

- ★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



四川大学电气信息工程实验楼及新高电压实验中心

Vol.32
2009
增刊

期刊增刊特许准印证
川新出增字(2009)084号

四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

《四川电力技术》 编辑委员会名单

主任委员 王平

副主任委员 张伟

刘俊勇

委员

(按姓氏笔画为序)

方文弟 王卓 白家棣

刘勇 朱白桦 朱国俊

朱康 邓亚军 邬小端

李兴源 李建明 严平

胡灿 徐波 唐茂林

韩晓言 谢舫 甄威

秘书 李世平

吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN1003-6954
CN51-1315/TM

2009年第 32卷增刊 1期(总 204期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力试验研究院

发行范围:公开

主编:胡灿

副主编:吴小冬 谢舫

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发行:四川电力试验研究院情报室

地址:成都市青华路 24号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传真:(028)87314278

E-mail:cdsclj@163.com

印刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册 6.00元

[期刊基本参数] CN51-1315/TM* 1978*

b* A4* 80* 24* P* ¥6.00* 4300* 19*

2009-12

目次

·卷首语·

建设统一坚强的智能电网 张伟(1)

·四川大学专栏·

省级智能调度支持系统的设计及实现方法初探 刘俊勇 王民昆 杨嘉湜(2)

面向智能电网的电力系统云计算 潘睿 刘俊勇 郭晓鸣(6)

最小二乘支持向量机短期负荷预测研究 侯贺飞 刘俊勇(11)

基于人机互动的智能调度监控系统的设计及实现

..... 黄媛 刘俊勇 何迈等(16)

电力系统运行状态分析和识别方法研究 程向辉 刘俊勇 杨嘉湜等(20)

考虑分布式电源的智能电网备用市场交易模型 张国芳 吕林 刘俊勇(24)

超导储能技术对智能电网电压稳定的影响 徐建 邱晓燕 汪兴旺(29)

超导储能技术在电力系统中的应用与展望 李勇 刘俊勇 胡灿(33)

传统变电站检修向数字化变电站状态检修转变 刘阳 刘俊勇 张健明(38)

基于 Google Earth的电网信息可视化研究及实现

..... 黄媛 刘俊勇 何迈等(43)

巡线机器人的研究综述及面向智能电网技术的一些探讨

..... 佘松宜 翁桃 廖云杰等(47)

数字化变电站网络选型设计 罗小东 郑旭 舒勤(52)

·四川电力公司专栏·

四川省电力公司应急通信建设管理概况及思考 邓创 肖行谏(55)

光伏发电的政策与技术浅析 杜新伟(61)

提高初期特高压互联电网稳定性措施初探 丁理杰 刘洋 杜新伟等(64)

对智能电网概念的理解与四川发展智能电网的思考 杜新伟(68)

典型接线方式下智能配电网自愈功能实施的探讨 都健刚(71)

供电企业建设坚强智能电网新技术应用策略的探讨 郑毅(73)

智能电网初探 赖民昊 刘芸(77)

CONTENTS

Constructing Unified and Powerful Smart Grid.....	Zhang Wei(1)
Pilot Study on Design of Provincial Smart Dispatch Supporting System and Its Realization Method.....	Liu Junyong Wang Minjun Yang Jiashi(2)
Cloudy Computing of Power System Oriented to Smart Grid	Pan Rui Liu Junyong Guo Xiaoming(6)
Research of Short-term Load Forecasting Based on Least Squares Support Vector Machine.....	Hou Hefei Liu Junyong(11)
Design and Realization of Smart Dispatch Monitoring System Based on Man-machine Interaction	Huang Yuan Liu Junyong He Mai(16)
Analysis and Research on Identification of Operating Condition in Power System	Cheng Xianghui Liu Junyong Yang Jiashi(20)
Reserve Market Direct Transaction Platform Model for Smart Grid Considering Distributed Generation	Zhang Guofang Lv Lin Liu Junyong(24)
Influence of Superconducting Magnetic Energy Storage on Voltage Stability of Smart Grid	Xu Jian Qiu Xiaoyan Wang Xingwan(29)
Application of Superconducting Magnetic Energy Storage Technology to Power System and Its Prospect	Li Yong Liu Junyong Hu Can(33)
Transferring from Traditional Substation Maintenance to Condition-based Maintenance of Digital Substation	Liu Yang Liu Junyong Zhang Jianming(38)
Research and Implementation of Power Grid Visualization Based on Google Earth.....	Huang Yuan Liu Junyong He Mai(43)
Research Overview of Inspection Robot and Discussion on Smart-grid-oriented Technology	Dian Songyi Weng Tao Liao Yunjie(47)
Network Mode Selection Design of Digital Substation.....	Luo Xiaodong Zhen Xu Shu Qin(52)
General Situation and Thinking of Emergency Telecommunication Construction in SEPC.....	Deng Chuang Xiao Hangquan(55)
Analysis of Photovoltaic Generation Policy and Technology	Du Xinwei(61)
Superficial Discussion on Improving Stability of Ultra-high Voltage AC Interconnected Power Grid	Ding Lijie Liu Yang Du Xinwei(64)
Understanding on Concept of Smart Grid and Suggestion for Development of Sichuan Smart Grid	Du Xinwei(68)
Study on Self-healing Function of Smart Distribution Grid under Typical Connection.....	Du Jiangang(71)
Discussion of New Technology Application Strategy for Building Strong Smart Grid in Power Supply Enterprise.....	Zhen Yi(73)
Superficial Discussion on Smart Grid	Lai M(77)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2009 Vol.32 Supplement
(Ser. No. 204)

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

建设统一坚强的智能电网

四川省电力公司总工程师 张伟

1 明确智能电网的定义

智能电网就是一个利用现代网络通讯、计算机等技术与电气设备结合起来,实现电网在能源配置方面更环保(主要是污染物和温室气体排放最低),能源配置效率更高(即电网自身损耗最低),智能电网建设成本更节约,能源使用更安全,即电网稳定性更高、设备可靠性更高,人员得到更安全的工作环境,用户平均停电时间更短,并使发电商与用户以及电网管理者实现有效互动,出现故障后能最大限度地保证用户的基本需求并用最短的时间恢复到正常状态。

2 智能电网的构成与功能

2.1 发电侧

智能电网应具有联接各种能源发电设备接入的智能终端。如风能、水能、太阳能、生物质能、地热能、核电、火电等能够对这些能源发电进行科学有效的管理。充分利用可再生能源使其发挥最大效益,而使整个电网污染物及温室气体排放最小。这就要求发电侧智能终端与电网的互动是实时进行,对发电出力进行预测。对发电接入的有关技术标准能自动检测并采取有效管理与控制。特别是对于分散的发电商如屋顶太阳能、小型风电、生物质发电等能够在正常情况下全部收购,故障情况下充分利用它们使相邻用户能利用分散发电者的电力而不停电。

2.2 输配电环节

1)智能化的各级调度系统:这个系统除具有现有的 SCAD、EMS等功能外,还应具有电网稳定控制、故障隔离、自动负荷转移、网络重构、孤网运行控制等功能。

2)各电压等级的智能变电站:充分利用成熟的数字通讯技术、传感技术对变电站设备运行状况进行监视与控制,大量减少电缆用量;对站内外事故的类型进行预测和判断,自动作出处理反应;对配电变电站还应有当主供电源失去时能有效组织其下面接入的发电设备保证发电不停,并根据发电能力、功率缺额对用户用电进行管理和平衡,自动切除可间断负荷(如用户的加热、制冷设备等)依次保证照明、计算机等基本需求,待系统正常时自动恢复已暂停用电设备的供电。

3)智能配电变压器:它是一个承上启下的智能变压器,对下面用户的用电设备通过智能用户终端发来的信息进行管理,并向智能变电站发送本变压器的有关运行信息(如负荷、开关位置等运行工况)且当主供电源失去时,能使其下接的电源与用户保持供电平衡(即切除可间断用电设备,保持照明等)故障消除后恢复正常运行。

4)智能用户终端(智能电表):它具有分时计量、显示电费并管理用户各类用电设备的能力。把用户的用电设备划分为:最低需求如一只灯泡,一般需求如数只灯泡和计算机等,可间断负荷如电视机、冰箱、空调、热水器等,时刻掌握其用电情况(如有太阳能等发电设备也可进行管理)向上级管理设备发送接收信息,并接收上级管理设备发来的限电以及解除限电的指令。

5)计算机与通讯系统:智能电网的调度,变电站、线路、配电变压器、发电厂或小型发电设备与用户之间都需要有完善的通讯保障。各种智能设备收集处理信息、做出判断、处理下达指令、执行指令都离不开现代计算机和通讯技术的有效支撑。

3 智能电网的建设

我国正在建设资源节约型、环境友好型和谐社会,智能电网建设是其中重要的组成部分。国家电网公司站在履行社会责任的高度,对智能电网建设高度重视,出台了一系列措施和办法,对建设统一、坚强智能电网工作进行了安排和部署,非常必要和及时,十分具有前瞻性和指导性,为建设智能电网指明了方向。我们要在国家电网公司的领导下,统一规划、统筹协调、分步实施。在具体实施中应把握以下原则。

1)统一、坚强的电网是智能电网的基础。没有一个统一调度管理的电网,没有一个优化我国电力资源配置的以特高压为骨干网架、各级电压协调发展的坚强电网,智能电网就将是无源之水。

利用特高压骨干网架解决我国电力资源分布不均的问题,即将西部水电等清洁能源输送到东部负荷中心,将北部火电送往中东部。与此同时建设好坚强的受端网络,使特高压电力落得下、用得上,并辅以智能化使其更加高效、节能、安全。

2)智能化是核心。智能电网就是要解决当前在电网调度方面,由于规划不合理,达不到 $n-1$ 、 $n-2$ 稳定的问题以及 $n-1$ 、 $n-2$ 用户停电问题,使 $n-1$ 、 $n-2$ 故障发生时都能自动切换用户不停电。另外如果细分目前的电网,对分散的发电设备的接入,一是不能适应,怕主供电源故障时反送电;二是不能充分利用这些发电出力来供电,而不是小电源全部切除然后再逐个并网。同时智能用户终端还可以提供家电管理、通讯、网络等增值服务。这些智能化的功能还需要进一步的开发应用,产生更大的经济和社会效益。

3)环保、节能、安全是目标。智能电网就是要使电网对清洁能源的利用最大化,对有排放污染物及温室气体的机组按单位电量排放物的多少来确定发电顺序。电网自身潮流分布更加合理,采用低损耗设备,使电力输送过程的能耗最低。智能电网利用网络重构等技术使电网达到不故障、输配设备及用户都不停电,电网更加安全可靠运行。

总之,建设统一、坚强智能电网是今后一个相当长时期的主要任务,我们要在国家能源方针政策的指导下,在国家电网公司的统一领导下,加强对智能电网的统一规划、试点先行,不能一哄而上造成重复建设和浪费,分步实施,一步一个脚印,因地制宜地实现有中国特色的智能电网,为建设和和谐社会贡献力量。

省级智能调度支持系统的设计及实现方法初探

刘俊勇¹, 王民昆², 杨嘉湜²

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

摘要: 智能调度是实现强壮智能电网过程中的核心内容, 是整个电网的枢纽。提出了智能调度的内涵, 比较了智能调度和传统调度的不同点, 总结了智能调度要解决的问题和难点。结合智能调度的发展前景以及四川电力调度实时运行可视化系统和备用调度系统的建设情况, 对省级智能调度支持系统的设计及实现方法进行了初步探索。

关键词: 智能调度; 备用调度; 可视化

Abstract: Smart dispatch is the key of the process to realize the strong smart grid and it is the pivot of the whole grid. The connotation of smart dispatch is proposed, the different points between smart dispatch and traditional dispatch are compared and the problems and difficulties to be resolved in smart dispatch are summarized. Combined the development prospect of smart dispatch with the construction of real-time operation visualization system of Sichuan power dispatch and the reserve dispatch system, the pilot study about the design of provincial smart dispatch supporting system and its realization method is carried out.

Key words: smart dispatch; reserve dispatch; visualization

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0001-04

0 引言

智能调度以电网调度系统为对象, 通过不断研发、应用新型的电网控制技术、信息技术和管理技术, 实现电网调度各环节信息的智能交流^[1], 以提高电网调度安全生产保障能力和决策能力, 提高调度资源共享和优化配置能力, 提高电网调度规范化、标准化、精益化和智能化运行和管理能力, 为电网安全、优质、经济运行提供支持和保障的技术体系。

传统调度只需要处理一次系统的信息, 是电网稳态水平上的监控分析, 各应用系统相对独立, 数据库结构、数据格式、图形格式各不相同, 系统间通过既定的访问接口进行数据交互和共享, 纵向数据转发环节较多、时延明显, 各系统的数据分析结果在系统间几乎没有交互。智能调度面向调度全专业, 需要实现一、二次系统的同步建模、采集与分析, 是扩展到静态、动态、暂态三位一体的信息处理与分析, 是分布式一体化的标准系统平台, 实现全网调度范围内的统一协调控制, 实现多级调度主、备系统间实时与非实时数据的横向集成与纵向共享。

现代智能电网^[2]在空间、时间和控制目标等多个维度表现出复杂性, 作为电网决策中心和控制中心

的调度系统也必须与之相适应。随着电网规模和调度业务的快速增长, 传统调度系统已无法满足需求, 从软硬件构架和功能内涵上都需要实质性变化。智能调度首先要解决传统调度内部各系统、各平台间信息透明度差、多数据接口、数据格式差异大以及重复建设等弊端, 实现调度系统支撑平台的一体化; 其次, 智能调度要解决传统调度功能分散、整体性和扩展性较差、纵向数据共享不够、辅助决策功能薄弱等问题, 提高调度支持系统的实用化水平。而智能调度如何实现不同数据结构、不同访问接口、不同图形格式间的统一, 如何实现调度各业务系统之间、调度各安全区横向与纵向间的信息集成与共享, 如何实现备用调度中心的标准化建设和精益化管理, 是智能调度建设与发展的难点和亟待解决的问题。

文中结合智能调度的发展前景以及四川电力调度实时运行可视化系统和备用调度系统的建设情况, 对省级智能调度支持系统的设计及实现方法进行了初步探索。

1 SCADA/EMS支持平台

智能调度支持系统采用新一代 SCADA/EMS支持平台^[3]的框架, 主要功能包括电网运行监视与预

警、电网实时调度与智能决策、电网运行分析与评估等。数据采集采用多应用、多网关、多任务的分布式模式,以提高采集应用的运行可靠性。数据源除了传统的 RTU 数据外,还包括来自 PMU 装置、TMR、安全自动控制系统、继电保护和故障信息管理系统、水调自动化系统等智能设备和系统的实时采集数据。

