总量为 814 TWh。

3.2 联合国基金会的评估

在一份公布于 2007 年的报告中, 联合国基金会 (United Nations Foundation) 提出了一项宏伟的提高能源效率的计划, 该计划规定, 从 2012 年到 2030 年, 让八国集团 (八国集团包括加拿大、法国、德国、意大利、日本、俄罗斯、英国和美国) 的能源效率提高到历史能效数据的两倍, 即达到每年提高 2.5%, 参考国际能源署 2006 年的报告, 从 1973 年到 1990 年, 全球

能效提高率每年 2%; 1990 年到 2004 年, 下降到 0.9%。尤其是, 该计划也呼吁“G8 + 5 国 (巴西、中国、印度、墨西哥和南非)”, 以及其他发展中国家, 也共同来完成节能目标。八国集团的能源消耗占全球总能耗的 46%, 经济最发达的国家应首先重视能效的提高, 然后其他发展中国家才能效仿。所有“G8 + 5 国”的能耗占全球一次能源消耗量的 70%。

如果上述计划得以顺利实施, 随着能源效率的提高, 可使八国集团在 2030 年的能耗总量相对于国际能源署在参考性设想中提出的能源需求降低 22%, 达到这些国家 2004 年的能耗水平。

表 2 给出了 2010 年在节能措施影响下, 年度能量消耗的减少量, 该分析忽略了目前正在实施的提高能源效率的相关计划, 或是根据历史趋势, 可能会出现节能措施改进所带来的影响, 因此, 表 2 提供的节能数据是基于未执行能效政策的, 该表最大化地反映了各经济计划的节能水平, 实际可能没有这么多。2010 年总共可节能近 230 TWh, 这相当于 2010 年电力需求预测总量的 5.5%。节能政策对住宅、商业和工业部门都会产生重大影响, 1/5 的电能是可在住宅领域内节约出来。在住宅项目中, 节能计划的目标超过了当前政府规定的大功率空调、建筑物保暖措施、高效照明设备和其他装置的规定。通过提高终端用电设备的性能, 强制推行新建筑物保暖标准就能在住宅项目方面实现节能。商业领域的节能机会最多 (商业领域节能机会占了近 50%), 在商业项目中, 节能计划的目标主要是高效加热系统、通风和空调 (HVAC), 同时也包括照明系统、大功率设备, 如冷藏设备和电动机等。通过新举措的刺激, 有望达到更大节能效果, 其余 30% 的节能贡献来自于工业领域, 该领域的节能计划主要针对优质高效电机、产品加工过程效率的提高, 也包括照明效率的提高等。

3.3 中国节能减排综合性工作方案及目标

国务院关于节能减排综合性工作方案指出, 到 2010 年万元国内生产总值能耗由 2005 年的 1.22 t 标准煤下降到 1 t 标准煤以下, 降低 20% 左右; 单位工业增加值用水量降低 30%。控制高耗能、高污染行业过快增长, 严格控制新建高耗能、高污染项目。加快淘汰落后生产能力, 完善促进产业结构调整的政策措施, 进一步落实促进产业结构调整暂行规定, 积极推进能源结构调整, 促进服务业和高技术产业加快发展, 加快实施重点节能工程, 推动燃煤电厂二氧化

表 1 2030 年所选地区在 WEO 参考性和可选择政策设想下的电力需求比较(国际能源署 2006)

地区	2004 年需求量 /TWh	2030 年需求量(参 考性设想) /TWh	2030 年需求量(可 选政策设想) /TWh	2030 年可选择政策 与参考性设想之差 /TWh
美国	3 641	5 281	4 792	489(9%)
日本	965	1 175	1 047	128(11%)
欧盟	2 652	3 710	3 175	535(14%)
俄罗斯	58	954	872	82(9%)
中国	1 756	6 106	5 292	814(13%)
印度	442	1 733	1 570	163(9%)
拉丁美洲	698	1 640	1 419	221(13%)
巴西	349	651	547	104(16%)
中东	477	1 221	1 082	139(11%)
非洲	407	1 070	977	93(9%)

表 2 2010 年美国终端用电节约的能量(Gellings 等 2006 年)

住宅项目	能源节省/kWh	商业项目	能源节省/kWh	工业项目	能源节省/kWh
新建工程	10. 6	新建工程	35. 8	电动机	24. 1
审计/过冬维护	10. 3	照明	33. 5	工序	12. 1
照明	6. 3	冰箱	14. 9	照明	17. 9
能源之星电器	6. 3	冷却	13. 4	压缩空气	5
高压交流电 发动机的调整/维护	4. 7	设备能量效率	12. 6	冷却	6. 2
空调能量效率	4. 5	审计	5. 4		
冰箱能量效率	2	高压交流电 发动机的 调整/维护	1. 9		
其他设备能量效率	1. 8				
风扇能量效率	0. 9				
总计	47. 4	总计	117. 5	总计	65. 5
所有行业总计				230. 4	

硫治理。多渠道筹措节能减排资金,推进资源综合利用,促进垃圾资源化利用,全面推进清洁生产。加快节能减排技术研发,加快节能减排技术产业化示范和推广,广泛开展节能减排国际科技合作,建立政府节能减排工作问责制。建立和完善节能减排指标体系、监测体系和考核体系,建立健全项目节能评估审查和环境影响评价制度,加强节能环保发电调度和电力需求侧管理等^[3]。

哥本哈本联合国气候变化大会于 2009 年 12 月 7 日召开。温家宝总理在会上表示,遏制气候变暖,拯救地球家园,是全人类共同的使命,每个国家和民族,每个企业和个人,都应当责无旁贷地行动起来。中国正处在工业化、城镇化快速发展的关键阶段,能源结构以煤为主,降低排放存在特殊困难。但是,中国始终把应对气候变化作为重要战略任务。1990—2005 年,单位国内生产总值二氧化碳排放强度下降了 46%。在此基础上,温总理又提出,到 2020 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%至 45%。中国将进一步完善国内统计、监测、考核办法,改进减排信息的披露方式,增加透明度,积极开展

国际交流、对话与合作。通过大力发展可再生能源、积极推进核电建设等行动,到 2020 年中国非化石能源占一次能源消费的比重达到 15% 左右;通过植树造林和加强森林管理,森林面积比 2005 年增加 4000 万公顷,森林蓄积量比 2005 年增加 $13 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这是中国根据国情采取的自主行动,是中国为全球应对气候变化做出的巨大努力。

4 结 论

受传统的和新的推动力的驱动,节能问题已开始被新的发电技术、政策和计划等所唤醒。全世界已经认识到节能对世界能耗有怎样的影响,已认识到了石化燃料的有限性,已推动了高效发电、输电和用电技术的发展,已不断形成一种非常重要的国家和国际性资源价值观念——节能,在面对新的与能源制约、燃料成本增长、全球努力减少温室气体排放等相关的推动力时,节能意识正在被提升。

智能电网背景下,终端节能技术得到了飞速发
(下转第 26 页)

在一起,为改善用户能源服务提供了机会。在智能电网的大背景下,通过使用能量端口设备,用户可以更好地参与到动态能量管理中,并通过对电价信号进行有效的响应来影响未来国家的能源体系,并能够提高能效。智能端口设备的开发利用为设备制造商和提供商带来了严峻的考验。因此,从结构设计和逻辑设计出发,同时兼顾两者是值得深入研究的问题。

参考文献

[1] Gellings C W. The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response [M]. New York: Fairmont Press 2009.

[2] 薛蓉, 陈江华. 电力需求侧管理实施模式初探 [J]. 电力需求侧管理 2008, 10(6): 1-3.

[3] Gellings C W, Smith W M. Integrating Demand-side Management into Utility Planning [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(6): 908-918.

[4] 王蓓蓓, 李扬, 高赐威. 智能电网框架下的需求侧管理展望与思考 [J]. 电力系统自动化 2009, 33(20): 17-22.

[5] 全生明, 卢键明, 谢传胜, 等. 需求侧响应机制的国际经验及对我国的启示 [J]. 电力需求侧管理 2009, 11(2): 73-76.

[6] 牛东晓, 陈志强. 电力市场下的需求响应研究 [J]. 华东电力 2008, 36(9): 5-9.

[7] Rahimi F, Ipakchi A. Demand Response as a Market Resource under the Smart Grid Paradigm [J]. IEEE Transactions on Smart Grid 2010, 1(1): 82-88.

[8] Parmenter K E, Hurtado P, Wikler G, et al. Dynamic Energy Management [R]. Palo Alto: EPRI 2008.

[9] Didierjean A. What is a Consumer Portal? [C]. 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas(TX), May 21-24 2006: 471-473.

[10] RI. IntelliGrid Consumer Portal Telecommunications Assessment and Specification [R/OL]. <http://mydocs.epri.com/docs/public/00000000001012826.pdf>.

[11] McGranaghan M, Gilchrist G. Telecommunications Assessment for a Consumer Portal [J]. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal(Quebec), June 18-22 2006: 1-6.

[12] Gellings C W. A Consumer Portal at the Junction of Electricity, Communications, and Consumer Energy Services [J]. The Electricity Journal 2004, 17(9): 78-84.

(收稿日期: 2011-02-10)

(上接第16页)

展,能源供应与传输行业、运输行业、居民住宅和商业建筑物、工业、农业、林业、废弃物管理业等的节能减排技术层出不穷。国际能源署和联合国基金会针对各行业的节能效率进行了评估。中国根据国情,提出了节能减排的综合性工作方案及目标,在智能电网建设中,相信会有越来越多的节能技术应用在各个行业。

参考文献

[1] 田廓, 鄯帆, 薛松, 等. 建设中国特色坚强智能电网技术经济关键问题框架研究 [J]. 华东电力 2010, 38(1): 1-5.

[2] 姚建国, 赖业宁. 智能电网的本质动因和技术需求 [J]. 电力系统自动化 2010, 34(2): 1-5.

[3] 国发[2007]15号. 国务院关于印发节能减排综合性工作方案的通知.

[4] Chris Marnay, Julie Osborn, Carrie Webber. End-Use Efficiency to Lower Carbon Emissions [J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 3: 10-18.

[5] P. Ravi Babu, V. P. Sree Divya, K. Venkatesh. Application of ANN and DSM Techniques for Peak Load Management a Case Study [J]. IEEE Region & Sibircon, 2008: 169-174.

[6] Masanet E., Kramer K. J., Homan G.. Assessment of Supply Chain Energy Efficiency Potentials: A U. S. Case Study

[C]. Sustainable System and Technology, 2009: 1-6.

[7] Greg Wikler, Ahmad Faruqui, Clark W. Gellings. The Potential for Energy Efficiency in Electric End Use Technologies [J]. IEEE Transactions on Power Systems 1993, 8(3): 1351-1357.

[8] 崔视宏. 工业能源消费问题研究——以镇江市为例 [D]. 南京: 江苏大学 2008.

[9] 窦义粟, 于丽英. 国外节能政策比较及对中国的借鉴 [J]. 节能环保 2007(1): 26-29.

[10] Norma Anglani, Alfio Consoli, Giovanni Petrecca. Energy Efficiency Technologies for Industry and Tertiary Sectors: the European Experience and Perspective for the Future [C]. Energy 2030 Conference 2008: 1-7.

[11] Ghaddar, N. K.. Economic and Environmental Assessment of Improving Energy Efficiency in Lebanese Industrial Sector [C]. Environment and Solar, 2000 Mediterranean Conference 2000: 48-55.

[12] Arai, J., Iba, K., Funabashi, T.. Power Electronics and Its Application to Renewable Energy in Japan [J]. IEEE Circuits and Systems Magazine 2008, 8(3): 52-66.

[13] M. Elbuluk, N. R. N. Idris. The Role Power Electronics in Future Energy Systems and Green Industrialization [C]. 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), 2008: 1-6.

(收稿日期: 2011-02-10)

智能配电网促进用电侧节能减排的政策与计划

汪颖¹ 陈武²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 成都电业局, 四川 成都 610021)

摘要: 在当今世界节能减排、绿色能源及可持续发展理念的引领下, 智能电网的建设已在众多国家如火如荼地开展。提高终端能源利用效率、节能减排已成为智能电网建设过程中的一项重要内容。其中覆盖面最广、需全民参与的是通过智能电网战略的实施推动用电侧的节能减排, 这对于体现智能电网的综合效益具有重要意义。对中国当前的终端能效政策与计划实施情况作了简要介绍, 综述分析了国际上已成功实施的终端能效政策与计划, 提出了中国推进智能电网建设的过程中, 尤其在用电侧应注意的一些问题。

关键词: 智能电网; 能源消耗; 能源效率; 节能减排; 政策与计划; 现状与趋势

Abstract: Leading by the conception of energy conservation and emission reduction, green energy and sustainable development nowadays, the smart grid is constructed in many countries. It is an important content in constructing smart grid that improving the end-use energy efficiency and saving energy. The energy conservation and emission reduction in demand side is promoted by the implementation of smart grid strategy which calls on all citizens to actively participate in and is of great significance in reflecting overall efficiency of smart grid. The current end-use energy efficiency policy and the implementation of the project in China are introduced briefly. The international successful end-use energy efficiency policies and plans are summarized and analyzed. The problems needing attention especially in demand side during the construction of smart grid are proposed.

Key words: smart grid; energy consumption; energy efficiency; energy conservation and emission reduction; policy and plan; status and trend

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)04-0017-05

随着社会经济的快速发展, 资源和能源问题已成为世界性课题。人们已认识到, 资源是有限的, 而社会发展对资源的需要却在不断增长, 因此, 能源效率、节能减排、绿色能源、可持续发展、环境保护等自然地称成了全球关注的重点。为此目的, 智能电网概念作为引领未来电力系统发展的路线图被提到了各国发展的国家安全战略、能源战略高度。在已提出的各种智能电网愿景中, 仅注重满足社会能源需求的传统电网已不再适应时代发展要求, 而智能电网、绿色电网成了全球性行动^[1]。中国于2009年5月在北京召开的“2009特高压输电技术国际会议”上正式提出建设坚强智能电网的战略目标^[2]。在实施智能电网战略中, 研究开发和整合需求侧资源、需求响应以及提高终端能效等, 是构筑智能电网的重要内容之一。终端能源效率的提高有助于在智能电网建设过程中节约相关硬件投资, 特别是可减缓新建发电装机容量^[3], 这对显著提高整个电力系统经济效益、促进智能电网的有序、优质、高效发展而言, 具有重要意义。

电力需求侧管理的概念自20世纪被提出以来,

作为提高终端能效的一项重要管理策略, 受到电力行业和其他诸多行业的广泛关注。文献[4]分析了传统电力需求侧管理的关键技术及实施过程中可能遇到的主要问题, 给出了中国在建设智能电网过程中需重视的诸多管理建议。与此同时, 作为电力需求侧管理在竞争性电力市场中的最新发展——需求响应也受了越来越多专家、学者和电力工程师们的密切关注^[5]。除此之外, 实施与终端能源使用方式、能效改进等相关的能效政策与计划^[3]也是提高终端能效的一项重要措施。

当前, 中国智能电网的建设, 主要对电网基础设施进行大量投资, 而对于如何提高终端能效的关注程度仍然还不够^[6], 还有很多工作值得深入, 以保证人与自然的持续、和谐发展。因此, 在认真分析国内外有关文献和政策及其实施情况的基础上, 对国际上现有的、较为先进与高效的终端能效政策与计划进行了归纳和总结, 以期进一步提高中国智能电网的效率与效益。首先对中国目前的终端能效政策和有关计划的实施情况进行分析, 随后重点对国际上代表性

国家的终端能效政策与计划实施情况及逆行能够归纳总结和对比,通过比较,提出对中国智能电网建设过程中值得重视的几点建议。

1 中国现有终端能效政策与计划

据统计,工业领域的能耗占中国终端能源消费总量的绝大多数^[7],因此,主要对工业领域内的能效政策与计划进行分析和归纳。中国在2005—2010年五年规划期间,确立了在2005年到2010年间能源强度(定义为单位GDP的能耗)降低20%的目标,在此目标要求下,制定了“1 000家”最大耗能企业计划(TOP 1 000)。在该计划中,政府为挑选出来的1 000家耗能最大的企业设定了相应的节能目标^[8]。这1 000家企业在2004年共耗能 19.7×10^6 MJ,占全国能源使用量的1/3和工业能源使用量的一半左右。预计到2010年,这1 000家企业的总节能目标将达到 2.9×10^6 MJ。在TOP 1 000计划中,钢铁与化工行业是主体,占企业总数的一半左右。其中,钢铁行业的能源使用量约占1 000企业耗能总量的40%,石油/石化工业和化工行业则分别约占企业耗能总量的15%。

在2006年夏季,国家发展与改革委员会为每家企业都确立了明确的节能目标,并在该年秋季为每家企业举办了专门的节能培训班。

制定节能减排目标和进行专门培训后,所有被挑选企业,都被要求进行能源审计并制定相应的能源行动计划。然而,由于中国当时还较缺乏能源审计人员,提出的规定难以得到落实,为此,美国能源部(U. S. Department of Energy, DOE)与中国发改委签署了一份关于理解工业能效合作的备忘录^[9-10]。备忘录的内容中,第一阶段的内容,包含了由DOE组织的工业能效专家团队以及一个由发改委组织的类似的专家团队共同对“TOP 1 000”计划中的8到12家企业进行能源审计。作为能源审计的一部份,DOE专家将确定出潜在的节能环节,并为有助于提高能效的美国设备供应商提供相应建议,以期共同进行技术合作与开发。此外,DOE还计划确定出典型节能锅炉、燃煤锅炉以及热电联产机组等,并进行工程示范。

2 国际上典型终端能效政策与计划

总的来说,终端能效政策与计划可以分为如下几

类^[3]:常规类、能源供应与传输类、工业类、建筑类、交通运输类等五大类,具体如下所述。

(1) 常规类政策与计划,包括广泛作用于经济领域的各类能效工具。具体有:用于研究与开发的补贴、税收激励、私人投资激励、节能设备、车辆及设施的采购领导权(如由政府或大型公司负责采购)、提高知名度的公共信息和教育(如通过邮件、媒体、接触等)以及商业同盟等。

(2) 能源供应与传输类政策与计划,包含直接作用于能源公司的各种行动。一些可能的行动是建立使用化石燃料电厂的最低能效标准、削减化石燃料补贴、制定碳费政策、创新税率体系(包括从销售收入中提取利润以鼓励提高能效)、实施需求侧管理方案、通过提高能效,满足未来大部分电力需求的目标、更多采用热电联产、改进供电和电力传输设施(包括发展智能电网)、减少天然气燃烧以防止资源浪费和减少污染排放,以及引入节能交易许可证制度。能效交易许可证类似于绿色许可证和CO₂交易,但用于节能和达到能效目标。

(3) 工业类政策与计划,由多种能效工具组成,如能源战略管理、重要类型设备(电动机、锅炉、泵和压缩机等)的最低能效标准、特定过程高能效技术、能源管理系统、公认改进目标、激励、研究倡议和能效标杆,有些政策和计划已扩展到农业和废物管理类。

(4) 建筑类有很多能效政策与计划机会,主要机会包括更高要求的建筑规范和设备标准、标识与认证方案、旨在逐步淘汰低效照明并引进高效照明和先进控制的先进照明倡议、高能效建筑的采购领导权、节能职责及配额、合同能源管理(能源服务公司通过节能效益收回能效提高过程中所采取的能效措施的成本)、自愿与谈判协议、税收优惠、补贴、补助与贷款、碳税、教育与信息、强制性审计与能源管理要求、详细账单等。

(5) 交通运输类的能效政策与计划,包括改善燃料经济性、强制性燃料效率标准、先进车辆设计及新技术(如插入式混合动力电动汽车)、车辆购置税、燃油税及停车税、更适于大众需求的轨道交通的改善、旨在优化路线的交通基础设施规划、交通流量与总体效率、更多的远程办公津贴、更高能效的多运输模式转换、节能型交通工具的采购领导权等。

另外,除上述能效政策与计划外,还包括协助经济转型国家和发展中国家的潜在能效政策等。如联合国基金会报告建议:为能效投资设立贷款担保基

金;对相关国家进行人力和资源投资以最大化地提高能效;支持出口节能技术市场;减少低效的贸易和技术。特别是对于发展中国家,最成功的能效政策与计划是在考虑环境影响与成本的同时,解决好经济发展过程中的能源需求问题。

3 在不同层面实施的能效政策与计划

3.1 国际能源机构层面

1999年,国际能源机构(International Energy Agency, IEA)建议,所有国家协调能源政策以期在2010年将所有产品的待机功耗都降低至1 W或更少,而且,IEA还建议,所有国家应采用相同的定义和测试过程,但实际上,各国所使用的措施和政策根据各自的情况确定^[3]。

虽然多数小型设备的待机功耗都非常小,每台设备的典型范围为0.5~10 W,由于当前和今后设备使用量都将以较快的速度增加,总的待机功耗将变得非常大。实际上,据估计全世界所有设备的待机功耗总量达480 TWh/年,据IEA预测,通过采取相应的节能增效措施后,待机功耗可减少60%~80%。

迄今为止,已完成了与1 W倡议相关的多项措施有如下几个:

①八国集团一直致力于推动1 W倡议;②2005年,国际电工委员会采用了一种获得国际认可的待机功耗测试程序,时至今日,该测试程序已成为官方指定程序,并得到了广泛应用;③全世界许多国家都采用自愿性认可标章;④韩国和美国已实施政府采购;⑤日本和美国加利福尼亚州是当前仅有的两个已采用法规的地区,但是,待机功耗的要求逐渐成为应用更为广泛的能效法规的一部份,如中国与韩国、澳大利亚、新西兰、美国、加拿大等国都正在考虑制定相应法规;⑥在欧洲,自愿性法规已扩展到覆盖外部电源、机顶盒与宽带调制解调器等的待机功耗;⑦通过1 W倡议,可以发现,对单台设备制定出有针对性的法规很难且其成本很高。因此,IEA针对所有产品提出一种统一方法,该方法可用于除已经采用具有待机功耗测试程序能效标准的产品和一些特定设备,如医疗器械等以外的所有产品。

3.2 国家层面

3.2.1 挪威

2002年,挪威石油与能源部建立了一个能效机

构^[3],名为Enova。Enova是建立在征收配电税收的基础之上,它在2007年的预算为20 000万美元。Enova的任务是通过在挪威采取全面统一的方式,提高终端能效和推动可再生能源发电,其最终目标为通过提高终端能效或增加可再生能源产量的方式,到2010年实现能源使用量减少12 TWh(2006年,挪威总能源使用量为222 TWh。因此,Enova提出的节能目标约占挪威总能源使用量的5%)。

Enova主要靠提高工业生产的能效来实现其节能目标,特别地,Enova还为工业提供投资援助或拨款,这些拨款总额可多达投资成本的40%(国家指导准则规定的最高额度)。Enova采用标准净现值方法来评价项目收益水平,在选择能效项目时,Enova使用的主要标准为单位节能所需项目投资援助额。单位节能所需项目投资援助额越低,项目就越有可能获得拨款援助,然而,这些拨款也有一些附加约束,如:如果未能达到节能目标,企业将部份或全部返还项目的投资援助,类似地,如果实际投资成本比预算投资成本低,援助拨款将相应减少,另一方面,如果实际投资成本比预算投资成本高或实际达到的节能目标超出预先估计的节能目标,援助拨款额仍将维持最初水平。因而,这在一定程度上也就削弱了对公司实施高投资成本和高节能目标项目的激励作用。

可见,挪威的能效投资模式带来的结果令人鼓舞。截至2006年底,Enova已经达成了累计节能目标为8.3 TWh/年的合约,其中,与工业能效项目相关合约中的节能目标为2.2 TWh/年,占总合约中规定节能目标的26%。在挪威,许多公司都在利用能效项目取得的成就来履行其社会责任。

3.2.2 加纳

2003年,加纳向联合国气候变化框架公约提交了一份技术需求评估报告(Technology Needs Assessment, TNT),并在此后不久收到了联合国开发计划署提供的主要资金援助以及美国可再生能源实验室的技术支持^[3]。TNT的目的在于确定能够减少的潜在温室气体排放量及有利于国家可持续发展的各类技术的开发和转让方案。

首批确定的终端能效技术包括采用紧凑型荧光灯(compact fluorescent lamps, CFLs)替代白炽灯和提高锅炉效率两方面。TNT实施以来,由于加纳国内进口关税、安装工作组织和零售业的改观,加纳在用CFLs替代白炽灯的实现率上得到了大幅增加。一直

以来,CFLs的推动政策都保持在可持续发展和自我融资服务状态。据估计,新的CFLs市场将给加纳经济带来1 000万美元的经济增长,同时,CFLs政策的实施也使加纳国内的电力需求减少了6%。

3.2.3 德国

提高能源终端使用侧的能效对于德国到2020年成功实现温室气体排放减少40%这一宏伟目标而言至关重要,因此,在当前和不远的将来,大量影响能源终端需求侧能效的政策将获得实施或引进。下面给出了几个事例^[3]。

(1) 任何人对房屋或公寓进行能效改造都可获得国家补贴。如:采用隔热项目、替换低效供热系统和安装新型节能窗等都可获得补贴。

(2) 今后,所有新建和现有建筑物都必须进行能源认证;能源证书将说明建筑物当前的能源利用情况,并能识别出有效的能效措施。

(3) 在不久的将来,德国将依据二氧化碳排放量,而不再根据车辆大小来对机动车进行征税。同样,对于卡车,也将依据其二氧化碳排放量来征收高速公路通行费。

3.2.4 日本

在采取节能措施方面,日本当属世界领跑者。日本也因此成为世界范围内每单位GDP温室气体排放量水平最低的国家。日本《1979合理使用能源法》及其修订版包含了多项能效政策与计划,这些政策与计划囊括了工业、建筑业及交通运输业等领域。各领域中具有代表性的成功范例如下^[3]。

(1) 工业。在日本,工业领域的能效改进取得了重大成就,即使日本的经济的发展突飞猛进,当前其能源使用水平仍保持在1970年的水平,这主要归因于工业化过程中能源强度的减小、产业结构的调整以及工业设备的节能。尽管日本在提高能效上获得了进步,但其仍努力在工业领域中降低能源强度及减少温室气体排放量,其主要原因在于,工业耗能约占日本全部能源使用量的一半。在工业领域内,提高能效的具体措施包括:在大、中型企业任命节能管理员,并要求他们提交节能计划,对其能源消费做出详细报告。另一项措施是,1997年日本经济团体联合会引入的自愿行动计划,该项计划鼓励工业部门自愿采取能效措施,在该计划中,日本设定了2010年的二氧化碳排放量应低于1990年时目标工业企业的排放水平。

(2) 建筑业。虽然设备能源使用效率在持续稳

定地改进,但随着电子设备、人口的迅速增加以及人们更多方便思想的产生,日本建筑领域内的能源使用量仍在不断增加。为解决该问题,日本制定了领跑者计划,以便为电器与设备推出高能效标准。该标准明确说明了计划中的产品效能等同于或高于市场上最好的同类产品。对于每种类型的电器,日本在指定目标年内对制造商和进口商都制定了强制性能效要求。当前,日本仍在不断对所提能效标准进行重新评估。领跑者计划的实施,使得大量终端电器和设备的能效得到了大幅提高,如2004年,日本空调能效比1997年提高了近40%。另外,在2000年8月,日本引入了节能标识制度,该制度告知用户其终端设备的能源使用特性。为了鼓励商家销售高能效设备,日本于2003年引入了能效产品零售商评价制度,以此追踪和评价销售工作。在该制度实行的第一年,有150家商场被认定为能效产品的积极推动者。同时,日本为鼓励电厂与办公大楼内实施综合热能及电能管理,也给出了相应的奖励措施。

为给消费者树立榜样,2001年4月,日本设立了一项采购政策,鼓励政府机构为办公和公共建筑购买终端能效设备。政府的这种采购措施开拓了新技术市场,同时,也增加了产品的市场渗透力。

(3) 交通运输。为减少交通运输领域中的温室气体排放,日本针对客运车辆的燃料效率制定了领跑者标准。此外,日本政府还为混合动力车辆提供了税收优惠、补贴、低息贷款等多种方式的激励措施。同时,还为配备具有自动减少空转功能装置的车辆提供补贴。对于托运和大型运输企业而言,日本政府则要求其提供节能方案及出具相应的节能报告。

3.3 州(省)层面

在美国,加利福尼亚州是在能效方面处于领先地位的州之一^[3],已经实施了大量卓有成效的能效计划。其中,于2002年首次获得批准的全州住宅照明计划就极具代表意义。全州住宅照明计划是为应对2001年加利福尼亚州能源危机而推出的,在此后几年里,市政公司实施了多个试点和全面计划来解决发电容量不足问题,包括全州住宅照明计划、其他能效与需求响应计划等。在2002计划年中,共有5 502 518盏电灯、24 932台设备、6 736盏火炬灯和50组吊扇灯获得了补贴,该方案总价值940万美元。据估计,该计划已节能162 888 MWh,其中,在需求侧节能21.4 MWh,这些节能数量相当于每年减少约 10×10^6

t 二氧化碳排放。另外,类似的照明计划也从2002年开始获得了批准。

3.4 城市层面

美国俄勒冈州波特兰市是过去30年内社区能源政策的国际领跑者^[3]。为应对欧佩克(Organization of Petroleum Exporting Countries, OPEC)石油禁运,波特兰市于1979年实施了美国历史上第一个地方性能源政策,该政策包含建立能源办公室和成立能源委员会两方面。1990年,波特兰市采取了新能源政策,包括对超过50个公共和民间团体、协会进行广泛研究与社区参与。1990能效政策包含城市运转、能效、交通运输、电信、能源供应、减少废物及其回收等方面在内的近90个目标,总目标是到2010年使城市各领域(包括住宅、商业、工业及交通运输业)能效提高10%。

波特兰市能效政策得以成功实施,主要原因在于该城市首先关注了内部建筑和设施的能效。特别地,该城市制定了城市能源挑战计划,使其能源成本到2000年降低了100万美元。在实现该目标后,波特兰市还将在今后进一步减少能源成本。目前的节能效益相当于200万美元/年或者超过整个城市能源费用的15%。

3.5 公司/研究院层面

2006年底,沃尔玛宣布到2007年底在沃尔玛及其山姆会员商场实现1亿只CFLs的销售计划,即在1亿客户中实现人均1只CFLs的销售目标^[3]。根据沃尔玛的说法,如果该销售目标得以实现,那么在CFLs的使用寿命期内,它将为所有客户节约30亿美元的电费开支,总节能量相当于45万个家庭的能源使用量。同时,也将减少近 $2\,000 \times 10^4$ t的温室气体排放量,相当于减少了700 000辆汽车在公路上行驶时所排放的温室气体。

2009年,美国电力研究院列举了目前在美国已采取的主要终端能效技术^[11],包括基于Web的工业能源管理工具、高效的数据中心、供热通风与空气调节技术(heating, ventilation and air conditioning, HVAC)、家用电器及商用设备、先进照明技术、用于消费电子产品电源供应器、先进电机。文献[12]则进一步对HAVC能效技术进行了研究。同时,还对工业、高性能住宅和建筑、电力电子、插入式负荷及照明等众多能效技术进行了详细介绍与分析。

4 结 语

的成功实施,取得了显著的节能效益。中国智能电网建设目前主要集中在基础硬件上,对于终端能效还未重点关注。实际上,智能电网的建设是一项极其复杂庞大的系统工程,它不仅集中在发、输、配电环节的基础设施之上,还包含大力提高住宅、工业、建筑、交通运输等多终端领域内的能效,以充分发挥智能电网的社会效益及其经济效益。因此,在中国智能电网建设背景下,提出一系列有效的终端能效政策与计划以充分挖掘终端能效潜力是值得深入探讨的重要课题。

参考文献

- [1] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等.智能电网技术综述[J].电网技术,2009,33(8):1-7.
- [2] 常康,薛峰,杨卫东.中国智能电网基本特征及其技术发展评述[J].电力系统自动化,2009,33(17):10-15.
- [3] Clark W, Gellings P. E. The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response[M]. Fairmont Press, 2009.
- [4] 王蓓蓓,李扬,高赐威.智能电网框架下的需求侧管理展望与思考[J].电力系统自动化,2009,33(20):17-22.
- [5] 张钦,王锡凡,付敏,等.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.
- [6] 吴疆.用能效的观点比较中美不同的智能电网投资策略[J].中国能源,2009,31(9):15-18.
- [7] 王庆一.中国2007年终端能源消费和能源效率(上)[J].节能与环保,2009(2):14-17.
- [8] Price J. L. and W. Xuejun. Constraining Energy Consumption of China's Largest Industrial Enterprises through the Top-1000 Energy-consuming Enterprise Program[C]. 2007 Summer Study on Energy Efficiency in Industry, New York(USA), July 24-27, 2007:1-12.
- [9] U. S. Department of Energy. U. S. and China sign agreement to increase industrial energy efficiency, DOE to conduct energy efficiency audits on up to 12 facilities, 2007.
- [10] U. S. Department of Energy. Memorandum of Understanding between the Department of Energy of the United States of America and the National Development and Reform Commission of the People's Republic of China Concerning Industrial Energy Efficiency Cooperation, 2007.
- [11] Electric Power Research Institute. 170 End-Use Energy Efficiency — Preparing for a Low-Carbon Future, 2009.
- [12] Electric Power Research Institute. End-Use Energy Efficiency and Demand Response in a Low-Carbon Future — Program 170, 2010.

(收稿日期:2011-02-10)

终端能效政策与计划已在多个国家获得大规模

TinyOS 感知节点在智能电网输电环节的应用

黄宏光^{1,2}, 钟俊^{1,2}, 李国才^{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: 以智能电网中输电环节的关键设备研制问题为目标, 从技术实现手段——无线传感器网络操作系统 TinyOS 及节点设备, 讨论了实现中涉及的网络拓扑、能量消耗优化、地址分配、调度机制的特性和应用考虑, 给出了应用中的实现过程。

关键词: 输电线感知; TinyOS; 任务调度; 能量消耗优化; 网络状拓扑; 地址分配

Abstract: Aiming at main research problems in status monitoring for transmission line of smart grid and by means of TinyOS and nodes device, the characteristics and application considerations of the involved mesh topologies, energy consumption optimization, node address, dispatching mechanism are discussed, and the implementation process during the application is given.

Key words: smart grid sensor; TinyOS; task scheduling; energy consumption optimization; mesh topology; node address

中图分类号: TM711 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)04-0027-03

0 引言

中国输电线有 300 000 km, 且以每年 3% 的速度增加, 如何监测和预测输电线的事故征兆、降低输电线的事故率, 是 2010 年国家电网关于智能电网关键设备研制规划中输电环节的主要项目之一。利用无线传感器网络技术进行输电线路的监测也被列入国家 10 年重大科技专项。

无线传感器网络 WSN 由无数个感知节点随机布置, 形成可动态扩展的感知网络, 感知节点采用传感器、无线通信单元、微处理器形成一个具有基本前端处理能力的节点。由于感知节点的微型化、智能化和自组网的特点, 将其应用于各种物体和设备, 则这些物体和设备形成一个数量巨大、分布广泛的信息交换数字通信网络, 和现有的 IP 网络结合, 将使地球村变成物物相联的智能世界, 对人类社会的发展模式产生重大的影响。TinyOS 是由加州大学伯克利分校专门为无线传感器网络开发的一种微型操作系统。是目前主流的 WSN 的操作系统之一, TinyOS 由一系列的软件组件和硬件组件构成, 而一个完整的系统配置由一个调度器和组件表组成。

下面就利用无线传感器网络 TinyOS 及感知节点进行输电线路监测所涉及的网络拓扑、能量控制、地

址分配等进行底层技术特性分析, 并给出一个基本的方案流程。

1 输电线应用中的 WSN 网络拓扑

WSN 网络拓扑有不同的形式, 其特性也有所不同。在实际实现中推荐采用网格状、网格状 + 星形方式, 典型的网格状如图 1 所示。

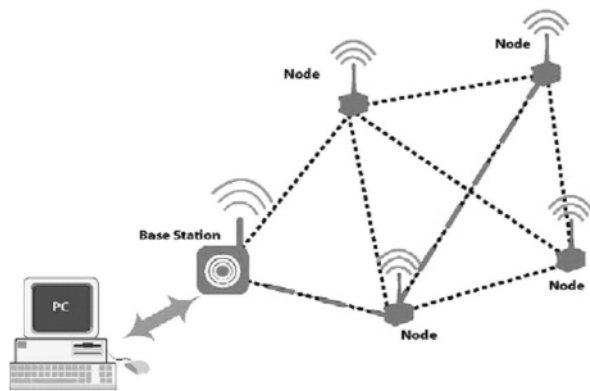


图1 网格状网络拓扑结构

网络状拓扑具有自组路由和自愈特性, 适合 WSN 的网络布局方式和传输环境要求, 这种拓扑的多路由的特点使数据可以上流的模式从感知节点到基站, 也可以下流的模式到其他节点, 可以广播方式发布到一个会聚区域的所有节点, 或者在一个簇中的两个节点间发布。

在输电线应用中,布置在输电线上的感知节点实现网格状拓扑比较容易,只要注意以多路由的方式布局,工程上可以按间距 50 m 左右的等边三角形布设。

网格状的多路由特性使网络中的节点可动态配置为不同的功率模式,以节省节点的能量消耗,提供的模式有 HP 模式、LP 模式、ELP 模式。在协议方面,网格状拓扑的路由协议可实现低功率侦听(平均电流小于 220 μA)、时间同步、休眠状态、节点到基站路由、基站到节点路由。典型室内应用一般在 30 ~ 1 200 m^2 的范围。如远距离传输应用,则发信功率控制到 -6 dBm。室外应用,节点分布于几千平方米的范围,平均密度 1 000 m^2 为一个。

图 2 给出了针对网络状拓扑的 WSN 网络,利用 Micaz 进行的端到端应答传输实验中的数据。

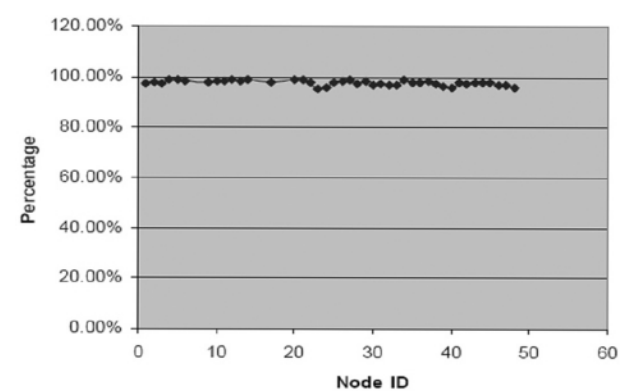


图 2 48 个节点的 72 小时传输实验数据

2 能量消耗

能量消耗是 WSN 中在应用中需要解决的主要技术问题,低功耗设计和实现方案中的能量管理也是目前研究的热点问题。工程上供电方式一般有常规电池、可充电电池,也有太阳能供电和基于输电线的供电方式。

在实际实现中,感知节点提供底层的能量控制接口或工作模式,为应用实现给出可控制和优化的手段。这些接口涉及 MCU、无线通信、读写操作。目前最底层的能量控制可实现晶振频率的改变。表 1 给出了一组典型的电流消耗数据。

根据表 1 的电流消耗情况,可计算出电池容量和使用寿命,如表 2 所示,

在输电线应用中,其使用周期较长,表 2 给出的参数距工程应用存在一定的差距,可以考虑其他的延长电池寿命的方法。

表 1 感知节点在不同工作状态下的工作电流

工作模式	M2110 电流/mA
MCU,全工作状态	6 (7.37 MHz)
MCU,休眠状态	0.010
无线通信单元,接收状态	16
无线通信单元,发射状态 (1 mW 功率)	17
无线通信单元,休眠状态	0.001
串口 flash 存储,写状态	15
串口 flash 存储,读状态	4
串口 flash 存储,休眠状态	0.002

表 2 电池容量和使用寿命

系统参数		
	电流	典型工作时间
处理器	电流 (全工作状态) 6 mA	1
	电流 (休眠状态) 10 μA	99
无线电单元	电流 (接收状态) 16 mA	0.75
	电流 (发射状态) 17 mA	0.25
	电流 (休眠状态) 1 μA	99
Logger 存储	电流 (写状态) 15 mA	0
	电流 (读状态) 4 mA	0
	电流 (休眠状态) 2 μA	100
传感器单元	电流 (全工作状态) 5 mA	1
	电流 (休眠状态) 5 μA	99
每小时消耗 电流	处理器	0.0699
	无线通信单元	0.1635
	Logger 存储器	0.0020
	传感器单元	0.0550
	合计	0.2904

续表 2 典型电池使用寿命

电池容量/(mA/hr)	电池寿命/月
250	1.20
1 000	4.78
3 000	14.35

表 3 输出功率的编程控制范围

RF 功率/dBm	功率控制代码
3.0	0
2.6	1
2.1	2
1.6	3
1.1	4
0.5	5
-0.2	6
-1.2	7
-2.2	8
-3.2	9
-4.2	10
-5.2	11
-7.2	12
-9.2	13
-12.2	14
-17.2	15

WSN的信道工作频率为2.4 GHz,在使用中,WSN的通信单元可以在IEEE 802.15.4的信道内调整,典型数据如M2110'的Atmel通信单元,信道数为11~26,对应频率为2.405~2.480 GHz,每信道带宽为5 MHz。由于发信功率是WSN节点的能量消耗的主要部分,对其进行优化控制是能量控制中的有效方法,在应用中,射频发信功率可通过编程控制,以减少能量消耗,表3给出了典型的控制接口和功率的对应关系。

利用控制接口,射频发信功率的编程控制范围是3~-17.2 dBm。在输电线实用中,通过编程控制,利用适当低的发信功率可有效地减少通信部分的能量消耗,也利于降低干扰。

3 地址分配

应用中,同信道的信息通过8比特的组ID来区别。实现WSN中的簇划分,在消息头中,通过16比特的目的地节点地址,地址格式为IP,如12.11.13.230,在应用中,两个数字126和255由网络内部使用。

输电线应用中,簇划分及节点地址的分配视具体应用而定,可按标准进行分配。

4 用于输电线路监测的调度机制

调度策略研究给出不同的技术路线^[3]。TinyOS 2.x任务调度模型如图3所示^[1-2],一个任务若需要执行多次,可在任务结束的代码处添加将自己再次投递入队的代码即可。这种方式可避免出现任务队列已满而无法通知分相事件结束的问题,实现一个任务

只占任务队列的一个位置^[4]。

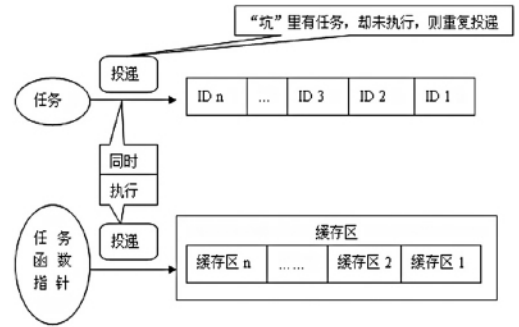


图3 TinyOS 2.x任务调度模型

输电线中线路的状态监测按状态监测、前端故障诊断、前端在线预警分解为TinyOS下的任务,利用函数指针进行投递调度,调度方式在Cygwin下用nesC编程实现。

5 结论

智能电网输电线路状态监测装置目前有不同的研究方案,基于TinyOS构建WSN实现线路的状态监测,可实现数据和图像的采集。目前,整个实现有了初步的结果,正进行进一步的研究和开发实现中。

参考文献

- [1] TEP 106: Schedulers and Tasks: at <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x>.
- [2] TEP 119 Collection at <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x>.
- [3] 尹震宇,赵海,林恺,等.无线传感器网络操作系统调度策略[J].计算机工程,2007,33(17):77-79.
- [4] 钟雷,武泽旭,章正辰,等.TinyOS 2.x的调度策略及协议分析[J].通信与信息技术,2010(3):66-69.

(收稿日期:2011-02-10)

(上接第12页)

- [6] 侯建朝,谭忠富,王绵斌.提高我国电力产业能效的系统规划方法研究[J].华北电力大学学报(社会科学版),2008(4):1-5.
- [7] 米建华.“十一五”电力能效影响因素分析[J].中国电力企业管理,2006(4):31-33.
- [8] 张钦,王锡凡,王建学,等.电力市场下需求响应研究综述[J].电力系统自动化,2008,32(3):97-106.
- [9] Clark W, Gellings P. E. The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response [M]. Fairmont Press, 2009.
- [10] 余贻鑫.智能电网的技术组成和实现顺序[J].南方

电网技术,2009,33(2):1-5.

- [11] 余贻鑫,栾文鹏.智能电网[J].电网与水力发电进展,2009,25(1):7-11.
- [12] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等.智能电网技术综述[J].电网技术,2009,33(8):1-7.
- [13] 王蓓蓓,李扬,高赐威.智能电网框架下的需求侧管理展望与思考[J].电力系统自动化,2009,33(20):17-22.
- [14] 张钦,王锡凡,付敏,等.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.

(收稿日期:2011-06-17)

用户友好配电系统规划方法的研究

刘旭娜¹, 汪颖^{1,2}, 黄静¹

(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:在现代智能电网框架下,对用户友好配电网概念及其规划方法展开研究。针对配电系统拓扑结构改变时系统中扰动不确定性的问题,重点研究了不同规划方案下不同用户因设备故障引起的间接损失的评估方法,并将该损失计入用户损失中,以此为基础进行系统规划。实际中用户可能经受的间接损失与系统扰动和用户设备电压耐受能力的兼容性有关,分别用最大熵方法和模糊法评估系统扰动和用户设备对扰动耐受能力的不确定性。对 RBT Bus2 配电系统的仿真结果证明,考虑用户间接损失后规划的配电系统能保证综合成本最低。

关键词:智能电网; 用户友好配电系统; 间接损失; 不确定性

Abstract: Under the framework of the modern smart grid, the concept and the planning method of customer friendly distribution systems are proposed. Due to the uncertain disturbance in the systems during the change of network topology of distribution system, the assessment of potential losses caused by customers' equipment failures under possible disturbance of different planning schemes is proposed. The planning method based on customer loss including indirect loss is correlated with the compatibility between system disturbance and voltage tolerant level of customer equipment. Based on maximum entropy principle and fuzzy method, the uncertainty between system disturbance and customer equipment is evaluated. The simulation results of RBT Bus2 distribution system show that the distribution system planned after considering the customer indirect loss can guarantee the lowest comprehensive cost.

Key words: smart grid; customer friendly distribution systems; indirect loss; uncertainty

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)04-0030-06

0 引言

智能电网已成为许多国家的能源安全和国家发展战略^[1-3]。作为一个愿景或一种技术路线,智能电网的实施须从规划设计、运行控制、管理决策等方面入手。由于配电系统直接面向用户,对用户与社会的满意程度有直接影响,是实现智能电网的关键之一^[3]。智能电网具有自愈性、抵御攻击、优质供电、用户参与和选择、市场化、资产优化与高效性等特征^[4],在其发展过程中,电网企业的经营理念已从生产导向型向用户与环境友好型转变,更关注用户、社会响应和对环境、经济的影响^[5]。供配电企业的经营理念通常为用户让渡价值最大化,具体表现为用户满意度最大化^[6],因此,在规划配网时,将其作为指标之一,既符合用户和电网经营理念要求,也是实现智能电网手段。但是,用户满意度受复杂不确定因素影响,通常仅能定性描述,规划时需将定性指标转换为直接和间接损失等定量指标,这是用户友好配电系

统规划的关键。

智能配电网要求供电安全、可靠、经济,同时对用户和环境更友好^[4],将这样的配电网定义为用户友好配电系统,并将配电系统的友好性指标转换为直接损失和间接损失,构成用户满意度指标,以评价配电系统对用户的友好性。在评价直接损失时与传统规划方法一样考虑停电引起的损失,考虑间接损失时主要考虑对用户影响最严重的电压暂降,这样虽有一定片面性,但足以验证方法的可行性和正确性。

根据 IEEE Standard 1346-1998^[7]及文献[8]等给出的设备电压耐受能力,同时考虑涉及的不确定性,定量评估用户间接损失^[9-10]。在进行规划^[11]时,对各种可行方案和不确定性因素引起的间接经济损失、用户满意度等进行研究,重点考虑了用户侧使用最多的敏感设备^[12-13],如计算机(personal computers, PC)、调速驱动装置(adjustable speed drives, ASD)、可编程序逻辑控制器(programmable logic controllers, PLC)和交流接触器(AC-contactor, ACC)等。这样同时考虑停电引起的直接损失和电压暂降等引起的间接

损失,能更合理地反映配电系统对用户的友好性。

传统配电系统规划考虑了可靠性指标,主要反映了直接损失。进一步考虑用户抱怨最多的系统中电压暂降的不确定性引起的间接损失,提出一种新的用户友好配电系统规划方法。根据文献[11]提出的配电系统电压暂降评估法,文献[14]提出的配电网重构法,以及文献[12]引入电压暂降后的可靠性分析方法,在研究间接损失的不确定性的基础上,提出确定间接损失的方法。对各种可行性的规划方案下电压暂降和用户设备电压耐受能力进行研究,定量计算间接损失,提出用户友好配电系统的规划模型和方法,以RBT Bus2配电系统为例,对提出的方法进行验证,证明方法的有效性和可能性。

1 用户友好配电系统与规划指标

1.1 用户友好配电系统

传统配电系统规划目标^[15]主要有供电能力、线损、稳态供电质量等,这些指标大多立足于供电方,反映了供配电企业生产导向型经营理念。智能电网的基本特征之一是用户参与,必然要求在规划和建设的过程中考虑用户和社会利益,建立用户友好配电系统。为了区别于传统配电系统,将用户友好配电系统定义为:用户友好配电系统是智能电网愿景在配电系统中的具体化和现实表现,是在建设成本、运营成本和用户损失最低的前提下,满足用户对供电容量、电量、可靠性、用电效率等的要求,考虑资源能源和环保要求,以用户满意度为目标的配电系统^[16]。

根据以上定义,配电系统和用户的满意度是用户友好配电系统的主要特征,用户满意度是关键。现有配电系统规划考虑了供电充足性,但对用户利益,如用户间接损失等考虑不够。用户消耗电力更关注的是否能达到期望的效用,即达到其希望的满意度。用户的满意度受自身和电网的多重不确定性因素影响^[10],包括接线方式、回路数、线路型号、故障位置、故障类型、用电特性以及用户设备的电压耐受能力等。用户设备的电压耐受能力则根据IEEE标准^[7]设定。在配电网规划时,只有充分考虑用户设备的耐受能力与系统内可能发生的供电质量扰动之间的兼容性,才能实现用户友好配电系统。

1.2 用户友好配电系统规划指标

传统规划将建设成本、运营成本、用户停电损失

作为规划目标,满足系统的等式和不等式约束,满足系统和用户的可靠性指标要求。用户友好配电系统除满足以上要求外,用户满意度是重要指标之一。因此,在进行规划时,需全面考虑系统侧和用户侧成本,评估用户停电引起的直接损失和供电质量波动引起的间接损失。在诸多间接损失中,电压暂降引起的损失最严重,根据2000年的统计,美国每年因电压暂降引起的损失达260亿美元。电压暂降引起的间接损失具有影响因素多、随时间和空间变化的特点,需考虑可能的规划方案中,电压暂降的不确定性和用户设备响应的不确定性,以此定量确定用户满意度,并将其纳入规划指标。用户友好配电系统的规划指标体系如图1。图中间接损失的确定是关键,其他指标的确定与传统方法类似。

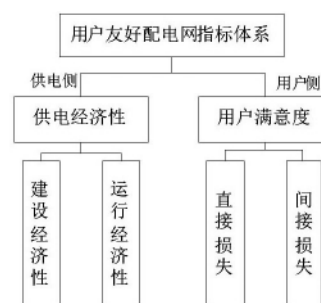


图1 用户友好配电系统规划指标体系

2 间接损失指标的确定

2.1 配电系统电压暂降的确定

配电系统电压暂降的严重程度与系统拓扑、运行方式、故障位置、故障类型、保护类型、保护定值及装置特性等有关^[10]。现有故障定位法^[17]、临界距离法^[18]等可用以确定给定用户设备和给定配网条件下的配电系统暂降域或不可接受的故障范围,但是,由于不同用户设备的电压耐受能力不同,即使在相同情况下导致间接损失也不同,因此,在配电网规划时,需根据可行配电网规划方案和用户设备特性进行评估。

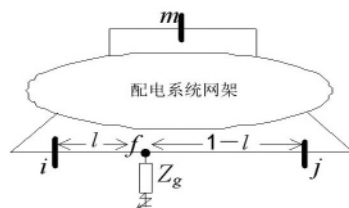


图2 配电系统结构

对任意系统,如图2,当任意线路*i-j*上任意位置*f*点发生三相短路时,任意用户设备接入点*m*处的

电压暂降幅值为

$$U_{r,m} = U_m^{pref} - [(1-l) \cdot Z_{mj} + l \cdot Z_{mj}] \cdot U_f^{pref} / [(1-l)^2 \cdot Z_{ii} + l^2 \cdot Z_{jj} + 2l(1-l) \cdot Z_{ij} + l \cdot (1-l) \cdot Z_{ij} + Z_g] \quad (1)$$

式中, $U_{r,m}$ 为节点 m 的剩余电压(电压暂降幅值); U_m^{pref} 、 U_f^{pref} 为故障前 m 、 f 点的电压; l 为故障线路 $i-j$ 的归一化长度; Z_{ii} 、 Z_{jj} 为节点 i 、 j 的自阻抗; Z_{mi} 、 Z_{mj} 、 Z_{ij} 分别为节点 m 、 i 、 j 的互阻抗; z_{ij} 为线路 $i-j$ 的阻抗; Z_g 为故障阻抗。当线路 $i-j$ 发生非对称故障时,可用对称分量法分析^[19]不再赘述。

输电系统的故障也可能引起用户设备损失,但配电系统故障引起的暂降对用户设备的影响更频繁也更严重,同时,配电系统内大型感应电机的起动等也可能引起电压暂降,但严重程度不如系统故障,可在制定供电方案时考虑。配电系统的故障具有较强的随机性,根据线路 $i-j$ 上不同故障点引起的用户设备接入点 m 处的电压暂降幅值分布,用最大熵方法^[20]确定故障引起的 m 点电压暂降严重性,其概率密度函数如式(2)。

$$f(s) = \exp(\lambda_0 + \lambda_1 s + \sum_{n=2}^N \lambda_i (s - E_i)^n) \quad (2)$$

式中, λ_i 为第 i 阶矩约束条件对应的拉格朗日算子, $i = 2, 3, \dots, N$ 。根据文献[20]取 $N = 5$ 。

式(2)中,变量取值由电压暂降幅值分布决定,结合式(1),计算时采用的 Z_{ii} 、 Z_{jj} 、 Z_{mi} 、 Z_{mj} 、 Z_{ij} 均为系统阻抗矩阵对应参数,与拓扑有关,可根据规划方案确定。

2.2 电压暂降引起的用户设备故障次数

用户设备电压耐受能力的不确定性受设备类型、安装位置、使用寿命、运行条件、负载水平等影响,可用图3所示不确定区域描述。对于不同设备,仅用给定特征的电压暂降(如幅值为50%的电压暂降^[21])来估计用户损失具有片面性,因此,需对电压暂降引起的损失的不确定性进行全面评估。

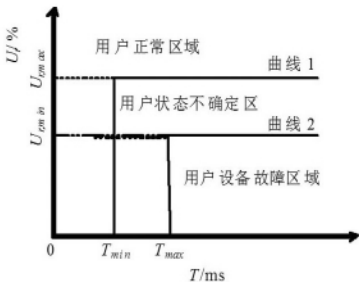


图3 用户故障不确定性区域

发生电压暂降时,用户设备可能处于正常、故障、

正常与故障之间的过渡状态等多种状态。电压暂降发生在故障区域内时引起的损失与停电引起的直接损失的评估方法相同,当暂降发生在图3的不确定区域时,需同时考虑系统电压暂降的随机性和设备运行状态的模糊性。系统电压暂降严重性的概率密度函数 $f(s)$ 如式(2),用户设备运行状态的模糊性可用隶属函数 μ_A 刻画^[10],此时用户设备的故障概率为

$$P(A) = P(s > x) = \int_0^{+\infty} \mu_A(s) f(s) ds \quad (3)$$

式中, s 为电压暂降严重性指标,根据文献[13],可描述电压暂降幅值、持续时间和综合指标,这里为说明方法仅考虑暂降幅值。

用户设备故障概率 $P(A)$ 反映了线路 $i-j$ 任意点故障可能导致的 m 点用户设备的故障概率。在 m 点接入的 k 类用户设备因电压暂降引起的年故障次数为

$$PFN_{mk(x_{mk1}-x_{mk2})} = P(A) \cdot L_{ij} \cdot \lambda_{ij} \quad (4)$$

式中, k 为用户设备类型; x_{mk1} 、 x_{mk2} 表示 m 点处 k 类用户设备电压幅值耐受能力最小、最大值; L_{ij} 和 λ_{ij} 为线路 $i-j$ 长度和故障率。

2.3 电压暂降引起的用户间接损失评估

现有配网规划很少考虑电压暂降损失,在电力技术经济评价中^[22],有时间接损失更严重^[21]。这是因为其包括了设备维修、员工补贴、购置辅助设备(如不间断电源)或修改生产工序等一系列的消费。

实际中,用户可分为居民、商业、政府机关、工业等类。根据北欧调查数据显示^[21],工业用户对供电恢复时间更敏感,其他用户的敏感特性基本相同,这与工业生产大量流水线作业相符。因此,工业用户以瞬时中断(200 ms),而其他用户则以短时中断作为单次电压暂降引起的间接损失。

表1为某供电公司调查统计得出的用户中断成本^[23],表示用户因电压暂降发生故障后为恢复1 kW正常用电年峰值而导致的间接经济损失。

表1 用户单次故障损失

用户类型	居民	商业	政府	小型工业	大型工业
损失/(\$ /kW)	0.98	1.88	2.50	0.271	0.312

节点 m 处 k 类用户的年间接损失为

$$C_{p,m} = PFN_{mk} \cdot C_k \quad (5)$$

对于配电系统的可行规划方案,全系统内用户因电压暂降引起的损失为

$$C_{potential} = \sum_{m \in M} C_{p,m} \quad (6)$$

式中, m 、 M 为可行方案内节点号和负荷接入点集合;

C_k 为第 k 类用户单次故障损失。

3 电压暂降引起的间接损失评估过程

基于以上分析,评估给定配电系统规划方案间接损失的一般过程如下。

① 根据给定规划方案下的网络拓扑结构、各支路参数,以及各类用户设备电压耐受能力,用式(2)和式(3)计算各类设备的故障概率。

②根据历史统计和经验所得系统元件可靠性参数,用式(4)计算各用户设备接入点各类用户的年故障次数。

③由各类用户设备单次故障损失并计及年故障次数,计算不同系统规划方案下用户电压暂降损失,确定配电系统规划的目标函数,由此判定最优配电系统方案,得到期望的用户友好配电系统。

4 用户友好配电系统规划

4.1 规划模型

为说明原理,以系统扩建线路为规划变量,用电压暂降引起的用户损失和系统电量不足损失作为年用户损失,以年用户损失、建设投资年费用、年运行费作为系统规划综合费用,以综合费用最小为规划目标,规划模型如下。

$$\min Z = f_1 + f_2 + f_3 \quad (7)$$

$$s. t. \quad U_h \in u_h \quad (8)$$

$$F(x_h) \leq 0 \quad (9)$$

$$G(x_h, y_h) \leq 0 \quad (10)$$

式中 f_1 、 f_2 、 f_3 为建设投资等年值费用、年运行费用(包括年网损费和年折旧维护费)、用户综合损失费用(包括缺电损失和潜在损失); u_h 为第 h 年建设计划(U_h 为系统建设可行方案集); x_h 为系统结构优化变量; y_h 为系统运行优化变量。

式(8)、(9)为系统结构优化约束,如线路回路数、线路路径、线型等;式(10)为系统运行优化约束,包括线路潮流、发电厂出力和机组出力、负荷水平以及系统稳定性等约束。

目标函数中各分量的表达式如下。

$$f_1 = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \sum_{l \in L} c_l l_l \quad (11)$$

式中 i 为投资折现率; n 为施工年限; c_l 为线路 l 单位

长度造价; l_l 为支路 l 新增回路数; L 为系统支路集合。

$$f_2 = T \sum_{l \in L} C_{loss} r_l p_l^2 + C_d \quad (12)$$

式中 T 为年损耗小时数; C_{loss} 为单位功率损耗年运行费用; r_l 、 P_l 分别为支路 l 的电阻及有功潮流; C_d 为年折旧费。

$$f_3 = EENS \cdot CIC + C_{potential} \quad (13)$$

式中 $EENS$ 为年电量不足期望; CIC 为单位电量停电损失; $C_{potential}$ 为不确定性故障引起的用户年潜在损失。

4.2 规划流程

根据以上规划目标和模型,用户友好配电系统的规划流程如图4。

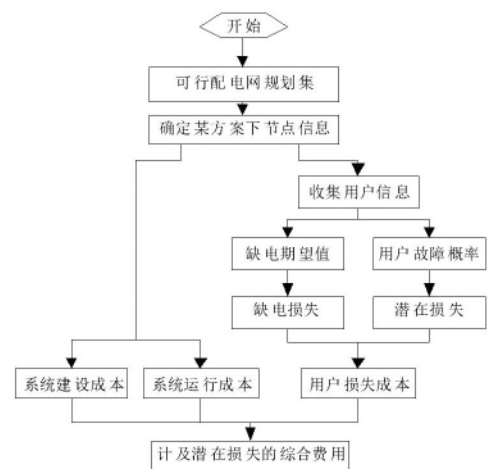


图4 配电网规划流程

5 算例分析

算例取自 IEEE - RBTS 的 BUS2 配电系统的一条主馈线^[24]。该系统为 11 kV 的配电网络,网络结构如图5,图中,方框为 33/11 kV 变电站,虚线为可扩展线路,LP1 ~ LP7 为负荷节点,其他均为分支节点。

利用本方法对待规划系统进行损失评估,并与未考虑间接损失的评估结果比较,证明考虑用户满意度的重要性和必要性。

方案1和方案2分别为考虑和不考虑间接损失的规划结果(实线表示选中线路,虚线未选),相应网络结构见图6。

在不同方案下,各条支路在负荷节点处的电压暂降幅值的概率密度函数系数的变化趋势如表2和表3,表征了系统电压暂降严重程度,结合各节点不同用户设备的电压耐受能力,得用户设备故障概率。

结合用户设备信息^[24],用第3节提出的方法评估经济损失,根据 SEMIF47 标准,用 PC、ASD、PLC 分

表2 不同方案下支路6-8扰动的概率密度函数对负荷节点LP5上用户造成的故障										
系数	E_1	λ_0	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	居民用户 故障概率	商业用户 故障概率	工业用户 故障概率
方案1	0.439 5	2.876 9	-5.643 0	25.275 3	84.784 6	-576.085 4	537.378 4	0.406 3	0.604 5	0.557 7
方案2	0.482 9	3.041 4	-5.234 1	33.521 7	95.143 7	-901.592 7	916.957 5	0.502 8	0.779 8	0.650 3

注:表中仅给出了系统发生三相故障的情况。

表3 方案1支路2-4和支路6-LP5扰动的概率密度函数对负荷节点LP4上用户造成的故障										
系数	E_1	λ_0	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	居民用户 故障概率	商业用户 故障概率	工业用户 故障概率
支路2-4	0.326 4	1.083 0	-2.578 4	-2.406 2	29.086 0	38.237 4	-185.704 6	0.302 8	0.411 8	0.386 9
支路6-LP5	0.038 4	3.230 4	-25.158 9	-7.508 9	0.608 8	-14.221 6	11.004 6	3.3E-06	8.6E-05	0.002 2

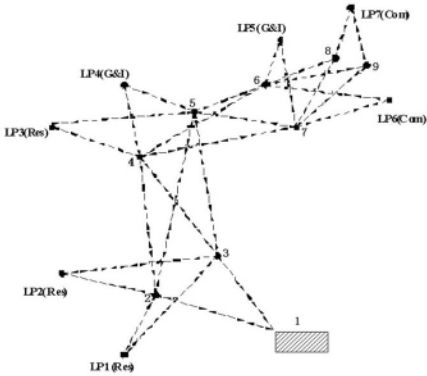


图5 RBT Bus2 配电系统馈线图

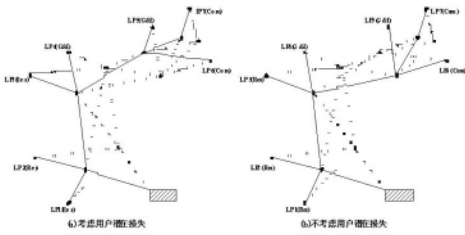


图6 优化网络结构图

别代表居民、政府和商业、工业用户的典型设备,并假设各用户与设备相互独立。由图5及用户信息可知,各负荷节点的类型各不相同,住宅用户所需容量较少,单次故障对其的影响最小,但其分布数量却最为庞大。从总体上看住宅用户的间接损失也是个不小的数目。相对而言,工业用户则更为集中,对单次故障概率也更为敏感。因此可以发现,如何合理地选择用户接入点是用户友好配电网接下来需要考虑的问题。

由表2、表3可知:

(1) 对于不同规划方案,拓扑结构影响会负荷节点的故障概率密度,导致不同的用户故障概率。以表2中结果为例,同一用户因暂降引起的故障概率相差15%以上,说明不同用户的满意度不同。

(2) 对于辐射型配电网,系统暂降严重性有单调性,如表3。负荷点处的严重暂降多起源于系统上游以及周边节点,下游节点的影响可忽略,因此,用户满

意度与用户接入点的位置有关,说明合理的拓扑结构是规划用户友好配电系统的关键指标。

(3) 对于不同类型的用户,其设备电压耐受能力不同,同一节点处不同用户对同一电压暂降的兼容性不相同,这表明,在进行配网规划时,因充分考虑可能接入的用户设备的类型和特性。

结合系统元件的可靠性参数^[24],两种不同方案下的费用计算结果如表4。

表4 RBT Bus2 配电系统馈线规划结果			
规划结果		方案1	方案2
线路投资年费用/万元		4.861 5	4.861 5
年运行费用	年网损费用	1.594 6	1.595 7
/万元	年维护费	0.546 3	0.546 3
年用户损失	直接损失	8.768 9	8.684 8
/万元	间接损失	39.926 7	42.571 6
年综合费用合计/万元		48.696 6	51.256 4

注:表中费用未包括变电站投资

对于方案1和方案2,两者均能满足负荷点的用电需求,只在馈线构建上略有不同,扩建线路的投资费用基本相同。但两方案的间接损失分别为39.92万元和42.5716万元,是该系统规划中不可忽略的部分。同时,计入用户间接损失后,所得到的优化方案结果是不同的。虽然方案1的网损、投资及折旧维护这三者的费用之和较方案2的费用高,但该网络减少了用户故障次数,降低了用户损失。可见,该规划结果更有针对性,间接损失大的用户将能够获得更高的电能质量,提高了全系统中用户满意度。

6 结 论

(1) 以上提出了实际中可行的、正确的用户友好配电网的仿真模型。通过间接损失指标搭建了配电网结构与用户间更为直接的联系,将智能电网的用户互动特性真正地体现到工程运用中,迈出了用户友好

智能配电网的第一步。

(2) 考虑了配电系统中各类用户经济损失的不确定性,通过选择具备用户设备耐受能力与系统扰动最佳兼容性的规划方案,能直观地反映出用户对系统的满意度。该配电网规划方法适用于任何规模的辐射网和环网。

(3) 国内外大量地投诉都与配电系统网架结构不合理而导致的用户经济损失有关。仿真结果也表明了考虑用户满意度的必要性。如何进一步找到合理的补偿装置以及用户的最佳接入点,提高系统抗灾性,是值得更深入研究的重要课题。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Noreen Parks. Energy Efficiency and the Smart Grid [J]. Environmental Science & Technology ,2009 ,43(9) : 2999 -3000.
- [3] Bob Saint. Rural Distribution System Planning using Smart Grid Technologies [C]. 2009 IEEE Rural Electric Power Conference(REPC 09) ,Fort Collins ,Colorado ,USA 2009: U57 - U64.
- [4] The National Energy Technology Laboratory for the U. S. Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. A Systems View of the Modern Grid [R]. Office of Electricity Delivery and Energy Reliability , USA 2007.
- [5] Clark W. Gellings ,P. E. The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response [M]. New York: Fairmont Press 2009.
- [6] 肖先勇. 电力市场营销原理 [M]. 北京: 中国电力出版社 2005: 16 - 22.
- [7] The institute of electrical and Electronics Engineers , Inc. IEEE Standard 1346 - 1998 ,IEEE Recommend Practice Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment [S]. New York ,NY 10017 - 2394 ,1998.
- [8] Gupta C P ,Milanovic J V. Probabilistic Methods for Counting Equipment Trips Due to Voltage Sags [C]. 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems ,Stockholm ,Sweden 2006.
- [9] 肖先勇 杨洪耕 陈武 等. 敏感设备电压暂降敏感度的模糊随机评估[J]. 中国电机工程学报 2009 ,29(34) :

- [10] 肖先勇 陈武 杨洪耕. 敏感设备电压暂降故障水平的多不确定性评估 [J]. 中国电机工程学报 ,2010 ,30(10) : 36 - 42
- [11] 肖先勇 陈卫东 杨洪耕 等. 以用户满意度区间数为测度的电压暂降频次评估 [J]. 中国电机工程学报 2010 ,30(16) : 104 - 110.
- [12] 陶顺 肖湘宁 刘晓鹃. 电压暂降对配电系统可靠性影响及其评估指标的研究 [J]. 中国电机工程学报 2005 ,25(11) : 63 - 69.
- [13] Cheng - Chieh Shen ,Chan - Nan Lu. A Voltage Sag Index Considering Compatibility Between Equipment and Supply [J]. IEEE Trans on Power Delivery 2007 22(2) : 996 - 1002.
- [14] 王宾 潘彦存 徐丙垠. 配电系统电压跌落问题的分析 [J]. 电网技术 2004 28(2) : 56 - 59.
- [15] 范明天 张祖平 岳宗斌. 配电网规划与设计 [M]. 北京: 中国电力出版社 ,1999: 47 - 55.
- [16] 肖先勇. 电能质量及其控制技术(讲义) [M]. 成都: 智能电网四川省重点实验室 2009: 10 - 11.
- [17] M. T. Aung J. V. Milanovic. Stochastic Prediction of Voltage Sags by Considering the Probability of the Failure of the Protection System [J]. IEEE Trans on Power Delivery , 2006 21(1) : 322 - 329.
- [18] M. H. J. Bollen ,Fast Assessment Methods for Voltage Sags in Distribution System [J]. IEEE Trans on Industry Applications ,1996 32(6) : 1480 - 1487.
- [19] Juarez E E ,Hernandez A. An Analytical Approach for Stochastic Assessment of Balanced and Unbalanced Voltage Sags in Large Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery 2006 21(3) : 1493 - 1500.
- [20] 肖先勇 ,马超 ,李勇. 线路故障引起电压暂降的频次最大熵评估 [J]. 中国电机工程学报 ,2009 ,29(1) : 87 - 93.
- [21] Heine P Pohjanheimo P ,Lehtonen M ,Lakervi E. A Method for Estimating the Frequency and Cost of Voltage Sags [J]. IEEE Trans on Power systems 2002 17(2) : 290 - 296.
- [22] 肖先勇. 电力技术经济分析原理 [M]. 北京: 中国电力出版社 2010.
- [23] Tollefson G ,Billinton R ,Wacker G et al. A Canadian Customer Survey to Assess Power System Reliability Worth [J]. IEEE Trans on Power Systems ,1994 9(1) : 443 - 450.
- [24] S Jonnavithula R. Billinton. Minimum Cost Analysis of Feeder Routing in Distribution System Planning [J]. IEEE Trans on Power Delivery ,1996 11(4) : 1935 - 1940.

双馈风电机组低电压穿越能力的研究

李鹏程, 晁 勤

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘 要: 随着风电机组容量的逐年增大, 为减少大规模风电接入系统对电网的影响, 对风电提出了新要求, 即风电机组具有一定的低电压穿越能力。介绍了变速恒频双馈风电机组的基本结构, 建立了双馈风电机组动态数学模型。以 Matlab/Simulink 为仿真平台搭建了系统仿真模型, 结合风电场低电压穿越能力要求的规定, 针对不同电网电压跌落的情况下, 仿真研究了变速恒频风电机组的低电压穿越能力。结果表明: 双馈风电机组在电网电压跌落时满足继续并网运行的条件, 且为电网电压恢复提供了无功, 提供的无功功率大小与电网电压跌落程度有关。

关键词: 双馈风力发电机; 电压跌落; 低电压穿越能力; 仿真研究

Abstract: The installed capacity of wind power generating set is increasing yearly, in order to reduce the impact of a large-scale wind farm on power grid, the new regulations for wind power are proposed, that is, the wind power generating set has the ability of low voltage ride-through (LVRT). The basic structure of variable-speed constant-frequency wind power generating set is introduced and the dynamic mathematical model of doubly-fed wind power generating set is established. The simulation models are set up based on Matlab/Simulink. According to new regulations for the ability of LVRT of wind farm, the low voltage ride-through ability of variable-speed constant-frequency wind power generating set is studied under the different condition of voltage dip. The simulation results show that doubly-fed wind power generating set has met the new requirements in the case of voltage dip and can provide the reactive power which is decided by the amplitude of voltage dip.

Key words: doubly-fed wind power generator; voltage dip; low voltage ride-through (LVRT); simulation research

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)04-0036-04

0 引 言

由于风力发电具有较好的经济效益和社会效益, 使其发展受到世界各国的高度重视, 同时也使风电机组的并网特性成为热门研究^[1]。

目前, 风力发电技术大体分为恒速恒频和变速恒频风力发电机组。变速恒频的双馈风电机组能够实现定子有功功率和无功功率的解耦控制, 以及其优越的并网运行特性, 使得双馈风电机组成为当前风电机组中的主流机型。

随着风力发电规模和单机容量的不断扩大, 针对风电机组的并网运行要求也日益严格。目前许多标准规定要求风电机组具有一定的低电压穿越能力即电网电压跌落至一定范围时, 风电机组必须不间断并网运行, 因此研究风电机组低电压穿越能力意义重大。以往的多数关于低电压穿越能力的研究都集中于

联络线发生故障时电压恢复能力的分析^[2,3], 文献[4]理论上阐述了提高风电机组低电压穿越能力的措施。根据变速恒频双馈风电机组的特性, 在 $d-q$ 坐标系下, 建立了变速恒频风电机组的数学模型, 并以 Matlab/Simulink 为仿真平台搭建了机组系统的仿真模块, 结合新的风电场低电压穿越能力要求的规定, 针对不同电网电压跌落的情况下, 仿真研究了变速恒频双馈风电机组的低电压穿越能力, 仿真结果为达坂城新一期的风电机组并网运行提供了理论依据。

1 双馈风电机组的结构与数学模型

1.1 双馈风电机组的控制结构

基于双馈发电机的风电机组主要包括风力机、绕线式感应电机、变频器和控制环节, 其定子绕组直接接入电网, 转子绕组采用三相对称绕组, 经背靠背的 PWM 变频器与电网相连, 为发电机提供交流励磁。其中网侧变流器的控制目的是满足电流波形和功率因数的要求, 保证直流电压恒定; 转子侧变流器的主

基金项目: 国家自然科学基金项目(51067009)、新疆教育厅重点项目(XJEDU2009I04)、新疆自然科学基金项目(2010211A10)

要任务是调节有功功率,实现最大风能捕获,同时为转子侧回路提供励磁,调节定子无功功率,其结构示意图见图 1。

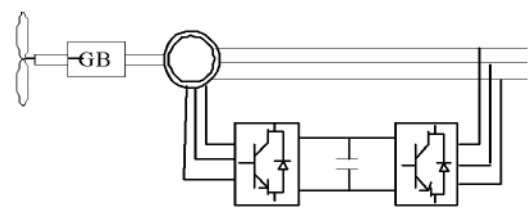


图 1 双馈风电机组结构示意图

1.2 双馈风电机组的数学模型

1.2.1 风力机的数学模型

风力机通过叶片捕获风能,将风能转换为作用在轮毂上的机械转矩,风速与转矩之间的关系可表示为^[5]

$$T_M = \frac{1}{2} \rho A C_p \frac{v_w}{\omega} \frac{\omega_N}{P_N} \times 10^3 \tag{1}$$

式中, T_M 为风机叶片的转矩,p.u.; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; C_p 为风机功率系数; A 为风机叶片扫过的面积, m^2 ; v_w 为作用于风机的风速, m/s ; ω_N 为风力机额定机械角速度, rad/s ; P_N 为风力机的额定功率,MW。

发电机转轴上的机械转矩 T_m 与发电机的电磁转矩 T_e 共同作用调节转子转速,设 J 为惯性时间常数,则

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_M - T_e \tag{2}$$

从轮毂到发电机转子之间的联轴器和齿轮用一阶惯性环节来描述^[6],即

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{T_d} (T_M - T_m) \tag{3}$$

风电机组的电磁转矩 T_e 与机端电压 U 的平方成正比^[7],则方程式为

$$T_e = K s U^2 \tag{4}$$

式中, K 为与机型有关的常数; s 为滑差。

1.2.2 双馈发电机的暂态数学模型

选择以 $d-q$ 同步旋转坐标系建立异步发电机的状态方程式^[9]。

$$\begin{aligned} u_{ds} &= -R_s i_{ds} + \omega_s \psi_{qs} - \frac{1}{\omega_{base}} \frac{d}{dt} \psi_{ds} \\ u_{qs} &= -R_s i_{qs} - \omega_s \psi_{ds} - \frac{1}{\omega_{base}} \frac{d}{dt} \psi_{qs} \\ u_{dr} &= -R_r i_{dr} + s \omega_s \psi_{qr} - \frac{1}{\omega_{base}} \frac{d}{dt} \psi_{dr} \\ u_{qr} &= -R_r i_{qr} - s \omega_s \psi_{dr} - \frac{1}{\omega_{base}} \frac{d}{dt} \psi_{qr} \end{aligned} \tag{5}$$

其中,

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= X_s i_{ds} + X_m i_{dr} \\ \psi_{qs} &= X_s i_{qs} + X_m i_{qr} \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \psi_{dr} &= X_r i_{dr} + X_m i_{ds} \\ \psi_{qr} &= X_r i_{qr} + X_m i_{qs} \end{aligned}$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_g}{\omega_s} \tag{7}$$

其中 ψ_{ds} 、 ψ_{qs} 表示定子磁链; ψ_{dr} 、 ψ_{qr} 表示转子磁链; u_{ds} 、 u_{qs} 为定子电压; u_{dr} 、 u_{qr} 为转子电压; i_{ds} 、 i_{qs} 表示定子电流; i_{dr} 、 i_{qr} 为转子电流; s 表示转差率; ω_s 为转子转速; ω_g 为同步转速; ω_{base} 为基频;电机参数 X_s 、 R_s 、 X_m 、 X_r 、 R_r 分别表示定子电抗和电阻、互感电抗和转子电抗、电阻。

2 低电压穿越能力

风电机组的低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)功能就是指机组在端电压降低到一定值的情况下不脱离电网而继续并网运行,甚至还可以为电网提供一定的无功以帮助电网电压恢复的能力。低电压穿越的提出主要是基于有功功率平衡的考虑,但对局部无功平衡也有好处。LVRT功能可躲过保护动作时间,故障切除后恢复正常运行,可大大减少风电机组在故障时反复并网次数,减少对电网的冲击,图 2 给出了风机并网的规程^[5]。

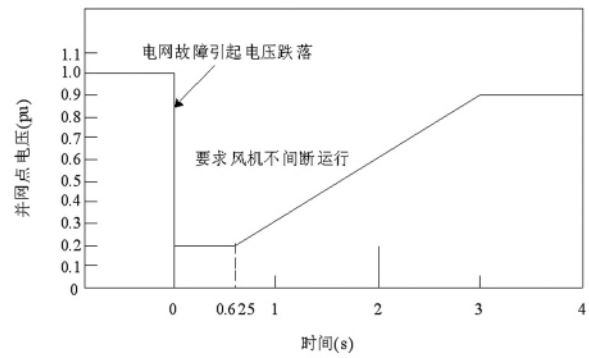


图 2 风电机组 LVRT 运行曲线

3 仿真算例

3.1 仿真算例

采用的双馈风电机组的参数如下:风机的额定容量 1 500 kW,额定电压 690 V,风力机叶片半径 $R = 30 \text{ m}$,发电机的转子电阻 $R_r = 0.0073 \text{ p.u.}$,定子电阻 $R_s = 0.0076 \text{ p.u.}$,定子电抗 $X_s = 0.1248 \text{ p.u.}$,转

子电抗 $X_r = 0.0884$ p. u. , 发电机转动部分惯性时间常数 $T_j = 7.1$ 极对数 $p = 3$ 。含双馈风电机组的仿真示意图见图3。

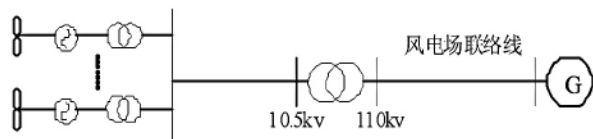


图3 风电机组接入系统示意图

3.2 运行特性

仿真中双馈机组稳定运行时基本风速为 8 m/s , 在 5 s 时出现风速为 14 m/s 的阵风干扰 , 持续在风速为 14 m/s 下稳定运行 , 仿真结果见图4。