智能调度支持系统提供标准的接口技术,一方面,第三方应用软件可通过标准接口进行进程之间的网络通信;另一方面,图形显示界面具有开放的体系结构,可以提供 API 接口和图形结构标准,供第三方应用软件使用,同时支持基于第三方界面模块的显示(例如动态连接库、OCX 控件等)。基于此,可以将现有的很多应用及电网模型有机地迁移、集成到 SCADA/EMS 平台中^[4~5]。

智能调度支持系统利用可视化技术,以图形或图像方式展示系统运行状态,突出显示告警以及电压和功角、线路和设备负载、断面潮流、备用和检修、负荷预测、灵敏度、状态估计等信息,使运行人员更方便、直观地了解系统的当前运行状态和电网运行趋势,从而采取更有效、更有针对性的运行控制措施。

目前,在备用调度中心建成的 SGD-5000 系统作为新一代“广域全景分布式一体化”调度自动化系统,采用基于组件的面向服务体系架构(SOA)和简单灵活的消息机制^[6],构成覆盖国、网、省三级调度的广域分布、互通互联、协调运作的电网调度自动化系统,涵盖了电网运行各个侧面,包括了历史、实时、未来和静态、动态、暂态全景信息,能够满足电网监视、分析、控制、计划和管理不同应用层面的业务需求。

2 省级智能调度技术支持系统

省级智能调度技术支持系统的建设除了要适应大电网特性和形态的改变,丰富系统功能,提高应用水平,还应结合各省电网的实际情况,开发出具有省级特点的实用的功能和算法。

2.1 信息处理模式转变

以调度员思维模式为框架,实现调度员信息处理模式的转变。

随着电网规模的快速扩充和电网互联的增强,对电网大模型的统一分析越来越成为需要。而各种繁杂的数据,其表现形式不直观,必然导致调度人员面对全网实时数据而视觉上变得模糊,太专注局部的变

化,降低对抽象数据的敏感度,从而弱化对系统运行态势发展的全面掌握。因此,调度系统需要从全局的角度来考虑,需要处理海量的信息。

省级智能调度支持系统从调度员的思维模式出发,充分利用省级电网丰富的数据资源,如 EMS、PMU、节能调度、水调自动化、OMS 等系统的数据,实现电网运行信息从静态、二维平面、孤立数据的展示方式到动态、三维立体、连续图形的展示方式的转变。为调度员提供了一个准确及时掌握电网实时运行态势的分析决策平台。

2.2 算法和功能开发

结合省网特点,开发出实用的功能和算法。

四川水力资源丰富,目前开展前期项目的电站装机容量已经超过了 40 000 MW,到 2010 年底,四川省水电装机容量将达到 30 000 MW 左右。水力发电在四川省发电量中占很大比例,对于联络线功率交换、自动发电控制和电网稳定起着至关重要的作用。

因此,省级调度系统应与水调自动化数据接口,通过对实时和历史数据的对比分析,为水电调度决策提供可视化分析界面,即通过收集水电机组及相应水库的发电曲线、耗水曲线、最低水位限制等数据,例如可实时计算水电机组按自定义发电出力时的最大运行时间等,并用可视化形象表达水电机组出力的相应时间,其目的和意义是便于调度人员全面掌握电网水力发电能力。目前,四川电力调度实时运行可视化系统已实现这一功能。

2.3 可视化

利用可视化技术,实现分析调度模式向智能化调度方向的转变。

电网可视化技术将 SCADA/EMS 系统升级,为调度人员提供电网实时数据的分类管理,并且挖掘出那些对电网运行有重要影响的数据,并对这些数据进行形象表达。电网可视化系统是专门为电网调度自动化设计的监视程序,它采用可视化的手段显示电网调度运行的参数,为调度员进行调度提供直观的可视化图形,它将电网运行枯燥的数据用灵活的、实物化的、动态的方式,借助计算机图形显示技术进行显示,充分发挥了人脑的模糊识别功能,将为调度自动化系统提供前所未有的技术手段。

省级智能调度支持系统的可视化展示应合理设计,充分反映本地电网特色,充分利用先进电网理论和计算机技术的最新成果,实用化程度高,贴近调度

生产需求,为本网调度运行及与上级电网调度互
联提供崭新的技术支撑平台,提高调度人员对电网运
行的监控能力,提高电网安全生产水平。

3 四川电力调度实时运行可视化系统

四川电力调度实时运行可视化系统^[7]从建设以
来,致力于探索省级智能调度支持系统的设计及实现
方法。该系统根据“以调度员思维模式为框架,以可
视化界面为功能模块,以互动计算为系统核心”的思
路,从电网充裕度、安全性、脆弱性、可控性等方面进
行了理论研究、算法实现及可视化表达,系统主要功
能包括:机组备用和检修容量监视、低频振荡快速检
测、电网运行整体态势指标可视化、水库及发电能力
可视化计算、设备运行方式智能表达。开关 SOE 的
立体智能表达、实时开关短路容量监视与预想短路电
流计算匹配可视化、变电站电压(无功)的智能控制
及其全过程动态响应监视、节点控制范围计算、特高
压电网特性自动监视等。

3.1 机组备用和检修容量监视

可视化系统采集 EMS、OMS 系统的数据,采用三
维柱形图显示发电机机组容量、备用及检修情况。纵
向维度总长用来显示总的容量,其中一段表示现有功
率,一段表示备用,另一段表示备用情况。每段采用
不同的颜色表示,如图 1 所示。

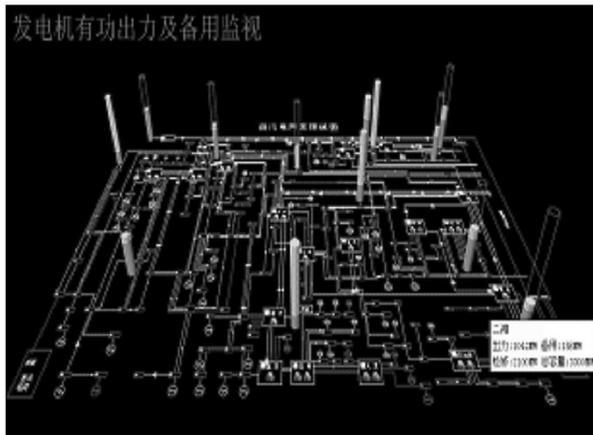


图 1 机组备用和检修容量的可视化展示

3.2 低频振荡快速检测

随着电网规模的扩大,电力系统的动态行为更加
复杂,掌握系统各种运行动态,实施先进的保护和控
制,对确保电力系统的安全稳定运行越来越重要。在
电力系统受到扰动的动态过程中,特别是发生低频振
荡等长周期动态过程时,传统调度系统通常无法做出

反应。因此,需要将功能从传统的监视、分析和控制
进一步延伸到广域保护和协调防御。

可视化系统根据主站 WAMS 系统提供的数据,
实时检测系统的低频振荡,计算出所检测线路的振荡
频率和幅值,在电网单线图 and 地理接线图上,动态地
进行展示,如图 2 所示。

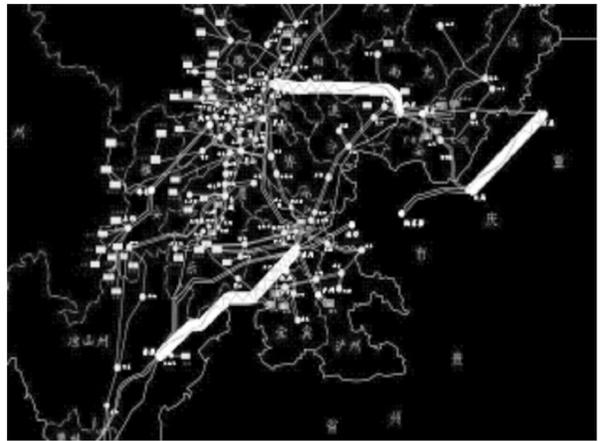


图 2 低频振荡快速检测的可视化展示

3.3 水库及发电能力可视化计算

可视化系统根据调度人员给定的水电机组出力,
通过采集与存储的水库库容曲线、水库特征水位、机
组出力特性、机组耗量曲线、水库来水情况等数据,计
算机组按此出力运行时,水库的水位何时降落到最低
水位限制,并用可视化技术加以表达。反之,调度员
也可输入时间得到水库在这一时间内消落到目标水
位对应的机组出力。分析结果可视化的虚拟仪表给
予形象表达,给调度人员以直观的信息,如图 3 所示。



图 3 水库及发电能力计算的可视化展示

3.4 实时平衡节能调度

可视化系统结合四川电力市场需求和电网商业
化运营的要求,以计算机为工具,以数据库为核心,网
络为媒介,综合预测、优化等现代化科学技术,为调度

员提供实时平衡调度计算以及区内外联合实时经济调度和安全校核。其实质是根据超短期负荷预报结果和节能调度的需要,按公平、公正、公开的原则组织实时交易。分析结果如图 4 所示。



图 4 实时平衡节能调度的可视化展示

3.4 实时平衡节能调度

可视化系统适应了现代复杂电网规模飞速增长的要求,强化调度运行人员全局监控的能力,提高了决策的准确性和科学性,实现传统电网调度模式向智能电网调度模式转换,它的建设将为系统的预警机制、方式预想、调度后状态重演评估提供快速、准确的显示平台;同时也将在今后智能调度策略、数据挖掘和知识发现的直观表达方面显示出强大的生命。

4 结论

随着特高压互联大电网技术取得重大突破,省级电网规模迅速发展,对调度系统提出了更高的要求,省级智能调度支持系统的建设已提上日程。对于省级智能调度系统的建设,应着力解决好以下几个方面的问题。

(1)实现智能调度系统工作流程的整合。 workflow 应提供流程调用服务和人机交互界面。 workflow 服务包含在基础的公共服务中,公共通过服务总线将不同的 workflow 服务整合为跨系统、跨应用、跨部门的流程。流程控制数据和流程业务数据在不同安全级别的系统和应用间传递。

(2)环境数据的融合及对电网的影响评估。省级智能调度支持系统不仅要省级电网一、二次设备

的运行工况进行在线监视和预警,同时对非电网但影响到电网运行的实时信息也要进行监视和预警,包括气象预报和实时气象卫星云图信息、雷电监测等功能,同时要对这些信息对电网的影响范围和程度进行评估。

(3)快速仿真模型(FSM, fast simulation model)问题。以特高压电网为代表的新一代智能电网,其实时运行需要新的理论支撑,需要突破传统的理论框架和运行工具。某些传统电力系统理论研究及实现工具涉及到复杂的模型和计算,在速度上已不能适应智能调度系统快速的数据传递要求。智能调度系统应有针对性地开发和应用快速仿真模型,以增强系统实时性。

(4)调度员直觉及思维问题的进一步拓展应用。新一代的智能调度系统要解决调度员与实时运行系统之间的互动关系,以及人如何介入调度自动化系统,要解决大量历史数据挖掘,采用不完全依赖于数学模型的知识模型和展示平台来拓展调度员的洞察力和思维模式。在以上问题得到解决后,省级智能调度系统能够以可视化技术为核心得到实现。

参考文献

- [1] 钟金, 郑睿敏, 杨卫红, 等. 建设信息时代的智能电网[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 12-18.
- [2] European Commission. European Technology Platform Smart Grids. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future [EB/OL]. http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf 2006. [2008-10-10].
- [3] 王明俊. 我国电网调度自动化的发展——从 SCADA 到 EMS[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 44-45.
- [4] 张慎民, 邵山. 国内第四次 EMS-API 互操作实验介绍[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 7-10.
- [5] 姜彬, 罗玉孙, 叶周. 面向对象技术在 EMS 图像系统中的应用 // 全国能量管理及其的地区电网中的应用会议论文集, [C]. 南昌, 1996.
- [6] 杨志宏, 赵京虎, 陈梅. 基于 SOA 的实时信息系统平台 // 2004 全国电力系统自动化年会论文集 [C]. 桂林, 2004, 10: 28-11. 1.
- [7] 刘俊勇, 陈金海, 沈晓东, 等. 电网在线可视化预警调度系统[J]. 电力自动化设备, 2008, (1): 1-5.

作者简介:

刘俊勇 (1963-), 男, 四川成都人, 教授, 博士生导师。主要从事电力市场、分布式发电、灵活输电与电力系统可视化等方面的研究。

(收稿日期: 2009-11-04)

面向智能电网的电力系统云计算

潘睿, 刘俊勇, 郭晓鸣

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

摘要: 针对电网规模的不断发展, 智能电网在电力系统的不断实现, 对电力系统处理器资源和储存资源的要求越来越高。提出了电力系统智能云, 智能云能够在现有处理器、储存设备不变的情况下利用系统内网整合电力系统现有的资源, 提高整个系统的计算储存能力和数据安全性, 减小系统扩建投资, 对于实现中国电力系统智能电网和超大规模计算提供了思路和有力的技术支持。

关键词: 云计算; 智能电网; 数字化变电站; 分布式; 超大规模计算; 智能云

Abstract: Aiming at the continuous development of power grid and the implementation of smart grid, the demands on processor and storage resource for power system are increased. The conception of smart cloud in power system is proposed. With the same processors and storage installations, smart cloud can integrate the existing resource in power system with system intranet to improve the computation and storage abilities and data security of the entire system, and can reduce the investment of system expansion as well. It provides a thought and technical supports for the implementation of smart grid and very large-scale computation.