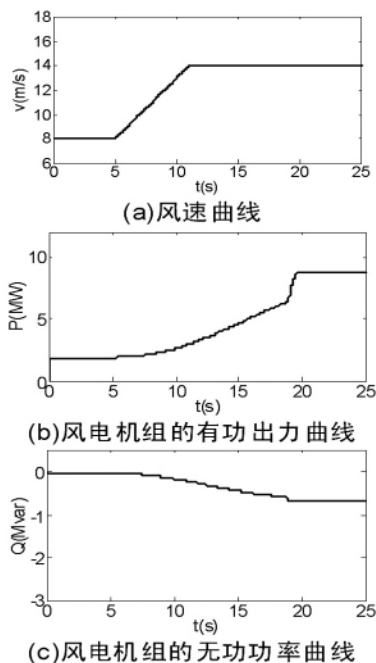


图4 双馈风电机组的运行特性曲线

仿真结果表明: 随着风速的变化 , 其有功出力跟随风速的变化进行调节 , 使得变速恒频的风力发电机组实现了最大风能捕获 , 无功功率保持在0左右 , 即保持功率因数为1 , 实现了双馈风电机组的有功和无功的解耦控制 , 也验证了所建模型的合理性。

4 双馈机组的低电压穿越能力的研究

4.1 20% - 3 s 电压跌落

电网电压跌落20%持续时间为3 s时 , 双馈风电机组的端电压、有功功率和无功功率变化曲线如图5所示。

仿真结果如图5表明: 当电网电压跌落20%持续时间3 s时 , 双馈风机端口电压略有所下降保持在

0.9 p. u. 以上 , 电压跌落期间风机有功功率为0 , 并向电网提供了无功功率 6.5 Mvar , 风机能够不脱网继续运行且为发出的无功功率有利于电网电压恢复。

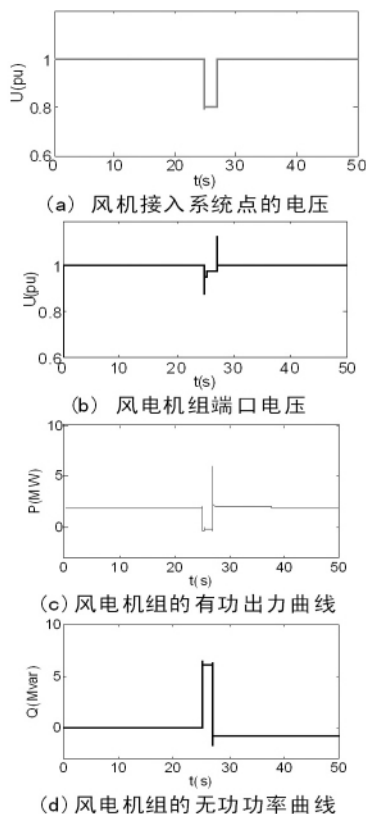


图5 20% - 3 s 电压跌落时风电机组的参数变化曲线

4.2 50% - 1 s 电压跌落

电网电压跌落50%持续时间为1 s时 , 双馈风电机组的端电压、有功功率和无功功率变化曲线如图6所示。

仿真结果表明: 当电网电压跌落5%持续时间1 s时 , 双馈风机端口电压略有所下降保持在 0.7 p. u. 以上 , 电压跌落期间风机有功功率为0 , 并向电网提供了无功功率 5 Mvar 。电网电压跌落期间 , 风机能够不脱网继续运行 , 电压跌落消失后风机端电压能恢复至稳定运行的电压水平。

4.3 80% - 0.625 s 电压跌落

在电网电压要求中跌落最为严重的情况下(电网跌落至 0.2 p. u. , 持续时间 625 ms) , 双馈风电机组的端电压、有功功率和无功功率变化曲线如图7所示。

由图7仿真结果可知: 在电网电压跌落最严重的情况下 , 风机发出的无功功率为 4.5 Mvar , 待电网电压恢复至额定值时 , 风电机组能够不脱网继续并网运行 , 风机端电压恢复至稳定运行前电压水平。

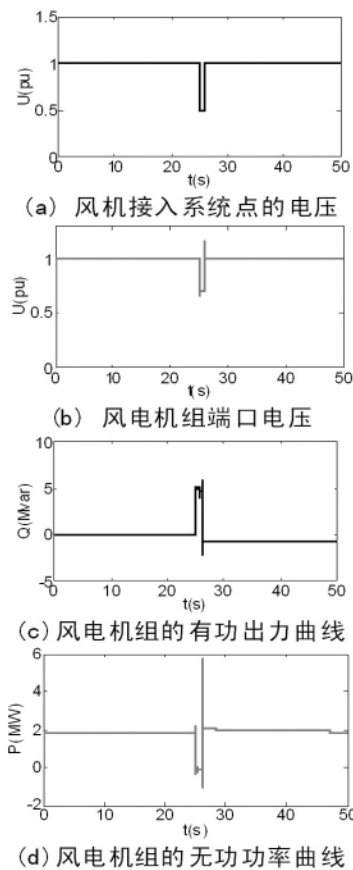


图6 20% - 3 s 电压跌落时风电机组的参数变化曲线

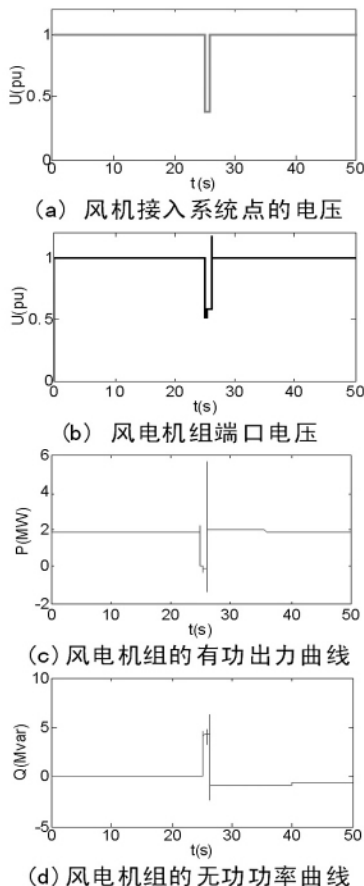


图7 80% - 625 ms 电压跌落时风电机组的参数变化曲线

5 结 论

基于 Matlab/Simulink 建立了含双馈式异步风力发电机的仿真模型,参照风电场低电压穿越能力要求的规定,对双馈风电机组的低电压穿越能力进行了仿真研究。仿真结果表明:双馈风电机组在电网电压跌落时能够继续并网运行,待电压跌落消失后能够恢复稳定运行,满足新的风电并网标准。电压跌落期间,风机发出一定无功功率,其无功功率的大小与电网电压跌落程度有关,也为电网电压恢复提供了无功支撑。

参考文献

- [1] 雷亚洲. 与风电并网的有关课题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84 - 89.
- [2] 闫广新, 晁勤, 刘新刚, 等. 并网型双馈风电机组动态稳定性仿真[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 63 - 66.
- [3] 邢文琦, 晁勤. 不同风电机组的低电压穿越能力分析[J]. 华东电力, 2008, 36(12): 21 - 25.
- [4] 操瑞发, 朱武, 涂祥寸, 等. 双馈式风力发电系统低电压穿越技术分析[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 72 - 76.
- [5] 关宏亮, 赵海翔, 王伟胜, 等. 风电机组的低电压穿越功能及其应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 173 - 177.
- [6] 文玉玲, 晁勤, 吐尔逊·依布拉音, 等. 关于风电场适应性继电保护的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 37(5): 47 - 51.
- [7] 文玉玲, 晁勤, 吐尔逊·依布拉音. 风电场对电网继电保护的影响[J]. 电网技术, 2007, 32(14): 15 - 18.
- [8] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 101 - 105.
- [9] Daniel J T, Andrew G, Jawad M K. Fixed - speed Wind - generator and Wind - park Modeling for Transient Stability Studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 1911 - 1917.

作者简介:

李鹏程(1984),男,硕士研究生,研究方向为风力发电及其并网技术;

晁勤(1959),女,博士生导师,研究方向为电力系统稳定及风电并网技术。

(收稿日期: 2011 - 04 - 06)

连锁故障引发的电网灾难性事故风险评估

何焱¹, 冯靖², 催振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: 根据结构状态与运行状态耦合关系, 建立考虑故障直接风险和潜在风险的综合风险指标, 评估电网灾难性事件。从故障传播数学特征出发, 比较本层故障综合风险与下一层故障综合风险指标, 将故障传播过程分为累积效应阶段和连锁效应阶段, 对各阶段的故障事件进行综合风险排序, 更好地评估可能发生的灾难性事故风险。对 IEEE-9 节点系统和某地区电网进行仿真, 结果表明该方法具有更高的完备性和有效性。

关键词: 灾难性事件; 事故序列; 综合风险指标; 累积阶段; 连锁阶段

Abstract: For the highly coupled relationship between network topology and operating condition in the physical properties of power grid, a new method based on uncertainty risk assessment theory is proposed. The proposed method takes static direct risk and dynamic potential risk into account to work up the comprehensive risk index. Comparing self-layer comprehensive risk index with next layer comprehensive risk index, the failure propagation process is divided into cumulative effects stage and cascade effects stage. Then, the failure events are sorted by the comprehensive risk index, and it helps the operators and dispatchers to prevent power grid changing from cumulative effects stage to cascade effects stage. The simulation analyses for IEEE-9 bus system and an area grid in Western China have shown that the proposed method is more complete and effective during assessing the dynamic process of power grid catastrophic events.

Key words: catastrophic event; event sequence; integrated risk index; cumulative stage; cascade stage

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)04-0040-05

0 引言

灾难性事故评估是电网防灾预灾的重要课题。电网大多能镇定 $N-1$ 故障, 一般不会演化为连锁故障^[1], 但由于元件耐受水平不确定^[2], 故障物理形式上的潮流转移使数学形式上的风险不断累积, 使电网进入临界状态, 直至连锁效应阶段^[3], 就可能引发灾难性事故, 国内外对此开展了大量研究。

文献[4]建立了机组无功出力极限变化与电压崩溃联系模型, J. Dobson 提出了 OPA、CASCAD^[5] 等模型, 但未从整体上揭示规律; 文献[6]从结构状态识别脆弱线路; 文献[7]将其发展为权重网络; 文献[8]发展为有向有权网络, 但忽略了运行状态; 文献[9]提出状态脆弱性和结构脆弱性概念与评估模型, 但对不确定性考虑不足; 文献[10]用数学特征评估故障传播。总体上, 现有方法考虑了静态影响, 对动态影响尚需进一步研究。

元件故障使电网状态偏离, 状态漂移累积的潜在风险是其数学表现。电网灾难性事件在时域上是连

续的, 但可分为累积和连锁两阶段。基于现有研究, 这里基于不确定风险理论^[11], 结合电网结构状态和运行状态, 建立了由静态直接风险和动态潜在风险构成的综合风险指标, 揭示出故障风险传播数学规律。以 IEEE-9 节点系统和某地区电网为研究对象, 验证了后提出的方法。

1 连锁故障动态风险评估

灾难性事件过程可分累积效应和连锁效应两阶段^[3]。在累积阶段, 元件故障带来直接影响的同时, 以潮流转移形式在其余元件上累积故障风险。由于电网的镇定作用, 在风险累积阶段, 传播到下层故障事件的风险小于本层故障事件风险, 但一旦漂移到临界状态, 若仍存在累积风险, 将进入连锁效益阶段, 累积风险释放, 演变为灾难性事件。因此, 分析累积效应和连锁效应至关重要。

1.1 动态潜在风险

单一元件故障能在满足 $N-1$ 准则的电网中衍变为灾难性事件, 是由于关键元件的动态响应造成系

统下一时刻的质变引起的。因此,需分析动态潜在风险。

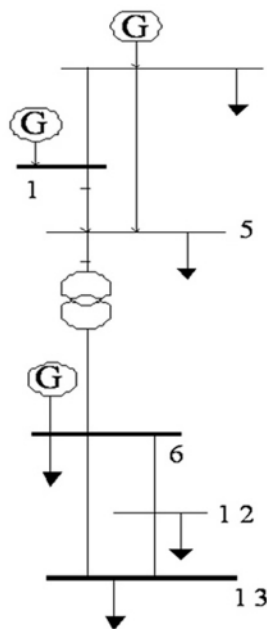


图1 IEEE-14节点系统的左半岛

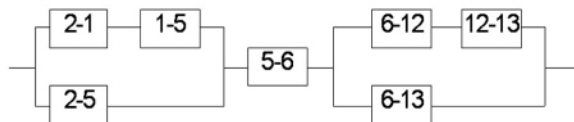


图2 IEEE-14节点系统左半岛的逻辑图

以图1的IEEE-14节点系统左半岛为例,取节点1、2、5、6、12、13。其逻辑关系如图2^[12]。假设Line₁₋₂故障,与之关联的Line₂₋₅暴露出极大故障隐患。若Line₂₋₅也故障,平衡节点2必须通过其他路径才能与左半岛联通,这对系统功能实现影响大,会出现状态偏离。虽然节点1和2为发电机节点,没有负荷,两者间线路故障似乎无足轻重,但其关联元件的行为极其关键。故而,对于电网中故障的风险评估,除了评估本身直接静态风险,还必须计及关联元件的潜在风险。

1.2 综合风险评估

学者们已达成共识,对连锁故障影响程度的评估选择“blackout size”(如停电造成的掉负荷数或影响的地域面积)^[13]。这里用负荷损失指标作影响程度指标。电网物理结构复杂,拓扑结构决定运行状态,同时受不等式约束,运行状态也会影响结构状态。电网功能实现程度表现为运行状态偏离程度,偏离越远,运行风险就越大,因此,结构状态与运行状态是评估的一对关键因素^[14]。

电网满足“N-1”原则,但2003年美加大停电是在“N-4”后引起大停电的,说明经历了累积阶段后风险才释放出来。累积阶段累积的是动态潜在风险。在灾难性事件发展过程,静态直接风险反映故障危害性,动态潜在风险反映潜在风险,可见,动态风险对灾难性事件的发展有主导作用,需综合考虑直接风险和潜在风险。

1.2.1 静态直接风险

以图1为例,当Line₁₋₂退出后,导致状态偏离,系统负荷损失指标为Loss₁₋₂,反映故障自身导致既定功能不能实现而带来的直接风险,可表示为

$$Risk - direct_{1-2} = Cr_{1-2} \cdot Loss_{1-2} \quad (1)$$

式中,Cr₁₋₂为Line₁₋₂故障可信性测度。

除直接风险外,灾难性事件发展是动态的,故障后,由于结构联接牵动的关联元件状态变化产生的潜在风险开始累积,在累积风险中,若又一故障事件出现,立即产生下一层潜在风险继续累积,直到发生连锁故障事件。

1.2.2 动态潜在风险

IEEE-14节点系统中,若Line₁₋₂故障,造成线路功率越限、节点电压越限,都会对元件映射出一定的故障可能性,这正是故障元件结构联接关系引起的潜在风险。以负荷损失作严重性指标,可得潜在风险测度。

$$Risk - potential_{1-2} = \sum_{n=1}^j (Cr_n \cdot Loss_n) \quad (2)$$

其中,Cr_n为Line₁₋₂退出后元件映射出的故障可信性测度;Loss_n为负荷损失指标。

1.2.3 综合风险

故障直接风险和潜在风险是其危害性的两方面,忽略任一方面都不能作出清晰解释。综合考虑电网灾难事故的动态过程,可对电网灾难性事故作出预测,可采用综合风险测度得

$$Risk - total_{now} = Risk - direct + Risk - potential \quad (3)$$

式(3)中,Risk - direct为直接风险,Risk - potential为潜在风险。以按综合风险对连锁故障序列排序,可更好刻画故障序列在灾难性事件过程中的风险。

1.3 累积效应和连锁效应阶段

元件故障退出后的风险会牵动下一层故障发生,如式(4)。如果风险传递关系呈递减趋势,电网能镇定风险;若呈递增趋势,当运行于临界状态时,将引起连锁故障事件。

电网对故障有一定镇定作用,一定程度的故障不会自持地传播,电网处于累积效应阶段,其数学特征为故障引发的风险小于触发下层故障事件而带来的风险。但随着事件发展,当漂移到临界状态时,电网会转入连锁效应阶段,已累积风险释放,数学特征为故障事件引发的风险大于触发下层故障事件而带来的风险。

$$Risk-total_{next} = \sum_{k=1}^n (\frac{Cr_k}{CR} \cdot Loss_k)$$

(4)

$$Risk-total_{now} < Risk-total_{next}$$

(5)

$$Risk-total_{now} > Risk-total_{next}$$

(6)

式中, Cr_k 故障为引发下一层元件 k 故障的可信性测度, CR 为故障引发下一层元件故障的可信性测度和, $Risk-total_{now}$ 为本层故障的综合风险指标, $Risk-total_{next}$ 为以下层元件故障综合风险指标。

2 灾难性事件评估

2.1 评估模型

为减小灾难性事件风险,需建立以预警决策系统为核心的应急管理平台^[15]。通过离线分析建立预警决策性事故序列库,在实际故障时,仅需简单地辨识事故序列。灾难性事件源于 $N-1$ 事故,初始事件发生后,会触发一系列反应,当电网漂移到距稳定状态不远时,处于风险累积效应阶段,该过程缓慢,当风险累积到临界状态时,如果继续累积,风险就会释放出来,进入连锁效应阶段。

以 $N-1$ 事故作灾难性事件的初始事件,以隐性故障模式刻画故障传播机理。根据本层故障引发的风险与下层故障事件风险相比较,将故障发展过程分为累积效应阶段和连锁效应阶段。在累积效应阶段,筛选出最严重的 Q 组事件作下层仿真的触发事件,当系统潮流不收敛或丢失负荷超过 20% 时^[16] 仿真停止。

2.2 评估算法

电网灾难性事件动态综合风险评估流程如下。

1) 读取拓扑结构和电气运行的初始参数,进行初始状态的潮流计算,得出元件承受扰动的耐受区间。

2) 计算各 $N-1$ 故障的综合风险指标,并对其降

序排序。

3) 按排序结果,依次搜索各事件对应的下一层暴露元件,并按其修改结构参数。

4) 搜索拓扑结构是否形成孤岛,若“是”,准备进行多区域潮流计算;若“否”,进行故障后潮流计算。由潮流计算结果得出维持故障后拓扑结构的可信性测度,按式(1)得到故障事件的直接风险,按式(2)得到故障事件牵动的潜在风险,最终得出故障事件的综合风险指标式(3)。

5) 将本层故障事件的综合风险与上一层故障事件的综合风险相比较,若式(5)成立,按照风险降序的原则,将事件保存到连锁效应阶段;若式(6)成立,按照风险降序的原则,将故障事件保存到累积效应阶段,并从本层累积效应阶段筛选出综合风险最高的前 Q 组事件。

6) 判定系统负荷损失时是否小于 20%,若“是”,转入步骤 3);若“否”,停止仿真。判定是否到达最大搜索层数,若“是”,则结束仿真;若“否”,则转入步骤 3)。

3 仿真

3.1 累积效应阶段风险排序

对 IEEE-9 节点系统进行仿真,如图 3,并与传统方法比较。传统方法将各类严重度指标加权得整体影响严重度,权重系数如表 1。用该方法对 $N-1$ 事故进行分析,结果与传统风险评估法 1、2 进行比较,如表 2。

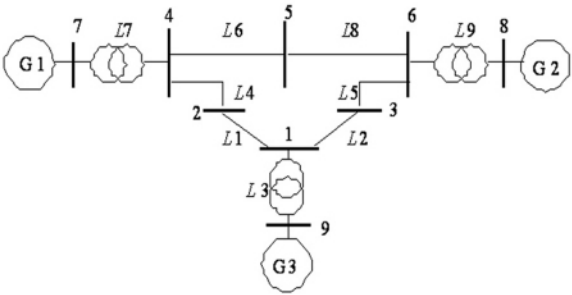


图 3 IEEE-9 节点系统

表 1 传统风险评估方法权系数

方法	Sev ₁	Sev ₂	Sev ₃	Sev ₄	Sev ₅
1	0.500 0	0.200 0	0.200 0	0.050 0	0.050 0
2	0.000 2	0.999 5	0.000 1	0.000 1	0.000 1

表 2 N-1 事故排序

事故序列号	所提方法	方法 1	方法 2
1	L7	L7	L9
2	L9	L6	L1
3	L1	L4	L7
4	L5	L5	L6
5	L6	L1	L5
6	L2	L9	L8
7	L4	L3	L4
8	L8	L2	L2
9	L3	L8	L3

可见,本方法与传统方法有较多相似处,特别对于最严重和最不严重 N-1 故障的认同度高。当 L7 和 L9 故障后,导致 G1、G2 与系统解裂造成严重影响,与工程实际相符。

3.2 连锁效应阶段风险排序

后续连锁故障序列的评估以 N-1 事故为起始事件,从起始事件中筛选出风险最大的 q 组事件,送入下一轮连锁事件序列的搜索中,以此类推,直到搜索至最大搜索深度为止。由所提方法得出的后续连锁故障事件如表 3。

表 3 连锁效应阶段的故障序列排序

层数	2	3	4
连锁故障序列	(L5 , L2)	(L7 L6 L8)	(L4 , L1 , L3 , L2)
	(L4 , L1)	(L4 L1 L3)	(L1 , L4 , L6 L8)
	(L1 , L4)	(L7 L6 L4)	(L4 , L1 , L2 , L5)
	(L6 , L8)	(L4 L1 L2)	(L4 , L1 , L2 , L3)
	(L2 , L5)	(L1 L4 L7)	(L7 , L6 , L8 , L5)
	(L8 , L6)	(L1 L4 L6)	(L7 , L6 , L8 , L9)
	(L7 , L6)	(L8 L6 L7)	(L7 , L6 , L4 , L1)

3.3 实际电网累积阶段风险排序

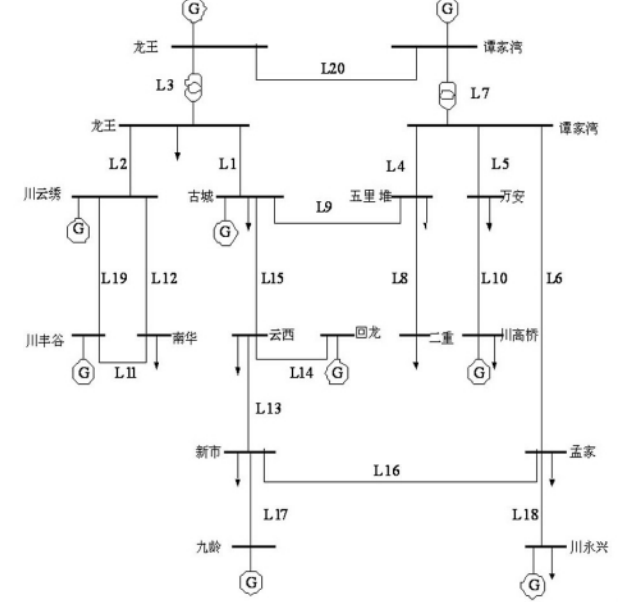


图 4 丰水期某地区电网的节点图

以图 4 实际系统为例,系统处于负荷高峰时刻,能考验该电网接纳负荷的能力,电网输变电设备均投入运行。建模时将电网中 500 kV 和 220 kV 站等效为节点,110 kV 及以下的变电站等效为对应 220 kV 节点的负荷。

以 N-1 事故风险排序作为连锁性事故的起始事故,进行事故风险排序,结果如下。

表 4 丰水期 N-1 事故风险排序

事故序列号	丰水期运行方式	
	丰大	丰小
1	L14	L8
2	L8	L2
3	L17	L7
4	L7	L13
5	L13	L4
6	L3	L1
7	L4	L3
8	L18	L5
9	L1	L9
10	L20	L10
11	L6	L12
12	L5	L19
13	L15	L11
14	L10	L16
15	L11	L6
16	L12	L20
17	L16	L15
18	L9	L14
19	L19	L17
20	L2	L18

表 5 丰水期累积效应阶段事故风险排序

方式	丰大		丰小	
层数	2	3	2	3
连锁故障序列	(L7 L20)	(L3 L20 L7)	(L8 L4)	(L7 L20 L3)
	(L3 L20)	(L17 L16 L18)	(L7 L20)	(L8 L9 L4)
	(L14 L13)	(L14 L13 L17)	(L3 L20)	(L7 L4 L9)
	(L7 L4)	(L8 L4 L7)	(L2 L1)	(L4 L9 L15)
	(L17 L13)	(L17 L13 L14)	(L4 L9)	(L2 L19 L11)
	(L8 L4)	(L7 L4 L9)	(L5 L4)	(L1 L3 L20)
	(L18 L6)	(L18 L6 L7)	(L14 L15)	(L5 L7 L20)
	(L1 L3)	(L13 L16 L17)	(L9 L8)	(L10 L5 L4)
	(L13 L15)	(L4 L7 L20)	(L10 L5)	(L13 L14 L15)
	(L6 L4)	(L1 L3 L20)	(L11 L12)	(L16 L17 L13)

3.4 实际电网连锁阶段风险排序

根据 $N-1$ 风险排序结果,对系统崩溃序列进行评估,如表 6 可见,结果与实际相符。

表 6 丰水期的连锁效应阶段故障序列排序

仿真 层数	连锁效应阶段	
	丰大	丰小
4	(L9 , L4 , L5 , L10)	(L4 , L9 L1 , L15)
	(L10 , L5 , L4 , L9)	(L9 , L4 , L5 , L10)
		(L10 L5 L4 , L9)
5	(L4 , L9 , L1 , L2 , L3)	(L4 , L9 L1 , L3 , L2)
	(L9 , L4 , L6 , L5 , L10)	(L4 , L8 , L9 , L1 , L15)
	(L9 , L4 , L7 , L5 , L10)	(L9 , L4 , L6 , L5 , L10)
	(L9 , L8 , L4 , L5 , L10)	(L9 , L8 , L4 , L5 , L10)
	(L9 L4 , L6 , L16 , L18)	(L9 , L4 , L7 , L5 , L10)
	(L4 L9 L15 L14 , L13)	(L10 , L5 , L4 L8 , L9)
	(L15 L14 L13 L17 L16)	(L9 L4 , L6 , L16 , L18)
	(L14 L15 L13 L17 L16)	
	(L4 L8 L9 L1 , L2 , L3)	(L8 L4 L9 L1 L2 , L3)
	(L9 L4 L6 L7 L5 L10)	(L9 L4 L6 L7 L5 L10)
	(L9 L4 L7 L6 L5 L10)	(L4 L9 L1 L2 L12 L11)
	(L4 L9 L15 L1 L3 L2)	(L9 L4 L5 L6 L16 L13)
6	(L4 L9 L1 L15 L14 L13)	(L9 L4 L5 L6 L16 L18)
	(L4 L8 L9 L15 L14 L13)	(L9 L4 L7 L6 L16 L18)
	(L9 L4 L6 L16 L17 L13)	(L9 L4 L6 L16 L17 L13)

4 结 语

虽然电网对 $N-1$ 故障具有镇定作用,但事故传播具有不确定性。在 $N-1$ 故障模式下,薄弱环节的隐性故障引发的风险不断累积,电网逐渐偏离稳定状态,但风险累积效应阶段是相对缓慢的,在此阶段可尽力阻止电网进入故障连锁效应阶段。由于基于结构状态和运行状态,评估由静态风险和动态风险组成的综合风险,根据故障传播数学属性提出了一种新的电网灾难性事故评估方法。对理论模型和实际模型的仿真证明,所提方法正确、合理,具有一定的工程应用价值。

参考文献

[1] 于会泉,刘文颖,温志伟,等. 基于线路集群的连锁故障概率分析模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10) : 29 - 33 61.

[2] 肖先勇,陈卫东,杨洪耕,等. 以用户满意度区间数为测度的电压暂降频次评估[J]. 中国电机工程学报, 2010,

30(16) : 104 - 110.

[3] 丁道齐. 复杂大电网安全性分析—智能电网的概念与实现[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 136 - 145, 221 - 223, 293 - 294.

[4] Overbye T J, Demarco C L. Voltage Security Enhancement Using Energy Based Sensitivities[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(3) : 1196 - 1202.

[5] Dobson I, Carreras B A, Lynch V E, et all. Estimating Failure Propagation in Models of Cascading Blackouts [C]. 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Ames, USA, 2004 : 641 - 646.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Kim J, Dobson I. Approximating a Loading - Dependent Cascading Failure Model With a Branching Process [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2010, 59(4) : 691 - 699.

[11] Liu Bao - ding, Uncertainty Theory [M]. Beijing: Uncertainty Theory Laboratory, 2010. <http://orsc.edu.cn/liu>.

[12] Daniele Codetta - Raiteri, Andrea Bobbio, Stefania Montani. A dynamic Bayesian Network Based Framework to Evaluate Cascading Effects in a Power Grid [J]. Engineering Application of Artificial Intelligence, In Press, Corrected Proof, 2010.

[13] Z. J. Bao, Y. J. Cao, G. Z. Wang and L. J. Ding. Analysis of Cascading Failure in Electric Grid Based on Power Flow Entropy [M]. Physics Letters A, 2009, 373(34) : 3032 - 3040.

[14] 韩祯祥. 电力系统稳定[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995: 147 - 151.

[15] 田世明,陈希,朱朝阳,等. 电力应急管理平台研究[J]. 电网技术, 2008, 32(1) : 26 - 30.

[16] 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.

(收稿日期: 2011 - 04 - 28)

住宅小区公用电网的谐波及治理

黄冰心

(南安市电力有限责任公司 福建 南安 362300)

摘 要: 随着各种计算机、电子设备等非线性负载的广泛使用,住宅小区公用电网的谐波污染日益严重,小区电网的电能质量问题越来越受到重视。该文对住宅小区各种谐波源进行了分析和讨论,总结了小区电网谐波电流的特点及谐波危害,最后给出了常用的住宅小区电网谐波治理、提高电能质量的方法。

关键词: 住宅小区电网; 谐波源; 谐波治理

Abstract: With the widely use of non-linear load, such as various computers and electron devices, the harmonic pollution of utility power grid in residential district is becoming seriously. The various harmonic resources of residential district are analyzed and discussed. Then, the characteristics of harmonic current and the hazard of harmonic in the power grid of residential district are summarized. Finally, the common measures for eliminating harmonic and improving power quality in utility power grid of residential district are proposed.

Key words: power grid of residential district; harmonic resource; harmonic elimination

中图分类号: TM714 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)04-0045-03

0 引言

随着科学技术的发展和生活水平的不断提高,日常生活中人们使用的电气、电子设备越来越多,这些设备和装置的使用一方面对公用电网的电能质量(power quality)要求越来越高,要求“绿色”、“干净”的电能;另一方面很多电气和电子设备对于电网而言是非线性负载,电网中大量非线性负载的接入降低了电网的功率因数,使电网电压和电流波形发生畸变,影响供电质量。目前,建筑供用电系统产生的谐波已经成为城市公共电网的主要谐波污染源。

近年来,工业供电方面的电能质量问题已得到大量关注,各种谐波抑制措施和其他提高供电质量的措施被广泛应用。随着住宅小区公用电网中非线性负载使用数量的增加,住宅小区电网的电能质量问题也开始被重视。

在对住宅小区公用电网的谐波污染源进行了分析和讨论的基础上,总结了住宅小区谐波电流分布情况及由谐波引起的危害,最后给出了常用的谐波治理方法。

1 住宅小区电网的典型谐波源及谐波电流特点

住宅小区公用电网的负荷主要是各种家用电器,如电视机、各种节能灯、电冰箱、洗衣机、微波炉、电磁炉、计算机、激光打印机、充电器以及高层建筑中的空调压缩机、大型电梯等,这些电器中都含有非线性元件,当这些非线性元件接入电网中时,会在线路中产生谐波电流,从而引起电压波形畸变,影响电能质量。所以,人们日常生活中使用的各种家用电器对于电网而言都是谐波源。

住宅小区公用电网谐波电流分布情况有以下特点。

(1) 主要是奇次谐波电流,其中以低次3次、5次和7次谐波电流为主。

(2) 住宅小区公用电网的非线性负荷具有基波功率因数高、含谐波功率因数低的特点,如家用计算机的基波功率因数可达0.9,但是含谐波后功率因数只有0.5~0.6。

(3) 住宅小区公用电网的非线性负荷具有单个负荷用电容量小,但同时集中使用的概率大,导致电网总负荷量大,谐波电流叠加。所以,在晚间的用电高峰时期,谐波含量最高,白天处于低谷,谐波含量最低,也就是说公用电网中谐波电流每日波动较大。

(4) 随着住宅小区用电负荷的季节性波动,谐波

大小也随之变化,夏、冬季节用电负荷大,谐波含量高,春、秋季节负荷小,谐波含量也低。

近年来,建筑供用电系统的谐波日益严重,已经成为城市公共电网的主要谐波源。日本有关调查数据表明,电网谐波有 40% 来自于建筑用电系统。英国曾就谐波电流、对地泄露电流和电压扰动造成的计算机停机问题进行了统计,他们随机对 45 家公共事业、商业和工业用户进行了调查,结果表明谐波电流造成的公用电网内的停机事故频率最高,上述三类用户每年的事故报告在 12 次以上的超过 60%,每年至少一次事故的报告为 80% 以上。在国内,苏州供电公司苏州工业园区的苏都花园 2 号配电所在 2008 年 6 月 23 日 21:00 晚居民用电高峰时段对电网谐波进行了测试,测试数据表明电网中含有大量的谐波电流,主要为 3 次、5 次、7 次和 9 次,其畸变率分别为 19.5%、13.7%、6.7% 和 6.6%,电流总畸变率平均值达到 25%,最高达 30%。

以上的数据和分析表明,住宅小区公用电网的谐波污染已经非常严重,到了不得不治理的程度。

2 住宅小区电网谐波的危害

谐波污染是电网公害,谐波电压和电流在电网中的存在,将对电网本身以及由该电网供电的用户都造成很大影响。谐波的危害主要体现在以下几个方面。

(1) 使输电线路损耗增加,传输效率降低;当与电网的系统参数配合不恰当时,可能引起谐波电流的谐振和放大,将产生更大的损耗。

(2) 谐波电压可使电力变压器的磁滞损耗和涡流损耗增加,变压器内的绝缘材料承受的电气应力增大;谐波电流使变压器损耗增加,谐波较大时可能使变压器局部过热、噪声增大,从而影响电网和供电一次设备的安全运行。

(3) 引起系统各类继电保护和自动装置误动作或拒动作。

(4) 对系统计量仪表产生影响,造成电能计量的误差。谐波的存在,一方面增加了电度表本身的误差;另一方面,谐波源负荷从系统中吸收基波功率,向系统送出谐波功率,而受害的用户既从系统中吸收基波功率,又从谐波源吸收无用的谐波功率,其后果是谐波源负荷用户少付电费,而受害的用户多付电费,

造成不公平交易。

(5) 住宅小区电网中大量的三次和三的倍数次谐波电流流过中性线,使中性线流过的电流大大增加,甚至可能超过相线的电流。如建筑电气线路设计时选用的中性线截面较小,则会使中性线严重过载而发热增加,严重时绝缘损坏,引起短路和火灾。

(6) 谐波会产生电磁干扰,影响通信系统,降低信号的传输质量,破坏信号的正常传递,甚至损坏通信设备。

3 住宅小区公用电网谐波标准

对于谐波电压,现行国家标准规定,380 V 电网谐波电压总畸变率不得大于 5%,其中奇次谐波电压含有率小于 4%,偶次谐波电压含有率小于 2%。

对于用户注入电网的谐波电流允许值的大小与电网容量和谐波电压标准有关。标准规定,分配给用户的谐波电流允许值应保证满足各级电网公共连接点处谐波电压在允许值范围内。而影响各级电网谐波电压的主要因素有:本级谐波源负荷所产生的谐波;上级电网谐波电压对本级的传递(即渗透);各谐波源同次谐波的相量合成。

关于谐波电流允许值可以采用以下的方法进行计算。

对于 380 V 系统,给定基准短路容量为 10 MVA,在已知电网的第 h 次谐波电压含有率以后,可得到电网中第 h 次谐波电流允许值的大小为

$$I_h = \frac{10S_k HRU_H}{\sqrt{3}U_N h} \quad (1)$$

其中 I_h 为电网第 h 次谐波电流允许值; S_k 为基准短路容量; HRU_H 为第 h 次谐波电压含有率允许值; U_N 为额定电压; h 为谐波次数。

对某一个用户来说,其谐波电流允许值为

$$I_{hi} = I_h (S_i/S_t)^{1/\alpha} \quad (2)$$

S_i 为第 i 个用户的协议用电容量; S_t 为公共连接点的供电设备(或线路)容量; α 为相位系数,按表 1 的数据取值。

表 1 相位系数取值表

h	3	5	7	11	13	其他
α	1.1	1.2	1.4	1.8	1.9	2

当公共连接点的短路容量为 S'_k ,与基准短路容

量 S_k 不相同, 谐波电流允许值 I_h 按式(3) 计算。

$$I'_h = I_h \times \frac{S'_k}{S_k} \quad (3)$$

4 常用的谐波治理措施

谐波治理的基本思路有两种: 一种是主动型谐波治理, 这种方式是对电力电子装置本身进行改造, 使其不产生谐波, 从根本上解决谐波问题, 但它仅适用于作为谐波源的电力电子装置; 另一种是被动型谐波治理, 在系统中谐波已经存在时采用这种方式, 即在系统中装设单独的谐波补偿装置来进行谐波治理, 所以这种方式可适用于各种情况。

4.1 主动型谐波治理措施

对于主动型谐波治理方式, 目前主要采用的方法有以下几种。

(1) 改进电力电子装置主电路的拓扑结构, 如采用由新型全控型器件 IGBT 等构成的 PWM 整流电路取代传统的由晶闸管作为主控元件的相控整流电路。

(2) 对于整流电路, 增加整流相数, 如采用十二脉波整流电路、十八脉波整流电路等。

(3) 限制变流装置的容量。

(4) 在电力电子装置中采用各种先进智能控制技术, 现代控制技术已广泛应用于电力电子装置中, 如无差拍控制技术、模糊控制、神经网络控制、滑模控制等。

值得注意的是, 以上这些措施虽然可以有效地减少电力电子装置所产生的谐波含量, 但由于它们的非线性, 谐波不可能全部消除, 所以电力电子装置中谐波总是存在的。

4.2 被动型谐波治理措施

对于被动型谐波治理方式, 常用的方法是安装无源电力滤波器 (passive power filter) 和有源电力滤波器 (active power filter)。

无源电力滤波器的基本工作原理是: 滤波器由电感、电容和电阻组成, 它为系统中的谐波电流提供一条低阻抗通道, 即滤波器对于谐波电流阻抗接近为零, 使谐波电流通过滤波器流出, 而不流入电网。只要合理设置滤波器中电感和电容的参数, 使滤波器的谐振次数为所需要滤除的谐波次数, 则该次谐波通过滤波器时被滤除, 系统中该次谐波被消除。无源滤波

器具有结构简单、技术成熟、设备投资较少、运行可靠性较高、维护方便、运行费用较低等特点, 得到了广泛应用。但是其补偿频带窄, 仅能消除特定的几次谐波, 甚至在与系统参数不匹配时可能发生谐振而导致某些次数的谐波放大, 补偿特性易受电网阻抗和频率变化的影响。此外, 在大容量的情况下无源滤波器的滤波装置笨重, 体积大, 损耗多。由于无源滤波器的以上缺点, 近年来性能更加优越的有源电力滤波器开始被重视而得到广泛关注。

有源电力滤波器是一种用于动态抑制谐波的新型电力电子装置, 它的基本工作原理是: 滤波器检测电网谐波电流, 根据谐波电流情况, 滤波器产生一个大小与谐波电流相同、相位与谐波电流相反的补偿电流, 与电网中的谐波电流叠加, 使叠加后的电网电流只有基波分量。有源电力滤波器克服了无源滤波器等传统谐波抑制装置的缺点, 能对频率和幅值都变化的谐波及无功进行跟踪补偿, 且补偿特性不受电网阻抗的影响, 也很难和电网阻抗发生谐振, 已成为目前抑制电网谐波最有效的手段。

只是由于目前中国有源电力滤波器价格相对还比较高, 而且人们对谐波危害的认识程度还不够, 谐波治理问题还没有得到足够高的重视, 使得有源滤波器的应用在中国还相对较少。而在日本及欧美国家, 有源滤波器的使用已经非常广泛。

为了解决大容量有源滤波器价格太高问题, 同时考虑滤波器在对系统进行谐波抑制时能对系统进行无功补偿, 目前建筑电气系统中也常采用无源滤波器 + 有源滤波器的混合补偿方式, 可以同时补偿无功和抑制谐波, 得到更好的补偿效果。

5 结 语

对住宅小区公用电网的谐波情况及谐波抑制方法进行了讨论, 提出了防范和治理谐波的措施, 以减小谐波对小区电网的影响。建筑系统的谐波治理已经成为不得不重视的问题, 减小系统谐波, 可以提高电网供电质量, 降低系统损耗, 达到节能的目的。

作者简介:

黄冰心(1979), 女, 工程师, 主要从事电力系统生产、运行与管理工作。

(收稿日期: 2011-05-10)

西藏昌都电网联网方案探讨

何志强¹ 扎西² 郑勇¹ 郑荡¹

(1. 西南电力设计院 四川 成都 610021; 2. 西藏电力有限公司 西藏 拉萨 850000)

摘要: 根据西藏昌都电网现状及其发展规划,探讨了“十二五”末期昌都电网与其他电网联网的必要性和可行性,并对其通过玉树与西北电网联网和通过玉曲河梯级电站与四川电网联网两种可行的方案进行了初步比较,最后初步推荐昌都电网通过玉曲河梯级电站与四川电网联网并对下一步工作提出了建议。

关键词: 昌都电网; 联网; 方案

Abstract: According to the current situation and development planning of Qamdo power grid in Tibet, the necessity and feasibility of Qamdo power grid connecting to other power grid at the end of the 12th Five-year Plan are discussed. Two schemes are compared, that is, its connection to Northwest power grid by Yushu power grid and another connection to Sichuan power grid by cascade hydropower stations on YuQu River. Finally, it is recommended that the connection to Sichuan power grid by cascade hydropower stations on YuQu River is more reasonable for Qamdo power grid, and the suggestions are given for further work.

Key words: Qamdo power grid in Tibet; interconnection; scheme

中图分类号: TM715 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)04-0048-04

0 引言

目前,西藏自治区形成了覆盖拉萨、山南、日喀则、那曲、林芝五个地市的西藏中部电网和昌都、阿里共二个地区电网共“一大二小”三个地市级独立电网以及由农村小水电、太阳能光伏电站供电的众多独立小电网和分散户用系统,构成了大电网供电和分散独立电源供电相结合、多能互补的供电格局。

昌都地区地处西藏自治区东南部,东与四川省的德格、白玉、石渠、巴塘四县隔江相望,东南与云南省的德钦县接壤,西南与林芝地区毗邻,西北与那曲地区相连,北面与青海省的玉树州交界,总面积为 11 万 km²,占西藏自治区总面积的 8.9%,辖昌都、江达、类乌齐和芒康、洛隆等 11 个县,是西藏自治区东大门。昌都矿产资源十分丰富。全地区已发现或探明的矿种有 52 种。昌都地区水能资源开发潜力巨大,境内金沙江、澜沧江、怒江三江并流,水力资源理论蕴藏量达 40 460 MW。

目前,昌都电网供电范围仅覆盖昌都县大部及察雅县、江达县、八宿县和类乌齐县少量乡镇。昌都电网最高电压等级为 110 kV,已形成以 110 kV

链式电网为主网架,以 35 kV 电网为骨干配电网的辐射形网架结构。截至到 2010 年年底,昌都电网电源装机为 71.2 MW,全部为水电。2010 年昌都电网实际最大用电负荷约为 34 MW,实际用电量约为 140 GWh。

根据《西藏电网“十二五”发展规划》,“十二五”期间昌都地区矿产业的电力需求量将呈现超常规增长,此外昌都电网覆盖范围远期将扩大到昌都地区的全部县份。由于负荷增长迅猛,加之规划电源全部为水电,与电网负荷特性不匹配,昌都电网丰枯期电力供需矛盾十分突出。

1 昌都电网规划简述

1.1 负荷预测

昌都地区“十二五”及以后,矿产业的电力需求量将逐渐成为电力消费的主要大户,其中主要矿业负荷包括玉龙铜矿负荷、类乌齐菱镁矿负荷及邦达镇周边采矿负荷。此外,远期“三江”流域水电开发的施工用电负荷及相关建材生产用电负荷也将是昌都电网负荷的重要增长点。

根据《西藏电网“十二五”发展规划》负荷预测结

果 2015 年昌都电网用电能量将达到 1 TWh ,最大负荷将达到 183 MW ,“十二五”期间电量年均增长 32.0% ,负荷年均增长 26.7% ;2020 年昌都电网用电能量将达到 1.92 TWh ,最大负荷将达到 344 MW ,“十三五”期间电量年均增长 13.9% ,负荷年均增长 13.4% 。

1.2 电源规划

根据《西藏电网“十二五”发展规划》,昌都电网 2013 年左右将投产果多水电站(160 MW) ;2016 年左右将投产侧格水电站(160 MW) 。根据电源建设进度安排 2015 和 2020 年昌都电网电源总装机容量分别为 231.2 MW 和 391.2 MW(全部为水电) 。

1.3 电力供需分析

根据昌都电网负荷预测和电源规划 ,其供电平衡结果见表 1。从平衡结果可以看出,“十二五”后期果多水电站投产后 ,昌都电网丰期电力有较大富余 ,但枯期缺水仍较为严重 ,其中 2015 年丰期电力富余约为 85 MW 枯期电力缺额约为 90 MW。“十三五”期间 ,尽管投产了侧格水电站 ,电网丰期电力富余、枯期缺水的问题仍然突出 ,其中 2020 年丰期电力富余约为 116 MW 枯期电力缺额约为 187 MW。

由平衡结果可以看出 ,由于昌都电网网内规划电源与电网负荷特性不匹配 ,水电丰期大发时 ,电网负荷较小; 枯期出力小时电网负荷较大,“十二五”后期昌都电网丰期多电 枯期缺水的问题十分突出。

由于运营成本及生态环境保护等多方面因素的制约 ,昌都电网建设煤电或燃油机组的可行性较低 ,其规划电源仍将以水电为主 ,而仅靠网内建设水电电源无法解决并且反而会进一步加剧电网丰枯期电力供需矛盾。因此 ,要从根本上解决昌都电网供电问题 ,应考虑与外送大电源或大电网联网以调节其丰枯期电力余缺。

表 1 昌都电网供电平衡结果

项 目	2015		2020	
	丰期 /MW	枯期 /MW	丰期 /MW	枯期 /MW
供电负荷	146.6	183.3	275.4	344.3
电源出力	231.2	93.0	391.2	157.0
电力盈亏	84.6	-90.3	115.8	-187.3

2 昌都电网联网方案设想

2.1 与西藏中部电网联网

昌都电网负荷中心——昌都县距西藏电网主要负荷中心——西藏中部电网的拉萨地区直线距离约为 630 km ,公路(317 国道及青藏公路) 距离约 1 060 km。由于一方面两者相距较远 ,另一方面西藏中部电网同样存在丰枯电力供需不平衡的问题 ,其枯期电力缺额尚需通过输电距离超过 1 000 km 的青藏直流联网工程从西北电网格尔木换流站送入 ,因此昌都电网目前通过与西藏中部电网联网解决其丰枯期电力供需矛盾经济性较差 ,可行性也较低。

2.2 通过马尔康 500 kV 变电站与四川电网联网

四川电网西北部“十二五”至“十三五”期间规划建设距昌都县最近的 500 kV 变电站是马尔康 500 kV 变电站。昌都县距四川省阿坝藏族羌族自治州马尔康县直线距离约为 550 km ,公路(317 国道) 距离约 910 km。由于相距较远 ,昌都电网通过马尔康 500 kV 变电站与四川电网联网的方案虽然存在可能性 ,但其联网方案投资将极高 ,因此也不宜采纳。

2.3 通过玉树 330 kV 输变电工程与西北电网联网

昌都县距青海省玉树藏族自治州玉树县直线距离约为 250 km ,公路(214 国道) 距离约为 520 km。根据玉树 330 kV 输变电工程可行性研究成果,“十二五”中后期西北电网将建设玉树 330 kV 变电站并将其 330 kV 主网架延伸到玉树县。由于昌都县和玉树县距离相对较近 ,因此昌都电网通过玉树 330 kV 变电站与西北电网联网存在可能性。

玉树 330 kV 输变电工程第一段为日月山至班多水电站(360 MW) 单回 750 kV 线路 ,线路长度约为 240 km; 第二段为班多至玛多至玉树双回 330 kV 线路 ,线路单回长度约为 530 km。

根据该工程可行性研究成果 ,日月山至玉树断面最大输送能力不足 100 MW ,仅能满足玉树地区用电需要。如若考虑昌都电网经玉树与西北电网联网 ,首先需要研究提高西北电网至玉树断面送电能力。

初步设想昌都电网通过玉树 330 kV 输变电工程与西北电网联网方案为: 建设玉树至昌都双回 330 kV 线路及昌都 330 kV 变电站; 为提高该断面的稳定水平 ,考虑在该线路中段建设一座 330 kV 变电站。

2.4 通过玉曲河梯级电站与四川电网联网

玉曲河是怒江左岸一级支流,河口以上控制流域面积 $9\,379\text{ km}^2$,多年平均流量 $114\text{ m}^3/\text{s}$,河道总长 444.3 km ,天然落差 $3\,122\text{ m}$,平均比降为 7.1% ,水力资源理论蕴藏量 $2\,510\text{ MW}$,拟采用8级开发,总装机容量为 $1\,930\text{ MW}$ 。根据目前工作进展,玉曲河梯级电站有望作为“藏电外送”首批开发项目在“十三五”初期投产 $1\sim 2$ 座电站。

玉曲河下游的碧土电站(初步勘察较为合适的汇集点)距四川电网西南部“十二五”规划建设的乡城 500 kV 变电站直线距离约为 120 km ,距昌都地区负荷中心——昌都县的直线距离为 320 km ,公路(214国道)距离约 420 km 。由于玉曲河梯级电站至昌都电网和四川电网的距离均较为适中,因此昌都电网通过玉曲河梯级电站与四川电网联网也是可行的。

根据项目业主初步勘察结果,碧土电站距拟建的四川电网乡城 500 kV 变电站实际线路距离约为 200 km 。目前初步考虑玉曲河梯级电站电力汇集后以两回 500 kV 线路送至乡城变。需要说明的是,乡城变计划2012年左右投产,其设计过程中已考虑了玉曲河梯级电站的接入。

如果考虑昌都电网通过玉曲河梯级电站与四川电网联网,初步设想从玉曲河梯级电站电力汇集点(碧土电站)出2回 220 kV 线路至昌都县。为提高线路的稳定水平同时考虑当地供电需要,可考虑在邦达附近设 220 kV 中间变电站。

在玉曲河梯级电站外送方案确定的前提下,即便玉曲河梯级电站不能在“十二五”期间投产,也可先建成相关输变电工程提前实现昌都电网与四川电网的联网。

3 联网方案初步比较

以下对可行性相对较高的昌都电网通过玉树 330 kV 输变电工程与西北电网联网和通过玉曲河梯级电站与四川电网联网方案进行初步的方案技术经济比较。

3.1 方案投资初步比较

根据初步设想的联网方案,昌都电网通过玉树 330 kV 输变电工程与西北电网联网方案在不考虑日

月山至玉树断面加强的情况下,需要建设 330 kV 变电站两座, 330 kV 输电线路约 $1\,040\text{ km}$ (线路路径暂按沿公路走线考虑,下同),总投资约为30亿元。昌都电网通过玉曲河梯级电站与四川电网联网方案需要建设 220 kV 变电站两座, 220 kV 输电线路约 840 km ,总投资约为21亿元。

通过方案投资初步比较结果可以看出,后者投资远远低于前者。

3.2 联网通道送电能力和送电可靠性

昌都电网若通过玉树 330 kV 输变电工程与西北电网联网,昌都至西北电网主网只有一个通道,其距离长达约 $1\,300\text{ km}$,其中 330 kV 通道长度约为 $1\,100\text{ km}$ 并且缺乏电源支撑,联网通道送电可靠性明显较差。若不加强西北电网至玉树断面的输送能力,联网通道送电能力也无法满足要求。

昌都电网若通过玉曲河梯级电站与四川电网联网,昌都至玉曲河电力汇集点距离约为 420 km (到第一落点距离约为 280 km)。根据西藏中部电网已建成的 220 kV 输变电工程经验,其送电能力完全可以满足昌都电网负荷发展需要。

3.3 方案实施可行性

昌都电网若通过玉树 330 kV 输变电工程与西北电网联网,一方面应保证玉树 330 kV 输变电工程能按计划投产,另一方面还需要加强西北电网主网至玉树断面的送电能力。由于线路距离长,供电负荷小,该方案的经济效益较差,从目前情况看其实施的可行性较低。

根据目前工作进展,玉曲河梯级电站目前各项前期工作推进较快,有望在“十三五”初期投产 $1\sim 2$ 座电站。此外在玉曲河梯级电站外送方案确定的前提下,可先建成相关输变电工程提前实现昌都电网与四川电网的联网。

综上所述,昌都电网通过玉曲河梯级电站与四川电网联网的实施可行性更高。

根据方案进行初步的方案技术经济比较结果,昌都电网通过玉曲河梯级电站与四川电网联网方案经济性明显较优,其联网通道送电能力和送电可靠性也较高,此外其方案实施可行性也较大,因此初步推荐昌都电网通过玉曲河梯级电站与四川电网联网以解决其丰枯期电力供需矛盾。



图1 昌都电网联网方案设想

4 结论与建议

1) 由于区内规划电源有限且全部为水电,电源出力特性与负荷特性不匹配,要解决昌都电网供电问题,必须通过与外送大电源或大电网联网的方式解决。

2) 从目前情况看,要考虑昌都电网经玉树与西北电网联网,由于与西北主网距离较远且仅以一个通道相连,此外该通道 330 kV 线路单回长度将达到约 1 100 km 且中间缺乏电源支撑,因此需要对该方案的送电可靠性和送电能力进行进一步研究,尤其需要研究加强西北电网至玉树断面的输送能力。

3) 玉曲河梯级电站目前前期工作推进较快,其可能的电源汇集点与昌都电网和四川电网的距离均较为适中。昌都电网通过玉曲河梯级电站与四川电网联网,一方面可充分利用玉曲河梯级电站的外送通道,另一方面玉曲河梯级电站也可作为联网通道的重要支撑。此外,该方案有利于加快推进玉曲河梯级电站前期工作的开展,进而推动联网方案的设计论证进度。因此,其实施的可行性较高。

4) 根据方案初步比较结构,建议昌都电网通过

玉曲河梯级电站与四川电网联网以解决其丰枯期电力供需矛盾。

5) 根据目前工作进度,玉曲河梯级电站最早也要在“十三五”初期投产。如要实现昌都电网“十二五”期间与四川电网联网,可结合玉曲河梯级电站输电规划,研究提前建成相关输变电工程实现联网的可行性。

建议尽快推动玉曲河梯级电站输电规划及后续本体电站和相关输变电工程设计工作。

参考文献

- [1] 李骈文,陈冠南.西北电网与周边电网的联网规划[J].中国电力,2000,33(7):52-54.
- [2] 黄明良,张卫东.西北与华中电网多点联网有关问题探讨[J].中国电力,2007,40(11):46-50.
- [3] 张育英.全国联网战略方案的探讨[J].电网技术,1998,22(4):56-59.
- [4] 西藏电力有限公司,西南电力设计院等.西藏电网“十二五”发展规划[R].2010.

作者简介:

何志强(1979),男,工程师,硕士,主要从事西藏电网电力系统规划设计工作。

(收稿日期:2011-06-10)

关联规则在输电网安全性评价中的应用

程 政¹, 雷 霞², 柏小丽¹, 徐博海³

(1. 泸州电业局, 四川 泸州 646000; 2. 西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039;
3. 国电大渡河瀑布沟水利发电总厂, 四川 雅安 625304)

摘 要: 一种新的查找方法: 数据挖掘方法, 用来查找输电网存在的危险点。建立了一个智能化的数据挖掘工具, 从输电网安全性评价数据库的大量历史数据中获取输电网中存在的危险点从而指导管理者进行决策。数据挖掘工具的核心是: 采用 Apriori 算法找关联规则从而判断影响输电网安全性的危险点。通过危险点查找, 确认发生事故的可能性及其严重程度, 提出相应的整改和控制措施, 达到预防、控制隐患和事故。

关键词: 数据挖掘; 关联规则; 危险点; Apriori 算法

Abstract: An entirely new searching method, data mining, has been put forward to figure out the dangerous points that might exist in transmission network. An intelligent data mining tool is established, and on the basis of numerous historical data in safety evaluation database of transmission network, the data mining method can obtain the dangerous points in transmission network to guide the administrators to make correct decisions. The core of data mining tool is to find association rules through Apriori algorithm to judge the dangerous points that may affect the security of transmission network. By searching for the dangerous points, the possibility and severity of the accident can be confirmed, and then the relevant amendments and control measures are proposed to prevent and control the safety hazards and accidents.

Key words: data mining; association rules; dangerous point; Apriori algorithm

中图分类号: TM762 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)04-0052-03

0 引 言

安全性评价属于风险管理范畴, 是预防和控制企业事故行之有效的方法^[1]。安全性评价是度量、预测系统安全基础、控制事故的重要措施。中国已用法律形式将“安全第一, 预防为主”确定为劳动保护方针, 也是电力安全生产和建设管理的基本方针。编制安全性评价标准就是要切实贯彻“安全第一, 预防为主”的方针。针对电网运行、设备工况、生产环境、作业过程等进行安全性评价实现对事故的超前预测和控制, 达到消灭和减少事故的目的。1990年, 华北电网公司借鉴国外风险评估等现代安全管理办法, 开始了发电机组并网安全性评价, 目前已在全国全面推开。随着安全性评价在电力系统中的应用, 一些安全性评价管理系统已投入实际应用, 但仅仅完成了安评数据的统计以及个别数据的追踪功能, 对于查评中隐藏的信息没有进行有效的分析和挖掘。如何处理这些安评数据成为研究的首要问题, 数据挖掘技术应运

而生。数据挖掘也称数据库知识发现, 它从大量的、不完全的、有噪声的、随机的实际应用数据中提取隐含在其中的、人们事先不知道的、但又是潜在有用的信息和知识的过程^[2]。下面建立了数据挖掘模型, 挖掘影响输电网安全的危险点, 从而指导管理者开展输电网安全性评价工作。

1 基本原理

1.1 关联规则基本概念

关联规则反映一个事物与其他事物之间的相互依存性和关联性。如果两个事物或者多个事物之间存在一定的关联关系, 那么, 其中一个事物就能通过其他事物预测到。一般来说, 关联规则就是描述数据库中数据项(属性、变量)之间所存在的潜在关系的规则。设 $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$ 是 m 个不同项目的集合, D 是针对 I 事物的集合, 每一笔事物包含若干项目 $i_1, i_2, \dots, i_k \in I$ 。关联规则形如 $X \Rightarrow Y$ 的蕴含式, 其中 $X \subset I, Y \subset I, X \cap Y = \Phi$ 。关联规则 $X \Rightarrow Y$ 在事务集 D

中成立,具有两个规则兴趣度度量—支持度和置信度,它们分别反映发现规则的有用性和确定性。

定义1 支持度 X 的支持度是事物集中 A 出现的事物数与总的事物数之比,即

$$\text{support}(X) = \frac{\text{support_count}(X)}{\text{support_count}(D)} \quad (1)$$

定义2 置信度 规则 $X \Rightarrow Y$ 的置信度是事物集中 X, Y 同时出现的事物数与 X 出现的事物数之比,即

$$\text{confidence}(X \Rightarrow Y) = \frac{\text{support_count}(X \cup Y)}{\text{support_count}(X)} \quad (2)$$

如果规则的支持度大于最小支持度则认为此规则是频繁项集,否则为非频繁项集。同时满足最小支持度与最小可信度两属性的规则称为强关联规则。关联规则挖掘的目的就是从数据库中挖掘出满足用户要求的最小支持度与最小可信度的强关联规则。

1.2 关联规则挖掘一般步骤

挖掘关联规则问题一般可以分解为以下两个子问题^[9]。

(1) 找出存在于事物数据库中的所有频繁项集,即找出所有支持度满足用户所规定的最小支持度阈值的项集。

(2) 用频繁项集生成候选关联规则,然后验证候选关联规则是否满足用户所规定的最小可信度阈值。若满足,该候选关联规则为要找的关联规则。

2 关联规则实现过程

2.1 关联规则模型的建立

要处理的问题是如何从数据源中挖掘到想要的危险点。那么建立了图1给出了关联规则模型。

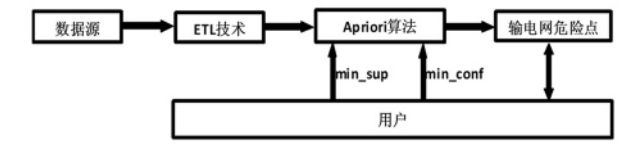


图1 关联规则模型
模型解释:数据源选择是输电网安全性评价管理系统中的数据;ETL技术指的是对数据源中数据的清理、转换等;应用Apriori算法时用户需对算法中的参数进行设置,其中min_sup代表最小支持度,min_conf代表最小置信度。通过数据挖掘技术挖掘出的危险点,可以直观地展现给决策者。

2.2 模型的求解

2.2.1 数据预处理

由于自查评表中数据比较完整、数据易处理的。下面对数据进行如下处理。

(1) 问题严重程度缺失的处理

在自查评过程中,问题严重程度的缺失是由于用户在填写自查评结果时漏填,因此为了不遗漏任何危险的因素,默认为问题的严重程度为严重。

(2) 数据错误的处理

数据错误产生的原因主要有两个:设计数据时没有进行约束;数据的人为输入错误。前者是在系统设计时没有对用户的输入进行约束,使得用户可以输入不满足要求的数据。后者是由于很多数据都是以字符串的形式来存储的,无法使用约束来保证数据的正确性,而且由于用户知识水平和文化背景的差异,输入时往往会拼写出错或者录入完全错误的数据。

在自查过程中,由于参评人员对标准的理解有差异,打出的分数不满足系统要求,甚至可能打出错误的分数,因此得分率就有可能大于1或者小于0,必须进行清理。首先通过SQL语句找到所有错误的得分率,将这些得分率都默认为0。

(3) 数据转换

由于自查评表中的得分率在[0-1]区间,问题的严重程度分为一般和严重两种。所用的Apriori算法是基于布尔型关联规则的挖掘,那么现在将数据离散化处理。将得分率记为selfrate,问题的严重程度记为plevel。得分率在区间[0-0.5]之间记为A1;在[0.5-1]之间记为A2。问题一般记为B1;问题严重记为B2。那么自查评表就转化为最终的数据表,如表1所示。

表1 关联规则模型最终事务表		
tid	selfrate	plevel
1	A1	B1
2	A2	B2
3	A2	B1
...	...	...

2.2.2 数据挖掘的实现

首先采用Apriori算法生成频繁项集,然后由频繁项集根据最小支持度和最小置信度产生强规则。基于Apriori算法的数据挖掘流程如图2所示。

2.2.3 关联规则在输电网安全性评价中的应用

输电网自查评表保存着输电网安全性评价中用户自查评时产生的数据,其中包括查评项目、查评得

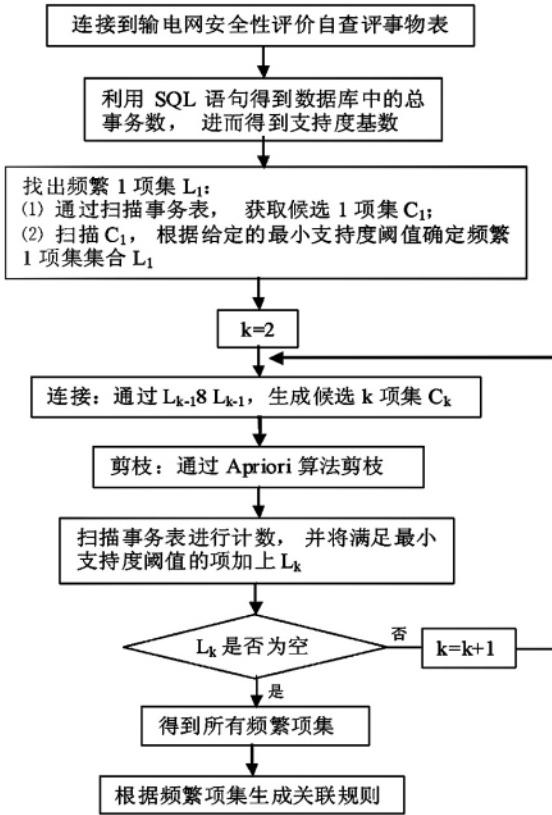


图2 数据挖掘流程

分、得分率等等。以自查评的项目为挖掘对象,以自查评表中的得分率(selfrate) 和问题严重程度(plevel) 为研究对象。通过前 200 次查评的历史数据进行挖掘,对得分率和问题严重程度之间的关联规则来判断输电网安全性评价指标是否存在危险点。

对于《输电网安全性评价标准》中查评项目 2.2.1^[3] 国家标准是这样描述的: 主力大容量电厂是否符合本网最高一级电压电网。评分标准及方法: 符合要求的满分,基本符合要求得 60% 标准分,不符合要求不得分。对于次项目,取之前 200 次的查评数据进行分析,通过数据挖掘找到得分率和问题严重程度之间的关联规则,对于得分率低且问题严重的关联规则,可以得出项目 2.2.1 是存在危险点的。

2.2.4 挖掘结果及解释

本模型对自查评表中查评项目 2.2.1 项前 200 次的查评历史数据进行分析,设定最小支持度为 0.5,最小置信度为 0.6。最后得到 3 条强关联规则。例如规则: $A1 \Rightarrow B2$ 其中支持度为 50.2% ,置信度为

67.5%。意味着当“得分率”在 $[0 - 0.5]$ 之间时,“问题严重程度”的概率为 67.5%。那么针对这种得分率低而且问题严重的关联规则,管理者可以对 2.2.1 项提前提出控制措施,达到预防事故的目的。

3 结 语

介绍了关联规则在输电网安全性评价中的应用,并建立了关联规则模型,挖掘输电网中存在的危险点。针对危险点,对输电网提出相应的整改措施,对输电网安全性评价有一定的指导作用。

参考文献

- [1] JiaweiHan ,MichelineKambe 著,范明,孟小峰译.数据挖掘概念与技术[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [2] 王金萍,樊凤林,刘发旺,等.安全性评价在电力企业中的应用研究[J].华北电力技术,2005(5):23-26.
- [3] 国家电网公司.供电企业安全性评价标准[S].北京:中国电力出版社,2002.
- [4] 骆嘉伟,彭蔓蔓,陈景燕,等.基于消费行为的 Apriori 算法的研究[J].计算机工程,2003,29(5):72-74.
- [5] 杨辅祥,刘云超,段智华.数据清理综述[J].计算机应用研究,2002,19(3):3-5.
- [6] 高艳霞. Apriori 算法在学生成绩管理中的应用[J].计算机时代,2009(8):30-31.
- [7] 陶建江,张文献.关联规则挖掘的基本算法[J].计算机工程,2004,15(30):34-35.
- [8] 高杰,理绍军,钱锋.数据挖掘中关联规则算法的研究及应用[J].2006(36):128-131.
- [9] 程政,雷霞,廖翔,等.数据挖掘在电网安全性评价中的应用[J].2010(8):97-99.

作者简介:

程 政(1986),男,硕士研究生,研究方向为计算机技术在电力系统中的应用;

雷 霞(1973),女,四川南充人,博士,硕士生导师,研究方向为配电自动化和电力市场;

柏小丽(1985),女,四川达州人,硕士,研究方向为电力市场及配电自动化;

徐博海(1984),男,河北唐山人,本科,研究方向为电厂运行维护。

(收稿日期:2011-05-30)

欢 迎 投 稿

欢 迎 订 阅

风电变流器网侧 SVPWM 变换器的控制研究

胡文胜 赵 宇

(许继风电科技公司 河南 许昌 461000)

摘 要: 分析了三相电压型网侧变换器的数学模型,在网侧变换器的 $d-q$ 坐标模型的基础上对其矢量控制策略进行了研究。提出了一种网侧变换器的控制策略,介绍了其基本原理与实现方案。最后进行了仿真分析,仿真结果表明,其控制策略具有良好的动态响应。

关键词: 网侧变换器; 矢量控制; 控制策略; 仿真

Abstract: A mathematical model of three-phase voltage-source grid-side converter is analyzed. The vector decoupled control strategy based on $d-q$ model of grid-side converter is studied. A kind of control strategy for grid-side converter is proposed. Its essential principles and realization scheme are introduced. Finally, the simulation is carried out. The simulation results show that the proposed control strategy has a good dynamic response.

Key words: grid-side converter; vector control; control strategy; simulation

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)04-0055-04

0 引言

随着风力发电技术的兴起,风电变流器的控制技术成为当今的研究热点。在双馈风力发电系统中,双馈发电机的转差功率在转子与电网之间双向流动,这就要求变流器的网侧变换器既要能够工作于整流状态,又要能够工作于逆变状态。对网侧变换器的准确控制,是实现双馈风力发电系统变速恒频发电的关键技术之一^[1-2]。

目前的电压源型交-直-交变流器,其网侧变换器多采用的是三相电压型 PWM 整流器。PWM 整流器的控制质量主要取决于交流侧的电流波形、功率因数、直流侧电压的稳定性等。随着空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)技术、滞环电流 PWM 控制等脉冲调制技术的发展,现代控制理论、智能控制等技术的引入, PWM 整流器的控制性能得到不断提高^[3-4]。

这里采用电网电压定向矢量控制技术、空间矢量脉宽调制(SVPWM)技术,对风电变流器网侧变换器的整流与逆变工作模式做了仿真研究。文中搭建了仿真模型,仿真结果表明,采用上述控制策略,网侧 SVPWM 变换器的响应速度快、稳定性好,可以工作于功率因数接近于 1 的整流或逆变状态。

1 网侧变换器的电路及数学模型

图 1 为三相电压型 PWM 整流器的主电路。稳态工作时,整流器的输出直流电压稳定,三相桥臂由正弦脉宽调制驱动。

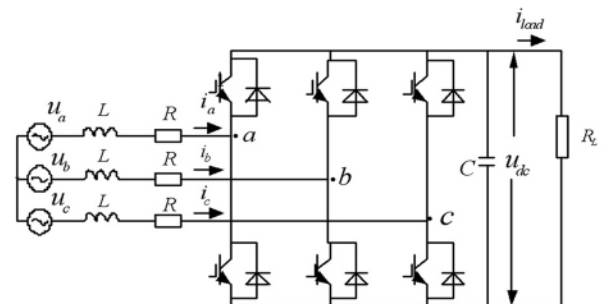


图 1 三相 PWM 整流器的主电路

当开关频率很高时,电感的滤波作用使得交流侧电压、电流的谐波非常小。只考虑电压、电流的基波,整流器可以看作是一个理想的三相交流电压源。

通过调节输入电压的幅值、相位,可以控制整流器交流侧输入电流的幅值、电流与电压的相角,使整流器运行于以下三种工作状态。

(1) 功率因数接近于 1 的整流运行。此时,交流侧电流为正弦且与电网电压同相,能量由电网流入整流器,电网与整流器之间几乎无无功功率流动。

(2) 功率因数接近于 1 的逆变运行。此时,交流侧电流为正弦且与电网电压反相,能量由整流器流入

电网,电网与整流器之间几乎无无功功率流动。

(3) 功率因数不为1的运行状态。此时,交流侧电流与电网电压具有一定的相位关系。当交流侧电流为正弦且与电网电压保持 90° 的相位关系时,整流器可作为静止无功补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)运行。

设三相电网电压平衡,主电路开关器件为理想开关,通断可以用开关函数表示。根据PWM整流器的拓扑结构,可得

$$\begin{cases} u_a - i_a R - L \frac{di_a}{dt} - S_a u_{dc} \\ = u_b - i_b R - L \frac{di_b}{dt} - S_b u_{dc} \\ = u_c - i_c R - L \frac{di_c}{dt} - S_c u_{dc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_{load} \\ = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{load} \end{cases} \quad (1)$$

式中 u_a, u_b, u_c 为等效三相电网电压; i_a, i_b, i_c 为整流器输入三相电流; i_{dc} 为变流器直流侧输出电流;为整流器直流侧负载电流; i_{load} 为整流器输出直流电压; u_{dc} 为整流器输出直流电压; S_a, S_b, S_c 分别为三相桥臂的开关函数,当 $S_i = 1$ 时,表示第 i 相上管导通,当 $S_i = 0$ 时,表示第 i 相下管导通。

2 变换器的电网电压定向矢量控制

在三相三线制系统中,三相电流之和为零,有 $i_a + i_b + i_c = 0$;三相电压平衡,有 $u_a + u_b + u_c = 0$ 。将这两个条件带入式(1)中,可得三相电压型PWM整流器在abc坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = u_a - i_a R - (S_a - \frac{S_a + S_b + S_c}{3}) u_{dc} \\ L \frac{di_b}{dt} = u_b - i_b R - (S_b - \frac{S_a + S_b + S_c}{3}) u_{dc} \\ L \frac{di_c}{dt} = u_c - i_c R - (S_c - \frac{S_a + S_b + S_c}{3}) u_{dc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{load} \end{cases} \quad (2)$$

对式(2)进行 $3s/2r$ (三相静止到两相旋转)坐标变换,可得PWM整流器在两相同步旋转dq坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_{ds}}{dt} = -Ri_{ds} + \omega_1 Li_{qs} - S_d u_{dc} + u_{d1} \\ L \frac{di_{qs}}{dt} = -Ri_{qs} - \omega_1 Li_{ds} - S_q u_{dc} + u_{q1} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} S_d i_{ds} + \frac{3}{2} S_q i_{qs} - i_{load} \end{cases} \quad (3)$$

将同步旋转坐标系的 d 轴定向于电网电压矢量 u_g 的方向上,则 d 轴表示有功分量参考轴,而 q 轴表示无功分量参考轴。此时,电网电压的 q 轴分量为零。为了实现单位功率因数,无功电流分量值设为零。

$$\begin{cases} u_m \text{ 为电网电压的幅值,电网电压的 } d、q \text{ 分量为} \\ \begin{cases} u_{d1} = u_m \\ u_{q1} = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

输入电流满足

$$\begin{cases} L \frac{di_{ds}}{dt} = -Ri_{ds} + \omega_1 Li_{qs} + u_m - u_{ds} \\ L \frac{di_{qs}}{dt} = -Ri_{qs} - \omega_1 Li_{ds} - u_{qs} \end{cases} \quad (5)$$

式中 u_{ds}, u_{qs} 为整流器交流侧电压的 $d、q$ 轴分量 $u_{ds} = S_d u_{dc}$ $u_{qs} = S_q u_{dc}$ 。

上式表明 $d、q$ 轴电流除受控制量 u_{ds}, u_{qs} 的制约外,还受交叉耦合项 $\omega_1 Li_{ds}, \omega_1 Li_{qs}$ 和电网电压的影响。

将式(5)改写为

$$\begin{cases} u_{ds} = -u'_{ds} + \Delta u_{ds} + u_m \\ u_{qs} = -u'_{qs} - \Delta u_{qs} \end{cases} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} u'_{ds} = L \frac{di_{ds}}{dt} + Ri_{ds} \\ u'_{qs} = L \frac{di_{qs}}{dt} + Ri_{qs} \end{cases} \begin{cases} \Delta u_{ds} = \omega_1 Li_{qs} \\ \Delta u_{qs} = \omega_1 Li_{ds} \end{cases}$$

上式中 u'_{ds}, u'_{qs} 与各自的电流分量具有一阶微分关系,可作为解耦项, $\Delta u_{ds}, \Delta u_{qs}$ 为消除定子电压、电流交叉耦合的补偿项。同时,引入了电网电压 u_m 作为前馈补偿,实现 $d、q$ 轴电流的独立控制,还可以提高系统的动态性能。

网侧变换器的控制框图如图2所示。网侧变换器采用双闭环控制,电压外环主要控制三相PWM整流器的直流侧电压,直流电压指令值与反馈的误差,经PI调节器计算得到有功电流指令值,其值决定了有功功率的大小,符号决定了有功功率的流向。电流内环按照电压外环输出的电流指令进行电流控制,为实现功率因数为1的整流或逆变,无功电流分量设为

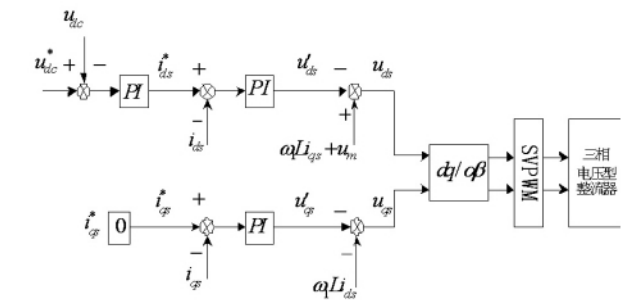


图2 电网侧变换器的控制框图

零 $i_{qs}^* = 0$ 。整流器交流侧参考电压 u_{ds}^* 、 u_{qs}^* 经坐标变换后进行 SVPWM 调制,产生的驱动信号实现网侧变换器的控制^[5-6]。

3 网侧变换器的仿真

3.1 整流状态

交流侧采用相电压为 220 V 的对称三相电源,频率 50 Hz;交流侧电感 $L = 6\text{ mH}$,电阻为 $R = 0.1\text{ }\Omega$;电容 $C = 4\text{ }400\text{ }\mu\text{F}$,电容的初始电压为 700 V,直流电压的指令值为 700 V;负载电阻 $R_L = 50\text{ }\Omega$;无功电流的指令值为 0;三角载波的频率为 10 kHz,调制比 $m = 1$ 。

PI 参数:直流 $k_{p1} = 2.8$ 电压环 $k_{i1} = 10$ 电流环;
 $k_{p2} = 100\text{ }k_{i2} = 100$; $k_{p3} = 100\text{ }k_{i3} = 100$ 。

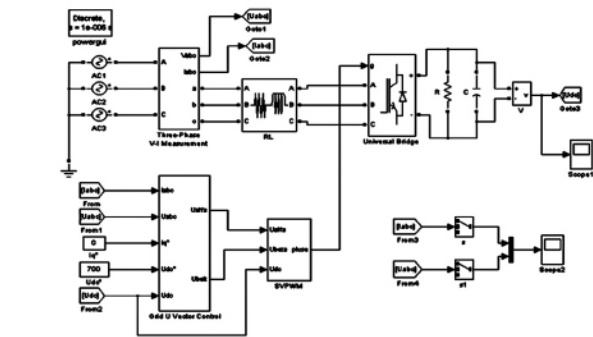


图3 整流状态的仿真模型

仿真结果分析。

(1) 直流电压的动态响应

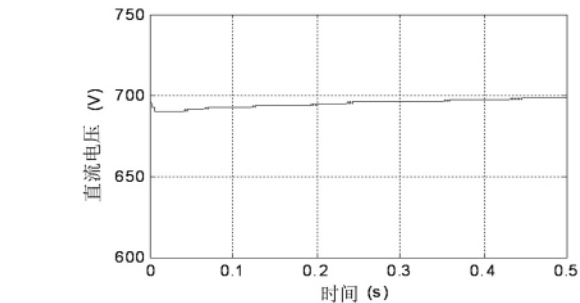


图4 直流电压波形 1

由图 4 可见,初始时刻,电容的电压设为 700 V;仿真开始后,直流电压出现波动,在 $t = 0.3\text{ s}$ 时刻,直流电压稳定在 700 V,稳定后,电压波形较为平滑。

(2) 网侧变换器交流侧电压、电流波形

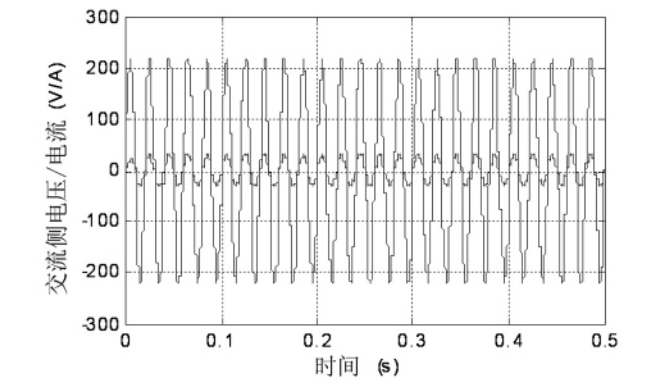


图5 交流侧 a 相电压电流波形 1

图 5 为交流侧 a 相的电压、电流波形。可见,在 $t = 0.1\text{ s}$ 之后,电流基本稳定,并且电流与电压的相位基本相同,交流侧的功率因数接近于 1。

(3) d、q 轴电流分量的波形

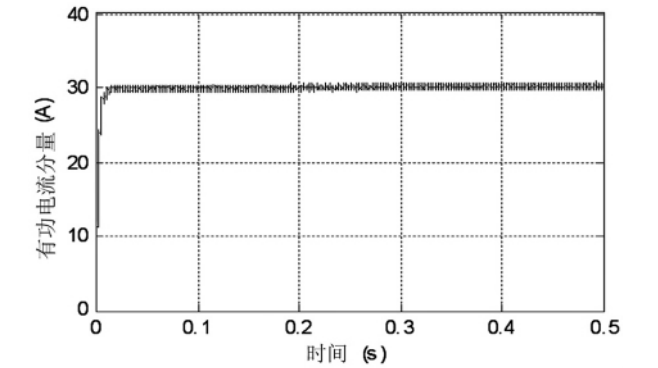


图6 有功电流分量的波形

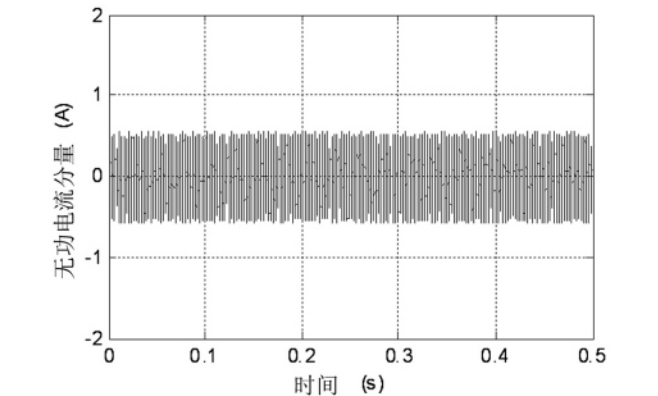


图7 无功电流分量的波形

图 6、7 为 d、q 轴电流分量的波形, d 轴电流分量为有功分量, q 轴电流分量为无功分量。可见,在 $t = 0.1\text{ s}$ 之后, d 轴电流分量基本稳定, q 轴电流分量接

近于零,交流侧的功率因数接近于1。

3.2 逆变状态

网侧变换器的交流侧采用相电压为220 V的对称三相电源,频率为50 Hz;电容侧连接二极管,二极管由电压为1 000 V、频率为50 Hz的交流电源供电,用来模拟发电机。正常工作时,电能由网侧变换器流向网侧负载。

网侧电阻电感参数 $L=6\text{ mH}$ $R=0.1\text{ }\Omega$; 电容 $C=4\text{ }400\text{ }\mu\text{F}$, 电容的初始电压为700 V, 直流电压的指令值为700 V; 二极管侧电阻电感参数 $L=6\text{ mH}$ $R=0.1\text{ }\Omega$; 无功电流的指令值为0; 三角载波的频率为10 kHz, 调制比 $m=1$ 。

PI 参数: 直流 $k_{p1}=2.8$ 电压环 $k_{i1}=10$ 电流环; $k_{p2}=100$ $k_{i2}=100$; $k_{p3}=100$; $k_{i3}=100$ 。

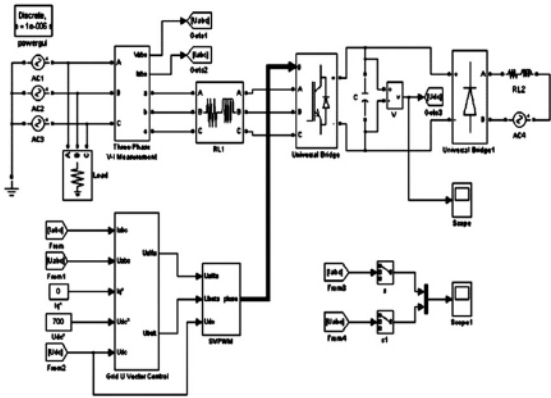


图8 逆变仿真模块

仿真结果分析。

(1) 直流电压的动态响应

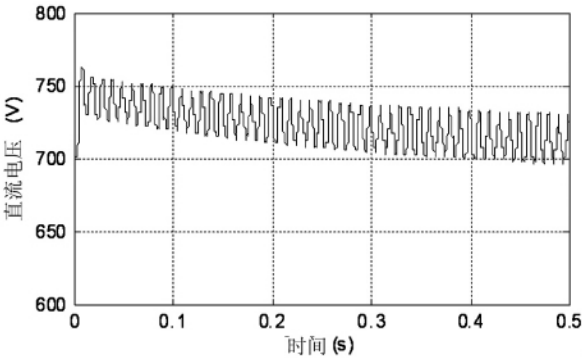


图9 直流电压波形2

由图9可见,初始时刻,电容的电压设为700 V;仿真开始后,直流电压出现波动;在 $t=0.4\text{ s}$ 时刻,直流电压基本稳定在700 V上下,波动较小。

(2) 网侧变换器交流侧电压、电流波形

图10为交流侧a相的电压、电流波形。可见在 $t=0.1\text{ s}$ 之后,电流基本稳定,并且电流与电压的相位

相反,变流器运行于功率因数接近于1的逆变状态。

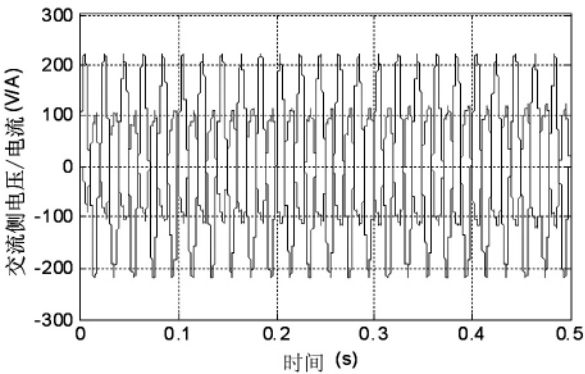


图10 交流侧a相的电压、电流波形2

4 结 论

SVPWM 脉冲调制具有直流电压利用率高、谐波小等优点,是风电变流器广泛采用的调制算法之一。对网侧变换器的仿真,验证了在所提的控制策略下,网侧变换器可运行于功率因数接近于1的整流或逆变状态,且动态响应较好,对电网污染较小。

参考文献

[1] 苑国锋,柴建云,李永东. 变速恒频风力发电机组励磁变频器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 90-94.