Key words: cloud computing; smart grid; digital substation; distributed; very large-scale computing; smart cloud

中图分类号: TM74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0005-05

0 引言

美国 2001 年 EPRI 最早提出 “Intelligrid” (智能电网), 并开始研究, 欧洲 2005 年成立 “智能电网 (Smart Grids) 欧洲技术论坛”, 也将 “Smart Grids” 上升到战略地位展开研究。2006 年, 美国 IBM 公司提出的 “智能电网” 解决方案。根据 IBM 中国公司高级电力专家 Martin Hauske 的解释, 智能电网有 3 个层面的含义^[1]。中国能源专家武建东提出的 “互动电网”^[2]。互动电网, 英文为 Interactive Smart Grid, 它将智能电网的含义涵盖其中。互动电网定义为: 在开放和互联的信息模式基础上, 通过加载系统数字设备和升级电网网络管理系统, 实现发电、输电、供电、用电、客户售电、电网分级调度、综合服务等电力产业全流程的智能化、信息化、分级化互动管理, 是集合了产业革命、技术革命和管理革命的综合性的效率变革。它将再造电网的信息回路, 构建用户新型的反馈方式, 推动电网整体转型为节能基础设施, 提高能源效率, 降低客户成本, 减少温室气体排放, 创造电网价值的最大化。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO. 50977059)

文献 [3~5] 都是关于智能电网概念的描述, 所有的关于智能电网的描述都具有共同的思想: 提高整个电力系统信息网络系统收集、整合、分析、挖掘数据的能力; 实现整个电力系统的智能化、信息化、分级化互动管理; 构建一个低成本的电力系统设备和信息网络。针对这些构想, 将 “云计算” 引入电力系统, 通过建立电力系统智能云可以在现有电力设备基本不变的情况下, 利用中国电力系统内网建立智能云, 可以充分的整合系统内部的计算处理和储存资源, 极大提高电网数据处理和交互能力, 成为智能电网在中国实现有力的技术组成。

1 电力系统智能云分析

1.1 云计算基本原理

“云计算” 比较普遍的定义为: 云计算 (cloud computing) 是分布式处理、并行处理和网格计算的发展, 或者说是这些计算机科学概念的商业实现, 是基于网络的超级计算模式。云计算是虚拟化、效用计算、IaaS(基础设施即服务)、PaaS(平台即服务)、SaaS(软件即服务) 等概念混合演进并跃升的结果。

狭义 “云计算” 是指 IT 基础设施的交付和使用

模式,指通过网络以按需、易扩展的方式获得所需的资源(硬件、平台、软件)。提供资源的网络被称为“云”。“云”中的资源在使用者看来是可以无限扩展的,并且可以随时获取,按需使用,随时扩展,按使用付费。广义云计算是指服务的交付和使用模式,指通过网络以按需、易扩展的方式获得所需的服务。这种服务可以是 IT 和软件、互联网相关的,也可以是任意其他的服务。



图 1 云计算的发展过程



图 2 云计算概念的生成

云计算的基本原理是^[6],通过使计算分布在大量的分布式计算机上,而非本地计算机或远程服务器中,企业数据中心的运行将更与互联网相似。这使得企业能够将资源切换到需要的应用上,根据需求访问计算机和存储系统。它把存储在众多分布式计算机中的大量数据资源和处理器资源整合在一起协同工作。云计算是一种新的共享基础架构的方法,它可以将巨大的系统资源联合以提供各种不同的服务。这使得企业能够将资源切换到需要的当前应用上,根据需求提供处理器和存储资源。在云计算平台中的服务器可以是物理的服务器或者虚拟的服务器。高级的计算云通常包含一些其他计算资源,如存储区域网络、网络设备、防火墙以及其他安全设备等。

1.2 云计算与网格计算的区别

目前正在使用的网格计算技术是通过局域网或广域网提供的一系列分布式计算资源,而对终端用户或应用来讲,好像是一台大型虚拟计算机。通过在个人、组织和资源之间实现安全、协调的资源共享,来创建虚拟动态的组织。网格计算是分布式运算的一种

方法,不仅包括位置,而且还涵盖组织、硬件和软件,以提供无限的能力,使连接到网络的每个人都可以进行合作和访问信息。网格计算同样也是应用于分布式运算的一种方法,但是可以说从很多方面比较,云计算同网格计算都有很大不同^[9]。

表 1 云计算与网格计算的比较

	云计算	网格计算
资源分布	聚合分布资源,支持虚拟组织	资源相对集中,主要以数据中心的形式提供底层资源的使用,并不强调虚拟组织(VO)的概念
支持应用	支持广泛企业计算、Web应用,普适性更强	把分散的资源聚合起来,强调支持信息化的应用
异构性	承认异构,用镜像执行,或者提供服务的机制来解决异构性的问题	用中间件屏蔽异构系统,力图使用户面向同样的环境,把困难留在中间件,让中间件完成任务
作业服务	支持持久服务,用户可以利用云计算作为其部分 IT 基础设施,实现业务的托管和外包	用执行作业形式使用,在一个阶段内完成作用产生数据
面向应用	针对企业商业应用,商业模型比较清晰	更多地面向科研应用,商业模型不清晰
标准化程度	有标准化的协议和信任机制	无标准化,各家采用的技术架构也不同

1.3 智能云的提出

电力系统是具有分布参数的超级系统,由于电力本身的特点,电能不能大规模储存,发、输、配、用必须同时完成,电力生产控制要求实时性强、可靠性高,具有自然分布的特性,电力的生产管理也就自然形成了一整套“分级管理、分层控制、分布处理”的体系,多年的实践表明,这是电力系统内在本质的体现^[10]。

“智能云”透过电力系统内网将庞大的计算处理自动拆分成小计算块,再交由多台服务器所组成的庞大系统进行计算分析,之后将处理结果返回给用户。通过智能云,极短的时间内可以处理巨大的信息,达到超级计算机的服务水平。通过分布计算,电力系统数据的运行与互联网相似,电力系统智能云能够根据应用切换资源,根据需求访问计算机和储存资源。智能云的目的是将运行的电网节点或单个计算机上的运算前移到系统内数量庞大的“智能云”内,由云来处理该点或计算机的请求。利用电力系统智能云不

在需要增强该点或计算机的额计算能力,而直接从“智能云”里面获得计算能力和资源,从而大大的提高整个系统各点的计算能力。

目前,各级电网都拥有一定的处理器资源和储存资源,智能云的实现关键在于不改变现有的计算机分布而能最大限度利用当前电力系统信息网络的物理架构,为当前的任务分配计算和储存资源。

2 电力系统智能云

2.1 智能云组成

中国现有电力系统的特点是电网分布的地域特征不同,网络的拓扑结构不同,电网的电气特点等将电网划分成多个子网,各子网的调度、运行、监控、保护、输配、营销由各子网中心负责,各中心拥有并维护着所辖电网的详细参数^[11]。各网络都针对所辖区域内的电网建立了较为详细的电力系统模型,而对相邻电网的模型则在一定程度上进行简化和等值,并在此系统模型的基础上进行计算机仿真,为电力调度、运行、监控、保护、输配、营销提供重要依据。这种简化等值的方法克服了由于中国地域辽阔而导致电力系统数据资源广域分布所带来的数据难以收集的困难,降低了系统仿真的复杂程度,但是简化等值模型的适用范围有限,智能云能较好地解决这一问题。

鉴于电力系统数据的敏感性和中国电力系统内网的完整性,在中国电力系统完全可以利用现有的系统内网的物理网络设备建立电力系统私有的云。利用这种云计算模式,电力系统完全控制云计算方式,这样的云储存和计算资源的访问可以完全由电力系统自己控制,而不是公用的云计算服务的提供商,相当于使用系统自己建立的内部云。



图 3 智能云的智能组成环节

面向智能电网的电力系统云计算就是为了实现智能电网各项智能模块而将云计算作为智能电网信

息交互的底层技术。智能云的组成包括:智能调度、智能运行、智能监控、智能保护,智能输配电。智能云就是智能电网各个智能环节信息整合、交互的技术实现。

2.2 智能云的服务体系

智能云不是单层的,而是一个多层服务的集合^[6]。底层是基础设施 (Infrastructure as a Service, IaaS),具有在特定服务质量约束的情况下提供计算机或数据中心的能力,使之能执行任意操作系统和软件。中间层是服务平台 (Platform as a Service, PaaS)。服务平台是在基础设施上加了一个用于给定应用的定制软件栈。其中包括操作系统和根据应用必须的服务。上层是应用程序 (Software as a Service SaaS),是计量服务,一个集中的系统部署软件在一台本地计算机上或者从智能云中远程运行的一个模型。

2.3 智能云技术体系

电力系统智能云通过集群应用、分布式计算等系统功能将电力系统内网络中的几乎所有网络和计算应用软件集合起来协同工作,共同对各级电网和计算机终端提供数据储存和计算服务。将集群功能、分布式处理等功能联合起来,通过软件接口,为电力系统各级电网和计算机终端提供智能云服务。

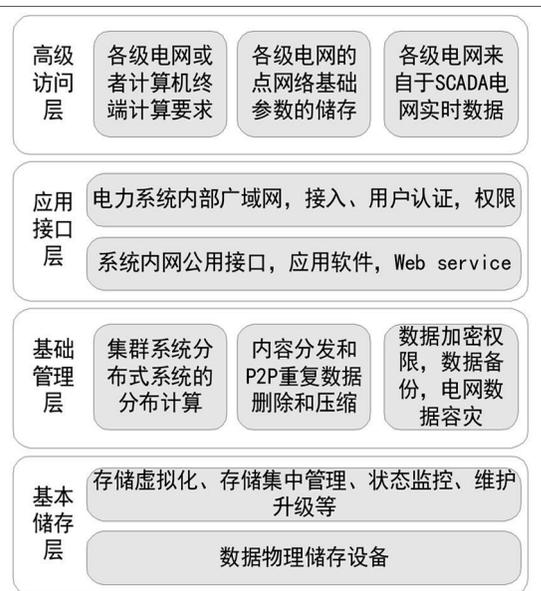


图 4 电力系统智能云的结构层次模型

电力系统智能云结构层次如下^[6]。

基本储存层:是电力系统智能云的储存基础。智能云储存中的存储设备大量分布在不同的地理位置,之间通过电力系统内部广域网连接在一起。

基础管理层:通过集群和分布式系统,实现智能

云中所有存储设备的协同工作,对外围提供强大的存储服务。

应用接口层:是智能云最灵活的部分,不同的各级电网可以根据需要、权限,提供不同的接口和服务。

高级访问层:任何级电网可以通过智能云公共接口来登录,获取计算需求。

2.4 智能云权限、冲突和安全机制

电力系统结构庞大,并且分布广,如果任何一个节点或者计算机终端的计算要求都提交到需求分配的总中心的话,中心压力很大,对网络速度要求很高,并且权限的判定也比较繁琐。在智能云体系的基础管理层中进行访问权限、冲突和安全机制的设置。

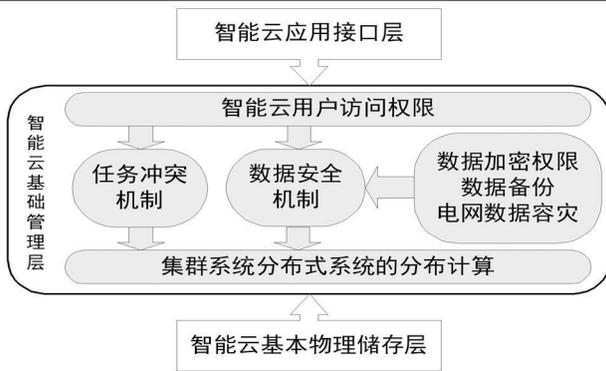


图 5 电力系统智能云的管理层机制

1)现有电力系统分级电网管理的层次很清晰,通过电网的级别建立主云和子云来限定权限和资源分配,从而减少系统内部不必要的权限管理和资源调配,是智能云的资源 and 权限更为合理。

当正常情况下,电力系统智能云中某级电网只能在间接本级和直接上一级的子云系统中获取资源。当出现紧急情况(如突发自然灾害)时,可以通过紧急调度的触发机制来获取更多级别的资源。

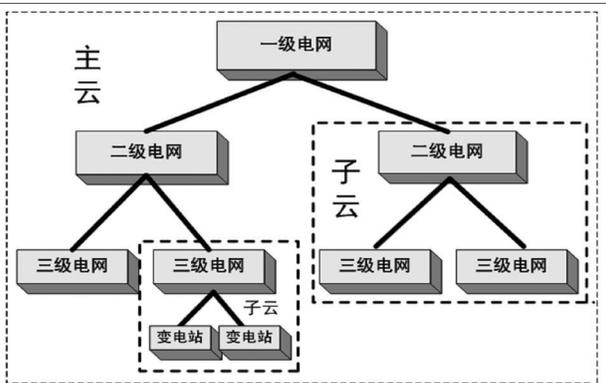


图 6 智能云访问权限机制结构关系实例

2)电力系统智能云中始终有多个任务同时提出资源申请,必须建立一个合理的任务分配和提交机

制,才能最大限度地利用云资源和避免网络的堵塞和任务的排队。首先,对整个系统内所有的任务进行分级,按照任务所属电网级别和任务紧急程度进行任务优先级分级;任务提出时,首先在本地对任务的资源需求进行分析,如果本地资源能够在本地或者以该级电网为云根的子云里在规定时间内完成时,该任务不向上级云资源提出资源请求;

不满足上面的情况时可以向同级的云提出资源请求,并且进行任务优先级进行比较,如果继续不满足,则向上级云提出资源请求,进行任务优先级排队。

以上只是初略方法,通过建立一个详细的任务分配机制可以逐步按照任务的需求获得智能云的任意资源,并且避免网络的阻塞,最大限度利用云资源。

3)智能云的数据安全是智能云实现的核心。通过数据加密权限、数据备份、电网数据容灾的建立完整的智能云的数据安全机制;电力系统内网是一个物理上完全独立的广域网,物理上的隔离保证了电力系统数据在网络上对于其他行业的安全保密性;同级的电网对数据没有访问权,但是数据可以在同级资源中进行加密的存储和计算;数据对上一级是完全可见的,也就说该级完全拥有下级所有的数据访问权。通过安全机制可以保护各级数据的安全,并且最大限度地提高资源的利用率。

2.5 智能云特点

1)良好的扩展性和经济性。即使建立电网中再小的节点或者计算机终端,需要配置显示器、硬盘、CPU、内存等一整套设备,并且确保其性能满足该节点或终端的计算和储存需要。但利用电力系统智能云,可能只需要一个现实设备,接入电力系统广域网,就可以根据权限实现计算和储存功能,而且不必担心自己购置的设备被淘汰,因为智能云所采用的硬件设备是系统核心节点单位负责维护和更新,这样电力系统在信息交互的这个层面就具有良好的扩展性和经济型。

2)强大的计算和存储能力。电力系统智能云将系统各节点和终端的计算和数据分布在大量的分布式计算机上,云海中成千上万的计算机提供强大的计算能力,针对中国巨大的电网规模和庞大的系统数据,智能云提供强大的计算和储存能力。

3)系统数据高安全性。在智能云中,数据集中存储,因而更容易实现安全监测。尤其针对电力系统安全 I 区,电力系统内部管理者对数据进行统一管

理、分配资源、均衡负载、部署软件、控制安全, 并进行可靠的安全实时监测, 从而最大限度地保证各级电网的数据安全和数据权限。

4) 计算和储存的虚拟化。虚拟化是电力系统智能云的技术基础, 它将底层的硬件, 包括服务器、存储与系统内网设备, 全面虚拟化, 以建立起一个共享的、可以按需分配的庞大的电力系统内部资源池。

5) 资源动态扩展、分配。系统信息网的各种资源可以按需分配和自动增长, 而上层的数据及应用可以根据级别和重要程度的不同, 搭配出各种互相隔离的应用, 形成一个服务导向的内部智能云架构。

6) 电力系统智能化。由于电力系统智能云的建立, 基于系统海量数据的数据挖掘技术来获得大量的系统知识。海量的数据加上海量的分析大于知识。

3 基于智能云的数字化变电站实例

电力系统数字化变电站是由智能化一次设备和网络化二次设备分层构建, 建立在 IEC61850 通信规范基础上, 能够实现变电站内智能电气设备间信息共享和互操作的现代化变电站。由于数字化变电站和智能云的特点, 两者相结合可以实现基于智能云的电力系统数字化变电站^[12]。

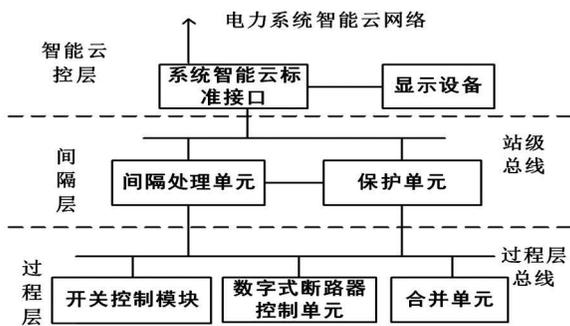


图 7 基于智能云的数字化变电站分层分布结构示意图

根据 IEC 61850 标准的描述, 结合系统的智能云结构, 基于智能云的数字化变电站的一、二次设备可以分为三层: 站网控层, 间隔层, 过程层。过程层主要是指变电站内的变压器和断路器、隔离开关等一次设备。变电站在基于智能云的数字化系统主要指间隔层和站网控层。间隔层一般按断路器间隔划分, 具有测量、控制元件或继电保护元件。间隔层由各种不同间隔的装置组成, 这些装置直接通过局域网或者串行总线与智能云控层联系; 也可设有数据管理机或保护

管理机, 分别管理各测量、监视元件和各保护元件, 然后集中由数据管理机和保护管理机与智能云控层通信。智能云控层包括本地的显示设备和智能云接口等, 实现与智能云的数据流的互动。

基于 IEC 61850 标准的数字化变电站确立了电力系统智能云变电站的建模标准, 采用面向对象建模技术、软件复用技术、高速以太网技术、嵌入式系统技术和嵌入式实时操作系统 RTOS (Real Time Operation System) 技术, 以及 XML 技术等, 体现了“软件总线”的概念, 实现软件领域的“即插即用”。满足了电力系统智能云的实时性、可靠性要求, 有效地解决了异构系统间的信息互通、数据内容与显示分离、自定义性和可扩展性等问题, 使得数字化变电站分层分布式方案的实施具备了可靠的技术基础。

基于智能云的电力系统数字化变电站主要包括两部分: 一是对原有的变电站进行数字化改造; 二是随着电网建设需求新建数字化变电站。

变电站一次设备中常规的继电器及其逻辑回路被可程序代替, 常规的强电模拟信号和控制电缆被光电数字和光纤代替。并且一次设备实现了故障的自动检测、诊断、信息上传, 减少了停电检修的机率, 提高了电网运行可靠性^[13]。

变电站内常规的二次设备, 同期操作装置以及正在发展中的在线状态检测装置等全部基于标准化、模块化的微处理器设计制造, 设备之间的连接全部采用高速的网络通信, 二次设备不再出现常规功能装置重复的 1/0 现场接口, 通过网络真正实现数据共享、资源共享, 常规的功能装置在这里变成了逻辑的功能模块。

目前, 传统变电站的综合自动系统虽然基本实现了计算机化和网络化, 但是由于缺乏统一的通信规约标准, 设备间互操作性差, 很难实现全站设备信息及操作一体化; 而基于智能云的数字化变电站采用的 IEC 61850 标准对站内智能电子设备的信息描述与访问方法都进行了全面的定义和规范, 形成了统一的通信规约平台, 设备间可实现无缝连接, 具有互操作性, 便于维护和更新, 减少投运时间, 提高工作效率。

4 智能云在电力系统的展望

根据电力系统的基本特点, 智能云的建立不能完
(下转第 37 页)

- [27] 郭栋,李啸骢,郭袞,等.励磁与 SMES 协调控制中的静态偏移问题 [J].电力系统及其自动化学报,2006,18(3):38-41,63.
- [28] 李啸骢,郭栋,韦化,等.超导磁储能与发电机励磁的多指标非线性协调控制 [J].中国电机工程学报,2007,27(28):29-33.

作者简介:

李勇 (1983—),男,硕士研究生.主要从事电力系统稳定与控制的研究。

刘俊勇 (1963—),男,教授,博士生导师,主要从事电力市场、电力系统可视化及电力系统稳定与控制等方面的研究。

(收稿日期:2009-10-10)

(上接第 10 页)

全的效仿普通的云计算,而是要构建适合电力系统现有信息网络架构的电力智能云。

(1) 电力系统结构庞大,并且分布广,如果任何一个小节点或者计算机终端的计算要求都提交到需求分配的总中心的话,中心压力很大,并且权限的判断也比较繁琐。但是电力系统分级管理的层次很清晰,通过级别建立主云和子云来限定权限和资源分配,从而减少系统内部不必要的权限管理和资源调配,是智能云的资源 and 权限更为合理。

(2) 目前,电力系统已经有比较完整系统内部网络的物理架构和分布在整个电网各级的计算和储存资源,只要通过软件和接口,就能在现有的设备上建立电力系统智能云。

(3) 当前,电力系统的发展很快,电网扩建很迅速。以前的扩建都需要很大的投资在处理器和储存设备上。而在电力系统智能云的体系架构下扩建电网,信息设备只需要要很小的投资,只需要投资显示和外设,这样可以大大节省硬件投资。

5 结 论

电力系统智能云的提出和建立,将对整个电力系统信息交互、计算和储存带来巨大的影响。通过智能云的建立,在完全不改变现有系统内网和设备的情况下,最大限度挖掘系统现有计算和储存资源能力,提高当前系统的整体性能。并且通过基于智能云的数字化变电站,极大的提高了电网在智能云下的可扩展性,为虚拟变电站的实现提供的新方法,减少了电网扩建的大量投资,为智能电网在我国的建立和实现提供强有力的技术支持。

参考文献

- [1] IBM 论坛 2009,点亮智慧的地球 [EB/OL]. <http://www>

-900.ibm.com/cn/forum2009/wisdom_shtml

- [2] 武建东.全面推互动电网革命 拉动经济创新转型 [EB/OL].2009-02-03. <http://www.chinapower.com.cn/article/1146/art1146899.asp>
- [3] 肖世杰.构建中国智能电网技术思考 [J].电力系统自动化,2009,33(9):1-4.
- [4] 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):1-5.
- [5] 钟金,郑睿敏,杨卫红,等.建设信息时代的智能电网 [J].电网技术,2009,33(13):12-18.
- [6] 李雅轩,杨春晖,田军夏.中小企业信息化建设的计算模式——云计算 [J].河北企业,2009,(6):70.
- [7] 王龙,万振凯.基于服务架构的云计算研究和实现 [J].计算机与数字工程,2009,37(7):88-91.
- [8] 张敏,陈云海,林立宇.带耐心运营商云计算数据中的构建分析 [J].规划与建设,2009,(6):100-106.
- [9] 高岚岚.云计算与网格计算的深入比较 [J].海峡科技,2009,(2):56-57.
- [10] 辛耀中.电力信息化几个问题的探讨 [J].电力信息化,2003,1(3):20-23.
- [11] 张伟,沈沉,卢强.电力网格技术初探(一) [J].电力系统自动化,2004,28(22):1-4.
- [12] 王璐,王步华,宋丽君,等.基于 IECQ61850 的数字化变电站的研究与应用 [J].电力系统保护与控制,2008,36(28):91-94.
- [13] 丁书文,史志鸿.数字化变电站的几个关键技术问题 [J].继电器,2008,36(10):53-56.

作者简介:

潘睿 (1984—),男,四川成都人,硕士研究生.主要研究方向为电力系统稳定与控制、电力系统新技术。

刘俊勇 (1963—),男,四川成都人,教授,博士生导师.主要从事电力市场、分布式发电、灵活输电与电力系统可视化等方面的研究。

(收稿日期:2009-11-04)

最小二乘支持向量机短期负荷预测研究

侯贺飞, 刘俊勇

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:电力系统短期负荷预测是一项非常重要的工作, 准确的短期负荷预测对于电力系统经济、安全、可靠的运行具有特别重要的意义。随着电力系统的日趋复杂化, 特别是电力市场的逐步深入, 短期负荷预测被赋予了更高的要求。提出了基于负荷日周期性进行前后向外推的数据预处理新方法, 为短期负荷预测模型利用这些历史数据奠定了基础。最小二乘支持向量机是新一代机器学习方法, 将其应用于电力系统短期负荷预测, 在充分利用日周期性和同时刻负荷相近性的基础上, 提出了基于最小二乘支持向量机回归算法 (LSSVR) 的短期负荷预测点模型。该模型通过采用不同天同时刻的负荷样本训练 LSSVR 来获取负荷的最优线性回归函数, 实现了在最小化负荷样本点误差的同时, 缩小模型泛化误差的上界, 获取了较好的负荷预测性能。

关键词:电力系统; 短期负荷预测; 最小二乘支持向量机

Abstract: Short-term load forecasting is a very important task of power system. Accurate short-term load forecasting is meaningful for the economical, safe and credible operation of power system. With the development of power system, especially the development of power market, the forecasting method with high accuracy must be researched. A new method of pre-disposing history data is proposed based on the daily periodicity of load, which lays the foundation for using history data by the model. Least square support vector regression (LSSVR) algorithm is a new generation of machine learning algorithms. So based on daily periodicity and the same moment similarity of load, a LSSVR-based short-term load forecasting model is put forward. The optimal load linear regression function is obtained by use of the samples in the same time but in the different days to train LSSVR. While the minimum load sample error is achieved, the model generalization error on the sector is reduced, so a better load forecasting performance is obtained.

Key words: power system; short-term load forecasting; least square support vector machine

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0010-05

0 引言

电力系统短期负荷预测是一项非常重要的工作^[1], 准确的短期负荷预测对于电力系统经济、安全、可靠的运行具有特别重要的意义。随着电力系统的日趋复杂化, 特别是电力市场的逐步深入, 短期负荷预测被赋予了更高的要求^[2]。

支持向量机^[3]是一种基于结构风险最小化原则和小样本学习理论的实用化机器学习方法, 它克服了神经网络方法存在一些缺陷^[4, 6~8]。同时, 最小二乘支持向量机回归模型将标准支持向量机模型中的损失函数设定成误差平方和, 并把不等式约束改成等式约束, 这样既减少了标准支持向量机模型中的待定参

数, 又将求解二次规划的问题转化成线性 KKT 方程组的求解, 极大地降低了求解的复杂性, 提高了支持向量机的实用性。

通过对电力负荷特性的分析, 认识到不同天同一时刻的电力负荷具有大致相近的从影响因素到负荷值的函数映射关系, 进而根据负荷数据预处理应充分利用待处理数据点前后向历史数据的要求, 提出了基于负荷日周期性进行前后向外推的数据预处理新方法。同时应用以结构风险最小化原则为理论基础的最小二乘支持向量机, 较好地解决了小样本、非线性、高维数、局部极小点等实际问题, 所以将其应用于电力系统短期负荷预测, 在充分利用日周期性和同时刻负荷相近性的基础上, 提出了基于最小二乘支持向量机^[9]回归算法 (LSSVR) 的短期负荷预测点模型, 获取了较好的负荷预测性能。

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

1 负荷数据预处理方法

负荷预测模型的性能在很大程度上取决于负荷历史资料的质量,但是采集到的初始负荷数据难免存在错误和缺漏^[11],在总结和归纳多种负荷数据分析及预处理方法的基础上^[5],使用“偏离率”统计学方法进行负荷“异常数据”的查找,并首创性提出了一种基于日周期前后向外推的负荷数据预处理的新方法,用于该文的数据预处理。

对异常数据的处理包括两个方面:①缺失负荷数据的补遗;②非缺失类的异常数据预处理。

1.1 缺失负荷数据的补遗

在众多的短期负荷一步预测法中,考虑到基于负荷日周期多点外推法是依据负荷日周期性、同类型日负荷相似性进行外推预测,能综合利用日负荷纵向和横向信息,并具有简单、快速的优点,而且它克服了基于日周期单点外推的预测精度对单点负荷值依赖过大、易受该点负荷采样记录值影响的缺陷,因此采用该方法进行单点缺失数据预处理,其建模过程如下。

设修补点为: $L(d, t)$, 该时刻前 k 点负荷值为: $L(d, t-k)$, 其中 $k=1, 2, \dots, m$, 用 d_t 表示修补点所在日的同类型日, 那么, 如果假定同类型日的同时刻的负荷增量相近, 则可以用历史上的同类型的日负荷增量 ΔL 来代替修补点所在日同时刻的负荷增量, 则有:

$$L(d, t) = L(d, t-k) + \Delta L = L(d, t-k) + [L(d_t, t) - L(d_t, t-k)] \quad (1)$$

取 $k=1, 2, \dots, m$, 将式 (1) 写成 m 个式子, 然后各式相加并整理有

$$L(d, t) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m [L(d, t-k) - L(d_t, t-k)] + L(d_t, t) \quad (2)$$

如果在历史数据库中取 s 个同类型日, 将式 (2) 写成 s 个式子, 合并整理可得

$$L(d, t) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \left\{ \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m [L(d, t-k) - L(d_i, t-k)] \right\} + L(d_i, t) \quad (3)$$

为了更充分地利用已有历史数据库的信息, 并进一步提高修补点的修补精度和稳定性, 考虑利用修补点后 k 点负荷值 $L(d, t+k)$ 来进行向前外推, 类似于上述推导过程, 最终可得到

$$L(d, t) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \left\{ \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m [L(d, t+k) - L(d_i, t+k)] \right\} + L(d_i, t) \quad (4)$$