[2] 郎永强. 交流励磁双馈电机风力发电系统控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

[3] 张崇巍,张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

[4] 李永东,王剑. PWM 整流器的现状与展望[D]. 2006 中国电工技术学会电力电子学会第十届学术年会, 2006.

[5] M. Malinowski, M. P. Kazmierkowski. Simple Direct Power Control of Three Phase PWM Rectifier Using Space - vector Modulation[J]. IEEE Trans. Ind. Appl. 2004, 51(2): 447-454.

[6] 王永,沈颂华,关森. 新颖的基于电压空间矢量三相双向整流器的研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 104-110.

作者简介:

胡文胜(1966) 男,工程师,研究方向为电力电子技术在水电变流器中的应用;

赵宇(1985) 男,助理工程师,研究方向为电力电子应用。

(收稿日期: 2011-03-10)

一起直流分压器故障导致直流系统闭锁事故分析

胡翔

(四川电力调度中心 四川 成都 610041)

摘要:介绍了德宝直流输电系统一起由于高压直流分压器的体系结构设计不足引起的直流系统闭锁事故,通过对事故的原因进行剖析,找出直流分压器的体系结构设计的不足,并提出了相应的解决措施,为高压直流输电系统的运行提供了借鉴经验。

关键词:直流;闭锁;分压器;冗余度

Abstract: A DC system blocking failure caused by the imperfection of architectural design of high-voltage DC voltage divider in DeBao DC transmission system is introduced. By analyzing the causes of the accident, the weaknesses of architecture design of DC voltage divider are found, and the corresponding resolutions are proposed, which provides an experience reference for the operation of high-voltage DC transmission system.

Key words: direct current; blocking; voltage divider; redundancy

中图分类号: TM711 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)04-0059-02

控制保护系统的正常运行是直流输电系统正常运行的必备条件。控制保护系统的正常运行不仅取决于系统自身的软件设计,同时与现场一次设备如DCCT、直流分压器以及传输通道等多种因素密切相关,其中任意一个环节出现异常,都可能导致整个直流控制保护系统的异常。因此,在测量装置正常的条件下,如何采取合理的系统体系结构,使直流控保系统最大程度地保持正常稳定运行是一个摆在面前的重要课题。直流分压器作为直流输电系统电压的监测设备,对于整个直流系统的正常运行意义重大,由于直流分压器的闪络及设备原因导致的直流系统故障近几年在中国已多次出现^[1-4],但由于直流电压采集、监测系统的设计不合理而导致的直流输电系统闭锁还不多见。这里对德宝直流系统的一次由于直流分压器系统体系结构设计不合理导致的直流输电系统闭锁故障进行了分析并提出改进措施,为中国直流输电运行提供了一些经验及借鉴。

1 故障现象及处理情况

2010年2月26日,德宝直流系统极I全压、金属回线1250 MW运行,功率方向为宝鸡送德阳;500 kV交流系统谭德一、二线运行正常;500 kV 1、2号母线运行正常;站用电系统1、2、3号站用变压器运行正

常,控制保护系统运行正常。

2010年2月26日20时59分,极I直流系统检测到系统扰动,接收到“来自对站请求降压运行”信号,进行一次降压再启动成功。21时26分,极I直流系统再次检测到系统扰动,接收到“对站发出保护闭锁指令”信号,“德宝”直流极I闭锁。22时25分,德阳站按调度命令进行带线路开路(OLT)试验,22时47分,该站带线路开路(OLT)试验成功,最高电压501 kV。

2 故障原因分析

2.1 直流电压测量系统结构

德宝工程现用直流电压互感器为Schniewindt产品,用于双极直流系统极母线、中性母线电压测量。其中,500 kV直流电压互感器安装于直流场,50 kV直流电压互感器安装于阀厅。直流分压器由高压部分和低压部分组成。

高压部分是一些电阻和电容先并联,然后再串联在一起组成,低压部分的设计原理与高压部分相似,并配有保护放电间隙。两者的共同特征是取同一时间常数。低压并联部分的电压作为直流放大器的输入电压信号,经过放大后取得与直流电压成比例的电压输出,通过光纤送至控制保护屏柜内。

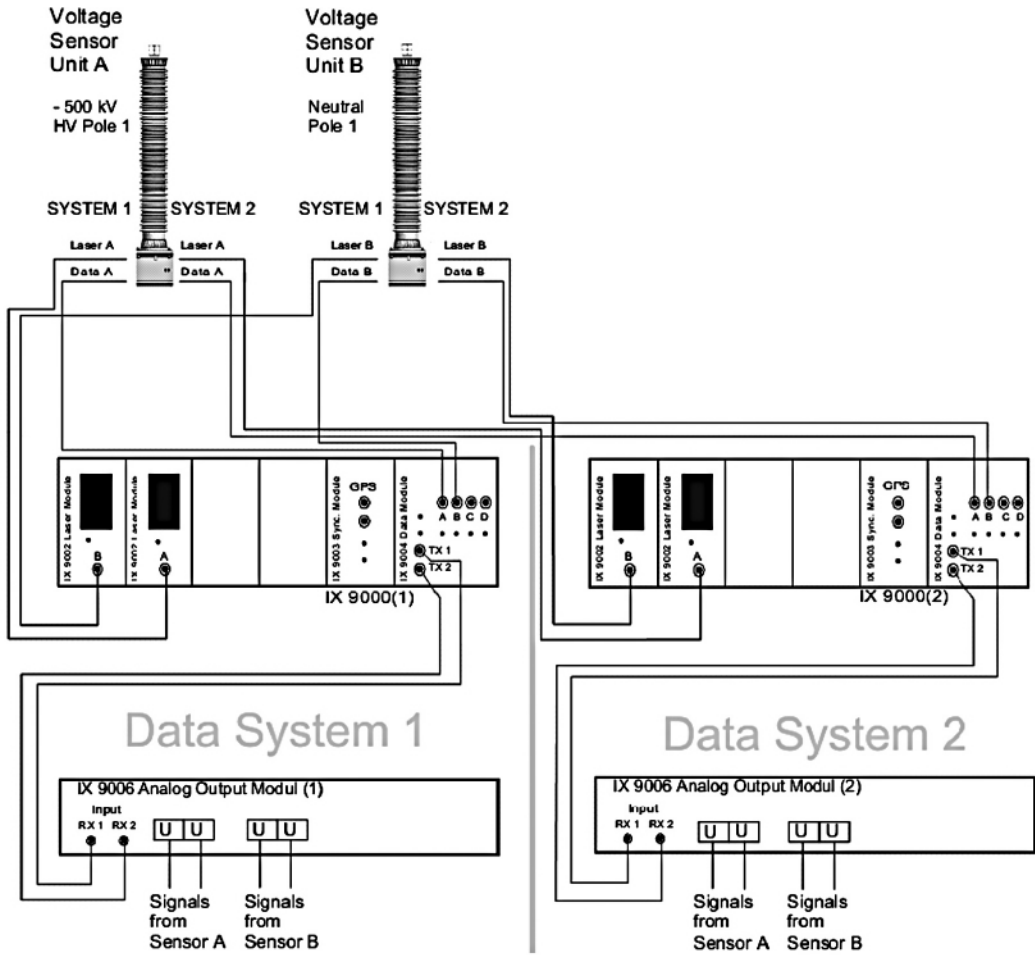


图1 直流电压测量系统系统结构图

Schniewindt 直流分压器电压采集传输由 IX 9000 - G2 OPDL 系统完成。该系统由三个模块组成,即远端模块、本地系统和模拟输出模块。系统结构如图1所示。

远端模块(9001)安装在直流分压器结构上,负责现场数据采集,包括电源转换器和相关的电源调节电路、三个装有前置放大器和滤波器的16位模拟-数字信号转换器(ADC)、数字控制电路以及用于回传数据通信的LED。

本地模块(9000)包括激光模块、同步模块和数据模块。激光模块向其所连接的远端模块9001提供光电源及时钟信息;同步模块用于提供时钟,以保证所有远端模块输入同时开始采样。这些脉冲通过后面板传输给激光模块。

模拟输出模块(9006)把本地模块输出的光信号转换为模拟量信号,提供给极保护PPR、极控制PCP和故障录波。

2.2 故障分析

由图1可见,直流分压器接口屏送至极保护PPR

保护启动和保护出口程序的信号均来自同一个远端模块9001传输过来的电压信号,只要这一套远端模块9001、本地模块9000和模拟输出模块9006中的某个环节出现异常,极保护PPR就会动作。

在直流输电系统故障后,德阳站成功进行带线路开路(OLT)试验,说明直流线路无故障。通过对故障录波数据进行分析,发现极母线和中性母线电压波动较大,直流分压器送至PCP和PPR的电压信号存在突变现象。

综上所述,在直流分压器送至保护的信号不冗余的条件下,由于极保护PPR上的保护启动和保护出口程序共用同一个远端模块9001传输过来的电压信号,当电压测量回路上的任何一个环节出现异常,尤其是直流分压器电压信号突变的情况下,直流保护启动回路及出口程序都将判断系统故障,并启动闭锁直流系统。因此,直流分压器送至保护的信号不冗余及直流分压器电压信号的突变,是导致直流系统闭锁的直接原因。

(下转第90页)

报, 2009(20): 176.

- [2] 韦红斌. 浅谈防止误操作的对策[J]. 湖州师范学院学报, 2009(S1).
- [3] 张健, 朱永利, 李东. 操作票专家系统的研究现状及其前景[J]. 电力情报, 2002(1): 61-64.
- [4] 张健, 朱永利, 杨子强等. 适用于变电站操作票推理的面向对象知识表示法[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(1): 63-65, 81.
- [5] 翟学明, 谢萍, 戚宇林等. 电网调度操作票专家系统中的知识表示方法[J]. 华北电力大学学报, 1998, 25(3): 98-102.
- [6] 张永生. 变电站智能操作票专家系统的开发应用[J]. 华东电力, 2000, 28(9): 23-25.
- [7] 李焕中. 电厂可视化操作票及PDA防误操作系统的设计[J]. 科技资讯, 2009(28): 25-26.
- [8] 邢晓敏, 赵东, 王兴奇. 通用型电气倒闸综合防误系统的研发[J]. 科技资讯, 2007(28): 8.
- [9] 邢晓敏, 王兴奇. 新型防误闭锁装置在智能操作票专家

系统中的应用[J]. 科技资讯, 2006(14): 8-9.

- [10] 马文建. 变电站仿真培训系统中操作票专家系统开发与实现[D]. 华北电力大学(河北), 2009.

作者简介:

袁贵川(1977) 毕业于浙江大学, 硕士, 长期从事电力系统调度运行工作。

庞晓艳(1968) 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统运行、电网稳定管理等方面研究工作。

张宏图(1973) 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统运行管理等方面研究工作。

王超(1976) 男, 工程师, 硕士, 主要从事电网调度运行、电力市场等方面研究工作。

肖志强(1978) 男, 工程师, 硕士, 主要从事电网调度运行、智能防误等方面研究工作。

陈登科(1981) 男, 江苏宁波人、工学学士, 主要从事电力系统高软设计工作。

(收稿日期: 2011-05-10)

(上接第60页)

3 解决措施

针对此次事故暴露的问题, 故障的根本原因在于直流分压器送至保护的信号不冗余, 因此, 若直流系统保护的启动与保护出口单独各自使用相应的传输系统时, 即使个别元件异常, 也不会导致保护启动与保护出口程序的同时出口, 从而导致直流系统的闭锁, 最多也只是引起相应PPR系统退出备用, 而冗余的PPR系统仍然能够保证在真正故障出现时及时切除故障, 保障直流输电系统设备的安全。

按照上述思路对德宝直流系统的直流分压器进行相应的冗余改造, 系统结构如图2所示。

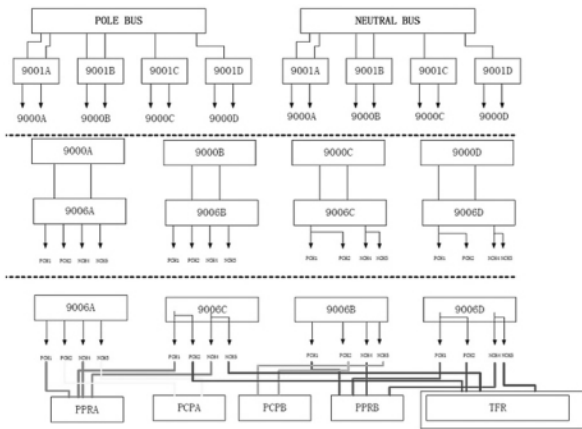


图2 冗余结构改造方案

由图2可见, 通过在每极直流分压器的两个接口柜上各增加一套IX 9000 - G2 OPDL系统, 即极母线

直流分压器增加两个远端模块9001, 中性母线直流分压器增加两个远端模块9001, 直流分压器接口柜A和直流分压器接口柜B上分别增加一套本地模块9000和模拟输出模块9006, 极保护PPR上的保护启动和保护出口程序不再使用同一个远端模块9001传输过来的电压信号, 这样能够有效避免一个远端模块采集信号的波动造成极保护的启动程序和出口程序同时满足跳闸条件, 增加了系统运行的稳定性。

4 结 语

根据德宝直流输电系统由于直流分压器导致的系统闭锁情况分析, 结合直流输电系统在电网稳定中的枢纽地位, 建议在有条件的情况下慎重考虑直流控制保护系统中各个监测量的冗余策略, 必要时可采取增加冗余度的方法, 确保直流输电系统运行的可靠性。

参考文献

- [1] 吴泽辉, 张鹏, 左干清. 高肇高压直流系统电压波动的分析与处理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 104-107.
- [2] 郭树永, 郝江涛. 天生桥换流站高压直流分压器雨闪事故分析[J]. 四川电力技术, 2008, 31(2): 36-37.
- [3] 陕华平. ± 500 kV 龙泉换流站极I极母线直流分压器故障导致直流系统闭锁原因分析[J]. 华中电力, 2010, 23(2): 42-44.
- [4] 饶洪林, 姚其新, 饶磊. 龙泉、江陵换流站直流分压器闪络原因分析及对策[J]. 华中电力, 2010, 23(1): 55-57.

作者简介:

胡翔(1976) 毕业于四川大学, 硕士, 长期从事电力系统调度运行工作。

(收稿日期: 2011-05-09)

单芯电缆实时载流量计算方法研究

李伟¹, 曾宏², 杨琳², 朱轲²

(1. 四川省电力公司 四川 成都 610054; 2. 四川电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘要: 以电缆温度在线监测为基础, 结合实时负荷数据和温度信息, 采用有限元方法, 对单芯电缆温度场进行分析, 实时计算地下电缆的温度场和载流量。该计算方法考虑了外部土壤热阻的实时计算和更新, 用环境温度、表面温度和实时负荷来间接计算。实验表明: 该方法能准确获取电缆温度场和实时载流量, 对提高电缆运行可靠性和输送能力具有重要意义。

关键词: 载流量实时计算; 表面温度; 温度场; 有限元法

Abstract: Based on on-line monitoring of cable temperature, and combined with real-time load data and temperature information, the temperature field of single-core cable is analyzed by using finite element method, which calculates the temperature field and carrying capacity of underground cable. The method takes the thermal resistance of the soil into account, which is calculated indirectly with ambient temperature, surface temperature and real-time load. The experiments show that cable temperature field and real-time carrying capacity can be obtained by the proposed method, which is of great significance in improving the operation reliability and transmission capacity of the cable.

Key words: real-time calculation of carrying capacity; surface temperature; temperature field; finite element method

中图分类号: TM751 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)04-0061-04

0 引言

高压电力传输主要有两种方式: 地下电缆和架空线路。随着经济社会的不断发展, 电力电缆在电能传输中越来越重要。由于其成本高、投资大, 如何充分利用电缆的传输能力, 也得到了学术界的广泛关注。运行经验表明, 电缆的实际运行环境和环境温度绝大多数情况下比额定载流量假定的条件好很多, 未能充分利用电力电缆的传输能力。

目前, 35 kV 等级以上的电缆基本安装了电缆温度监测系统, 其中重要线路的高压/超高压电力电缆采用分布式光纤测温系统。利用这些温度监测系统, 可实时获取外护套表面温度来计算导体温度, 从而实时控制电缆的载流量^[1-4]。电缆敷设好后, 载流量的影响因素主要是环境温度、外部热阻和外部热源。外部热阻一直以来都是载流量准确计算的难点。基于 IEC 287 标准, 下面用环境温度、表面温度和负荷来间接实时计算外部热阻。在此基础上, 则提出了单芯电缆载流量的实时计算方法, 经与载流量试验数据比较, 验证了该方法的准确性。

1 外部土壤热阻的实时计算

对于地下敷设电缆, 土壤热阻系数一般采用分区域处理。根据现场实测土壤方面的资料和一般经验来选择, 是一个静态值。实际上土壤热阻系数受温度、水分、气候等因素影响, 是随时间和空间变化的动态值。单芯电缆的稳态热路模型如图 1 所示。

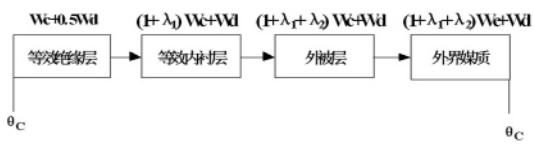


图1 单芯电缆稳态等效热路图

图中, θ_a 是外护套表面温度, $^{\circ}\text{C}$; θ_0 是环境温度, $^{\circ}\text{C}$; T_4 为外界媒质热阻, $\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$; λ_1 、 λ_2 分别为金属护套损耗、铠装损耗与导体损耗之比; W_c 、 W_d 分别为电缆单位长度导体损耗、介质损耗, J/m 。

由图 1 可得

$$\theta_a - \theta_0 = T_4 (1 + \lambda_1 + \lambda_2) W_c + W_d \tag{1}$$

介质损耗在运行中基本不变。由式 (1) 得到以下函数关系。

$$f(T_4) = \beta \times \frac{I^2}{(\theta_a - \theta_0) - W_d} \tag{2}$$

β 是一个常系数。 T_4 土壤热阻系数可由现场实测数据得到,作为标准值。式中参数均能测得,代入计算得到 β 值。结合实时获取的表面温度、环境温度和负荷大小,利用已知的 β ,重新计算 T_4 。电缆表面温度长期超过一定数值,土壤湿度或外部热源发生较大改变等情况,就会引起 T_4 计算值明显偏离。如果计算值与标准值的相对误差超过一定数值(比如5%),就用计算值或重新现场测取来更新 T_4 。

2 单芯电缆温度场和载流量实时计算方法

载流量实时计算就是求解电缆温度场的有限元方程,当导体温度达到最大允许温升时的负荷大小。实际运行中,实时负荷、环境温度、外部热阻等因素改变时,电缆温度场就由稳态温度场进入暂态温度场。暂态温度场计算涉及到电缆热容和内部热源的起始条件。根据稳态方程来求解得到初始条件后,在暂态过程中,每一个时刻计算出的热容值均作为下一时刻的起始条件,用迭代法求解。

2.1 暂态温度场的有限元方程

电缆温度变化的暂态过程必须考虑电缆结构材料中热容产生的吸、放热作用。热容的存在,使得导体的温升是经过热平衡才到达稳态。最受关注是导体温度。

有限元方程基于以下假设。

(1) 多芯扭绞导线等效为截面面积相等的单芯圆导线,电缆材料的热物性为常数;

(2) 热源发热均匀。

电缆暂态温度场属于含有内热源的二维导热,考虑电缆分布热容,其数学模型为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} - \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) = q_v \quad (3)$$

式中 ρ 为密度, kg/m^3 ; c 为比热容, $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$; T 为点 (x, y) 处的温度, K ; λ 为导热系数, $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$; q_v 为体积生热率, W/m^3 。

交流电力电缆的内热源主要是导体损耗、介质损耗、护套损耗和铠装损耗,根据文献[2]计算。结构参数根据厂家推荐值或采用相应产品国家标准中的规定值。

2.2 边界条件

热量通过热传导、对流和辐射等形式向外散发。根据传热学,边界条件可归结为三类^[5-7]。

$$T(x, y)|_r = f(x, t)|_r \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_r + q_2 = 0 \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_r = \alpha(T - T_f)|_r \quad (6)$$

式中 q_2 为热流密度, W/m^2 ; α 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_f 为环境温度, K ; r 为积分边界。

暂态方程和边界条件都与时间有关。有限元计算就是将暂态过程离散为若干个时刻的连续,初始时刻的边界条件根据稳态温度场来确定,以后各时刻的边界条件为上一时刻的数值结果。计算时采用三角形单元,用交叉迭代法求解。当迭代收敛于 10^{-5} 时,认为“等于”解析值,终止迭代。

2.3 实时载流量计算方法

地下直埋方式时单芯电力电缆实时载流量计算流程如图2,采用迭加法,具体计算过程见流程图2。

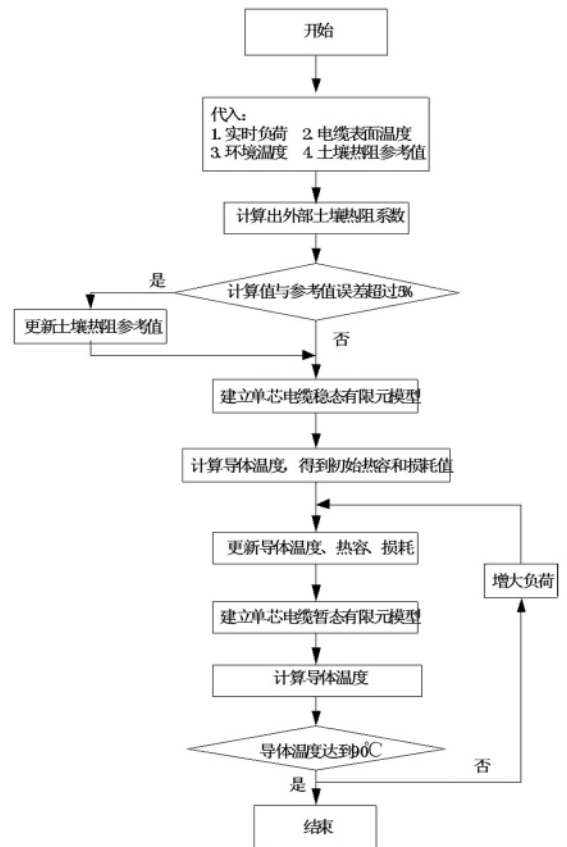


图2 地下直埋单芯电缆载流量实时计算流程图

1) 根据实时负荷、外护套表面温度和环境温度,计算实时土壤热阻系数,一旦与参考值的误差超过5%,就更新土壤热阻系数。

2) 利用实时的土壤热阻系数和其他数据,用有限元计算得到稳态温度场分布、热容和损耗的初始条件。

- 3) 更新导体交流电阻、热容及损耗值。
- 4) 建立暂态温度场模型,将土壤热阻系数、环境温度、初始热容等参数代入暂态有限元方程中进行计算,得到导体温度。
- 5) 然后重复第三步,迭代直至导体温度达到 90℃。此时的负荷就是实时载流量。

3 实验验证

3.1 电缆参数

选用 35 kV YJLV 1×50 mm² 交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电缆,铺设在空气中进行实验验证,电缆结构及热性能参数如表 1。其中所取的主要参数如下:聚氯乙烯的热阻系数为 3.5℃·m/W,交联聚乙烯的热阻系数为 7℃·m/W,环境温度为 7℃。对 110 kV 以下的电缆,焦耳热是主要的热源。由于电压等级较低,介质损耗较小,同时与大电流实验数据对比,这里不考虑介损。

表 1 35 kV YJLV 电缆参数

	结构/mm	热容/J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
导体直径	8.3	900
绝缘厚度	10.3	2 640
铜带屏蔽	1.0	385
外护套厚度	2.1	1 130
电缆外径	35.1	

将半导体层合并到绝缘层,电缆分为导体、绝缘层、铜带和外护层。采用三角形单元计算,在各层相邻处进行网格加细,以保证计算精度,一共 5 072 个单元数。

3.2 实验原理接线图

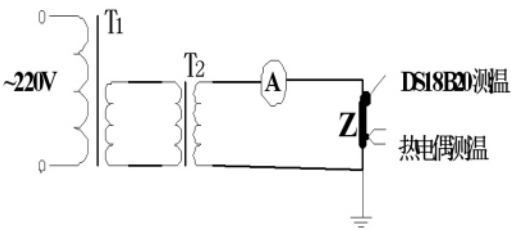


图 3 实验原理接线图

图 3 中 T1 是调压变压器,T2 是大电流变压器,A 是钳形电流表,Z 是电缆试样,热电偶对电缆导体测温,DS18B20 对电缆护套表面温度测温。用电缆大电流加载装置给电缆加载 150 A 电流至稳态后,瞬间增至额定载流量 200 A,利用热电偶监测电缆暂态过程中的温升变化。

3.3 实验结果及分析

在不同环境温度和外部散热条件下进行载流量实验。

(1) 环境温度恒定时负荷改变

实验进行中,环境温度在 19.9 ~ 20.5℃变化,可忽略环境温度对载流量的影响。

对于处于负荷为 100 A 稳态情况的电缆瞬间增大负荷至 150 A。实验过程中用电缆温度测温装置测得表面温升曲线如图 4 所示,导体温升的实验值和计算值如图 5 所示。通过查询可知,表面温度从 20.9℃缓慢上升到 29.3℃,载流量曲线如图 6。在实际环境温度 20℃下,额定载流量为 192 A。负荷即便超过了 192 A,但是未达到实时计算的载流量,导体未超过允许温度,电缆仍然安全运行。通过导体温度计算值和实验值的比较,证明了暂态下提高电力电缆短时负荷来挖掘电力电缆输送潜力是可行的,尤其是对冬季环境温度低、电力需求大的北方,是能解决紧急情况下的电力调度问题。

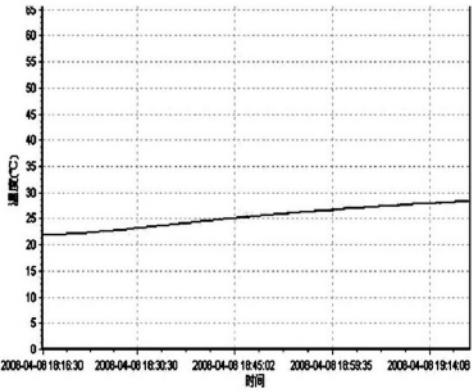


图 4 表面温升曲线

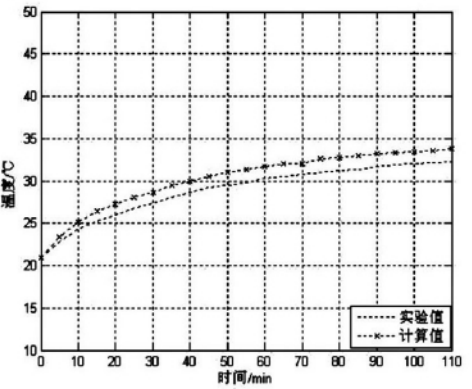


图 5 导体温升曲线

由图 4、5、6 可以看出:采用有限元法得到的计算结果均高于实验数据,随着导体温度的升高,相对误差反而减小。产生误差的原因主要是三方面:①有限

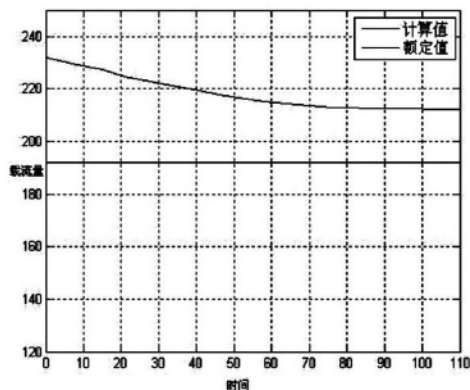


图6 实时载流量曲线

元法的实质是一种近似计算;②电缆参数通常采用厂家的产品值,与实际电缆情况存在误差;③外护套温度值的测量值比真实值偏低,温度传感器与电缆各层存在接触热阻。第三种是主要原因,对温度数据进行超前校正能减小误差。

(2) 恒定负荷下环境温度改变

图7为春季某日上午8点到晚上8点实验室的空气温度变化曲线,电缆负荷为100A时,电缆试样的载流量曲线如图8所示。额定载流量192A是在标准环境情况(空气温度为40℃)利用稳态温度场

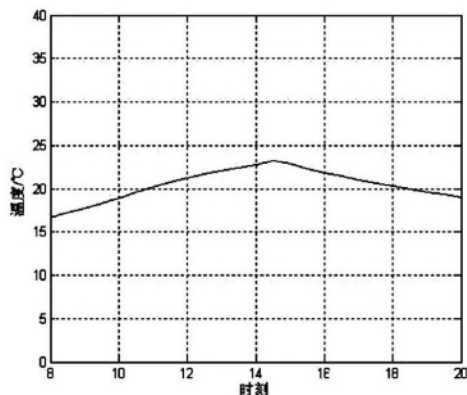


图7 环境温度变化曲线

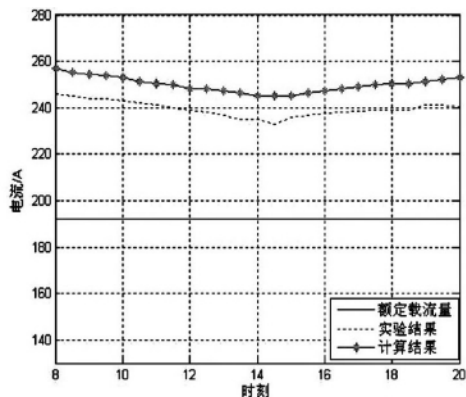


图8 实时载流量曲线

计算得到的。实时载流量的计算值比实验结果略高,在环境温度最高为23.2℃时,计算值为245A,实验值为233A,误差为4.8%;环境温度为16.7℃时,计算值为257A,实验值为246A,误差为4.2%。鉴于一部分误差由实验测温仪器带来的,总体来说,计算值和实验结果是较接近的,根据实时信息提高电缆负荷来挖掘电缆输送潜力是可行的,其实时计算的结果对电力调度人员在电力电缆负荷分配时有重要的参考价值。

4 结 论

利用电缆热阻法,用表面温度、环境温度及负荷来间接监测外部热阻,该方法克服了传统载流量计算中对外部热阻难准确获取的困难。在此基础上用迭加法实时计算单芯电缆载流量。

对35kV YJLV1×50mm²交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电缆敷设在空气中进行了载流量实验。将负荷和环境温度两种影响因素改变时的实验结果和有限元计算结果进行比较,误差在5%之内,验证了该单芯电缆实时载流量计算方法的有效性和正确性。

参考文献

- [1] Goehlich, L., Donazzi, F., and Gaspari, R. Monitoring of HV Cables Offers Improved Reliability and Economy by Means of Power Sensors [J]. Power Eng. J., 2002, 16 (3): 103 - 110.
- [2] 王东涛,高丹.基于组态王的动力电缆温度在线监测系统[J].中国电力,2006,39(4):79-82.
- [3] 刘毅刚,罗俊华.电缆导体温度实时计算的数学方法[J].高压技术,2005,31(5):52-54.
- [4] 马国栋.电线电缆载流量[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [5] 傅晨钊,汲胜昌,王世山,等.基于有限元法的电缆变压器绕组的暂态热路模型研究[J].电工技术学报,2003,18(2):77-82.
- [6] 于承训.工程传热学[M].成都:西南交通大学出版社,1990.
- [7] 孔祥谦.有限单元法在传热学中的应用(第三版)[M].北京:科学出版社,1998.

作者简介:

李伟(1978),男,工程师,安徽人,高电压与绝缘技术专业硕士研究生毕业,现从事电网技术管理工作。

一起有载开关故障案例分析

胡海
(德阳电业局,四川德阳 618000)

摘要:有载开关是变压器的重要组成部分,有载开关性能的好坏直接影响到变压器的健康状态,通过对一起有载开关的故障检测、分析和处理为类似的情况提供参考。

关键词:切换开关;直流电阻;主通断触头;烧损

Abstract: On-load tap-changer is an important component of transformer, and the performances of on-load tap-changer has a direct effect on the state of transformer. The fault detection, analysis and processing of on-load tap-changer are given for a reference.