然后利用式 (3) 和 (4) 的结果, 计算平均值作为最终的修补结果。也就是所提出的基于日周期多点前后向外推法。这样的好处在于: 计算修补点的负荷值不仅利用了该时刻前 m 个时段来外推, 而且也利用了该时刻后 m 个时段的负荷值来外推, 因此综合地利用了已有历史数据的信息, 从而更充分地应用了同类型日在修补时刻的前后各时段的负荷变化趋势。

1.2 非缺失类的异常数据预处理

对于非缺失类的异常数据处理, 首先需要按一定原则将异常数据从负荷数据库中辩识出来, 然后再进行预处理。因此利用这种负荷特性进行异常数据的辩识, 其思路是: 对不同天同时刻的负荷值求出其期望值, 并计算不同天同时刻的历史负荷值相对于该期望值的变化量, 再对该变化量选取一个合适的阈值, 当变化量超过这个阈值时, 就认为其对应的负荷值是异常值, 最后进行预处理。其建模过程如下。

设 $L(d, t)$ 表示二维矩阵历史负荷数据, 所以每个时刻历史负荷数据可用式 (5) 和 (6) 求出其均值 $E(t)$ 和标准差 $\delta(t)$ 。

$$E(t) = \frac{1}{m} \sum_{d=1}^m L(d, t) \quad (5)$$

$$\delta(t) = \sqrt{V(t)} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{d=1}^m (L(d, t) - E(t))^2} \quad (6)$$

定义第 d 天 t 时刻的负荷偏离率为 $\omega(d, t)$ 如下。

$$\omega(d, t) = \frac{|L(d, t) - E(t)|}{\delta(t)} \quad (7)$$

由概率论原理, 可以设定一个偏离率上限值 ω_0 , 当某天某时刻的负荷值满足式 (8), 则认为该点负荷值是异常的, 否则认为该点正常。

$$\omega(d, t) \geq \omega_0 \quad (8)$$

在异常数据辩识后, 仍按“缺失负荷数据的补遗”方法进行负荷数据预处理。

2 LSSVR 的短期负荷预测点模型

考虑到最小二乘向量机^[9]既具有支持向量机的结构风险最小化、非线性拟合能力好、泛化能力强等特性, 又具有求解简单、计算快速、待定参数少等优势, 这里将其应用于电力系统短期负荷预测^[10], 在建

模过程中利用短期负荷的日周期性和不同天相同时刻负荷的相近性,通过采用不同天同时段的历史负荷值来组建样本训练集,构建了基于最小二乘支持向量机回归算法的短期负荷预测点模型,并通过算例展示了该模型的预测过程。

2.1 最小二乘支持向量机回归 (LSSVR) 模型

支持向量机能拟合复杂的非线性模型并具有良好的泛化能力,但是在建模过程中涉及参数较多并需求解二次规划问题,这就大大地限制了它在实践中的运用。从结构风险最小化原则出发将函数回归中的最小二乘问题转化为支持向量机形式的问题加以解决,提出了最小二乘支持向量机的回归估计 (LSSVR) 数学模型,它将标准支持向量机模型中的损失函数设定成误差平方和并把不等式约束改成等式约束。这样,既减少了标准支持向量机模型中的待定参数,又将求解二次规划的问题转化成线性 KKT 方程组的求解,极大地降低了求解的复杂性,提高了支持向量机的实用性。

对于样本训练集 $\{(x_i, y_i) | i=1, 2, \dots, n\}$, 其中, $x_i \in R^n$, $y_i \in R$ 分别为输入和输出目标值,用非线性映射 $\Psi(\cdot)$ 将样本输入从原空间映射到高维特征空间,可以构造出如下最优线性回归函数。

$$f(x) = \omega^T \varphi(x) + b \quad (9)$$

根据结构风险最小化准则,求解上述回归问题的最小二乘支持向量机模型如下。

$$\min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^{n-1} \xi_i \quad (10)$$

$$s.t. y_i - \omega^T \varphi(x_i) - b = e_i, (i=1, 2, \dots, n)$$

引入拉格朗日函数将上述约束优化问题转变为无约束优化问题,在对偶空间得到下式。

$$L(\omega, b, \xi, \alpha) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^{n-1} \xi_i^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i [\omega^T \varphi(x_i) + b + e_i - y_i] \quad (11)$$

根据 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 优化条件可得如下等式约束条件。

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \omega} = 0 \rightarrow \omega = \sum_{i=1}^n \alpha_i \varphi(x_i) \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n \alpha_i = 0, i=1, \dots, n \\ \frac{\partial L}{\partial \xi_i} = 0 \rightarrow \alpha_i = \gamma e_i, i=1, \dots, n \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha_i} = 0 \rightarrow \omega^T \varphi(x_i) + b + e_i - y_i = 0, i=1, \dots, n \end{cases} \quad (12)$$

对上式消去变量 e_i 和 w 后,可以得到如下线性方程组。

$$\begin{bmatrix} 0 & 1_n^T \\ 1_n & ZZ^T + I/\gamma \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)} \begin{bmatrix} b \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据 Mercer 条件,可定义如下核函数

$$K(x_i, x_j) = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) \quad (14)$$

则式 (13) 变为

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & K(x_1, x_1) + \frac{1}{\gamma} & \dots & K(x_1, x_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & K(x_p, x_1) & \dots & K(x_p, x_n) + \frac{1}{\gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha_1 \\ \dots \\ \alpha_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y_1 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

求解上式得到 α 和 b 后,可得到 LSSVR 的最优线性回归函数。

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K(x_i, x) + b \quad (16)$$

2.2 基于 LSSVR 短期负荷预测的点模型

由负荷特性分析结果得知“不同天同一时刻负荷近似服从相近或同一的影响因素与负荷之间的函数映射关系;而不同时刻的负荷与影响因素之间的非线性映射函数关系是不同的。”该节从这个特性出发,构建 LSSVR 短期负荷预测的点模型。为此,对预测日各预测时刻分别构建不同的 LSSVR 回归预测函数式。在这个过程中需要确定样本的构建、训练样本集的组成、核函数及模型各项参数等等,用以最终可获得各时刻的负荷回归函数。

(1) 负荷历史数据的选取

在建模过程中,取用预测日前 2 个月左右的负荷数据来建立预测模型。

(2) 样本构建

样本构建的主要任务是确定输入向量,也就是确定负荷的主要影响因素。这里以预测时刻负荷 $L(d, t)$ 为输出目标值,考虑到相近日和同类型日负荷变化的相关性,选择如下形式的输入向量。

$$[L(d-7, t-2), L(d-7, t-1), L(d-7, t), L(d-2, t-2), L(d-2, t-1), L(d-2, t), L(d-1, t-2), L(d-1, t-1), L(d-1, t)]$$

进行输入-输出样本对的构建。

(3) 样本训练集的确定

根据前面负荷特性分析的结论,可知不同天同一时刻负荷具有相近的输入-输出函数映射关系。所以本节用不同天同一时刻的目标值来构建参与 LSS-

VR 训练的样本集。

(4)核函数的选取

LSSVR 由训练样本集和核函数完全刻画,选取不同形式的核函数就可以生成不同的 LSSVR 回归模型,但是必须要满足 Mercer 定理的函数才能作为核函数。

考虑到高斯函数具备表示形式简单且解析性好、径向对称、光滑性好等优点。此外,选取高斯径向基核函数 $k(x, y) = \exp(-\|x - y\|^2 / 2\sigma^2)$ 还可以使回归模型的每个支持向量 (即每个样本数据点) 处产生一个以其为中心的局部高斯函数,使用结构风险最小化原则,能找出全局的基函数宽度 δ 因此选择它作为 LSSVR 的核函数。

(5)参数的选取

为了构建基于 LSSVR 的短期负荷预测点模型,还需要确定核参数 δ 和平衡参数 γ 。这里采用网络搜索法来获得一组较优的模型参数,在搜索的过程中运用交叉验证法来评估模型性能。

2.3 基于 LSSVR 点模型的负荷预测步骤

用 LSSVR 点模型方法进行电力系统短期负荷预测的步骤如下。

(1)对历史数据进行预处理,并截取适宜长度的历史负荷数据作为建模的基础负荷数据;

(2)对建模的基础负荷数据进行归一化,这里的归一化公式如下:

$$L = (L - L_{min}) / (L_{max} - L_{min}) \quad (17)$$

(3)按该节所述方法组建输入-输出样本对,同时构建预测输入样本;

(4)根据不同的预测时刻确定各自的训练样本集,并用训练样本集,建立如式 (15) 形式的各时刻线性方程组;

(5)求取各时刻的 α_i 和 b

(6)将各时刻的 α_i 和 b 代入式 (16), 形成各时刻的最优线性回归函数,

(7)利用预测输入样本和形成的最优线性回归函数,对未来某时刻的负荷进行预测。

3 算例分析

利用本章所提的 LSSVR 点模型对甘肃电网的负荷数据进行仿真预测。根据所获得的历史数据情况,截取 2005 年 1 月 1 日到 2 月 23 日作为建模基础数

据,对 2 月 24 日 24 个整点负荷进行预测,其预测结果及误差情况见表 1。

表 1 基于 LSSVR 点模型的 24 小时整点负荷预测结果

时间 (2005. 2. 24)	实际值 /MW	LSSVR 点模型预测值		
		预测值 /MW	绝对误差 /MW	相对误差 /%
0:00	4 330	4 332.8	-2.810 0	-0.064 9
1:00	4 270	4 268.2	1.782 2	0.041 7
2:00	4 240	4 244.5	-4.493 0	-0.106 0
3:00	4 220	4 237.9	-17.901 7	-0.424 2
4:00	4 360	4 349.5	10.487 2	0.240 5
5:00	4 430	4 420.8	9.153 9	0.206 6
6:00	455 0	454 2.6	7.389 9	0.162 4
7:00	4 540	4 531.3	8.742 7	0.192 6
8:00	471 0	4 720.1	-10.059 3	-0.213 6
9:00	4 770	4 800.4	-30.359 1	-0.636 5
10:00	4 780	4 807.5	-27.549 5	-0.576 3
11:00	4 690	4 696.4	-6.408 7	-0.136 6
12:00	4 570	4 590.7	-20.721 4	-0.453 4
13:00	4 530	4 561.2	-31.231 4	-0.689 4
14:00	4 510	4 548.4	-38.366 3	-0.850 7
15:00	4 500	4 538.5	-38.478 0	-0.855 1
16:00	4 660	4 684.2	-24.217 1	-0.519 7
17:00	4 770	4 791.1	-21.058 3	-0.441 5
18:00	5 030	5 059.1	-29.007 0	-0.576 7
19:00	5 200	5 207.1	-7.298 8	-0.140 4
20:00	5 170	5 191.1	-21.484 8	-0.415 6
21:00	5 060	5 057.4	2.611 1	0.051 6
22:00	4 840	4 815.8	24.167 7	0.499 3
23:00	4 480	4 475.3	4.657 2	0.104 0
平均误差 (绝对值)			16.684 8	0.358 3
最大误差 (绝对值)			38.478 0	0.689 4

2 月 24 日整点负荷预测曲线和实际负荷曲线如图 1 所示。运用 LSSVR 点模型方法预测该省 2005 年 2 月 14 日到 2 月 20 日连续一周的负荷,其一周的负荷整点预测曲线如图 2 所示。

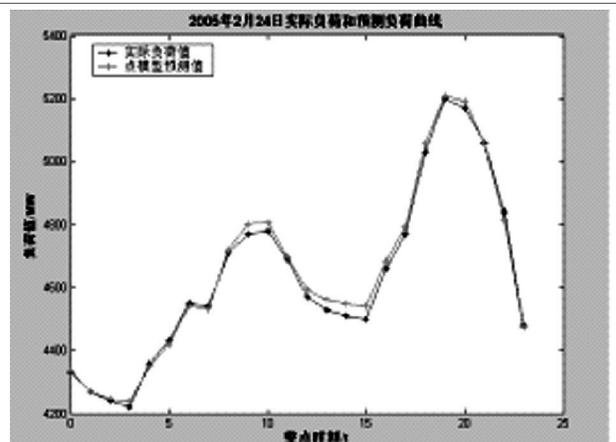


图 1 2 月 24 日实际负荷和预测负荷曲

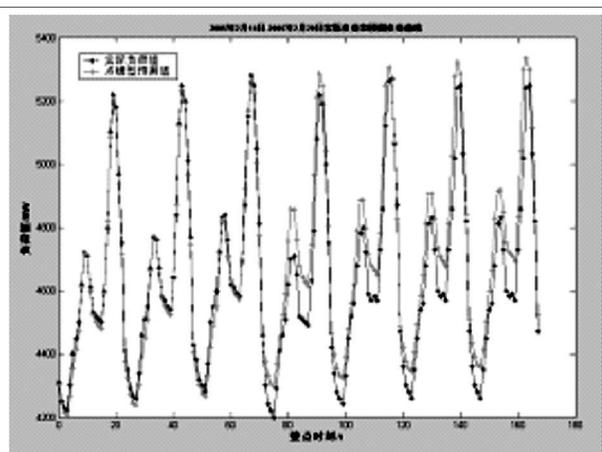


图 2 连续一周的实际负荷和预测负荷曲线

从以上预测结果和统计表可以看出,采用 LSSVR 点模型所得到的预测曲线基本上能与实际负荷曲线相符合。但是仍存在许多不足,例如该模型在负荷的峰、谷段预测效果不太理想;而且周末休息日与工作日相比,其预测效果偏差。因此有必要改进预测模型,进一步提高预测精度。

4 结 论

前面在系统地探讨了国内外多种短期负荷预测技术的基础上,围绕如何提高预测精度、降低预测风险这两大主题,充分利用 LSSVR 优越的非线性学习及推广性能提出了基于 LSSVR 的短期电力负荷预测模型,并通过仿真证明了其可行性和有效性,在电力系统短期负荷预测研究方面取得了较好的成果。在此,将主要的研究成果总结如下。

(1)提出了不同天同一时刻的电力负荷具有近似相同的数学分布特征的假设,并认为不同天同一时刻的电力负荷具有大致相近的从影响因素到负荷值的函数映射关系。

(2)提出了使用统计学中的“偏离率”方法进行负荷“不良数据”查找,进而考虑到负荷数据预处理的特点,提出了基于负荷日周期性进行前后向外推的数据预处理新方法,并在数据预处理中取得了较好的效果。

(3)将最小二乘支持向量机回归算法用于短期负荷预测,基于不同天同时刻的负荷具有相近的函数

映射关系的假设,构建了短期负荷预测的 LSSVR 点模型,该模型具有较强非线性拟合能力和较好的推广能力,在甘肃电网的短期负荷预测仿真中取得了一定效果。

参考文献

[1] 牛冬晓,曹树华,赵磊,等. 电力负荷预测技术及其应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.

[2] 金卓睿. 浅谈如何搞好电力市场中的负荷预测 [J]. 四川电力技术, 2000, 23(6): 1-5.

[3] Moulin L S da Silva A P A, El-Sharkawi M A, et al. Support vector machines for transient stability analysis of large-scale power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems 2004, 19(2): 818-825.

[4] 李云天,孙艳鹤,范广良. 基于弹性系数的电力系统短期负荷预测方法 [J]. 吉林电力, 2003, 3: 26-28.

[5] 瓦普尼克著,张学工译. 统计学习理论 [M]. 北京:电子工业出版社, 2004.

[6] Vapnik V. An overview of statistical Learning Theory [J]. IEEE Transactions on Neural Networks 1999, 10(5): 988-999.

[7] Mukherjee S, Osuna E, Girosi F. Nonlinear prediction of chaotic time series using support vector machines [C]. Proceedings of the 1997 IEEE Neural Networks for Signal Processing Amelia Island FL 1997: 511-520.

[8] Suykens J A K, Gestel T V, Brabanter J De et al. Least Squares Support Vector Machines [M]. Singapore: World Scientific 2002.

[9] 章健. 电力系统负荷模型与辨识 [M]. 北京:中国电力出版社, 2007.

[10] 赵登福,王蒙,张讲社,等. 基于支持向量机方法的短期负荷预测 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 26-30.

[11] 陈亚红,穆钢,段方丽. 短期电力负荷预报中几种异常数据的处理 [J]. 东北电力学院学报, 2002, 22(2): 1-5.

作者简介:

侯贺飞 (1986—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场及需求特性。

刘俊勇 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统稳定分析及电力市场等方面的研究。

(收稿日期: 2009-11-04)

基于人机互动的智能调度监控系统的设计及实现

黄 媛¹, 刘俊勇¹, 何 迈¹, 杨嘉湜², 王民昆²

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

2 四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘 要:分析了电网调度自动化系统的发展历程, 利用人机工程学的基本理论, 针对智能调度为调度员提供了有效参与调度自动化系统的工具和算法, 设计了若干的人机互动的界面, 并将调度员的控制效果反馈回来, 为智能调度的监控提供了新的思路。

关键词: 人机互动; 智能调度; 互动界面

Abstract: The development history of dispatch automation system in power grid is analyzed and then many tools and algorithms based on man-machine engineering theory are provided which can help the dispatcher a lot. Many man-machine interactive interfaces are designed in the new system, which can feedback the control effect of dispatcher and monitor the process of smart dispatch in a completely new way.

Key words: man-machine interaction; smart dispatch; interactive interface

中图分类号: TM732; TM734 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0015-04

0 引 言

21 世纪以来, 随着社会和经济的发展和技术的进步, 对传统的电力系统带来了新的挑战, 因而催生了智能电网, 以保证电网具备可靠、自愈、经济、兼容、集成和安全等特点, 能更好地服务经济、社会和环境的可持续发展^[1]。智能电网全面覆盖发电、输电、配电、用电和电力市场, 含括一、二次系统, 很难用一个简明的统一定义来表述。智能调度是统一坚强智能电网建设的关键内容, 是智能输电网的神经中枢, 是维系电力生产过程的基础, 是保障智能电网运行和发展的重要手段^[1]。

传统的 SCADA/EMS 能精确反映电网实时运行的工况, 这里把人机工程学原理引入到智能调度的监控设计中, 目的就是为了优化调度员和实时 SCADA/EMS 系统之间的界面, 为调度员有效地参与智能调度的运行提供工具, 力求使人-机(计算机)-调度自动化系统达到最佳组合, 从而发挥调度员对智能调度的控制作用。

1 人机互动在电力调度的应用

1.1 人机工程学的简介

人机工程学^[2] (Man-machine Engineering) 是一门以工程学、数学、人类学为基础的学科, 它研究如何将关于人类能力与限度的知识应用于系统或装备的设计与研制, 以最低的成本和最少的人力、技能和培训要求实现系统性能的有效性、高效性和安全性的一门应用学科。人机工程学的研究对象是人、机、环境的相互关系。人机系统之所以能够不断发展, 是由于人机系统中人与机器能够互相补偿各自的不足。因此, 任何一个人机系统都需要解决人与机器的合理分工问题。既然人与机器在完成系统目标上有分工, 随之而来的就是人与机器的信息交换问题——人机界面问题。为了使系统达到预期目标, 人机之间的信息交换必须保证准确、迅速。人机系统的改善, 很大程度依赖工程技术人员对机器进行改进, 使机器更适合于人体因素。人机工程学的目的是如何达到安全、健康、舒适和工作效率的最优化。随着社会生产的发展、科学技术的进步、生活水平的提高, 人们早已在关注产品保证一定物质功能的同时, 越来越注重在使用过程中的舒适性即宜人性, 既能达到舒适、高效、安全的操作, 又能满足人们精神功能的需求。

人机工程学是研究人的特性及工作条件与机器相匹配的科学, 它具有 50 多年的历史, 大致经历了经验人机工程学、科学人机工程学、现代人机工程学³

个阶段。“以人为本,以人的机体特性出发”,将人一机及作业环境视为一个系统整体进行分析研究,是人机工程学独有的研究方式。现代人机工程学所研究的内容主要就是要通过揭示人一机环境系统的规律,以达到确保人一机系统的最高综合效能,其中包含三方面的因素,即人的因素、机的因素、环境的因素。

大多数负责人一机系统的一种分类及操作顺序为:获取信息,分析和显示,决策行动和执行行动(见图 1)。

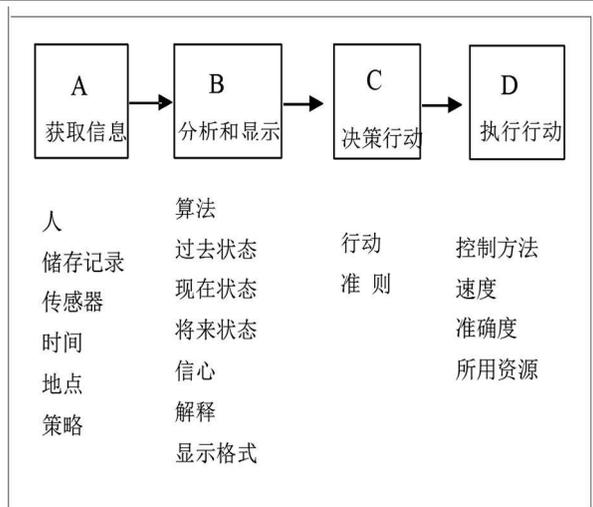


图 1 复杂人一机任务的 4 个阶段

1.2 电网调度的发展历程

随着计算机技术的广泛运用,电网控制中心的调度自动化系统经历了从简单到复杂,从孤立的各自动化功能到统一的“管理系统”,使电力系统从经验型调度提高到分析型调度。电网调度自动化系统是确保电网安全、优质、经济地供电,提高电网调度运行管理水平的重要手段。

1970 年以前只有监控与数据采集(SCADA)功能,尽管眼耳齐备,但缺少实时网络分析功能,缺少大脑,需凭调度员的经验或利用离线计算工具进行分析决策。20 世纪 80 年代出现的第二代,大部分采取集中处理方式的双机热备用系统,基于通用计算机和集中式的 SCADA/EMS。第 3 代是 20 世纪 90 年代基于精简指令集计算机(RISC)/UNIX 的开放分布式产品,采用商用关系型数据库和先进的图形显示技术 EMS 应用软件更加丰富和完善。第 4 代电网调度自动化系统,它是遵循 IEC61970 的公共信息模型(CM)组件接口规范(CIS)和可缩放矢量图形(SVG)标准,它支持现有的 SCADA/EMS、广域监测预警系统(WAMS)、并融合电力市场的相关应用软

件的一个电网调度集成系统^[3]。

但是这样一个系统中都未能充分考虑调度员在其中的参与作用,从他们看到的电网的运行状态到他们根据经验做出相关的处理,以及电力系统的物理变化过程反馈给调度员,是一个典型的人一机混合系统。为了体现调度员在电网调度中的互动过程,故提出了“以调度员思维模式为框架,以可视化界面为功能模块,以互动计算为系统核心”的设计思路,并在此基础上开发了智能调度监控系统。

1.3 基于人机互动的智能调度监控系统

在电力调度中,调度员时刻参与到电力系统的实时运行中,现有的 SCADA/EMS 给他们提供了非常丰富的信息,长期的工作和训练给他们提供了非常丰富的经验,他们在电力生产的闭环控制系统中能起到积极的参与和控制作用。因此,在设计中,立足于调度员所思、所想、所做^[4],在人一机互动的设计中需要考虑和解决以下问题:①在实时运行系统中如何解决调度员(人)与他所监控系统之间的互动关系?或人如何介入调度自动化系统?②在人与调度自动化系统之间,如何把系统海量数据抽取出来,用人最关心的特性及视觉方式展现出来?③目前的 SCADA/EMS 系统大多采用离线系统的数学模型乃至方法并用闭环系统的概念建模、分析,如何解决大量历史数据挖掘,如何使用规划和运行方式中得出的许多不完全依赖于数学模型的知识模型和展示平台是否是巨型系统值得探索的一条道路?为了解决以上问题,设计了以下的调度员互动系统,如图 2 所示。

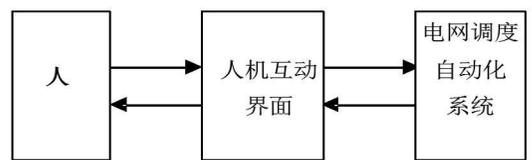


图 2 基于人机互动的智能调度互动系统

随着电网的大区互联,呈现给调度员的是海量的数据,电网的实时性、复杂性、随机性的增加需要他们能更加准确地操作控制电网,基于人机互动的思想可以为调度员提供很好的交互窗口,为调度员对电网的操作提供技术支持。

从图 2 可看出,调度员和调度自动化系统之间的互动操作中主要靠人机界面进行交互,在这个设计中以调度员为中心,符合以人为本的原则,即根据人的生理、心理特点,了解感觉器官功能的限度和能力,最

大限度地发挥人的潜力,达到人机之间的最佳协调。

2 基于人机互动的智能调度的算法设计

基于人机互动的机理,专门为调度员设计了可以对电网的监控进行互动的平台及操作。在设计上以调度员所想为核心,对调度自动化系统提供的信息重新进行组织和整合,如图 3 所示,将电网运行的顺序、调度员的经验、电力系统分析的功能有机地结合起来,用人机互动界面提供数据展示和计算的触发。这种互动计算融入了调度员的感知、经验,并能将他们的这些认识通过互动计算窗口进行实时计算,做出相应验证。通过互动平台能将人的作用加入到这样一个闭环控制的系统中。随着信息技术的发展,越来越多的计算可以在线进行,通过互动计算可以给他们提供很好的技术决策。在互动计算中解决了以下问题。

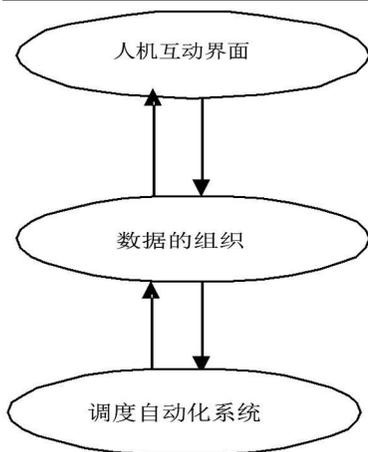


图 3 人机互动的实现流程

1) SCADA 数据的展示。面对海量的实时数据,为了醒目地提示越限的电压和重载的潮流,可以用等高线的思想予以表达,直接将需要和可能需要监视和控制的量呈现出来,避免因人的视觉关系将调度员淹没在海量的数据中,忽略了电网运行态势的变化^[5]。

2) 在线优化潮流的互动计算。过去最优潮流(OPF)大多用于离线计算,现在本系统可以在线计算最优潮流。所做的优化结果即使并不是直接利用计算结果下发控制命令,但也可为调度人员调度决策提供参考,它不但可对当前系统的安全水平做出评估,而且可以给出预防控制策略,辅助调度人员调整运行方式,提高电网的安全运行水平。

3) 在线 N-1 的互动计算。传统的 N-1 计算是将所有计算结果以列表形式给出的,但调度员真正关

心的是一些最严重的故障,为此专门设计了将 N-1 故障按最严重情况排序的三维显示方式,其故障的严重程度可以选择按有功越限程度和无功越限程度的指标进行排序,效果直观、明了^[4]。

4) 在线灵敏度的互动计算。灵敏度分析通常用来研究电力系统可控变量与状态变量之间的相互变化关系。在电网实时调度中,通常需要通过一些调压设备来调整中枢点的电压,如何快速地定量分析,给出最有效的结果并以最直观的方式给出,这是使用在线灵敏度的互动计算所达到的目的。

5) 水库智能调度的互动计算。水库的水位、水电厂的出力、水库的可运行时间之间存在内在的关联关系,这个功能的实现是将人一机对话框放在一个可视化的虚拟仪表中展现的,将时间、水电厂的出力、水位有机融为一体,在虚拟仪表中将互动计算形成了一个联动的展示。

为了使本图形系统具有良好的人机界面,在设计中充分利用了 GUI 界面的优点,使操作人员只需使用一个鼠标即可完成几乎所有的操作。这三者之间的关系计算是通过收集水电机组及相应水库的发电曲线、耗水曲线、最低水位限制等数据,实时计算水电机组按给定发电出力时的最大运行时间,以及在给定的运行时间内,水电机组可能达到的最大出力。

6) 任意断面的潮流累加的互动计算。电力系统的稳定分析等会形成若干的需要监视的断面信息,为此提供了让调度员在单线图和地理接线图中任意选择所关心的断面潮流的工具,能将它所选定的线路的累加和用三维立体的棒图予以显示,给调度员直观明了的感觉,这些功能将他们从“背”规则中解放出来,能更好地思考电网下一步的趋势发展。