Key words: change-over switch; DC resistance; main switching contacts; overfire

中图分类号: TM56 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)04-0065-02

0 简介

有载调压变压器的直流电阻数据分布有很强的规律性,当直流电阻不合格时,可以根据数据的分布规律准确定位故障点,判断故障性质,为检修决策提供恰当的建议,从而提高检修的针对性和可靠性。

1 试验结果及分析

1.1 修前试验及分析

2011年3月26日,在对某局某变电站Ⅲ号主变压器进行大修前的高压试验中,发现主变压器高压绕组本体直流电阻不合格,数据呈现出表1的变化规律。

从高压绕组数据中可以看出高压C相绕组直流电阻双数挡偏大。根据高压绕组和有载开关的结构,可以画出有载开关的电路图,如图1。由于所有奇数挡直流电阻正常,所以,主绕组和极性转换开关正常,所有双数挡C相电阻偏大,从原理图上可以看出故障应该在有载分接开关上与偶数挡相关的电路部分,共有4个区域,分别是:分解选择器触桥(区域1)、输出环和引线相连接部分(区域2)、抽出式引线部分(区域3)、切换开关动静触头部分(区域4)。

1.2 吊罩后试验与分析

吊罩后对有载开关回路进行分解测试,结果如

表1 高压绕组直流电阻数据				
档位	A相 /mΩ	B相 /mΩ	C相 /mΩ	不平衡率 /%
1	453.0	452.3	453.6	0.287
2	445.5	445.4	457.0	2.604
3	438.2	437.7	438.0	0.114
4	430.3	430.3	446.9	3.858
5	423.0	422.4	422.9	0.142
6	415.3	415.0	429.6	3.518
7	407.5	406.9	407.6	0.172
8	399.7	399.6	410.0	2.603
9a 9b 9c	390.8	390.3	403.3	3.331
10	399.2	399.2	410.3	2.781
11	406.9	406.6	407.5	0.221
12	414.5	414.4	429.5	3.644
13	421.9	421.7	422.7	0.237
14	429.8	429.7	440.0	2.397
15	437.3	437.0	437.8	0.114
16	445.1	444.8	452.4	1.709
17	452.6	452.4	453.3	0.199

表2。R2-W2为2分接至切换开关筒壁抽出式引线部分的电阻。由于这部分电阻三相都很小,不足1mΩ,而C相偶数挡比A、B两相至少大7.6mΩ,因此,故障不会在这个区域,只有可能在切换开关的触头部分。对切换开关进行测试,结果见表3。从测试结果可以看出C相双数挡接触电阻严重超标,远远超过标准要的500μΩ。

将切换开关解体检修,发现切换开关并未配置主触头,主通断触头严重烧损。由于没有主触头,因此

高压绕组电流仅靠主通断触头通流。从图 2 切换开关的变换程序可以看出,在步骤(3)时,主通断触头 K1 断开,产生电弧,该电弧在电流第一个零位熄灭^[1],K1 断口处恢复电压 $U_{k1} = IR$ 。主通断触头 K1 在经过反复切换后被烧损。

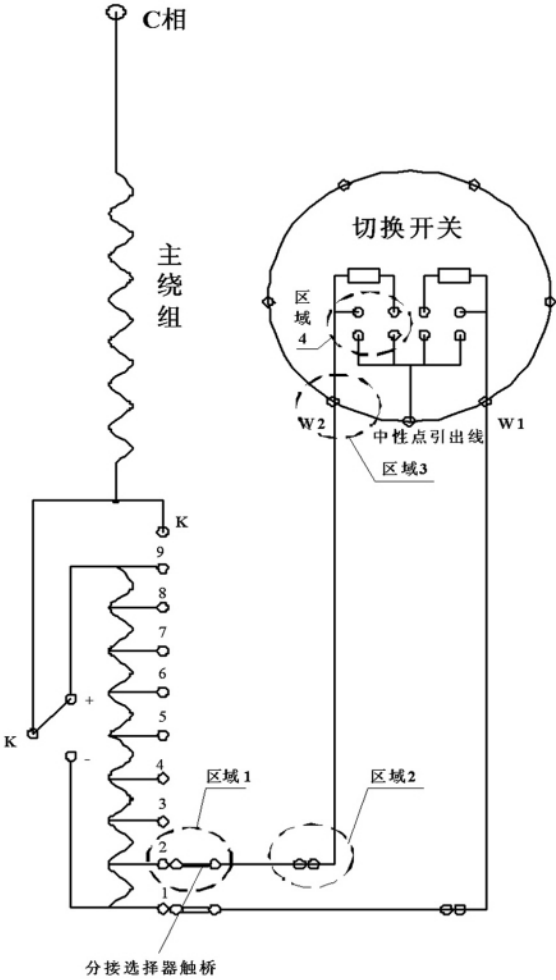


图 1 M 型有载开关原理图

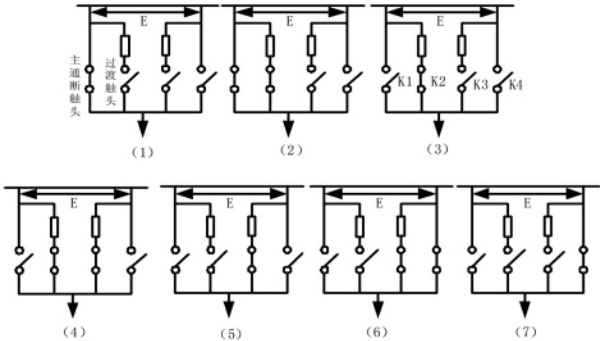


图 2 M 型切换开关的变换程序

表 2 直流电阻数据分解测试结果

测试部位	A 相	B 相	C 相	不平衡率
主绕组	397.1 mΩ	396.8 mΩ	396.9 mΩ	0.076%
R ₂ - W ₂	344.9 μΩ	397.0 μΩ	431.1 μΩ	

表 3 切换开关接触电阻测试结果

测试部位	A 相 /μΩ	B 相 /μΩ	C 相 /μΩ
双数侧	877.4	375.4	7 870.0
单数侧	500.0	2 050.0	2 199.0

吊罩前高压 C 相绕组双数挡直流电阻平均比 A、B 两相绕组大 10 多个毫欧,与吊罩后切换开关的测试结果不吻合,这是由于主通断触头烧损后,表面粗糙,接触电阻本身就存在较大的随机性,每次测试结果都不一致。另外,吊罩前,触头在油中,闭合时触头间存在一层油膜,油膜会使测试结果偏大。

1.3 修后试验结果

切换开关经过处理后,重新进行检查测试,切换开关测试结果见表 4,高压绕组测试结果见表 5,从修后试验可以看出,经过处理后,有载开关恢复正常。

表 4 修后切换开关接触电阻测试结果

测试部位	A 相 /μΩ	B 相 /μΩ	C 相 /μΩ
双数侧	215.0	151.9	108.2
单数侧	154.7	122.5	109.0

表 5 修后高压绕组直流电阻数据

档位	A 相 /mΩ	B 相 /mΩ	C 相 /mΩ	不平衡率 /%
8	409.5	409.3	409.2	0.073
9a 9b 9c	400.7	400.5	403.8	0.824
10	409.1	409.4	410.7	0.391
11	416.6	416.7	417.9	0.312
12	424.0	423.3	425.1	0.425
13	431.3	430.9	432.6	0.395
14	439.6	439.0	440.7	0.387
15	447.3	446.8	448.6	0.403
16	454.9	454.5	454.6	0.088
17	462.7	464.2	462.6	0.346

2 结 语

(1) 由于切换开关的主通断触头在开断电流时产生放电,因此,主通断触头并不是通流的理想选择。虽然经过处理后有载开关恢复正常,但在经过反复切换后,主通断触头仍然会被烧损,接触电阻增大,引起触头发热,影响变压器安全运行。

(2) 某些厂家早期的切换开关存在减配主触头的情况,为了让变压器长期安全稳定运行,在条件许可时,应加装主触头。

参考文献

[1] 陈敢峰. 变压器分接开关实用技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社 2002. (收稿日期: 2011 - 04 - 27)

因受潮引起 35 kV 开关柜事故的技术分析

谌天亮

(夹江供电局 四川 乐山 614100)

摘要: 对2010年7月15日某110 kV变电站35 kV开关柜因受潮而发生的一起事故进行技术分析,并提出相应防范措施以减少类似情况引发的电网事故。

关键词: 开关柜; 事故分析; 预防

Abstract: On 15 July, 2010, there is a fault occurred in 35 kV switchgear cabinet which is affected with damp in an 110 kV substation. The fault is analyzed, and the preventive measures are proposed in order to reduce the similar faults.

Key words: switchgear cabinet; fault analysis; prevention

中图分类号: TM564 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)04-0067-02

0 引言

高压开关柜是以断路器为主的电气设备,作为重要的开关设备在电力系统中使用量极大,分布面广,这也使得高压开关柜事故在各种电压等级开关设备事故中占有很大比例,严重威胁电网的安全运行。

2010年7月15日,某110 kV变电站发生了一起因35 kV高压开关柜故障导致主变压器开关跳闸,致使35 kV I、II段母线失压的电网事故(该变电站只有一台主变压器,35 kV系统主接线方式为单母线分段)。此次事故造成该站接带的1座35 kV变电站全站停电,减供负荷17 MW,损失电量约400 MWh。

1 事故情况

1.1 事故经过

2010年7月15日23时06分,运行值班人员反映变电站主变压器502开关跳闸,35 kV I、II段母线停运,情况紧急,需要立即对设备进行抢修。运行值班人员随后根据保护装置动作情况查明:变压器中后备保护动作,造成主变压器中压侧断路器跳闸。

检修人员经现场勘察,该故障是由于35 kV II段母线相间短路造成的。

1.2 事故现场

对事故现场进行勘察发现事故点如图1所示,位于35 kV II段母线TV、35 kV 596开关柜35 kV母线处。

35 kV II段母线TV柜后柜面板因事故变形,母

线室内被弧光烧得一片漆黑。安装于室内的母线、穿墙套管、绝缘护套表面均铺满了金属瞬间融化时所喷发的金属颗粒,35 kV II段母线与II母TV柜相连的搭接头处的内六角螺栓被烧至融化。母线室内所有设备绝缘试验数据无法满足运行要求,35 kV II段母线TV、35 kV 596开关试验后未见异常。



图1 35 kV II段母线TV柜所在母线室

1.3 事故后果

此次事故造成该变电站35 kV系统失压,并导致该站接带的1座35 kV变电站全站停电,减供负荷17 MW,损失电量约400 MWh,3家大用户和一个乡镇全部断电,经济损失近40万元。

经检查及试验后判断,此次事故致使以下设备已无法继续使用,需要更换。

1) 35 kV 596开关柜与35 kV II段母线TV柜之间的穿墙套管。

2) 35 kV II段母线TV柜与35 kV备用柜之间的

穿墙套管。

3) 35 kV II 段母线 TV 柜与 35 kV II 段母线相连的静触头座套管。

4) 35 kV 596 开关柜与 35 kV II 段母线相连的静触头座套管。

1.4 事故处理

针对柜与柜之间的穿墙套管(35 kV 596 开关柜与 35 kV II 段母线 TV 柜之间的穿墙套管、35 kV II 段母线 TV 柜与 35 kV 备用柜之间的穿墙套管),使用新的 CMZ-35 穿墙套管进行更换。

针对静触头座套管(35 kV II 段母线 TV 柜、35 kV 596 开关柜静触头座套管),由于备品采购时间原因,采取以下方案进行更换:将备用柜、35 kV I 母 TV 柜内的静触头座套管暂时更换到 35 kV 596 开关柜和 35 kV II 段母线 TV 柜上。

2 事故原因分析

检修人员在对故障设备进行检查发现,35 kV 开关柜内母线、穿墙套管、绝缘子、隔板及开关柜门内壁上都存在较多的凝露,潮湿情况十分严重;其中 35 kV II 母 TV 柜受潮最严重的。事故原因分析如下。

35 kV II 母 TV 处静触头穿墙套管与 35 kV II 段母线搭接处有受潮凝露,凝露水滴顺着弧形管流至穿墙套管下部。由于 35 kV II 母 TV 隔离开关母线室与 35 kV 596 断路器室之间装设了平行的环氧树脂绝缘板,当隔板表面长期受潮时,隔板表面极易形成爬弧,产生闪络放电,随着放电次数的增加,隔板表面结构被破坏,更易吸附气体中的水分和其他导电物质,可溶性的导电物质逐渐溶解于水,成为电解质,在隔板表面上形成一层薄薄的导电液膜,使隔板绝缘性能降低。近期多阴雨天气,断路器室内湿度大,隔板表面闪络放电次数更加频繁,断路器室内自由电荷急剧增多,在电场作用下,气体中的自有电荷发生撞击游离,产生“电子崩”现象,又由于天气炎热,环境温度高,气体蒸发使断路器、隔离开关母线室自由电荷密度比断路器室密度大,形成自持放电,当自持放电发展到

整个间隙,气隙即被击穿,产生相间短路或母线对地短路,最终导致 35 kV 596 开关柜引起 35 kV 母线对地放电,弧光造成三相短路,最终保护动作使主变压器 502 开关跳闸,造成 35 kV I、II 段母线失压事故。

根据以上事故分析,可见本次事故的主要原因是该 35 kV 开关柜为 2001 年产品,未安装除湿装置,在这样的运行条件下,35 kV 设备长期受潮,设备对地绝缘降低,在受潮最严重的 35 kV II 母 TV 柜发生短路故障引发了此次事故。

此外,运行单位对于设备受潮缺陷没有引起足够重视,没有加装除湿和通风装置,改善设备运行环境也是导致此次事故发生的间接原因。

3 防范措施

1) 要做好设备招标工作,有关技术要求要写进标书,按地理环境选择设备,柜内应有防潮设施。

2) 有关部门应监督好土建施工方完善高压开关柜室内的防水、防潮湿的细节处理工作,做好设备的验收工作。

3) 加强设备的检修工作,做好设备周期性预防试验,对于有类似隐患的设备应尽早进行技术改造,避免再次发生同样的事故。

4) 变电值班员加强现场巡视力度,认真检查设备运行情况。

4 总 结

由于四川境内气候潮湿,空气湿度大,若不能做好相应的防潮措施极易造成高压开关柜内受潮而引发类似的电网事故。因此,应从源头把好关,做好规划设计,加强管理与维护工作,做好防范措施,避免再次发生同样的事故。

作者简介:

谌天亮(1982)男,河南信阳人,学士,主要从事电力系统调度运行工作,助理工程师。

(收稿日期:2011-03-30)

欢 迎 订 阅

《四川电力技术》

基于模糊综合评判的断路器可靠性状态评估

谢 伟,卢更生,谭 杰,刘芳芳
(宜宾电业局,四川 宜宾 644002)

摘 要: 由于设备制造质量的提高,高压断路器逐渐成为少维护或免维护的设备,为保证供电的可靠性,需密切关注其运行工作状态,确保及时必要的维修工作。利用模糊数学的思想,提出一种模糊综合评判的方法来评估断路器工作状态,将表征断路器工作状态的可靠性参数结合起来,为断路器状态检修工作提供依据。

关键词: 高压断路器; 状态检修; 模糊综合评判

Abstract: HV circuit-breaker has gradually become the equipment needing less maintenance or free of maintenance due to the improvement of equipment manufacturing quality, but in order to ensure the reliability of power supply, a close attention to its operating condition is needed to guarantee the necessary maintenance in time. Using the idea of fuzzy mathematics, a fuzzy comprehensive evaluation method is proposed to evaluate the working condition of the circuit-breaker, and the proposed method is combined with the reliability parameters which characterize the working condition of circuit-breaker, which gives a reference for the condition-based maintenance of circuit-breaker.

Key words: HV circuit-breaker; condition-based maintenance; fuzzy comprehensive evaluation

中图分类号: TM561 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)04-0069-03

0 引 言

随着电网规模的不断扩大,电网设备数量不断增加,传统的基于周期的设备检修模式已呈现出工作量增加、人员紧缺的问题,已经不能适应电网发展的要求。为提高设备检修工作的针对性和有效性,合理降低检修成本,国家电网公司于2007年全面推行输变电设备状态检修的建议。

高压断路器在电力系统中担负着控制、保护的双重作用,为确保其运行的可靠性,减少浪费,提高设备的可用率,许多科研单位和运行部门对其状态检修的评估研究也投入了大量的人力物力,并取得一定的成果。但由于对断路器的状态检测工作处于起步阶段,目前还仅限于对断路器机械和电气特征的研究,随着可靠性工作的要求和开展,越来越多的关注将放在设备可靠性的工作参数上来。

1 模糊综合评判

模糊数学是通过使用模糊集合来工作的,是一种

解决不精确不完全信息的方法,其最大特点就是用它
可以比较自然地处理人类思维的主动性和模糊性。
综合评估是对多种影响事物的优劣、好坏的因素进行
评比、判别,做出一个能合理地综合这些因素的总体
评判。模糊综合评判要处理的主要问题是:对每一个
因素赋予一个非负实数值作为评判指标,再据此排序
择优^[1]。

模糊综合评判的主要步骤^[2]如下。

1) 确立因素集。评判对象的性能或各种参数指标的集合,表示为 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。

2) 确立权重集。根据各个因素 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的重要程度给出不同的权重,表示为 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 。通常应满足归一化和非负条件: $\sum_{i=1}^n a_i = 1, a_i \geq 0$ 。

3) 确立评判集。由评判对象可能做出的评判结果组成的集合,表示为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$,采用相应的方法确定最底层评判因素的隶属函数。

4) 建立因素评判矩阵。从因素集 U 中的单个因素出发,确定评判对象对评判集中个元素的隶属程度。则对第 i 个因素的评判集合为 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$,将 n 个 R_i 竖排得到模糊矩阵为

表 1 沙江南线 268 开关运行记录表

起始时间	终止时间	持续时间	作业起始时间	作业终止时间	作业持续时间	状态符
2006-03-26 08:42	2006-03-26 17:17	8.58			0.0	PR
2006-03-26 17:17	2006-03-27 18:30	25.22	2006-03-26 17:17	2006-03-27 18:30	25.22	T
2006-07-07 12:30	2006-07-08 18:20	29.83	2006-07-07 12:30	2006-07-08 18:20	29.83	U ₀₃
2008-07-09 11:10	2008-07-11 10:20	47.17			0.0	PR
2008-07-11 10:20	2008-07-12 11:00	24.67	2008-07-11 10:20	2008-07-12 11:00	24.67	T
2008-07-12 11:00	2008-07-13 11:20	24.33			0.0	PR
2009-12-01 08:37	2009-12-02 21:03	36.43			0.0	PR

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

5) 模糊综合评判。按照模糊矩阵的乘法,得到模糊综合评判集 $B = A \cdot R$,即

$(b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_m) =$

$$(a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_n) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

其中 b_j 为模糊综合评判指标,它的含义是:在综合考虑所有影响因素的情况下,评判对象对评判集 V 中第 j 个元素的隶属度。

2 高压断路器状态评估可靠性因素分析

一个设备的状态指该设备在特定时间里所处的特定状态。正确划分设备的工作状态是分析设备可靠性性能指标的基础^[3]。电力设备工作状态分类如图 1

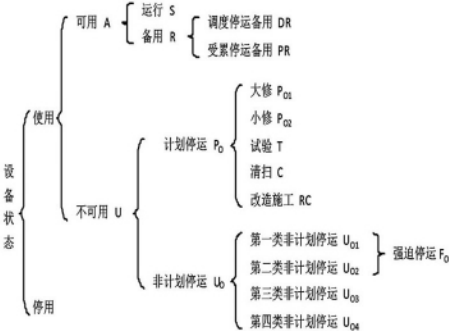


图 1 工作状态划分

电力设备可靠性可用以下几个指标参数来判断。

计划停运系数 $POF = \frac{\text{计划停运小时数 } POH}{\text{统计期间小时数 } PH} \times 100\%$

非计划停运系数 $UOF = \frac{\text{非计划停运小时数 } UOH}{\text{统计期间小时数 } PH} \times 100\%$

强迫停运系数 $FOF = \frac{\text{强迫停运小时数 } FOH}{\text{统计期间小时数 } PH} \times 100\%$

连续可用小时 $CSH =$

$$\frac{\text{可用小时数 } AH}{\text{统计期间计划停运次数 } POT + \text{统计期间非计划停运次数 } UOT} \text{ 小时/次}$$

可用系数 $AF = \frac{\text{可用小时数 } AH}{\text{统计期间小时数 } PH} \times 100\%$

运行系数 $SF = \frac{\text{运行小时数 } SH}{\text{统计期间小时数 } PH} \times 100\%$

暴露率 $EXR = \frac{\text{运行小时数 } SH}{\text{可用小时数 } AH} \times 100\%$

暴露率与可用系数和运行系数之间存在相关性,这里选择计划停运系数 POF 、非计划停运系数 UOF 、强迫停运系数 FOF 和可用系数 AF 、运行系数 SF 共同作为可靠性特征的评估指标。

3 实例分析

表 1 给出了宜宾电业局 220 kV 白沙变电站沙江南线 268 开关 2010 年 10 月 30 日至以前 5 年期间内运行记录情况。

由表征断路器可靠性的特征参数组成的因素集为 $U = \{ POF, UOF, FOF, AF, SF \}$,对各参数评分公式为: $S_{POF} = 100 \times (1 - POF)$; $S_{UOF} = 100 \times (1 - UOF)$; $S_{FOF} = 100 \times (1 - FOF)$; $S_{AF} = 100 \times AF$; $S_{SF} = 100 \times SF$ 。由表 1 及评分公式计算结果见表 2。

表 2 268 开关可靠性指标及评分

日期	POF	UOF	FOF	AF	SF
2010. 10. 30	0.068%	0.173%	0	99.76%	99.46%
评分变量	S_{POF}	S_{UOF}	S_{FOF}	S_{AF}	S_{SF}
评分值	99.932	99.827	100	99.76	99.46

对于断路器设备应尽量增长其可用小时数,故权重集 $A = (0.15 \ 0.15 \ 0.275 \ 0.275)$ 。

根据故障诊断、维修经验以及专家的分析,将断路器的健康状态分为:正常、注意、异常、严重 4 个状态。

1) 正常状态:指断路器电气及机械性能运行正常,停电和带电试验数据正常,设备资料齐全,满足安全性评估、输变电设备评估和反措的要求,即各状态量处于稳定且良好的范围内,设备可以正常运行。

2) 注意状态: 指断路器及主要附件有一般缺陷、暂时不对安全运行构成威胁。一般建议适时消缺或暂不处理、待停电预试或大修改造时一并处理, 但应加强运行中的监视。

3) 异常状态: 指断路器及主要附件有重大缺陷, 试验数据或运行工况异常, 应监视运行, 并适时安排停电检修。

4) 严重状态: 指断路器及主要附件有严重缺陷, 直接威胁安全运行, 若不及时处理有可能导致事故或非计划停运。需要尽快安排停电检修。

由于可靠性指标的评分值越大对应设备状态越好, 则根据经验, 计算时应选择隶属度函数如图2。

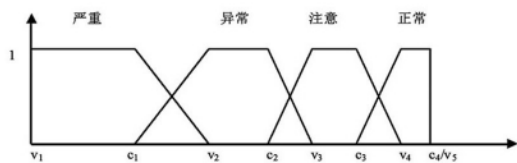


图2 可靠性指标的隶属度函数

4个等级(正常、注意、异常、严重)的阈值均取为:(0, 99.6, 99.8, 99.98, 100), 则 c_1, c_2, c_3 的值分别取为区间 $[v_1, v_2], [v_2, v_3], [v_3, v_4]$ 的中值, c_4 取 v_5 值, 分别为(49.8, 99.7, 99.89, 100), 把原始数据代入隶属度函数可得指标的质量为

$$R_{\text{正}} = \begin{cases} 1 & 99.98 \leq V \leq 100 \\ \frac{V - 99.89}{0.09} & 99.89 \leq V \leq 99.98 \\ 0 & V < 99.89 \end{cases}$$

$$R_{\text{注}} = \begin{cases} 0 & V > 99.98 \\ \frac{99.98 - V}{0.09} & 99.89 < V \leq 99.98 \\ 1 & 99.8 \leq V \leq 99.89 \\ \frac{V - 99.7}{0.1} & 99.7 \leq V < 99.8 \\ 0 & V < 99.7 \end{cases}$$

$$R_{\text{异}} = \begin{cases} 0 & V > 99.8 \\ \frac{99.8 - V}{0.1} & 99.7 < V \leq 99.8 \\ 1 & 99.6 \leq V \leq 99.7 \\ \frac{V - 49.8}{49.8} & 49.8 \leq V < 99.6 \\ 0 & V < 49.8 \end{cases}$$

$$R_{\text{严}} = \begin{cases} 0 & V > 99.6 \\ \frac{99.6 - V}{49.8} & 49.8 \leq V \leq 99.6 \\ 1 & V < 49.8 \end{cases}$$

根据以上分析, 将因素集评分值(99.932, 99.827, 100, 99.76, 99.46)代入, 可得单因素评判矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \\ 0.467 & 0.533 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0.997 & 0.003 \end{bmatrix} \begin{matrix} POF \\ UOF \\ FOF \\ AF \\ SF \end{matrix}$$

则关于可靠性特征的模糊综合评判为

$$\begin{aligned} B &= A \cdot R = (b_1, b_2, b_3, b_4) \\ &= (0.15, 0.15, 0.15, 0.275, 0.275) \cdot \\ &\begin{bmatrix} 0.467 & 0.533 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0.997 & 0.003 \end{bmatrix} \\ &= (0.22005, 0.39495, 0.384175, 0.000825) \end{aligned}$$

由以上评判结果可知, 断路器整个工作状态处于注意-异常阶段, 这期间断路器的运行状况基本稳定, 偶发性故障发生的可能性较大, 在以后运行期间需多加注意。实际运行情况也证明该断路器偶发性故障较多, 运行基本稳定, 与模型所得结果基本相符。

4 结 论

将体现高压断路器工作状态的可靠性参数采用模糊数学的方法结合起来, 建立基于模糊综合评判的状态评估评判模型, 通过实例分析了模型的有效性和可行性。

以上仅仅在可靠性参数下进行的一级模糊评判, 实际工程应用中还需结合断路器的机械和电气参数进行多级模糊的综合评判, 得出更加精确的结果, 为状态检修提供依据。

参考文献

- [1] 芮延年, 傅戈雁. 现代可靠性设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 178-219.
- [2] 周津慧. 重大设备状态检测与寿命预测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
- [3] 杨昆, 顾煜炯. 设备维修理论与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 84-121.

(收稿日期: 2011-05-10)

基于小波变换的变压器差动保护算法

高志勇, 成建军, 张 昕

(二滩水电开发有限公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 通过对典型励磁涌流和常见变压器内部故障的电流波形进行分析, 总结归纳出一种基于小波变换的差动保护算法。

关键词: 励磁涌流; 内部故障; 小波变换

Abstract: Through the analysis of the typical magnetizing inrush current and the current waveform of normal internal fault in the transformer, a differential protection algorithm based on wavelet transform in power transformer is presented.

Key words: magnetizing inrush current; internal fault; wavelet transform

中图分类号: TM762 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)04-0072-03

0 引 言

据统计^[1-2], 1999年中国运行中的220 kV变压器有2 526台, 330 kV变压器有102台, 500 kV变压器223台。到2002年底, 中国运行中的220 kV变压器达到3 229台, 330 kV变压器有122台, 500 kV变压器有295台。然而多年来电力系统变压器保护的正确动作率却大大低于发电机和线路保护的正确动作率。以2007年为例, 全国继电保护的运行情况是: 200 kV及以上母线保护装置正确动作率达96.72%; 100 MW及以上发电机保护装置正确动作率为99.74%; 220 kV及以上变压器保护装置正确动作率仅为96.49%。

差动保护一直用于变压器主保护, 但如何正确鉴别励磁涌流和内部故障电流一直是变压器差动保护的核心问题。采用二次谐波制动原理的变压器保护较为常见, 但也面临着一些问题^[3-5]: 对暂态信号的励磁涌流进行傅里叶级数的谐波分析, 傅里叶级数法的周期延拓将导致错误的结果; 同时二次谐波制动系数一直都没有统一的标准; 变压器在满足一定条件时, 三相励磁涌流的二次谐波含量可能均小于15%^[6], 因此可能使保护出现误动。

通过在PSCAD/EMTDC中建立电力变压器典型励磁涌流和内部故障模型, 通过Db小波函数研究电流波形数据从而获取明确鉴别励磁涌流和内部故障

的判据和算法。

1 仿真分析

变压器内部故障仿真研究选用PSCAD/EMTDC软件进行。该软件是当前国际上普遍流行的新型电磁暂态计算程序, 它具有精确的元件模型、方便的数据输入方式及强大的分析功能, 主要用来研究电力系统的暂态过程, 是系统分析和工程研究的有力工具。该软件包是由加拿大马里托巴高压直流研究中心(Manitoba HVDC Researcher Centre)开发出来的, 由PSCAD(Power System Computer Aided Design)和EMTDC(Electromagnetic Transient Including DC)两部分软件组成, 其典型应用是计算电力系统遭受扰动或者参数发生变化时, 电信号随时间参数发生变化的规律。特别是其中包含的基于中心几何学建立的UMEC变压器模型, 不仅考虑到同相绕组之间的耦合作用, 还考虑到了不同相绕组间的耦合作用。UMEC模型通过充分利用插值法, 以分段的线性 $U-I$ 曲线来描述铁心饱和特性, 在实时计算时特别是变压器铁心饱和的情况下可以获得精确的结果, 特别适合变压器饱和时励磁涌流的仿真研究。

仿真所得数据采用Matlab小波工具包中的Db小波函数进行处理。通过综合考虑, 选用分解尺度为5, 以特征较为明显的第3尺度下模极大值作为判断依据, 原始信号 $S = d1 + d2 + d3 + d4 + d5 + a5$, $d1$ 至 $d5$ 分别为第一至第五尺度的高频细节部分, $a5$ 为第

表 1 三相变压器励磁涌流仿真参数

名 称		参 数				
情况 1	A 相: $0B_m$	合闸时间 /s	0.1	0.1025	0.105	0.1075
	B 相: $0B_m$					
	C 相: $0B_m$					
情况 2	A 相: $0.9B_m$	合闸时间 /s	0.1	0.1025	0.105	0.1075
	B 相: $-0.9B_m$					
	C 相: $-0.9B_m$					
情况 3	A 相: $0.6B_m$	合闸时间 /s	0.1	0.1025	0.105	0.1075
	B 相: $-0.2B_m$					
	C 相: $0.2B_m$					

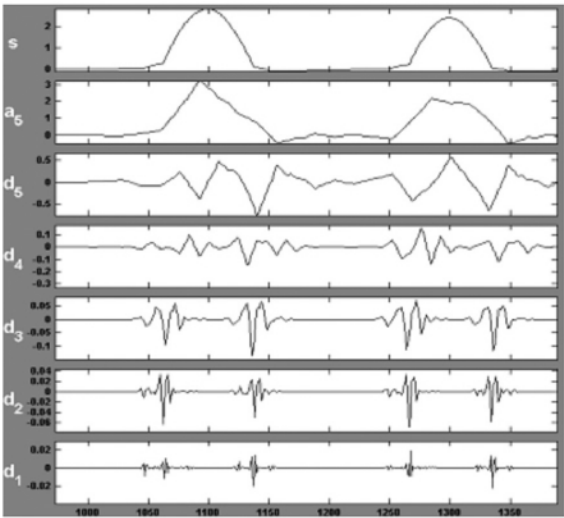
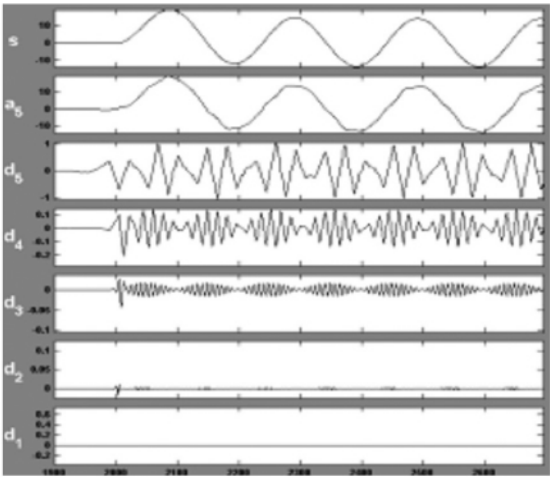


图 1 情况 1 $\alpha = 0^\circ$ 时 A 相一次侧电流小波变换五尺度下的低频粗糙部分。

内部故障主要模拟单相接地、两相短路、两相短路接地故障。设定在 0.2 s 时发生故障,对电流信号每工频周期采样 200 点,以空载合闸和故障时刻为起点,对一、二次侧采样电流一工频周期时间内的信号数据进行小波分析。励磁涌流仿真具体参数见表 1,数据采集范围从 0~0.6 s。



研究表明^[7],对于三相变压器来说,无论在任何一个瞬间空载合闸,至少有两相要出现程度不同的励磁涌流,而另一侧三相励磁电流则全部接近 0(数量级为 E-9)。由于变压器励磁涌流仅流经变压器电源侧,因此在差动回路中不能被平衡。图 1 显示了上述情况 1 合闸角 0°时小波变换前后各相的一次侧电流波形。

图 2 为 A 相接地短路时一、二次侧的电流小波变换,可以看出 A 相在故障发生后的一工频周期内的模极大值对应或者接近于故障发生时刻并且一、二次侧的模极大值符号相反。

限于篇幅,所仿真的单相接地、两相短路、两相短路接地故障仅列出 A 相单相接地短路时的电流小波变换波形,具体模极大值数据详见表 2。

上述仿真研究是基于直接对一、二次侧电流进行信号采样分析而得到的结果,而实际上无论是在励磁涌流还是在故障过程中,都有可能出现电流互感器的饱和。但是由故障开始到电流互感器开始饱和总是有一个过程,电流互感器的饱和不是从故障开始就立即出现,而只能在一定时间之后才发生,这一时间段至少有 1/4 个周期^[8]。而仿真得到的电流数据,虽然

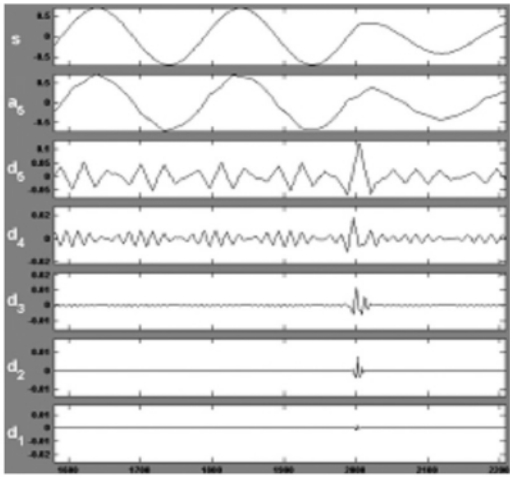


图 2 A 相接地短路时, A 相一、二次侧电流小波变换

表 2 典型故障状态下小波变换后各相电流模极大值

故障类型	模极大值		
	A 相一、二次侧	B 相一、二次侧	C 相一、二次侧
A 相单相接地	-0.042 9/0.011 7	0.005 89/0.000 46	0.006 025/ -0.007 635
AB 两相短路	-0.070 7/0.051 9	0.070 8/ -0.026 1	0.000 685/ -0.025 7
AB 两相短路 接地	-0.041 2/0.051 9	0.1/ -0.059 5	-0.057/0.007 65

时间范围是一个工频周期 ,但所需要的部分往往均在 1/4 周期内 ,因此其所设计的模型可以认为基本不受 TA 饱和的影响。

关于环境中的电磁噪声对小波变换模极大值所产生的影响 ,理论上可以通过对噪声与信号突变点的小波变换模极大值在不同尺度下的传播特性不同加以解决^[9]。噪声的小波变换模极大值幅度和平均稠密度通常随尺度的增大而减小 ,而信号的小波变换模极大值随尺度的增加不衰减。因此可以通过设置一定的尺度来有效去除噪声的干扰。

2 保护算法设计

根据上述仿真研究结果表明:当发生励磁涌流时 ,虽然变压器电源侧涌流的幅值能达到额定电流的数倍 ,但是在另一侧电流却几乎为零(数量级仅为 E-9) ,对应的模极大值也可以认为是为零的;对于发生单相接地、两相短路、两相短路接地等典型故障情况 ,故障发生相两侧对应的模极大值点的幅值其正负性是相反的 ,若采用适当的门槛值 ,将模极大值过小的点归结等同于是为零 ,则可以认为非故障相两侧的模极大值点总是有存在为零的情况。

对应于文中的具体仿真数据 ,可设定门槛值 K 为 0.008 ,低于该数值的模极大值均设定为零。可以看出 ,此门槛数值可以较好地地区分出励磁涌流和故障电流 ,并且当某相一旦发生故障时 ,其一、二次侧电流信号模极大值点处电流幅值符号相反 ,即乘积为负;而正常相的乘积则为零。因此不但可以依据其乘积的符号对励磁涌流和故障电流做出判断 ,并且可以进一步判断出故障所在相 ,并且可以保证判断的准确。

通过大量仿真研究可以看出 ,一个工频周期内的电流模极大值出现的位置往往在 1/4 周期后 ,但也有少量模极大值出现在 1/4 周期内或者极接近 1/4 周期处;而上述几种典型故障情况下各相电流的模极大值均出现在故障发生时刻或接近于发生时刻处。考

虑到现场实际情况的复杂性 ,单凭分析一周期内模极大值出现的时间位置也不足以在任何情况下都能做出准确判断 ,但是可以考虑将其作为进一步判断是否为故障电流或励磁涌流的依据。

综上所述 ,所设计的判据如下。

设变压器差动保护回路分别在三相各自独立判断 $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 分别为采样区间内某相一、二次侧电流小波变换模极大值点的幅值 ,设 K 为门槛值且 $K = 0.008$,若

$|I_1(t)| > K$ (1)

$|I_2(t)| > K$ (2)

则有

$S = I_1(t) \times I_2(t)$ (3)

则在差动回路中的不平衡电流高于整定值时 ,若数据运算后 $S < 0$,可判断该相发生内部故障 ,差动保护回路发出信号“1”;若小波变换后某相一次或二次侧电流幅值低于门槛值 K ,则 $S = 0$,差动保护回路发出信号“0” ,采用逻辑“或”判断 ,将三相发出的“0”和“1”进行“或”运算 ,若结果为“1”则差动保护发出跳闸信号 ,若逻辑判断结果为“0”(如上述匝间短路情况)则将一周期内的电流信号进行进一步分析 ,若发现至少存在一相的一次侧电流模极大值出现在 1/4 工频周期时间范围内 ,则可以认定此种情况为内部故障 ,差动保护发出跳闸信号。反之差动保护则发出闭锁信号 ,延迟一定时间后保护回路复位继续进行判断。更进一步 ,除了能保证发生故障时断路器分断 ,也可利用各相反馈回的“0”、“1”信号判断具体故障发生在哪一相。

考虑到实际工程应用中电磁环境的复杂 ,该判断方法还需要进一步调整以适应现场环境。若门槛值 K 选取的不够合理 ,比如过高 ,有可能使得某些轻微故障情况仅凭判断 S 的数值并不能做到足够准确的判断 ,甚至会导致拒动情况发生 ,最终引起更严重的事故 ,这也是为什么在设计保护方案的时候增加了备用方案 ,虽然两者单独使用均不能做到绝对正确 ,但是综合运用情况下则能大大降低误判的可能性;

(下转第 78 页)

表 3 补偿后的相关线路介数

线路	线路介数	线路	线路介数
(1 2)	6	(1 6)	20
(2 6)	20	(5 7)	12
(2 3)	16	(5 6)	20
(1 4)	10	(6 9)	20
(4 5)	12	(9 ,11)	20
(1 5)	12	(8 9)	0
(4 6)	20	(10 ,11)	20

4 结 语

基于复杂网络理论和有权网络模型 ,提出了带权重线路介数的概念 ,来量化电力系统线路脆弱的程度 ,将其作为选取多组同基 MBPS 的指标。该方法考虑了发电机分布和出力 ,符合系统的实际情况 ,能够较好地辨识那些承担功率不大 ,但是由于其在电网拓扑中的特殊位置而对系统产生重大影响的线路。所做工作还比较粗糙 ,可以继续开展深入研究 ,如在符合电力系统的实际情况下 ,进一步完善评估指标 ,考虑运行方式等因素。

(上接第 74 页)

若 K 值设定偏低 ,也不会造成保护装置的误动进而影响电力系统的可靠运行 ,仅仅会在发生故障的情况下除了能正确判断某相存在故障 ,同时还会错误判断正常相也存在故障。而这样的“误判”所导致的结果除了在故障排除的检修维护过程中增加一定工作量 ,对电力系统的安全稳定运行并不存在任何实质性的影响 ,并且该判断依据计算简单 ,所用数据量较少 ,能在很短暂的时间内就对变压器的运行状况做出判断 ,因此可以说该方法有着一定的可行性和实用性。

参考文献

[1] 王维俭,王祥珩,王赞基.大型发电机变压器内部故障分析与继电保护[M].北京:中国电力出版社,2006:205-208.

[2] 沈晓凡,舒治淮,刘宇,等.2007年国家电网公司继电保护装置运行情况[J].电网技术,2008,32(16):6-7.

[3] 王维俭.变压器保护运行不良的反思[J].电力自动化设备,2001,21(10):1-3.

[4] “九五”期间全国电网继电保护统计资料汇编,2001.

参考文献

[1] 吕飞鹏.基于配合关系计算复杂环网保护最优配合顺序的新方法[J].电力系统自动化,2005,29(24):65-69.

[2] 刘丹,吕飞鹏.基于网络化简和配合关系的最小断点集计算方法[J].电力系统自动化,2008,32(16):24-27.

[3] 刘丹,吕飞鹏.基于蚁群算法的环网方向保护配合最小断点集计算[J].电力系统自动化,2008,32(21):27-31.

[4] 李运坤,吕飞鹏,陈新,等.基于节点重要度估计的多组同基最小断点集选取方法[J].电力系统自动化,2010,12(34):58-60.

[5] 丁明,韩平平.基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估[J].中国电机工程学报,2005,25(增刊):118-122.

[6] 倪向萍,梅生伟,张雪敏.基于复杂网络理论的输电线路脆弱度评估方法[J].电力系统自动化,2008,32(4):1-5.

[7] 曹一家,陈晓钢,孙可.基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路识别[J].电力自动化设备,2006,26(12):1-5,31.

作者简介:

张向亮(1987),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护;

吕飞鹏(1968),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统继电保护和故障信息处理智能系统。

(收稿日期:2011-04-02)

[5] 葛宝明,王祥晰,苏鹏声,等.电力变压器的励磁涌流判据及其发展方向[J].电力系统自动化,2003,27(22):1-5.

[6] 林湘宁,刘沛,刘世明,等.变压器有载合闸的超饱和现象及对变压器差动保护的影响[J].中国电机工程学报,2002,22(3):7-11.

[7] 孙国凯,霍利民,柴玉华.电力系统继电保护原理[M].北京:中国水利水电出版社,2002:123-124.

[8] Kezunovic, M, Kojovic, L. Experimental Evaluation of EMTP-based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study. IEEE Transactions on , 1994, 9(1): 405-413.

[9] Mallat S., Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelet[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.

作者简介:

高志勇(1971),男,四川成都人,工程师,从事电力系统运行监控工作;

成建军(1973),男,四川成都人,工程师,从事电力系统运行监控工作;

张昕(1980),男,四川成都人,助理工程师,从事电力系统运行监控工作。

(收稿日期:2011-03-17)

基于线路介数的多组同基最小断点集选取方法

张向亮 吕飞鹏 张新峰 肖 飞 邓丰强 吕文超 赵美琳
(四川大学电气信息学院 四川 成都 610065)

摘 要: 最小断点集(MBPS)是复杂环网整定配合的起始点,它的求取往往会出现多组同基解。考虑线路对断点脆弱性的影响,并以带权重的线路介数作为衡量线路重要程度的指标,给出了一种多组同基 MBPS 的选取方法。最后通过算例验证了算法的有效性和可行性。

关键词: 整定; 最小断点集; 线路介数; 复杂网络

Abstract: The minimum break point set (MBPS) is the starting point for the relay setting coordination of complex ring network. During its solution , it always has multi - MBPS with the same cardinal number. Putting breakpoints of MBPS into the exit of the less vulnerable lines can greatly reduce the impact of breakpoint vulnerability on the grid. The weighted line betweenness of complex network theory is taken as an indicator to measure the importance of the line. Based on the indicator , a method for selecting the MBPS from multi - MBPS with the same cardinal number is proposed. The method estimates the betweenness of lines which the breakpoints of the MBPS calculation result belong to , then takes the sum of line betweenness of each MBPS , and finally chooses the MBPS of the least betweenness as the optimum MBPS. The numerical example can prove that this method can obtain the optimum MBPS.

Key words: setting; minimum break point set; line betweenness; complex network

中图分类号: TM751 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2011)04 - 0075 - 04

在复杂环网中,最小断点集(minimum break point set, MBPS)的求取往往会出现多组同基解^[1-3],需要从中选取一组 MBPS 作为整定配合的起点。断点保护定值通常不按配合来整定,所以这些保护存在拒动或误动的可能,使断点成为全网保护的一个脆弱环节。若断点保护在系统中处于重要位置,则该保护拒动或误动会对系统安全稳定运行产生较大影响,所以应把断点选在重要性低的位置。针对上述问题,文献[4]提出了一种以节点重要度为衡量指标的多组同基 MBPS 选取方法,避免了计算机随机选取的盲目性和整定人员手动选取的繁琐性,但是并未考虑发电机的分布和出力对系统稳定性的影响,不符合系统的实际情况,所提方法存在一定的局限性。

结合系统实际情况,考虑线路^[5,6]对断点脆弱性的影响,把断点尽可能选在重要性低的线路出口处,选用文献[6]提出的有权电网模型,以带权重的线路介数衡量线路的重要程度,基于此指标,从多组同基 MBPS 中选取一组 MBPS 作为整定配合的起点。

1 有权电力网络和线路介数

1.1 有权电力网络

电网具有小世界性和无标度性,可视为一类典型的复杂网络。将电网简化,其简化原则为:网络节点就是发电机、变电站、负荷,边就是传输线。详细原则如下:①考虑除电厂和变电站母线外的所有线路;②网络中所有节点分为 3 种,发电机节点、变电站节点、负荷节点;③所有电力线路均简化为无向有权边,线路的权重定义为线路的电抗标幺值,并定义网络中两节点之间所有电气路径中沿线权值之和最小的路径称为最短电气路径,其中最小的权值之和称为最短电气距离;④合并同杆并架输电线,不计并联电容支路。

经过简化,电网成为一张有 n 个节点和 m 条边的连通图 G ,由 $n \times n$ 边权连接矩阵 E 和 $n \times 1$ 权重矩阵 W 表示。其中,

$$G = (N, L) \tag{1}$$

$$E = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ E_{n1} & E_{n2} & \cdots & E_{nn} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$W = [W_1 \quad W_2 \quad \cdots \quad W_n] \tag{3}$$

表 1 保护与线路的所属关系

保护编号	保护所属线路	保护编号	保护所属线路
1 2	(1 2)	19 20	(1 6)
3	(2 6)	23	(5 7)
4	(2 3)	25	(5 6)
13	(1 4)	26 28	(6 9)
14 ,17	(4 5)	29 34	(9 ,11)
16	(1 5)	30	(8 9)
18	(4 6)	35	(10 ,11)

9) (9 ,11) (8 9) (10 ,11) }。

步骤 2): 根据图 1 可得边权连接矩阵 E 以及发电机节点权重矩阵。

$$W = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 6 \quad 0 \quad 0 \quad 10 \quad 0]$$

步骤 3): 根据步骤 2) 求出的边权连接矩阵 E 算出电网的最短电气距离矩阵 L 。

步骤 4): 根据步骤 3) 求出的最短电气距离矩阵 L 通过 C#编程可求出发电机节点和负荷节点间最短电气路径 组成最短电气路径集合 $S_L = \{ \{ 3 \ 6 \ 1 \ 5 \ ,$
 $E =$

0	0.125	∞	0.221	0.233 4	0.058	∞	∞	∞	∞	∞
0.125	0	0.382 8	∞	∞	5.827	∞	∞	∞	∞	∞
∞	0.382 8	0	∞	∞	0.345 1	∞	∞	∞	∞	∞
0.221	∞	∞	0	0.316	0.201 6	∞	∞	∞	∞	∞
0.233 4	∞	∞	0.316	0	0.74	0.402	∞	∞	∞	∞
0.058	5.827	0.345 1	0.201 6	0.74	0	∞	∞	0.072 8	∞	0.056 1
∞	∞	∞	∞	0.402	∞	0	∞	∞	∞	∞
∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0	0.140 2	0.051 5	∞
∞	∞	∞	∞	∞	0.056 1	∞	0.140 2	0	∞	0.021 6
∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0.051 5	∞	0	0.154 2
∞	∞	∞	∞	∞	0.056 1	∞	∞	0.021 6	0.154 2	0

$$L =$$

0	0.125	0.403 1	0.221	0.233 4	0.058	0.635 4	0.271	0.130 8	0.268 3	0.114 1
	0	0.382 8	0.346	0.358 4	0.183	0.760 4	0.396	0.255 8	0.393 3	0.239 1
		0	0.546 7	0.636 5	0.345 1	1.038 5	0.558 1	0.417 9	0.555 4	0.401 2
			0	0.316	0.201 6	0.718	0.414 6	0.274 4	0.411 9	0.257 7
				0	0.291 4	0.402	0.504 4	0.364 2	0.501 7	0.347 5
					0	0.693 4	0.213	0.072 8	0.210 3	0.056 1
						0	0.906 4	0.766 2	0.903 7	0.749 5
							0	0.140 2	0.051 5	0.161 8
								0	0.175 8	0.021 6
									0	0.154 2
										0

7) { 4 5 7} { 4 6 ,11 ,10} { 3 6 ,11 ,10} }。

步骤 5): 根据 S_L 和公式 (4) 可以得出多组同基 MBPS 所有保护所属线路的介数 ,如表 2。

步骤 6): 用式 (5) 对步骤 5) 算出的线路介数进行补偿 ,如表 3。

步骤 7): 根据表 1 和表 3 可以算出 3 组同基断点集 $M_1 \ M_2 \ M_3$ 线路介数之和分别为 204、182、184。可见 M_2 的线路介数最小 ,选 $M_2 = \{ 23 \ 2 \ 1 \ 4 \ 3 \ 19 \ ,$
20 ,19 30 28 ,13 25 ,14} 为环网整定配合的起始点。

表 2 相关线路介数

线路	线路介数	线路	线路介数
(1 2)	0	(1 6)	6
(2 6)	0	(5 7)	12
(2 3)	0	(5 6)	0
(1 4)	0	(6 9)	0
(4 5)	6	(9 ,11)	0
(1 5)	6	(8 9)	0
(4 6)	10	(10 ,11)	20

表 3 补偿后的相关线路介数

线路	线路介数	线路	线路介数
(1 2)	6	(1 6)	20
(2 6)	20	(5 7)	12
(2 3)	16	(5 6)	20
(1 4)	10	(6 9)	20
(4 5)	12	(9 ,11)	20
(1 5)	12	(8 9)	0
(4 6)	20	(10 ,11)	20

4 结 语

基于复杂网络理论和有权网络模型 ,提出了带权重线路介数的概念 ,来量化电力系统线路脆弱的程度 ,将其作为选取多组同基 MBPS 的指标。该方法考虑了发电机分布和出力 ,符合系统的实际情况 ,能够较好地辨识那些承担功率不大 ,但是由于其在电网拓扑中的特殊位置而对系统产生重大影响的线路。所做工作还比较粗糙 ,可以继续开展深入研究 ,如在符合电力系统的实际情况下 ,进一步完善评估指标 ,考虑运行方式等因素。

(上接第 74 页)

若 K 值设定偏低 ,也不会造成保护装置的误动进而影响电力系统的可靠运行 ,仅仅会在发生故障的情况下除了能正确判断某相存在故障 ,同时还会错误判断正常相也存在故障。而这样的“误判”所导致的结果除了在故障排除的检修维护过程中增加一定工作量 ,对电力系统的安全稳定运行并不存在任何实质性的影响 ,并且该判断依据计算简单 ,所用数据量较少 ,能在很短暂的时间内就对变压器的运行状况做出判断 ,因此可以说该方法有着一定的可行性和实用性。

参考文献

[1] 王维俭,王祥珩,王赞基.大型发电机变压器内部故障分析与继电保护[M].北京:中国电力出版社,2006:205-208.

[2] 沈晓凡,舒治淮,刘宇,等.2007年国家电网公司继电保护装置运行情况[J].电网技术,2008,32(16):6-7.

[3] 王维俭.变压器保护运行不良的反思[J].电力自动化设备,2001,21(10):1-3.

[4] “九五”期间全国电网继电保护统计资料汇编,2001.

参考文献

[1] 吕飞鹏.基于配合关系计算复杂环网保护最优配合顺序的新方法[J].电力系统自动化,2005,29(24):65-69.

[2] 刘丹,吕飞鹏.基于网络化简和配合关系的最小断点集计算方法[J].电力系统自动化,2008,32(16):24-27.

[3] 刘丹,吕飞鹏.基于蚁群算法的环网方向保护配合最小断点集计算[J].电力系统自动化,2008,32(21):27-31.

[4] 李运坤,吕飞鹏,陈新,等.基于节点重要度估计的多组同基最小断点集选取方法[J].电力系统自动化,2010,12(34):58-60.

[5] 丁明,韩平平.基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估[J].中国电机工程学报,2005,25(增刊):118-122.

[6] 倪向萍,梅生伟,张雪敏.基于复杂网络理论的输电线路脆弱度评估方法[J].电力系统自动化,2008,32(4):1-5.

[7] 曹一家,陈晓钢,孙可.基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路识别[J].电力自动化设备,2006,26(12):1-5,31.

作者简介:

张向亮(1987),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护;

吕飞鹏(1968),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统继电保护和故障信息处理智能系统。

(收稿日期:2011-04-02)

[5] 葛宝明,王祥晰,苏鹏声,等.电力变压器的励磁涌流判据及其发展方向[J].电力系统自动化,2003,27(22):1-5.

[6] 林湘宁,刘沛,刘世明,等.变压器有载合闸的超饱和现象及对变压器差动保护的影响[J].中国电机工程学报,2002,22(3):7-11.

[7] 孙国凯,霍利民,柴玉华.电力系统继电保护原理[M].北京:中国水利水电出版社,2002:123-124.

[8] Kezunovic, M, Kojovic, L. Experimental Evaluation of EMTP-based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study. IEEE Transactions on , 1994, 9(1): 405-413.

[9] Mallat S., Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelet[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.

作者简介:

高志勇(1971),男,四川成都人,工程师,从事电力系统运行监控工作;

成建军(1973),男,四川成都人,工程师,从事电力系统运行监控工作;

张昕(1980),男,四川成都人,助理工程师,从事电力系统运行监控工作。

(收稿日期:2011-03-17)

高压断路器非全相保护浅析

秦 川

(四川省电力公司超(特)高压运行检修公司 四川 成都 610041)

摘 要: 针对中国高电压等级的电力系统的运行工况,阐述了配置高压断路器非全相保护的必要性。结合非全相保护判据,通过对不同类型的非全相保护方法进行了分析和比较,归纳出其各自的优缺点以及不同的应用场合。与此同时,对非全相故障的原因进行了相关的探讨,并结合一起四川省某变电站的开关非全相保护动作而跳闸的案例来作分析,希望所做的工作能为此类高电压等级的故障检修提供有益的参考。

关键词: 高压输电; 高压断路器; 非全相保护; 断路器机构箱; 时间继电器; 本体保护

Abstract: According to the operating conditions of high-voltage power system in China, the necessity of configuring open-phase protection for high-voltage circuit-breaker is described. Combined with the criterion of open-phase protection, the different types of open-phase protection methods are analyzed and compared, and their advantages and disadvantages are eventually summarized as well as the relative different applications. At the same time, the causes of open-phase fault are discussed by analyzing the relevant cases of switch tripping in a substation in Sichuan, which can give a favorable reference for the troubleshooting in such high-voltage level.

Key words: high-voltage power transmission; high-voltage circuit-breakers; open-phase protection; circuit-breaker mechanism housing; time relay; body protection

中图分类号: TK762 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)04-0079-04

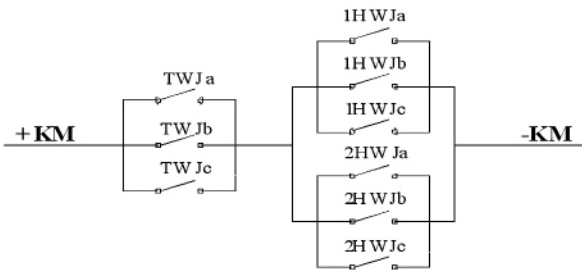
0 引 言

随着电力需求量的日益扩大,高电压等级的电能输送已成为必然趋势。在高电压等级的电网中一般采用分相操作的断路器,而高电压等级电网在运行时,由于设备运行工况、操作等因素的影响,开关可能出现某一相开关偷跳或是拒动的现象,从而造成系统的非全相运行,其后果是产生的零序、负序等分量对电气设备产生相当大的危害,同时还可能使一些保护动作误跳闸,切断正常运行的线路^[1],对系统的稳定运行产生一定的冲击。因此采取非全相保护来防止断路器的误动或拒动事故是非常必要的。

1 非全相保护判据

根据分相操作的高压断路器工作原理可以归纳出其非全相保护的判据:(1) 断路器非全相保护的硬接点由断路器相应辅助接点构成,并经光电隔离接入开关或线路保护装置或者开关本体三相不一致保护装置,形成必需的硬件控制回路;(2) 只要存在任

一相跳闸位置继电器接点闭合,作为判断非全相保护的启动依据。当这两个判据都满足时,经过时间继电器的启动延时,非全相保护出口跳闸,从而保证系统的全相稳定运行。其典型控制回路如图 1 所示^[2]。



图中: TWJa、TWJb、TWJc 为断路器 A、B、C 三相跳闸位置继电器动合触点; 1(2) HWJa、1(2) HWJb、1(2) HWJc 为断路器 A、B、C 三相合闸位置继电器动合触点。

图 1 非全相保护典型控制回路简化图

2 非全相保护的动作类型

非全相保护反映了断路器三相位置不一致的保护控制回路。既可采用断路器辅助触点组合实现,也可采用由操作箱给出的跳闸位置、合闸位置继电器

的接点组合实现。目前,非全相保护的常见类型主要有以下3种。

2.1 非全相接点直接启动时间继电器

该动作类型由断路器辅助接点或者由操作箱跳闸位置、合闸位置继电器的接点组合构成,通过判断其相应接点的通断来实现非全相保护,具有结构简单较易实现的特点。其动作逻辑如图2所示。

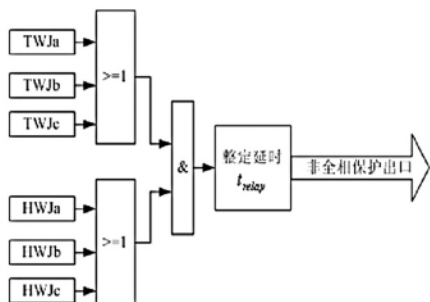


图2 非全相保护动作逻辑图1

2.2 非全相接点加零、负序电流闭锁判据来启动时间继电器

该动作类型在2.1类型的基础上增加了零序、负序电流的闭锁判据,通过两个判据共同来判断是否启动时间继电器。较第一种类型相比,该类型增加了非全相保护动作的可靠性和安全性。同时考虑到其零序和负序电流较易获得,使得其在系统中比较广泛应用成为了必然。其动作逻辑框图如图3所示。

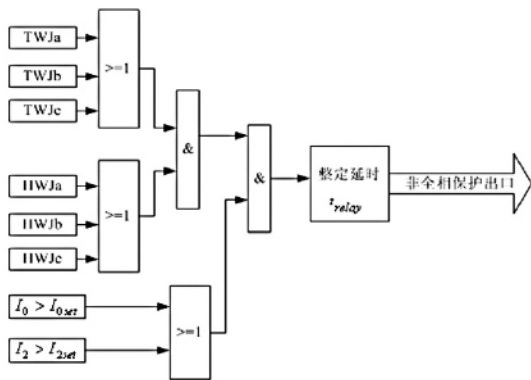


图3 非全相保护动作逻辑图2

2.3 非全相接点与保护装置组合来启动时间继电器

在该类型的保护中,非全相位置继电器的接点作为开关输入量引入保护装置,由保护程序自动判别。其依据为:若任一相TWJ动作且无电流则判定该断路器为跳开位置;当任一相断路器在跳开位置而三相不全在跳开位置且控制开关在合后,则确认为非全相故障,保护经延时后跳闸。其动作逻辑框图如图4所示。

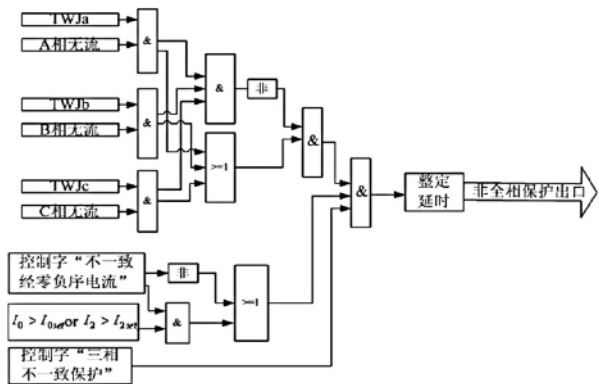


图4 非全相保护动作逻辑图3

3 不同类型非全相保护对比分析

通过对非全相保护类型的介绍,可以从中比较分析得到如下结论。

3.1 不同类型非全相保护的应用场合有所区别

对于上述3种主要的非全相保护类型,其应用场合有所区别,其中第一种主要应用于断路器机构本机的保护,若各相断路器出现三相不一致的情况,其相应的辅助接点将导通,保护启动;第二种加入了零负序电流判据,使其安全性得到进一步加强。该类型主要应用于传统非全相保护微机控制装置中,由于零负序电流能够准确反映出变压器中性点接地和不接地时线路的正常或故障状态信息,因此该类型可以用于末端变压器中性点接地和不接地运行的线路。使用时必须要考虑到零序电流和负序电流的整定,其整定值的大小直接影响保护的灵敏性和可靠性;第三种在兼备前两种优点的基础上结合线路三相电流判据,并通过微机化数据处理来综合判断,大大提高了运行时各种工况下的信息对比,降低了非全相保护的误动率,目前南瑞、许继、四方^[2]等主流继电保护厂家大都采用此类型并进一步完善。

3.2 500 kV 变电站的非全相保护配置

非全相运行对电力系统运行影响很大:分闸不同期将延长断路器内燃弧时间,使灭弧室压力增高,加重断路器负担;合闸不同期会造成系统在短时间内处于非全相运行状态,从而引起中性点电压漂移引发零序电流,极大降低保护的灵敏度;由于非同期时间差愈大愈增加重合闸时间,对系统稳定性不利;因此应尽量缩短非同期运行时间。为了保证系统可靠稳定运行,在220 kV及以上系统中多采用分相断路器。同时装设能反映断路器非全相运行状态的三相不一

致保护,作用于跳开已处于不正常状态的断路器。根据国家电网有关规定“220 kV 及以上电压等级的断路器均应配置断路器本体的三相位置不一致保护^[3]”。因此针对 500 kV 变电站的断路器,其非全相保护为双重配置:继电微机保护装置以及自身本体机构箱保护装置。两套配置相互独立,保证在故障发生时某套保护功能失去时仍能正确动作,及时切除故障。

3.3 500 kV 变电站非全相保护与重合闸的配置

实际中有可能出现如下情况:即断路器偷跳一相,由于断路器位置不对应,根据保护逻辑,其重合闸保护应当启动,将断路器重合,此时其非全相保护不应动作。而如果断路器有问题,偷跳相又未重合,此时该断路器才应启动非全相保护实现三跳。因此,非全相保护的动作时间必须能够躲过重合闸动作时间,以保证重合闸动作逻辑及过程正确,否则会因非全相保护动作时间短造成保护的误动作。两者时间的分配关系如图 5 所示。

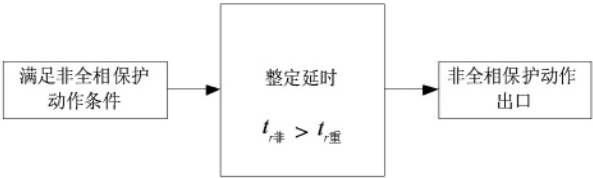


图 5 时间分配图

4 案例分析

4.1 非全相故障的原因

断路器出现非全相运行的原因主要可归纳为断路器机械部分故障和电气方面故障两方面。

机械部分故障主要包括两部分:传动部分故障和断路器本体的故障。传动部分的故障主要有机构所用元件的材料性能不佳;电磁操作阀针杆老化生锈,行程不够;传动机构连接部分脱扣,连接松动等。对于弹簧机构而言,若弹簧未储能或未储足、弹簧储能锁扣不可靠等故障将引起分合闸闭锁;对于液压机构而言,若气压低于其规定者亦将闭锁。断路器每相独立操作时,机构易发生失灵;而三相共用一个操作机构的断路器,如果油、气管配置不恰当,也会引起断路器非全相运行;而断路器本体故障主要是动静触头松动、磨损造成接触不好,行程调整不合理等。

电气故障主要为操作回路的故障;二次回路接触不良;断路器密度继电器闭锁操作回路等机构分合闸回路存在故障。

4.2 时间继电器延时设置

根据文献[4]的规定“220 kV 及以上电压等级分相操作的断路器本体和线路(或断路器)保护均应配置三相位置不一致保护并同时启用,动作时间应整定相同”,对于机构非全相保护的时间继电器的设置也要注意其规则:必须与保护装置的时间整定值一致,且要和保护的重合闸时间相配合,保证其非全相保护不能影响到单相重合的保护,确保不出现非全相保护的误动作。其结构界面简图如图 6 所示。

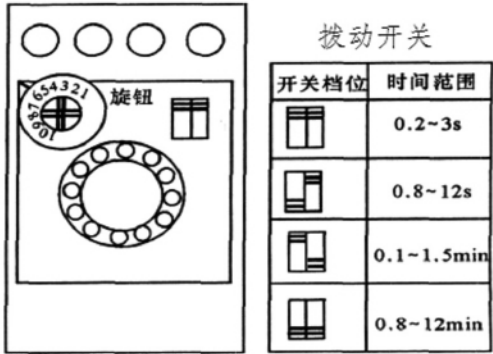


图 6 时间继电器的时间设定表

按照 ABB 厂家所提供的资料可以得出该开关非全相保护时间整定原则:刻度盘上的“6”代表整定时间的百分数,即 60%,由于时间范围整定为第 1 档(0.2~3 s),以此实际整定时间为 $3 \times 60\% = 1.8$ (s),而要与实际动作时间相匹配,需将旋钮转到“8”和“9”之间刻度线上,保证其动作延时时间满足 2.5 s 左右。若设置不当将造成保护误动。

4.3 非全相保护动作分析

结合工作实际情况,就一起四川某 500 kV 变电站 220 kV 线路侧开关调试时出现非全相保护动作的案例,对其故障原因进行进一步的分析和阐释。

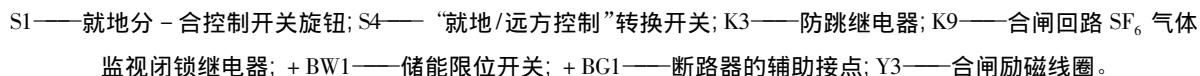
该站 220 kV 线路侧开关在调试过程中,出现某一线路开关因其 C 相拒动造成保护动作跳开三相的故障;同时后台给出“该开关非全相保护动作”信号报文,其保护启动报告如表 1 所示。

表 1 保护动作报文

CSC - 103B 动作报文		WXH - 803A/G 动作报文	
相对时间/5	动作元件	相对时间/6	动作元件
	保护启动		保护启动
105	三跳闭锁重合闸	107	三跳闭锁重合闸

保护一为北京四方 CSC - 103B 电流差动保护,保护二为许继 WXH - 803A/G 纵联差动主保护及后备保护,两者均适用于 220 kV 及以上电压等级的高压输电线路保护。

该线路所选 ABB 公司生产的分相断路器,其型



号为 LTB245E1 - 1 P - 50 kA ,属于弹簧操作机构 ,其 C 相的合闸控制回路图(其他两相类同) 如图 7 所示。

作从而导致三相跳闸。经过 ABB 厂家更换其转换开关并经过多次试验调试后,该开关再未出现某相拒动的现象。

非全相运行会给高压输电网的安全稳定运行带来一定的冲击,对电力系统的非全相及相应的保护进行了适当的整理、分类和分析,并对其所应用的场合进行了归纳和总结。与此同时,针对工作的实际情况,以一起开关非全相保护动作跳闸的案例对其事故原因进行探析和梳理,希望所做的工作能够为以后其他此类事故的处理提供一定的参考和借鉴。

- [1] 邹森元.《电力系统继电保护及安全自动装置反事故措施要点》条例分析[M]. 北京:中国电力出版社 2005.
- [2] 北京四方继保自动化股份有限公司. CSC-103B 数字式超高压线路保护装置说明书. 2009.
- [3] 国家电力调度通信中心.《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》(试行) 继电保护专业重点实施要求. 2005.
- [4] 四川省电力公司. 关于加强断路器三相位置不一致保护运行管理的通知. 2008.

间定值大,因此不存在两者时间错位的问题) 保护动

基于传统综合自动化变电站的程序化操作实现

李 杨 郭小龙 周建邦
(乌鲁木齐电业局 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘 要: 作为新疆首座程序化操作变电站, 110 kV 三汽配电变电站在程序化实施中, 结合已有综合自动化设备, 在不增加一、二次投资的情况下, 融入了五防闭锁和集控主站操作, 成功实现了由传统综合自动化变电站向程序化变电站的升级改造。在提高了经济效益的同时, 大大节约了投资, 同时具有很好的推广前景。

关键词: 程序化操作; 五防; 集控程序化

Abstract: As the first programmed operation substation in Xinjiang, in the programming operation of a 110 kV substation and combined with the existing integrated automation equipment, the alteration of the traditional integrated automation substation by the programmed substation is realized successfully by using the operation of five-proof system and the centralized control main station without adding investment for primary and secondary equipment. The economic benefits have been enhanced, meanwhile the investment has been reduced greatly with a good promotion prospect.

Key words: programmed operation; five-proof system; centralized control programming

中图分类号: TK76 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)04-0083-04

随着智能电网的发展, 程序化操作作为智能电网的一项基本功能, 已越来越多地应用到各新型综合自动化变电站中。为了积累经验, 为今后的智能电网在乌鲁木齐电业局的发展奠定基础, 该局选择了 110 kV 三汽配电变电站开展程序化操作的试点工作。结合目前站内的一、二次设备状况, 乌鲁木齐电业局将通过改造实现集控端、站端均实现程序化操作。

1 国内程序化操作现状

目前国内变电站自动化系统经过多年发展已达到较高的技术水平^[1-2], 其中一些重要变电站的一次设备和二次设备已经具有很高的可靠性和可控性, 具备了实施程序化操作的条件。在变电站自动化系统中采用程序化操作, 可提高运行工作效率和操作正确率, 有效防止运行过程中的误操作。

程序化操作就是预先定义好操作序列, 实际操作时完全依照预先定义序列形成实际操作序列, 以达到“一键操作”的目的。并将一个程序化操作抽象为操作票, 该操作票对应一个状态到另一状态的切换, 并包含有先后操作顺序的操作步骤, 每步骤包括操作前判断逻辑(防误逻辑)、操作内容、操作后确认条件(确认操作是否成功)^[3-4]。

1.1 目前国内程序化操作的典型情况

典型模式有以下两种^[5-9]。

第一种典型情况是单间隔典型票操作由该间隔测控装置完成。由于一次设备的操作控制接口不能共享, 故间隔层测控装置仅实现单间隔典型票的程序化控制功能。后台/主站下发的单间隔程序化控制命令直接发送至测控装置; 对于跨间隔典型票/组合票和临时票, 由远动转发至后台控制完成, 由后台统一协调控制。另一种典型情况是在站控层设置程序化操作服务器, 变电站内所有操作票均存放在该服务器中, 由当地运行人员选择合适的操作票后, 程序化操作服务器根据操作顺序依次向间隔层设备下发控制命令, 达到操作票的程序化操作目的; 或由主站端运行人员下发的操作命令通过远动机转发到程序化服务器后实现程序化操作。

1.2 两种模式的比较

第一种方案需要在测控装置内增加程序化操作功能, 然后再配合后台程序化操作模块和远动单元程序化操作模块实现变电站程序化操作。

优点: 可充分利用分布式系统的优点, 单一测控装置故障不会影响到其他装置的程序化操作功能,

缺点: 实现起来需要把站内测控装置都更换为带程序化操作功能的新型号装置。

第二种方案的兼容性比第一种方案好, 但两种方案均未设置实现在程序化操作过程中与传统站内五

防的融合。

2 乌鲁木齐三汽配电变电站设备状况

110 kV 三汽配电变电站 2008 年投运,综合自动化系统采用南瑞继保 RCS - 9000,远传设备采用 RCS9698D,与集控通信规约采用标准 101,一次接线采用扩大内桥接线 2 条 110 kV 进线、2 台主变压器,三汽配电变电站内 110 kV 部分为组合电器开关,断路器、隔离开关、接地刀闸都可以进行遥控电动操作,断路器和隔离开关的位置均可以采集;进线带自动验电(带电显示)装置;站内的保护装置支持通过遥控方式投退软压板,因此满足实现程序化操作的必要条件。10 kV 侧手车柜的退出和投入未实现电动操作,不具备遥控操作功能,因此不纳入本期程序化控制改造范围之内。集控采用的是 2009 年改造升级完成南瑞科技的 OPEN3000 系统。考虑到设备的可靠性,本次实现程序化操作的范围确定为:110 kV 设备。

3 项目实施方案

3.1 方案选择

由于 110 kV 三汽配电变电站为 2008 年按照传统模式新建的综合自动化变电站,站内一、二次设备服役年限尚未超期,站内测控采用的是南瑞继保 RCS - 9000 系列产品,远动采用的是南瑞继保 RCS9698 - D 型号产品,均不具备程序化操作条件。在不对变电站站内原有设备做过多更改的前提下,本项目采用第二种设置程序化操作服务器的方案,并且实现站内五防主机对程序化操作进行五防条件闭锁。同时对原操作模式(集控主站无法进行程序化操作时)、集控与后台遥控开关和就地操作功能不产生影响。

3.2 系统结构和功能

由于本次项目要求不进行保护和测控装置的更新改造,故使用程序化操作服务器来实现程序化操作。

程序化操作服务器既可以与支持实现程序化控制功能的测控装置一起使用,也可以与不支持程序化操作的传统测控装置配合使用。操作票存储在程序化操作服务器内。当测控装置支持程序化操作票执行时,程序化操作服务器下发执行操作票命令,操作票由测控装置来执行;当测控装置不支持程序化操作票支持时,则操作票由程序化操作服务器拆分为普通

遥控命令下发给装置执行。

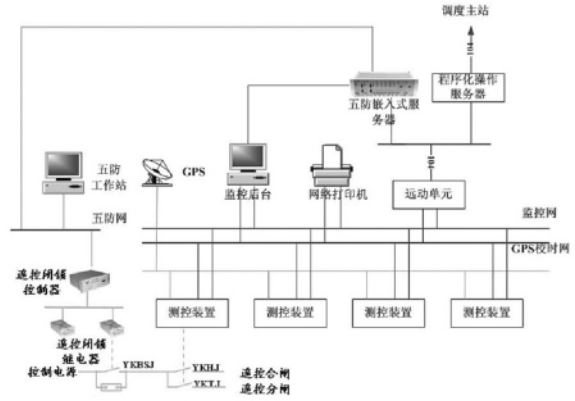


图1 程序化操作变电站系统示意图

3.3 与站内原有五防的配合

在接收到当地程序化操作机与主站下发的读取操作票后,程序化操作服务器通知独立五防主机对该操作票进行五防验证,只有在操作票通过五防主机验证的情况下程序化操作服务器才会将操作票文件上送给调度主站。之后程序化操作服务器每执行一步操作时,除自己需要判断执行条件外还需经五防主机进行验证,只有在验证通过的情况下程序化操作服务器才会下发执行命令。

五防方面增加一台五防嵌入式服务器(以下简称五防服务器),五防服务器除与程序化操作服务器通信外,还与遥控闭锁控制器通信,用于开放遥控闭锁继电器。同时与原五防后台通信,实时转发一些虚遥信点给程序化操作服务器,用于验证通道好坏。对一次设备,由于五防系统有遥控闭锁对一次设备进行硬件闭锁,通过五防判断后,五防服务器必须先解锁遥控闭锁继电器,再给程序化操作服务器发送允许操作命令,否则,程序化操作无法进行。

对于临时地线的装设和拆除,由于均为人工现场操作,其遥信位置考虑由电脑钥匙采集后,在当地五防机进行对位后,作为程序化操作前的条件进行是否允许操作的判据。

操作票内的单步执行失败时,若当前操作项出错处理方式定义为“立即停止”,则程序化操作服务器上送“执行总失败”信息,整个操作票执行失败;若当前操作项出错处理方式定义为“提示用户停止或继续执行”,程序化操作服务器将上送“当前步执行失败”信息,并进入等待状态。调度主站下发“继续执行”命令,程序化操作服务器将重新执行当前失败的操作项;调度主站下发“停止执行”命令,则结束当前

操作票执行。

3.4 方案的创新点

本次程序化改造大胆创新、锐意进取,制定出一套既适应该局实际情况,又标新立异的方案。主要的创新点如下。

(1) 通过在变电站内远动单元与监控中心间增加一套程序化操作服务器,实现监控主站从程序化服务器调取操作票,执行前由程序化服务器向嵌入式五防服务器提出请求,通过则允许,执行时由程序化将指令下发至各个测控单元完成。这就消除了技术壁垒,打破了厂家先入为主的垄断,以后不管是扩建还是综合自动化,不同厂家的设备都可接入实现程控。

(2) 目前程序化的实现基本上都甩开了五防,因为大家认为程序化操作票内的闭锁逻辑已经完美地替代了五防^[4,5]。但出于安全考虑,此次增加一套支持程序化操作的嵌入式五防服务器,五防主机与程序化操作服务器间进行通信,以实现五防系统对程序化操作票执行条件的判断,对操作票内操作项的预演,对操作票执行时的五防解锁及闭锁,给变电站内的安全操作构筑了第二道防火墙。

4 实施中遇到的问题

本次在方案实施过程中,在五防预演、组合票的操作、通道选择方面、时间配合方面、程控服务器与五防服务器配合方面等方面遇到了一定的问题,通过认真分析研究,找出了相对较优的技术解决方案。

4.1 五防预演

五防主机进行操作票预演时若在图形界面上显示预演过程,则整张票的预演需要花费1分钟时间,也就是说调度下发调票命令后需要1分钟后才能接收到程序化操作票文件。该时间可能已经超出主站的操作超时时间;并且由于图形界面是在站内显示,集控站端无法查看到界面,因此显示图形意义不大。若仅进行逻辑预演不显示预演过程,则整个操作票预演可以在几秒钟内完成。因此,出于时限限制,本方案考虑不进行图形预演,仅向程序化服务器发送预演成功或失败信息。

4.2 组合票的操作

程序化操作在操作票执行之前以及执行之后都需要对设备状态进行判断,程序化操作服务器内存储的操作票需满足“状态明确”这一原则,例如线路的

各种运行状态间的切换,可以做为典型票进行存储。对于像母线倒闸这样的操作,由于没有明确的运行状态,不适合将其作为典型操作票存储在程序化操作服务器内,而需通过主站端对典型票进行组合来实现操作。集控端将组合票分解成单张典型票与程序化服务器通信,通过对典型票的无缝链接进行组合票的操作。而站内程序化操作机仅进行单张典型票的操作。

4.3 通道选择

原站内远动装置 RCS-9698D 向集控中心传送数据的通道为两路互为备用的 101 通道,因程序化操作牵扯操作票的传送,原有 101 通道无法实现此项功能,故此次改造在程序化操作服务器与集控中心之间新增一路经南瑞科技扩展的程序化操作专用 104 通道,此 104 通道规约已在全国数座已投运的程序化操作变电站中实现了成功应用。程序化操作服务器需要的站内信息量与下发的遥控命令由原远动装置通过标准 104 规约向其传送;与嵌入式五防服务器间通讯采用为程序化操作扩展的 104 “许继四方规约”,用来传送操作序列和实遥信。

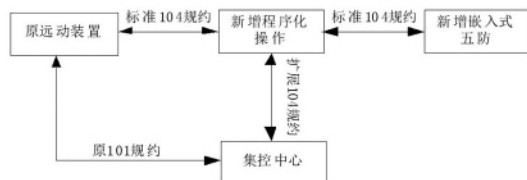


图2 通道配置示意图

4.4 时间配合问题

在实际配置过程中,出现了这样的问题:在程序化操作服务器向五防服务器请求操作时,五防服务器同时发对程控服务器解锁命令与对遥控闭锁继电器解锁命令。原站内遥控闭锁继电器控制器采用的是串口通信,程控服务器收到解锁命令后立即下发遥控命令,考虑继电器固有动作时间与串口通讯传输速率问题,出现了时间配合失步问题。在遥控命令下发的有效时间内,遥控闭锁继电器尚未开放,导致了遥控失败。

经过分析,采取以下方案进行解决:五防服务器与遥控闭锁控制器之间的通信由串口通信改为以太网通信,更换了通信板件,提高了通讯速率;五防服务器增加判断机制,在确认遥控开放后,再发软解锁命令;程控服务器在收到遥控命令后,延时1s下发遥控命令,同时在遥控成功后,向五防服务器发送全遥信供判断,要遥控成功重新闭锁继电器,延时3s再

做下一步申请。

4.5 程控服务器与五防服务器的预演功能划分

程序化操作服务器执行过程如图3所示。

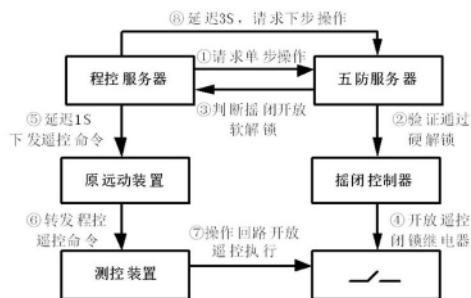


图3 遥控执行示意图

除自己需要判断执行条件外还需经五防主机进行验证,但程控服务器与五防服务器判断的条件是不同的。程控服务器判断设备态转换是否合法,即从一个设备态到另一个设备态之间是否能够直接转换,有三个判断条件:①当前设备态是否合法;②目标设备态是否合法;③操作票是否存在。

程控服务器判断通过后,再向五防服务器发送调取操作票的具体操作序列。五防服务器判断操作序列是否合法,即操作序列的每项单步操作是否符合严格的五防规则,通过允许程控服务器进行预置,否则禁止操作。

4.6 其他问题

在项目实施过程中,还出现了许多其他问题。如程序化操作为保证可靠性,要求开关刀闸位置采用双点遥信,由远动装置将双点合成后上送统一的双点遥信点,而南瑞继保的104规约组态配置里为双位置遥信,采用的是将双点遥信简单地划分为两个单点遥信来上送。通过更改组态规约,变双位置遥信为双点遥信来解决;同时在集控南瑞科技open 3000系统中的程序化操作模块Red Hat linux系统版本程序调取操作票时会发生错误,unix系统版本程序调取则无问题,在linux系统平台上调整了程序后则无问题。这些问题的成功解决,为将来程序化操作的推广积累了宝贵的调试经验。

5 改进空间

本次改造中还出现了一些没能有效解决的新问题,具体为如下。

(1) 由于程控扩展104规约目前不支持出错原

因上送,因此在条件不满足导致执行失败时,集控端无法获知导致出错的原因,可能造成处理时间的延误。这是由于规约本身的限制导致的。

(2) 目前乌鲁木齐电业局集控站系统并不具备程序化操作功能。其中集控站与变电站的通讯规约有IEC 101规约以及IEC 104规约,本次改造已实现的程序化部分是在扩展IEC 104基础上实现。但目前还有相当部分变电站不具备IEC 104接入调度条件,IEC 101规约基础上目前尚未能够成功实现程序化操作。这同样是由规约问题导致的。

(3) 对于部分需要人工进行执行状态确认的操作,本次改造采取的是在程序化操作票中增加“暂停”项。例如在合开关操作项后有一个提示确认,程序化操作服务器在对开关进行合操作并判断到执行结束条件满足后,将会上送暂停信息,集控站端相应地会弹出提示信息让操作人员进行确认,待确认完毕后从集控站端下发继续执行命令即可让程序化操作服务器继续进行下面的操作。并且由于传统操作习惯和相关继电保护规程规定,本次改造并未融入远方更改保护软压板功能,还需人工手动投退硬压板,尚未实现完全的摆脱人工操作。

(4) 目前国内的程序化操作变电站均为本站内间隔的程序化操作,尚未实现跨站间一体程序化操作。如在变电站送电时电源与负荷两侧刀闸与断路器的配合程序化送电。这牵扯到集控一体五防、集控跨站程序化操作功能模块的研发、通信协议的修改等诸多问题,需要解决。

这些新问题,需要在今后的程序化工程中一一加以改进。

6 结 语

变电站实现程序化操作,可尽量避免人为错误,达到减少或无需人工操作,减少人为误操作,提高操作效率。

前面讨论了程序化改造的方案,结合乌鲁木齐电业局三汽配电变电站程序化改造,提出程序化改造在具体工程中应进行调整和与实际结合的方面,针对三汽配电变电站程序化改造中出现的问题提出了相对较优的解决方案,对遗留问题也提出了整改的方向。为提高变电站的安全运行水平,开辟了一条全新的出

(下转第94页)

水期无功经济运行策略重点主要在以下3方面。

一是加强500 kV厂站间无功电压协调,实现无功分层分区平衡。枯水期轻负荷时段500 kV各厂站,特别是与二滩电站电气紧密联系的普提、石板箐变电站,应在保证安全运行的前提下,采取机组高功率因数或进相运行、退出低压电容器和投入低压电抗器等措施,将500 kV电压控制在电压曲线偏下限区域运行,为枯水期低谷负荷段正常方式下二滩电站保持最小开机方式创造有利条件。

二是研究机组间无功负荷的优化分配。二滩电站AVC采用等功率因素分配无功原则,目标函数是全厂效率最高,没有考虑无功补偿。另外,等功率因素原则要求有功出力大的机组进相深,而机组实际允许进相能力却低,接近低励运行;反而有功出力小的机组进相浅,大大浪费掉带低负荷机组的高进相能力,总体趋势是抬高机组功率因素,尽量在基本无功调节区域运行,降低了无功补偿效益。

三是研究在二滩高压侧装设带开关的分组补偿电抗器。根据系统无功负荷分组投入,可以大大减轻机组进相运行压力,枯水期低负荷段开2台机将成为典型运行方式,大大降低耗水率,同时无功补偿区域范围也大大增加。综合考虑到枯水期1.5倍的基准电价、入库流量以及无功补偿等因素,大大提高了装设高压电抗器的经济性,因此,对就地加装高压电抗器进行专题研究成为二滩电站无功经济运行的重要课题。

(上接86页)

路。在集控中心实现程序化操作功能,最大限度保留现有投资建设,使程序化操作模块具有足够的通用性和可扩展性。同时,这种应用改造的设计对其他即将建设和改造的变电站也有一定的借鉴和推广意义。

参考文献

- [1] 薄鑫. 浅析程序化操作在变电站中应用[J]. 南京供电技术, 2009, 3: 57-58.
- [2] 黄国栋, 陈志军, 张平. 500 kV 监控中心程序化操作应用[J]. 华东电力, 2009, 37(10): 1761-1763.
- [3] 王晶晶, 李群炬, 刘巍, 等. 面向智能电网愿景的无人值班站科技应用若干思考[J]. 华北电力技术, 2009, (12): 18-20, 24.
- [4] 陈国飞, 李有春, 钱平. 程序化操作在500 kV兰溪数字化变电站的应用[J]. 电力建设, 2009, 30(7): 104-105.