3 实例

1) 用等高线展示 SCADA 数据见图 4。

2) 在线 N-1 的互动计算见图 5。

3) 在线灵敏度的互动计算见图 6。

4) 水库智能调度的互动计算见图 7。

在这个虚拟仪表中,选择目标水位后,可以拖动指针、出力和时间相应联动计算。

5) 任意断面的潮流累加的互动计算见图 8。

这些互动计算,通过人机互动计算界面将调度员和 SCADA/EMS 系统提供的的数据信息进行交互,后台

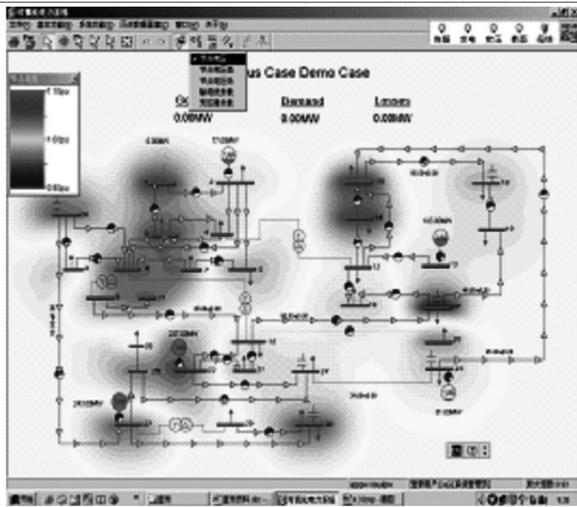


图 4 用节点电压等高线展示 SCADA 数据

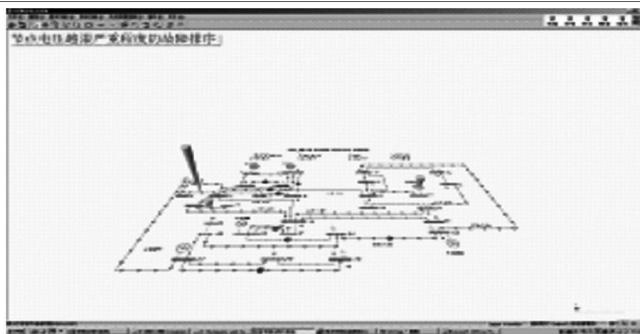


图 5 N-1 的互动计算的展示

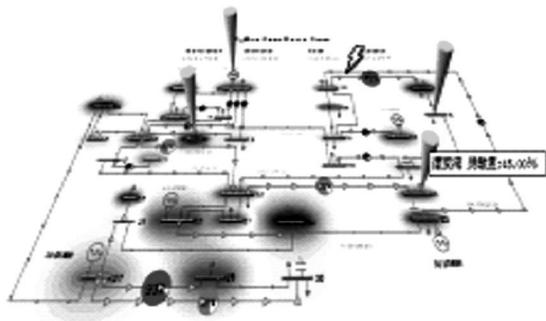


图 6 灵敏度计算互动展示

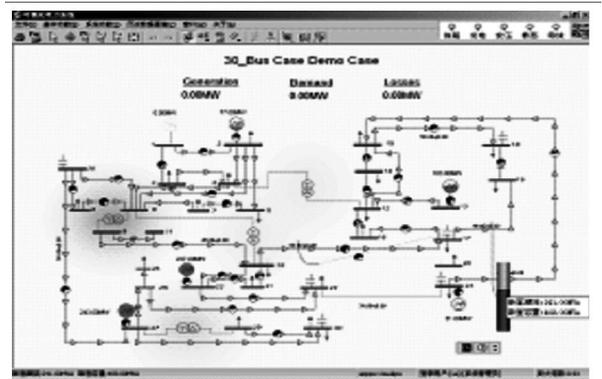


图 8 断面潮流的监视

计算机和对 SCADA/EMS 系统接口, 并将调度员所输入的信息融入相关计算中, 将计算的结果通过可视化界面返回给调度员。这些在线实时的计算为调度员提供非常有用的信息。

4 结 论

在人机交互技术发展的历程中, “以人为中心”, 降低认知负荷, 提高工作效率, 使人机交互更接近于自然的形式, 始终是人机交互技术发展的重心。人机互动的计算为电力调度提供了非常方便的工具让它参与到电力调度中。它能充分发挥调度员的经验、智慧, 让人主动参与电网的调度控制, 且通过电力系统分析的高层计算为它提供技术支持。它提供的信息丰富, 数据有针对性。

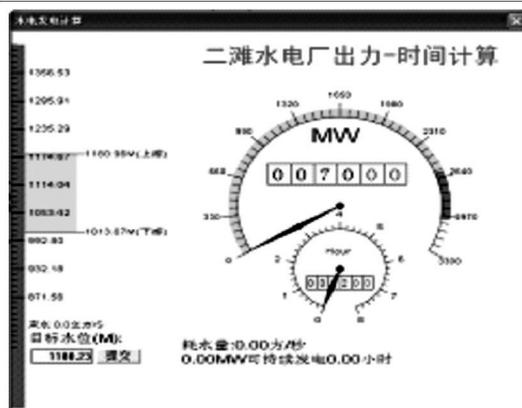
当前, 占统治地位的界面仍是图形用户界面 (WMP/GUI)。然而人机交互的风格经历了命令界面、图形界面、多媒体界面等主要发展阶段后, 目前正向虚拟现实技术和多通道用户界面的方向发展, 努力使人机的关系更为和谐。电力系统分析的高层计算也向着为调度员提供分析计算的方向发展。

参考文献

- [1] 姚建国, 严胜, 杨胜春, 等. 中国特色智能调度的实践与展望 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 17-20.
- [2] 谢庆森, 牛古文. 人机工程学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [3] 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.
- [4] 刘俊勇, 陈金海, 沈晓东, 等. 电网在线可视化预警调度系统 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 1-5.
- [5] Weber J D, Overbye T J. Voltage Contours for Power System Visualization. IEEE Trans on Power Systems 2000, 15(1): 404-409

(收稿日期: 2009-11-04)

图 7 水电出力计算的互动展示



电力系统运行状态分析和识别方法研究

程向辉¹, 刘俊勇¹, 杨嘉湜², 王民昆²

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

2 四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要: 电力系统运行状态的识别对于电力系统的安全运行具有重要意义, 在已有的关于电力系统运行状态划分的基础上, 提出判断电力系统运行状态关键性的实用量化指标, 采用基于信息熵的算法, 对实例集进行分析和学习, 构建决策树用以对电力系统运行状态进行状态识别和判断。

关键词: 电力系统; 运行状态; 信息熵; 决策树; 状态识别

Abstract: The identification of the operating condition of power system has a great significance to the safe operation of the grid. Based on the existing division of operating conditions of power system, the key quantitative indicators are proposed practically for determining the operating condition of power system. Using information entropy algorithm, the example set is analyzed and learned, and the decision tree are established, which is used to identify and estimate the operating condition of the power system.

Key words: power system; operating condition; information entropy; decision trees; state identification

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0019-04

0 引言

随着电力系统的不断发展, 电力系统规模的增大导致电力系统运行受各类外部因素影响增强, 同时电力系统作为一个时变动态大系统, 面对各种突发事件导致其运行状态发生变化的几率也急剧增大, 电力系统相关部门对这些突发事件的响应将直接影响电力系统乃至整个社会生产生活的方方面面。因此对电力系统运行状态的识别和判断就显得格外重要, 可为系统安全运行提供预警信息, 在突发事件发生时做出最快的响应, 减少损失。

电力系统中的各类运行参数可作为对电力系统的运行状态判断的实用量化指标, 而仅有这些是不够的, 应充分考虑各类因素对电力系统运行状态的影响, 加以量化, 并通过分析电力系统各类运行状态关键特征, 确定了一系列量化判断指标, 针对大量数据和样本集, 采用决策树学习算法 [1] 建立了基于决策树的电力系统运行状态识别方法。这一框架和方法对于电力系统状态运行中进行调度决策和预警、防范事故风险和突发事件的应急响应有着重要意义。

1 电力系统运行状态划分简析

1967年 Dylliaco划分和定义了电力系统的 5 种运行状态^[1]: 正常运行状态、警戒状态、紧急状态、系统崩溃和恢复状态。在考虑安全性和经济性的相互交叉、系统的静态和动态性能、故障原因和故障后果等特点后, 基于概率充分性和稳定性计算, 文献 [2] 将电力系统运行状态划分为 8 种: ①安全正常状态。②预警正常状态。③静态紧急状态。④动态紧急状态。⑤静态极端紧急状态。⑥动态极端紧急状态。⑦崩溃/危机状态。⑧恢复状态。8 种运行状态及相互转化路径如图 1 所示。

并在此基础上考虑电力系统实际运行情况、电力调度部门对信息的采纳和对各类事件的响应, 不考虑恢复状态, 将系统运行划分为 4 种状态: ①安全状态。电力系统的频率和各母线电压均在正常运行允许的范围内; 各电源设备和输变电设备又均在参数允许范围内运行; 系统内的发电设备和输变电设备均有足够的备用容量。②预警状态。系统某些运行参数处于临界状态或处于轻度越限状态, 使其对外界的抗干扰能力下降了, 但系统仍能继续正常运行。此时电力调

度部门采取预防性控制措施(如增加发电机的输出功率、调整负荷、改变运行方式等),即能使系统恢复到正常状态。③紧急状态。系统的某些重要参数越限(如变压器过负荷、系统的电压或频率超过或低于允许值)、出现少量的负荷丢失。此时电力调度部门必须及时采取正确而且有效的紧急控制措施。④崩溃(应急)状态。系统的某些运行参数发生严重越限或出现不可控制的切负荷(如切除一级负荷),停电持续时间、停电容量(占系统容量比例)及停电波及范围(停电负荷点数)等都达到应急预案启动条件。

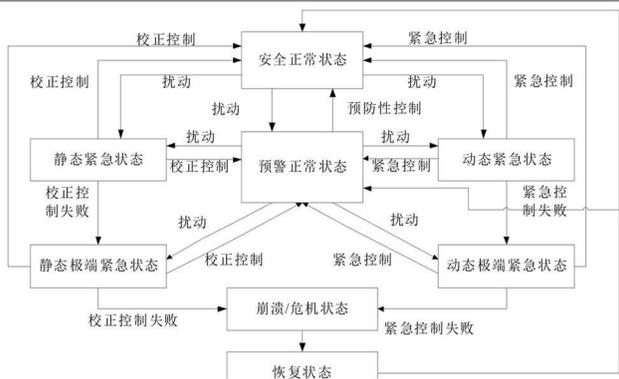


图 1 基于概率充分性和稳定性计算的详细状态定义

2 评价系统运行状态的指标

评价电力系统状态的依据有:重要电厂、机组、关键线路、枢纽变电所的严重故障对系统运行状态的影响;功角失稳、电压失稳、频率失稳、节点电压越界、线路过载等动态和静态安全遭受破坏的可能性、严重程度和持续时间;系统切负荷的位置、范围、比例、性质等。

文献 [3] 将安全指标分为两类。第一类,只用给定运行状态下的某些量的大小或者一些量对另一些量的变化关系作为该运行状态的安全性衡量指标,称为状态指标,这类指标主要有以下几种:①电压幅值,以负荷节点或母线电压幅值 V 作为安全指标。②灵敏度指标,以某些物理量的变化关系作为安全指标,如 dQ/dV , $d\Delta Q/dV$, dP/dV , dQ_C/dQ_V , dV/dE 等 [4,5]。③潮流雅可比矩阵指标,潮流雅可比矩阵最小奇异值 δ_{\min} ,潮流雅可比矩阵最小模特征值,潮流雅可比矩阵的行列式值 [6]。④频率幅值。以系统频率作为安全指标。第二类,以正常运行状态下和临界状态下某些物理量的差值作为电压稳定性的安全性衡量指标,这一类指标常被称为裕度指标。裕度指标主要有:电压

偏差 $\Delta V = V - V_{CT}$, 频率偏差 $\Delta F = F - F_{CT}$, 临界负荷节点的有功负荷差 $\Delta P = P_{CT} - P$ 和无功负荷差 $\Delta Q = Q_{CT} - Q$ [4] 等,其中下标“CT”表示相应量为临界状态下的值。

此外,在序贯仿真基础上,静态安全和动态安全评估得到的概率综合评估指标也可作为是判断运行状态的主要依据。主要风险指标有:最大停电功率 $P_{Fmax} WM$;最大停电时间 T_{Fmaxh} ;最大停电电量 $E_{Fmax} WMh$;停电概率 P_F ;年均停电次数 F_F 次/a;年均停电时间 $T_F h/a$;年均停电电量 $E_{FM} Wh/a$;均次停电时间 $T_{FM} h$ 次;均次停电电量 $E_{FM} MWh$ 次;年缺电比例 P_{ENS} ;系统失稳概率 P_{US} 等,这些指标的计算方法见文献 [7,8]。

对于电网运行状态的分析,不同角度和不同层面采用的分析方法和判别指标都不尽相同。

3 电力系统应对措施决策和启动过程

电力系统是一个复杂的系统,在正常情况下,电力系统通过保持相对的稳定性和可控性来达到它的目的和功能;但在某些特殊的情况下,由于电力系统的内因和外因发生了急剧变化,电力系统的稳定性和可控性就会遭到破坏,电力系统的运行状态就会出现异常情况,便会导致电力事故的发生。因此这里针对电力预警和应急调度而将电力系统运行状态划分为以上四种运行状态并提出决策树的识别方法,其目的就是把监控过程中得到的相关运行状态的信息进行分类和处理,结合对应事件的启动条件,尽量及时准确的做出是否启动应急预案和措施的决策。

首先是预警信号的发布,通过对电力事件的初步分析评估,得到描述事件的指标与参数,并且对事件的发生、发展与演化有了基本的了解。根据已经掌握的信息,对是否发布预警信号进行决策,若反应的信息显示已经达到了需要预警的程度,就发布预警信号,提醒相关部门做好突发事件的应急准备;若没有达到预警程度,则继续对该事件进行监控,观察时间的相关信息。其次是分级建立启动阈值,若预警信号发布,说明该事件已经发展到了一定的程度,这时就应分级建立启动阈值,因为应急预案和措施是针对不同的事件和级别制定和实施的,所以需要建立不同等级的启动阈值,作为启动对应措施的标准 [9]。