4 结 语

在统计分析2009—2010年枯水期二滩电站线路无功变化规律的基础上,结合主变压器无功损耗分析、机组进相运行与无功辅助服务补偿关系,提出二滩电站枯水期无功经济运行策略:一是加强500 kV厂站间无功电压协调调整;二是机组间的无功负荷优化分配;三是在高压侧装设补偿电抗器。

参考文献

- [1] GB/T 13462-2008, 电力变压器经济运行[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [2] 胡景生. 变压器经济运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [3] Prabha Kundur. 电力系统稳定与控制(影印版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [4] 严伟, 陈俊, 沈全荣. 大型隐极发电机进相运行的探讨[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 94-97.
- [5] 刘平, 江建明. 四川电网发电机进相试验研究[J]. 四川电力技术, 2005, 28(1): 8-11.
- [6] Carson W. Taylor. 电力系统电压稳定(影印版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

作者简介:

郭玉恒(1973)男,本科,高级工程师,从事水电站运行及技术管理;

唐杰阳(1981)男,硕士研究生,工程师,从事水电站运行管理。

(收稿日期:2011-05-09)

- [5] 王永明, 郭碧媛, 张丰. 分布式变电站程序化操作系统的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 92-94.
- [6] 程明, 金明, 李建英, 等. 无人值班站监控技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [7] 丁泉, 朱米强, 胡道徐, 等. 变电站程序化操作及远动装置在其中的应用[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 119-121.
- [8] 唐涛. 电力系统厂站自动化技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 92-97.
- [9] 朱一晨, 沈键, 庄卫金, 等. 集中监控系统程序化操作功能设计与实现[J]. 华东电力, 2008, 36(1): 30-34.

作者简介:

李 杨(1985)男,工程师,工学学士,从事继电保护及厂站自动化维护相关工作;

郭小龙(1983)男,工程师,工学硕士,从事继电保护及厂站自动化维护相关工作。

(收稿日期:2011-03-22)

智能操作票系统完整解决方案

袁贵川¹, 庞晓艳¹, 张宏图¹, 王超¹, 肖志强², 陈登科³

(1. 四川电力调度中心, 四川 成都 610041; 2. 北京用尚科技有限公司, 北京 100085;
3. 宁波四维科技有限公司, 浙江 宁波 315020)

摘要: 提出完整的智能操作票系统解决方案, 包含专业电力图形系统、防误校验模块、智能推理模块、基本出票模块、审核批准模块、执行模块这六大模块。方案中存在以下亮点: ①点图成票、逐步校验; ②提出智能推理票理论, 即自动分析操作任务, 分解操作步骤; ③增加掌上电脑(PDA)执行, 并且扫描对应设备条形码的措施, 来防止工作人员走错间隔、误操作设备。

关键词: 智能操作票; 防误校验; 智能推理票; 掌上电脑(PDA)执行; 条形码

Abstract: A complete solution of intelligent operation ticket system is put forward, which contains six modules: power graph system, anti-misoperation checkout module, intelligent reasoning module, issuing ticket module, auditing and approving module and execution module. There are some high lights in this solution, first of all, clicking the graph to issue an operation ticket and gradually checking the errors; secondly, proposing a theory of intelligent reasoning ticket which can automatically analyze the operation task and decompose the procedures; thirdly, adding the measures of personal digital assistant execution and scanning the bar code of the corresponding equipment to prevent operators going into wrong interval and operating the false equipment.

Key words: intelligent operation ticket; anti-misoperation checkout; intelligent reasoning ticket; personal digital assistant execution; bar code

中图分类号: TM731 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)04-0087-04

0 引言

在电网安全运行中, 操作票的编制、审核、批准、下令等操作是电网调度日常生产的重要工作, 同时也是发电厂、变电站等运行部门重要的工作内容, 操作票的正确与否直接关系着操作的正确与否, 关系到设备、人身和电网安全。电气误操作可能造成设备损坏、人身伤亡, 甚至引起电网振荡瓦解, 导致大面积停电等严重后果^[1-2]。

如何能够更加全面、有效防止运行电气设备误操作引发的人身和重大设备事故, 杜绝误操作事故发生, 始终是电力部门面临的重大课题。除加强操作安全管理外, 如何从技术手段上提高电网倒闸操作的安全性和规范性也是近期研究的热点。

在不断的技术革新中, 基于电网仿真的智能防误系统作为当前先进的高效防误技术^[3-6]已逐渐被认可并得到应用。这里提出的智能票解决方案有着严密的解决思路, 首先是以图形系统为基础, 建立电气设备拓扑图形, 图形系统含有智能防误校验功能, 系统

可以点图成票, 还可以生成智能推理票, 减少人工手工录入, 为操作票的编写提供专家级建议, 还可以对操作票进行潮流校验。在操作票的执行过程中, 厂站智能操作票还可以下载到掌上电脑(PDA)^[7], 以PDA正确扫描条形码来进一步加强操作票的安全执行措施。

1 操作票系统现状

通过对全国各地电力公司操作票系统使用情况调查发现, 各地使用操作票系统参差不齐, 是否使用操作票系统来开票, 操作票系统智能程度和该地区的经济以及地区开放程度是相关联的, 直辖市、省会等发达地区大部分都拥有自己的操作票系统, 但是操作票智能程度也有差别; 而一些相对欠发达的地区电力公司, 不具备电力专业的操作票系统, 通过使用社会上普及率很高的word、excel等办公软件来编制操作票, 完全通过人工编写, 信息化水平有待提高。以下分层次介绍了操作票系统使用现状。

1) 不具备操作票系统, 在word上设计好操作票的格式, 每次出票前, 完全手工逐条命令录入, 写票时

完全凭经验与技能,出票速度慢,出票合格率有待提高,而且纸质版操作的存储和查找都是一项复杂而难办的工作,尤其是随着电网规模不断扩大,调度人员工作更加繁重。

2) 具备简单的操作票系统,摆脱了非专业电力软件来开票的现状,实现在计算机上操作票的整个流程,包含操作票的编制、审核、批准、通知、下令操作、统计查找等功能,将调度人员从繁琐的日常劳动中解脱出来。现有操作票系统虽实现了计算机出操作票,但是缺少智能防误校验功能模块,安全性有待提高。

3) 具备智能防误操作票系统,同时也可以点图成操作票,出票过程中带有防误校验功能,实现了操作的智能防误校验,极大地提高了操作票出票的效率和安全性。

4) 传统的操作防误系统,主要采用手工定义操作逻辑的方式,生成校验规则。这样,对于每一可能需要进行安全校验的操作均要建立相应的设备状态逻辑条件,维护工作量大且复杂。并且从原理上来讲,很难将设备安全操作的状态条件逻辑式写完整。这种防误方式,对于简单的变电站还能勉强应付;但是对于复杂的变电站、集控中心的防误操作,就显得力不从心;对于调度操作票的防误,就更加无能为力。

智能操作票系统是不是还有更安全与科学的防护解决方案呢?现场五防闭锁装置不能完全满足要求,是不是仍然潜在走错间隔、误操作设备的危险呢?

2 智能操作票系统解决方案

基于以上操作票系统使用现状的研究,特提出了一套完整严密的智能操作票系统解决方案,有效地防止误操作,维护电力系统的安全与稳定^[8-10]。

2.1 智能操作票系统解决方案流程图

智能操作系统解决方案流程图见图1。

2.2 专业的电力图形系统

1) 专业的电力图形系统优势在于设计完全针对电力工作人员需求,图形编辑平台融合主流画图软件 Visio 以及 Auto CAD 作图软件的特性,易学易用。

2) 所有的一次、二次设备,都可以画在图上,支持一次、二次设备图形显示;而且画图即建模,图形系统可以模拟每个设备的真实物理属性,自动处理五防规则,简单来说,画图即建模;或者图形来源也可以由原有系统比如 EMS 系统对接而来,同样自动处理设

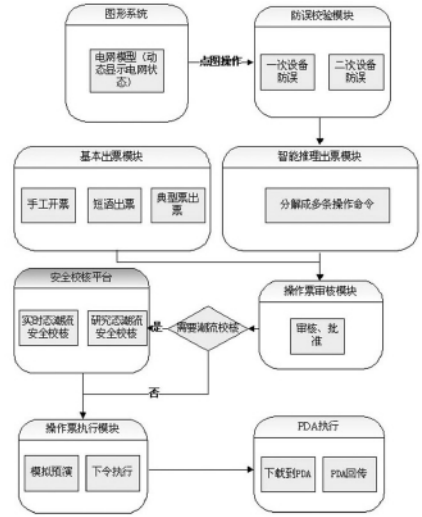


图1 智能操作系统解决方案流程图

备的五防规则。

3) 图形系统具有模拟仿真特性,通过与拓扑模块的无缝结合,可以实现电气设备的带电状态着色,动态显示开断设备的开断、拉合状态;与实时监控测量系统结合,可以显示设备的实时状态以及监测数据,而且还支持图形上的各种挂牌操作。向工作人员完全真实、实时显示电网运行状况,让调度以及运行人员不用到现场便可了解设备接线方式以及运行状态,为操作票编制等工作提供了真实环境数据支持。

2.3 防误校验模块

基于电网仿真的防误技术孕育而生。通过对电网的仿真和操作规程的建模,建立电网中电气设备之间的拓扑关联关系,对电网中的潮流进行模拟,从而得到电气操作安全与否。

根据电网的拓扑关系,自动生成安全校验算法,利用“点图成票、辅助生成、逐步校验、所见所得”的思想,点图自动生成操作票。在操作票命令生成的瞬间,系统根据防误校验功能,针对电气设备的五防规则,对生成的命令进行五防校验,符合五防规则即可生成命令,违反五防规则给出警告。

根据电网的拓扑关系,自动将电网分解为多个设备单元(比如分为多组出线)。工作人员根据设备的运行情况,维护设备单元的危险点。实际对这些设备单元进行操作时,根据操作的性质(通电、断电等),自动对设备存在的危险点进行提示告警。

将二次设备(或者是一些有特殊安全性要求的设备)的操作和其他设备的状态进行挂钩。当对这些设备进行操作时,自动对所需的条件进行检查,并对可能的危险进行提示告警。

2.4 智能推理出票模块

智能推理票是将一条操作术语,通过点图成票方式生成多条操作命令,并对自动生成的操作票进行安全校核、危险点分析的过程。智能推理票的生成系统首先分析操作命令,考虑到电压等级、接线方式、运行方式、可能的相关操作等因素,对操作任务分解成多条操作命令,再根据当地操作习惯调整操作序列,最终生成操作命令。

智能推理出票方式在防误的基础上智能代替工作人员来考虑操作票任务的执行步骤和顺序,提高了出票的合理性和安全性。

2.5 基本出票模块

除了以上说的点图成票方式,智能票系统解决方案还提供基本常规出票方式:在必要的时候可以直接手工编写操作命令;或者可以将按照正常的运行方式填写的经过审核的操作票,保存成典型票,那么遇到类似的任务时,可以直接调用该张典型票,不改动或者稍微做下改动,直接进入操作票的审核节点,完成操作票的编写;还有一种解决思路即用历史票出票,已经执行完毕的操作票如果遇到同样类似的任务,可以直接从历史票中找到该张票,稍微做些改动,也可以直接进入审核阶段。

2.6 操作票审核、批准模块

操作票审核、批准模块的设计从制度和流程的角度提高了操作票的安全性与准确率。在审核批准节点,严格设置权限,提供批准、打回、取回、再提交等灵活功能,还提供签名制度,体现权责分明。经过审核批准之后的操作票才能进入到下令环节。

审核节点还可以加入潮流安全校验功能,包含实时态安全潮流校验和研究态潮流安全校验,确保操作不会发生事故。

2.7 操作票执行模块

智能操作票解决方案中,对即将要下令执行的操作票进行图形化模拟预演,模拟操作票的执行过程,在预演中如果发现不符合安全操作的情况,将提示用户及早发现操作票的安全隐患,避免事故的发生。

执行时采用在线实时同步的执行系统,可执行预下令、通知、下令、回令等,在执行过程中还能进行下令间断、恢复、作废、中止等操作,并具备签字盖章功能。提供实时监护工具,必须在监护人监护的情况下才能成功执行下令、回令、终止等操作。

行部人员来操作,一般传统的做法需要使用纸张打印的方法执行,仍然潜在走错间隔、误操作设备的危险。

本方案中提出将操作票下载到掌上电脑(PDA),实现执行前先扫描设备条形码,核实后方能操作设备的方法,防止了工作人员走错间隔、误操作设备的危险。执行过程中,采用逐项执行、越项执行提醒等防误措施,执行完毕后回传到PC电脑,刷新本张操作票执行状态。

3 智能操作票系统解决方案优势

1) 利用“点图成票、辅助生成、逐步校验、所见所得”的思想,实现了操作票的点图自动生成。

2) 先进的算法,采用模式识别和一次操作模拟安全校验专家算法,能适应任意厂站接线方式、电网结构和运行方式,做到了一次设备操作逻辑的免维护,确保了电气设备操作安全。

3) 智能推理出票方式在防误的基础上智能代替工作人员来考虑操作票任务的执行步骤和顺序,提高了出票的合理性和安全性。

4) 掌上电脑(PDA)与设备条形码的扫描配合使用,确保工作人员走错间隔、误操作设备的危险情况不会出现。

4 结 语

电力系统中操作票的编制、审核、批准、下令等活动关系着整个电网的安全与稳定,正是因为操作票如此关键,如何能够更加全面、有效防止运行电气设备误操作引发的人身和重大设备事故,杜绝误操作事故发生,操作安全管理是电力部门关注的焦点。根据操作票系统在全国各地使用情况参差不齐的情况下,提出了完整的智能票系统解决方案。方案中的亮点即为专业的电力图形系统,自动维护五防规则,利用先进的安全校验算法,实现点图成票,瞬间进行安全校验;同时推出智能推理票思想,帮助写票人自动分析操作任务,分解操作步骤;最后一步在执行的过程中使用PDA下载现场对照操作票并且扫描对应设备条形码来防止走错间隔、误操作设备的情况出现,为智能操作票系统解决方案提供最后一道防线。

参考文献

[1] 潘家玮. 浅谈如何防止误操作事故[J]. 科技创新导

但是操作票命令都是下发给厂站人员或者由运

报, 2009(20): 176.

- [2] 韦红斌. 浅谈防止误操作的对策[J]. 湖州师范学院学报, 2009(S1).
- [3] 张健, 朱永利, 李东. 操作票专家系统的研究现状及其前景[J]. 电力情报, 2002(1): 61-64.
- [4] 张健, 朱永利, 杨子强等. 适用于变电站操作票推理的面向对象知识表示法[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(1): 63-65, 81.
- [5] 翟学明, 谢萍, 戚宇林等. 电网调度操作票专家系统中的知识表示方法[J]. 华北电力大学学报, 1998, 25(3): 98-102.
- [6] 张永生. 变电站智能操作票专家系统的开发应用[J]. 华东电力, 2000, 28(9): 23-25.
- [7] 李焕中. 电厂可视化操作票及PDA防误操作系统的设计[J]. 科技资讯, 2009(28): 25-26.
- [8] 邢晓敏, 赵东, 王兴奇. 通用型电气倒闸综合防误系统的研发[J]. 科技资讯, 2007(28): 8.
- [9] 邢晓敏, 王兴奇. 新型防误闭锁装置在智能操作票专家

系统中的应用[J]. 科技资讯, 2006(14): 8-9.

- [10] 马文建. 变电站仿真培训系统中操作票专家系统开发与实现[D]. 华北电力大学(河北), 2009.

作者简介:

袁贵川(1977) 毕业于浙江大学, 硕士, 长期从事电力系统调度运行工作。

庞晓艳(1968) 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统运行、电网稳定管理等方面研究工作。

张宏图(1973) 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统运行管理等方面研究工作。

王超(1976) 男, 工程师, 硕士, 主要从事电网调度运行、电力市场等方面研究工作。

肖志强(1978) 男, 工程师, 硕士, 主要从事电网调度运行、智能防误等方面研究工作。

陈登科(1981) 男, 江苏宁波人、工学学士, 主要从事电力系统高软设计工作。

(收稿日期: 2011-05-10)

(上接第60页)

3 解决措施

针对此次事故暴露的问题, 故障的根本原因在于直流分压器送至保护的信号不冗余, 因此, 若直流系统保护的启动与保护出口单独各自使用相应的传输系统时, 即使个别元件异常, 也不会导致保护启动与保护出口程序的同时出口, 从而导致直流系统的闭锁, 最多也只是引起相应PPR系统退出备用, 而冗余的PPR系统仍然能够保证在真正故障出现时及时切除故障, 保障直流输电系统设备的安全。

按照上述思路对德宝直流系统的直流分压器进行相应的冗余改造, 系统结构如图2所示。

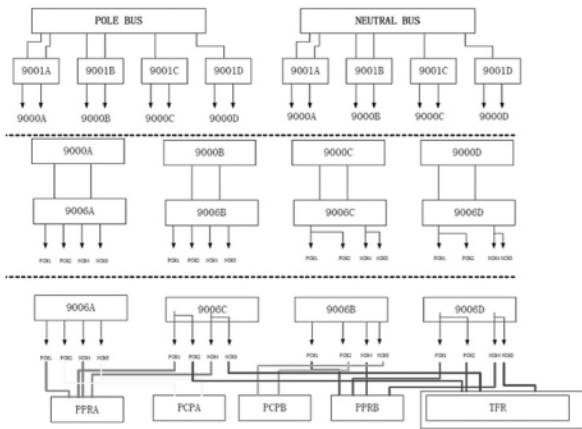


图2 冗余结构改造方案

由图2可见, 通过在每极直流分压器的两个接口柜上各增加一套IX 9000-G2 OPDL系统, 即极母线

直流分压器增加两个远端模块9001, 中性母线直流分压器增加两个远端模块9001, 直流分压器接口柜A和直流分压器接口柜B上分别增加一套本地模块9000和模拟输出模块9006, 极保护PPR上的保护启动和保护出口程序不再使用同一个远端模块9001传输过来的电压信号, 这样能够有效避免一个远端模块采集信号的波动造成极保护的启动程序和出口程序同时满足跳闸条件, 增加了系统运行的稳定性。

4 结 语

根据德宝直流输电系统由于直流分压器导致的系统闭锁情况分析, 结合直流输电系统在电网稳定中的枢纽地位, 建议在有条件的情况下慎重考虑直流控制保护系统中各个监测量的冗余策略, 必要时可采取增加冗余度的方法, 确保直流输电系统运行的可靠性。

参考文献

- [1] 吴泽辉, 张鹏, 左干清. 高电压直流系统电压波动的分析与处理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 104-107.
- [2] 郭树永, 郝江涛. 天生桥换流站高压直流分压器雨闪事故分析[J]. 四川电力技术, 2008, 31(2): 36-37.
- [3] 陕华平. ± 500 kV 龙泉换流站极I极母线直流分压器故障导致直流系统闭锁原因分析[J]. 华中电力, 2010, 23(2): 42-44.
- [4] 饶洪林, 姚其新, 饶磊. 龙泉、江陵换流站直流分压器闪络原因分析及对策[J]. 华中电力, 2010, 23(1): 55-57.

作者简介:

胡翔(1976) 毕业于四川大学, 硕士, 长期从事电力系统调度运行工作。

(收稿日期: 2011-05-09)

二滩电站枯水期无功经济运行策略研究

郭玉恒 唐杰阳

(二滩水力发电厂 四川 攀枝花 610098)

摘要: 枯水期, 电网负荷轻, 线路充电无功过剩, 线路负荷侧电压偏高, 需要机组深度进相调整电压。特别在低谷负荷段, 二滩水电站往往需要开额外的机组, 造成耗水率增加, 降低了经济运行水平。目前, 电网已启动并网发电厂辅助服务及运行管理考核工作, 对基本无功调节提出考核要求, 同时对额外无功调节进行补偿。针对当前实施辅助服务的新形势, 统计分析枯水期低谷负荷段的无功电压变化规律, 在保证电网和电厂安全稳定运行的前提下, 提出二滩电站枯水期无功经济运行策略, 以达到降低耗水率、提高运行效益的目的。

关键词: 枯水期; 辅助服务; 无功平衡; 进相运行; 经济运行

Abstract: In withered water period, the load of power grid is low, the charging reactive power of line is superfluous, so the generator needs leading phase operation deeply to adjust the system voltage, especially in low load periods, Ertan Hydropower Plant often needs opening additional units, which results in the increasing water consumption rate and the reduction of economic operation level. Now, the power grid has started the grid-connected power plant auxiliary services and operation management assessment, the evaluation requirements are proposed for the basic reactive power regulation, and the additional reactive power regulation is compensated. According to the new situation of auxiliary services, the variation rules of reactive power in valley period of load in withered water period are analyzed, and in order to ensure the stable and safe operation of power grid and power plant, the strategies of reactive power economic operation in withered water period for Ertan Hydropower Plant are proposed so as to decrease the water consumption rate and increase the operation benefits.

Key words: withered water period; auxiliary service; reactive power balance; leading phase operation; economic operation

中图分类号: TM714.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)04-0091-04

二滩电站安装6台550 MW发电机组, 水库库容 $57.9 \times 10^8 \text{ m}^3$, 属季调节水库, 设计多年平均发电量170 TWh, 保证出力1 000 MW, 年利用小时5 162 h。电站作为川渝电网的骨干电源点, 却处于川渝电网末端, 送出通道共五回500 kV线路, 其中, 二普断面通过二普一、二、三线, 经普提变电站与四川主网相连, 在普提侧加装串联电容器补偿; 二石断面通过二石一、二线与攀枝花电网相连。

在电网实施辅助服务的新形势下, 无功调节已成为一种经济手段, 如何在保证电网和电厂安全稳定运行的前提下, 提高二滩电站无功经济运行水平, 以达到降低耗水率、提高运行效益的目的, 成为研究的重点。

1 线路与主变压器的无功运行分析

1.1 线路无功运行分析

随着川渝电网发展, 不断有新的500 kV高压输电线路投产, 由于线路分布电容作用, 特别在枯水期, 全

网负荷轻, 无功过剩的问题更加突出。枯水期低谷负荷段, 二普三回长距离输电线路接近空载运行, 线路本身与电网过剩无功的叠加作用, 要求二滩机组大大增加从系统吸收的无功容量, 不断增加进相深度, 甚至接近低励限制运行。因此, 研究枯水期低谷负荷段二滩电站侧的无功电压变化规律, 具有典型的参考作用。

500 kV线路正常运行方式是指二普断面三回线与二石断面两回线均投运, 且普提侧串联电容器补偿装置正常投运。统计正常运行方式下2009年12月至2010年5月间的典型历史运行数据, 绘制线路总无功与总有功、电压的关系曲面图, 见图1。

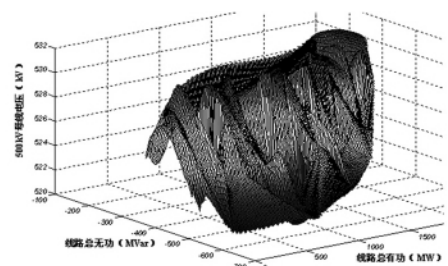


图1 枯水期线路无功与有功、电压曲面图

从图1关系曲面图可以看出,随着线路负荷减轻,无功过剩加剧,负荷侧电压也就越高,为了满足逆调压原则,二滩机组需不断增加进相深度,从系统吸收更多无功,降低二滩侧电压,但仍不能根本上解决系统电压偏高的问题;从关系曲面图可以看出,随着线路负荷升高、无功过剩程度逐渐减轻,为了维持二滩侧电压在电压曲线上限运行,需减轻机组进相深度,甚至迟相运行。

1.2 主变压器无功运行分析

变压器不作为无功电源,消耗电网中的感性无功,属于无功负荷之一。其无功功率损耗计算公式^[1-2]如下。

$$\Delta Q = Q_0 + K_T \beta^2 Q_K \quad (1)$$

式中 ΔQ 为无功功率损耗; Q_0 为空载励磁功率; K_T 为负载波动损耗系数; β 为平均负载系数; Q_K 为额定负载漏磁功率。

二滩电站每台主变压器由3台单相变压器组成,额定容量为 $214 \times 3 = 642$ MVA,查阅主变压器铭牌参数,统计枯水期6台主变压器的负载系数 β 在 0.22 ~ 0.48,计算6台主变压器枯水期总无功损耗 $\sum_{i=1 \dots 6} Q_i$ 约为 76 Mvar,即6台主变压器总共吸收的感性无功。

2 发电机无功运行分析

2.1 发电机进相运行

发电机是首先被考虑的调压手段^[3]。因为它控制方便,不需要附加设备,不需要额外投资,充分利用发电机本身具有的发出或吸收无功的能力。发无功的能力与同时发出的有功有关系,由发电机 PQ 的极限曲线决定^[4]。

发电机进相运行是结合电力生产需要而采取的一种运行技术,即由改变发电机的运行工况达到降压的目的,具有平滑无级调节电压的优点,又可降压节能。但发电机进相运行要受到静稳定、定子端部发热和厂用电电压降低等的限制,需对发电机作进相运行试验^[5],以确定其进相能力,为发电机的进相运行提供可靠依据。

根据机组进相运行低励限制定值表,可以推导出二滩机组励磁装置低励限制整定关系式为

$$Q_{Gmin} = \frac{5}{11} P_G - 300 \quad (20 \text{ MW} < P_G \leq 575 \text{ MW}) \quad (2)$$

2.2 无功辅助服务补偿

依据《华中区域电网发电厂辅助服务管理实施细则(试行)》和《华中区域发电厂并网运行管理实施细则(试行)》,并网发电厂应提供基本无功调节服务,即发电机组应具备功率因数在 0.9 ~ 1.0 范围内向系统注入或在 0.97 ~ 1.0 范围内从系统吸收无功功率的能力。有偿无功电量为发电机组在进相功率因数低于 0.97 时从系统吸收无功或在迟相功率因数低于 0.9 时向系统注入的无功电量。对有偿无功调节电量给予经济补偿。

2.3 发电机进相运行与无功辅助服务补偿

根据机组进相运行低励限制表以及无功辅助服务补偿规定,得出机组进相运行区域图,如图2所示。

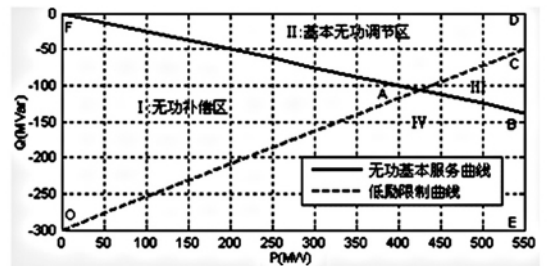


图2 发电机进相运行区域

从图2可以看出,区域I (O - A - F) 为低励限制曲线与无功基本服务曲线之间的区域,既满足低励限制,又满足无功服务补偿的要求,属于无功补偿区,是机组的优化运行区域;区域II (F - A - C - D),既满足低励限制,又满足基本无功调节的要求,属于基本无功调节区;区域III (A - B - C) 不满足低励限制,大于 430 MW 时,发电机进相功率因数达不到基本辅助服务规定值 0.97,为无功考核区;区域IV (O - A - B - E) 位于低励限制曲线以下,为机组不可运行区域。

综上所述,机组无功经济运行最主要是优化机组有功、无功分配,尽量在区域I运行。

3 无功经济运行策略研究

3.1 系统无功平衡

电压取决于无功平衡^[6]。具体来说,枯水期二滩电站从系统吸收过剩的感性无功,主要由两部分消纳,一是主变压器作为感抗元件消耗无功;二是机组采用进相运行吸收无功。综上所述,得出线路无功、主变压器损耗无功以及机组进相无功三者平衡的公式如下。

$$\sum Q_C + \sum Q_T = \sum Q_L \quad (3)$$

式中, $\sum Q_C$ 为机组总进相无功; $\sum Q_T$ 为主变压器总消耗无功,取枯水期的统计计算值 -76 Mvar; $\sum Q_L$

为线路从系统吸收的总无功,三者单位均为 Mvar。

3.2 无功经济运行策略

3.2.1 3 台机无功经济运行

枯水期典型运行方式,是指 3 台机并网调压,6 台主变压器投运,二普三回线与二石两回线均投运,且普提侧串联电容器补偿装置正常投运的运行方式。根据统计的线路无功历史运行数据、统计计算的主变压器无功损耗值,结合机组低励限制曲线、无功辅助服务,研究无功经济运行策略。

将图 1 中线路无功与有功、电压关系曲面图投影到 X-Y 平面,形成有功、无功等值线,考虑主变压器无功损耗,画出 3 台并网发电机共同作用下的低励限制曲线与无功基本服务曲线,得到图 3。

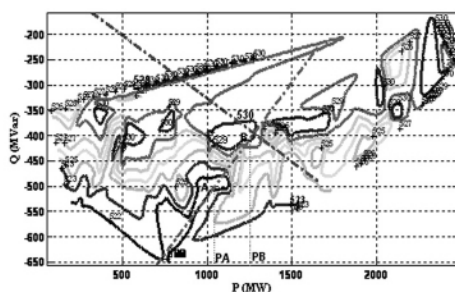


图 3 3 台机运行时的无功平衡

从图 3 可以看出以下两点。

一是分析不同电压等值线,相同负荷,电压越低,需要从系统吸收的无功越多。

二是分析图中 B 点的关系,在 530 kV 下,当系统负荷大于 PB 时,由于低励限制,系统无功失去平衡,机组吸收的无功(考虑主变压器无功消耗)不足以抵消线路分布电容产生的无功,造成系统无功过剩,系统电压抬高。为了防止电压越限(枯水期低谷段电压曲线上限为 530 kV),则需要额外开一台机调整无功电压,此时 PB 小于 3 台机额定出力总和。可以看出即使系统有功满足要求,仅仅为了调压,也需要开出额外机组,造成耗水率增加,降低了经济运行水平。

如何在满足系统电压的要求下,最大程度提高系统允许运行出力,减少开机台数,降低耗水率,成为无功经济运行策略研究的重点。

3.2.2 无功经济运行策略

提高电站无功经济水平的关键是如何完全彻底地解决系统过剩无功消纳问题,尽量保持最小开机方式运行。从系统侧来看,是要解决二普断面、二石断面无功倒送问题,虽然普提变电站、石板箐变电站已装设并联电抗器,但随着电网发展、高压输电线路的

投运,系统无功过剩问题却有加重的趋势,成为影响二滩无功经济运行的负因素。从二滩电站侧,为了满足调压要求,提高经济运行水平,理论上有三种方式可以考虑:一是提高机组低励限制能力,增加机组最大允许进相深度;二是在 500 kV 母线高压侧装设并联电抗器;三是调整主变压器绕组分接头挡位,也就是提高主变压器作为感抗元件消耗无功的能力,改变无功潮流的分布,而二滩主变压器为无载调压变压器,调整挡位和主变压器停电和测量接触电阻,涉及的工作面大,同时频繁调整,有降低主变压器作为主设备运行可靠性的风险,实际运行中不予采用。

讨论 3 台机在不同方式下的系统无功平衡关系,如图 4 所示。

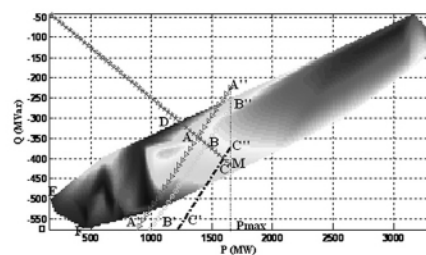


图 4 3 台机在两种方式下的无功平衡

图 4 中颜色区域为系统有功、无功在不同电压下的等值线图,随着负荷升高,系统运行电压被逐步抬升,符合逆调压的原则。从图 4 可以看出,当采用增加机组低励限制功能,增加进相深度时,由曲线 A'-A''右移至 B'-B'',无功补偿区域由 A-A'-F-E-E'-A 扩展至 B-B'-F-E-E-B,相应基本无功调节考核区减小,增加了允许运行的最高负荷。同理,采用装设高压电抗器,等效无功低励限制曲线移至 C'-C'',无需增加机组进相深度,而消耗容性无功的能力仍大大加强,无功补偿区域大大扩展,而基本无功调节考核区相应减小。

考虑增加机组进相深度,无需增加设备投资,充分利用发电机平滑无级调节电压的优点,但使得机组接近极限运行,降低了安全稳定水平,并且 2007 年二滩机组已提高过低励限制能力,实际可允许进相的冗余度很小,并不能彻底解决未来电网发展带来的持续无功过剩问题。

考虑装设高压电抗器,实现无功的分区平衡在二滩侧高压母线就地装设带开关的高压补偿电抗器(或可控高压补偿电抗器),大大增加电站侧吸收无功的能力,从而大大减轻机组吸收无功的负担,在枯水期低谷负荷段,甚至只需开 2 台机运行。故研究二滩电站枯

水期无功经济运行策略重点主要在以下3方面。

一是加强500 kV厂站间无功电压协调,实现无功分层分区平衡。枯水期轻负荷时段500 kV各厂站,特别是与二滩电站电气紧密联系的普提、石板箐变电站,应在保证安全运行的前提下,采取机组高功率因数或进相运行、退出低压电容器和投入低压电抗器等措施,将500 kV电压控制在电压曲线偏下限区域运行,为枯水期低谷负荷段正常方式下二滩电站保持最小开机方式创造有利条件。

二是研究机组间无功负荷的优化分配。二滩电站AVC采用等功率因素分配无功原则,目标函数是全厂效率最高,没有考虑无功补偿。另外,等功率因素原则要求有功出力大的机组进相深,而机组实际允许进相能力却低,接近低励运行;反而有功出力小的机组进相浅,大大浪费掉带低负荷机组的高进相能力,总体趋势是抬高机组功率因素,尽量在基本无功调节区域运行,降低了无功补偿效益。

三是研究在二滩高压侧装设带开关的分组补偿电抗器。根据系统无功负荷分组投入,可以大大减轻机组进相运行压力,枯水期低负荷段开2台机将成为典型运行方式,大大降低耗水率,同时无功补偿区域范围也大大增加。综合考虑到枯水期1.5倍的基准电价、入库流量以及无功补偿等因素,大大提高了装设高压电抗器的经济性,因此,对就地加装高压电抗器进行专题研究成为二滩电站无功经济运行的重要课题。

(上接86页)

路。在集控中心实现程序化操作功能,最大限度保留现有投资建设,使程序化操作模块具有足够的通用性和可扩展性。同时,这种应用改造的设计对其他即将建设和改造的变电站也有一定的借鉴和推广意义。

参考文献

- [1] 薄鑫. 浅析程序化操作在变电站中应用[J]. 南京供电技术, 2009, 3: 57-58.
- [2] 黄国栋, 陈志军, 张平. 500 kV 监控中心程序化操作应用[J]. 华东电力, 2009, 37(10): 1761-1763.
- [3] 王晶晶, 李群炬, 刘巍, 等. 面向智能电网愿景的无人值班站科技应用若干思考[J]. 华北电力技术, 2009, (12): 18-20, 24.
- [4] 陈国飞, 李有春, 钱平. 程序化操作在500 kV兰溪数字化变电站的应用[J]. 电力建设, 2009, 30(7): 104-105.

4 结 语

在统计分析2009—2010年枯水期二滩电站线路无功变化规律的基础上,结合主变压器无功损耗分析、机组进相运行与无功辅助服务补偿关系,提出二滩电站枯水期无功经济运行策略:一是加强500 kV厂站间无功电压协调调整;二是机组间的无功负荷优化分配;三是在高压侧装设补偿电抗器。

参考文献

- [1] GB/T 13462-2008, 电力变压器经济运行[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [2] 胡景生. 变压器经济运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [3] Prabha Kundur. 电力系统稳定与控制(影印版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [4] 严伟, 陈俊, 沈全荣. 大型隐极发电机进相运行的探讨[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 94-97.
- [5] 刘平, 江建明. 四川电网发电机进相试验研究[J]. 四川电力技术, 2005, 28(1): 8-11.
- [6] Carson W. Taylor. 电力系统电压稳定(影印版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

作者简介:

郭玉恒(1973)男,本科,高级工程师,从事水电站运行及技术管理;

唐杰阳(1981)男,硕士研究生,工程师,从事水电站运行管理。

(收稿日期: 2011-05-09)

- [5] 王永明, 郭碧媛, 张丰. 分布式变电站程序化操作系统的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 92-94.
- [6] 程明, 金明, 李建英, 等. 无人值班站监控技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [7] 丁泉, 朱米强, 胡道徐, 等. 变电站程序化操作及远动装置在其中的应用[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 119-121.
- [8] 唐涛. 电力系统厂站自动化技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 92-97.
- [9] 朱一晨, 沈键, 庄卫金, 等. 集中监控系统程序化操作功能设计与实现[J]. 华东电力, 2008, 36(1): 30-34.

作者简介:

李杨(1985)男,工程师,工学学士,从事继电保护及厂站自动化维护相关工作;

郭小龙(1983)男,工程师,工学硕士,从事继电保护及厂站自动化维护相关工作。

(收稿日期: 2011-03-22)