电力调度人员针对电力系统出现的各种不同情

况、关键参数和指标的变化而采取对应的措施,这与决策树的思想具有明显的相似性,则可将决策树的思想 and 算法运用于对电力系统运行状态的识别。

4 基于决策树系统运行状态识别方法

4.1 基于信息增益决策树算法的描述

决策树的实现是以信息论原理^[10]为基础的。在决策树形成的过程中,最重要的部分是对分裂属性的选择。比较常用的一种方法是计算信息,信息增益的原理来自信息论,它是使某个属性用来分割训练集而导致的期望熵值降低。因此,信息增益越大的属性分裂数据集的可能性越大。决策树的形成就是递归的对数据集中的每个节点进行分裂,直到节点的所有类别都属于同一类或没有多余的属性来划分训练样本集。ID3 算法^[11,12]的具体算法如下。

设 S 为一个包含 s 个数据样本的集合,类别属性可以取 m 个不同的值,对应于 m 个不同的类别 $C_i, i = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ 。假设 s_i 为类别 C_i 中的样本个数,那么要对一个给定数据对象进行分类所需要的信息量为

$$I(s_1, s_2, \dots, s_m) = - \sum_{i=1}^{m} P_i \log(P_i) \quad (1)$$

设一个属性 A 取 v 个不同的值 $\{a_1, a_2, \dots, a_v\}$, 利用属性 A 可以将集合 S 划分为 v 个子集 $\{S_1, S_2, \dots, S_v\}$, 其中 S_j 包含了 S 集中属性 A 取值 a_j 的数据样本,若属性 A 被选为测试属性(用于对当前样本集进行划分),设 S_{ij} 为子集 S_j 中属于 C_i 类别的样本集,利用属性 A 划分当前样本集所需要的信息熵。

$$E(A) = \sum_{j=1}^v \frac{S_{1j} + S_{2j} + \dots + S_{mj}}{S} I(S_{1j} + S_{2j} + \dots + S_{mj}) \\ = \sum_{j=1}^v \sum_{i=1}^m \frac{S_{ij}}{S} P_{ij} \log(P_{ij}) \quad (2)$$

其中, $P_{ij} = S_{ij} / |S_j|$ 即为子集 S_j 中任一个数据样本属于类别 C_i 的概率。这样利用属性 A 对当前分支结点进行相应样本集合划分所获得的信息增益^[13]为

$$Gain(A) = I(s_1, s_2, \dots, s_m) - E(A) \quad (3)$$

计算出各属性的信息增益后,选取信息增益最大的属性作为结点向下生成决策树。

4.2 电力系统运行状态决策树的建立及算例

建立决策树的第一步,需要对典型事故和历史事故数据进行预处理。采用统计学和人工智能相结合的数据挖掘方法^[12],在对大量的数据进行分析后可

以从中找出一些对决策有帮助的数据,形成样本集 S。这里结合实际和分析以往各电网运行状态,取一组样本集,运行状态分别为安全、预警、紧急和应急 4 类共 1362 个样本作为算例。样本集中各种运行状态所占比例如图 2。

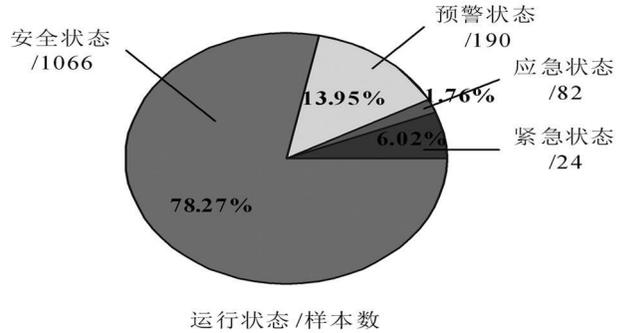


图 2 样本集运行状态比例

同时决策树算法中需要对一个属性取 n 个不同的值,则应取 n-1 个阈值,将其离散化为 n 个等级,而等级的划分和指标的选择同样是需要结合具体电力系统的特征及历史数据的分析来确定的。这里是从电力系统预警和调度角度出发,对出现的各类电力事件进行分析,选取负荷丢失率、频率偏差、电压偏差、线路潮流和备用容量作为识别电力系统运行状态的几个关键指标,进行等级划分:(1)参照文献[14]将负荷丢失率划分(无、轻度、II 级、I 级);(2)频率偏差划分(正常、一定、严重),阈值为 $\pm 0.05 \text{ Hz}$, $\pm 0.2 \text{ Hz}$ 或 $\pm 0.5 \text{ Hz}$, $\pm 1 \text{ Hz}$ ^[15];(3)电压偏差划分(正常、A 级、B 级、C 级),阈值为 $\leq \pm 5\%$, $\leq +7\%$, $\leq -10\%$, $\leq \pm 10\%$ ^[16];(4)线路潮流划分(正常、过载);(5)备用容量(充足、紧缺),用以分析该识别方法的可行性。

由样本集选择根节点属性并训练构造决策树由样本集计算信息熵,初始熵值为

$$I(s_1, s_2, s_3, s_4) = I(1066, 190, 82, 24) = 0.3070$$

分别选用各指标作为测试的根节点属性,计算其信息熵及信息增益。计算结果如表 1。

表 1 决策树信息计算结果

属性 A	信息熵值 E	信息增益 I
负荷丢失率 (A1)	0.2249	0.0821
频率偏差 (A2)	0.2266	0.0804
电压偏差 (A3)	0.2397	0.0673
线路潮流 (A4)	0.2423	0.0647
备用 (A5)	0.2612	0.0458

属性 A1 即负荷丢失率具有最高信息增益,被选为根节点。引出分支,递归地使用上述 ID3 算法过

程,一直到叶节点处(熵值为 0)为止。此时得到结论,每个叶结点中的实例都属于同一类(即同一运行状态),从而形成判断电力系统运行状态的决策树。得到的决策树例子如图 3 所示(方框表示内结点,椭圆框表示叶结点)。

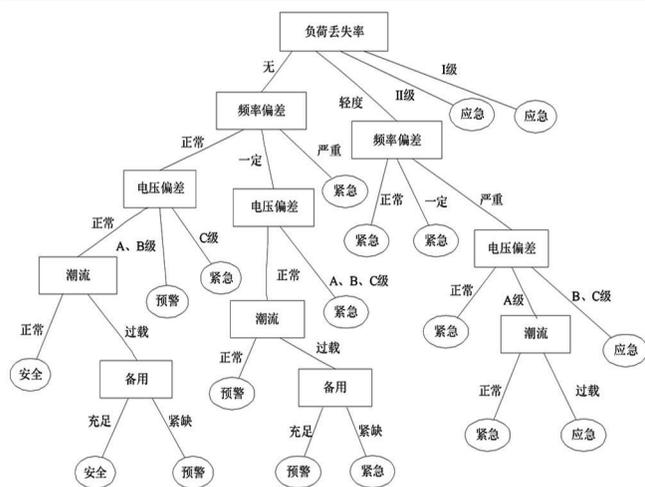


图 3 电网运行状态识别决策树例子

结果分析:在选取的样本集中紧急和应急的运行状态分别达到了 6.02%和 1.76%,出现这样较高的比例,是出于对大的自然灾害(如:地震、台风、雷电、泥石流和冰冻雨雪灾害等)的考虑,同时还与设置的状态条件阈值有关,比较具有典型性。通过对选取样本的学习和计算结果,可以归纳出所举出的电力系统运行状态的一些规律:选用的评价指标中,对电力系统运行状态影响最大的属性是负荷丢失率,其次是频率偏差,之后分别是电压偏差、线路潮流和备用。在决策树建立完成之后,利用监测所得到的信息可以很容易判断出电网处于的运行状态,从而迅速的启用不同的应对措施,保障电力系统的安全运行。

5 结 语

电力系统在运行过程中会出现各种影响运行状态的因素和事件,运行状态具有时变性,运行状态的恶化对电网安全是巨大的威胁,针对这些问题,提出了电力系统运行几种状态的定义、应急措施启动条件和基于决策树的电力系统运行状态的识别方法。该方法可作为电力调度人员发布预警和应急信号的决策依据。随着决策树算法的发展,可以选用更适合、更精确的决策树算法用于电力系统运行状态的识别。

参考文献

[1] A. A. Fouad Q in Zhou V. Vittal System vulnerability as a concept to assess power system dynamic security [J]. IEEE Transactions on Power Systems 1994, 9(2): 1009—1015.

[1] Dy Liacco T. E. The adaptive reliability control system [J]. IEEE Trans on PAS 1967, 86(3): PAS—86.

[2] 丁明, 李生虎, 吴红斌, 等. 基于充分性和安全性的电力系统运行状态分析和量化评价 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 43—49.

[3] 段献忠, 何仰赞, 陈德树. 论电力系统电压稳定几种实用判据和安全指标 [J]. 电力系统自动化, 1994, 18(9): 36—41.

[4] Idulkar C. S. et al. Maximum Power Transfer Limited by Voltage Stability in Series and Shunt Compensated Schemes for AC Transmission Systems [J]. IEEE PES SM 1988. 575—3.

[5] Schuelter R. A. Voltage Stability and Security Assessment [J]. EPRI EI—5967, 1988. 8.

[6] Tiranuchit A. Thomas R. J. A Posturing Strategy Against Voltage Instabilities in Electric Power System [J]. IEEE Trans Vol PWRS—3, NO. 1, Feb. 1988.

[7] 丁明, 李生虎, 吴红斌. 电力系统概率充分性和概率稳定性的综合评估 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 20—25.

[8] Ding Ming Li Shenghu Research on integrated evaluation framework of probabilistic adequacy and stability of composite power systems [C]. International Conference on Power System Technology Proceedings (Power Con 2002, Kunming China): 2067—2071.

[9] 张睿, 陈安, 崔玉泉. 现代应急管理中的监控与启动机制 [J]. 电力系统自动化, 2009, 4(2): 12—19.

[10] Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication [J]. Bell System Technical Journal 1948, (27): 379—423, 623—656.

[11] Margaret H Dunham 著, 郭崇慧, 田凤占等译. 数据挖掘教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[12] 夏火松. 数据仓库与数据挖掘技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[13] 姜丹. 信息理论与编码 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.

[14] 中华人民共和国国务院. 国家处置电网大面积停电事件应急预案 [EB/OL]. [2006—01—24]. http://www.gov.cn/yjgl/2006-01/24/content_168998.htm.

[15] 国家技术监督局. 电能质量电力系统频率允许偏差 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2003.

[16] 林海雪. 新国家标准《电能质量 电压波动和闪变》介绍 [J]. 供用电, 2001, 18(6): 4—10.

(收稿日期: 2009—11—04)

考虑分布式电源的智能电网备用市场交易模型

张国芳, 吕林, 刘俊勇
(四川大学, 四川 成都 610065)

摘要: 全球范围内的智能电网研究和大用户直接交易已成为中国深化电力行业改革的一个新兴的、重要的方向, 进一步促进了实现电力科技创新与国民经济的协调发展。总结了国内外智能电网的研究和实践经验, 提出了将分布式电源纳入备用市场, 探讨了新型备用交易操作平台的概念和职能, 建立了相应的优化决策模型, 综合考虑了经济性、可靠性、清洁性等因素, 最后给出了求解方法和算例进行验证。

关键词: 智能电网; 分布式电源; 备用交易; 多种交易类型; 大用户

Abstract: The worldwide smart grid and the direct transactions between power consumers and generation enterprises have been a new and important direction to further deepen the realization of electric power technology innovation and promote the implementation of harmonious development of power and national economy. The research and practical experiences of smart grid at home and abroad are summarized. The way of distributed generation brought into reserve market is proposed. The definition and the function of operation platform of direct transaction are discussed. And the structure of reserve markets in the ancillary service is studied. Considering the mode of energy-conservation power generation dispatch, the relevant optimization decision model is established, which synthetically considers several factors such as economy, reliability, cleanliness. At the end, the solving method and the examples are given and verified.

Key words: smart grid; distributed generation (DG); reserve market; kinds of transaction; large customer

中图分类号: TM711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0023-05

0 引言

电力行业作为国家发展基础产业之一, 与能源规划、经济发展等有着密切的联系。为构建集中与分散相结合、智能重组、电能质量提高、双向通信、实现与传统电网截然不同的智能电网体系, 中国电力工业已逐步走向具有中国特色的智能电网建设过程中^[1]。建设不仅包括电网建设、信息轨道铺设, 还包括交易模式重构等电力市场建设。考虑发电侧与用户侧的直接交易, 以及分布式电源接入等多方面因素, 具有中国特色的智能电网旨在成为一个以高端信息技术支持下的高能源利用率、高收益的可持续发展“三高”网络。

随着社会对电能质量与安全可靠性要求越来越高, 单一大电网已不能满足用户, 尤其是大用户的要求^[2]。为避免一点扰动影响全网, 引入分布式电源成为降低网损、提高可靠性的公认发展方向。分布式发电 (distributed generation, DG) 即位于用户侧的小

发电机组的综合应用。分布式发电使用户不仅能从电力公司购电, 而且可以保证自己用电充裕的情况下将剩余电量出售给电力公司或其它用户。DG 电源一般包括太阳能发电系统、风力发电站、微型燃气轮机、柴油发电机、燃料电池、生物质能发电及储能装置等^[3]。可减轻远距离输电线路的需求、对大电厂的依赖, 还可作为备用电源降低购买备用成本, 保障用户用电安全。

智能电网下的开放经营更加彻底, 只是世界各国的实现方式和途径有所不同, 试点结果表明统购统销十大用户直接交易市场是适宜中国国情发展的。随着改革的逐步深化, 辅助服务 (ancillary service) 市场直接交易逐渐提上议程。备用作为 AS 的重要内容, 它的获取与调用方式与发电厂、大用户、电网公司的利益息息相关, 又对系统运行的可靠性和经济性有着重大影响。在此架构下计入分布式电源, 签定长期合同可保证电力系统的稳定性, 帮助煤电价格保持稳定, 同时也可帮助电力产品上游相关企业保持交易稳定, 相应地降低交易风险和成本, 刺激购售双方交易

量,对于眼下化石能源紧张所带来的压力有非常重大的意义。

目前各项研究工作正在稳步开展,如何将各部分整合起来成为有机整体,成为了研究热点。文献 [1] 提出了大用户直接交易的核心工作和替代方案,但未涉及到辅助服务。文献 [2, 3] 提到了 AS 的重要性以及建议,但太笼统,未提出购销模型。电力市场下辅助服务是一种商品,其使用必须给予必要的经济补偿 [5]。辅助服务的获取和定价成为市场中关心的问题。文献 [4] 分析了大用户直购电主要各项辅助服务的经济成本,并基于大用户与发电厂对电网辅助服务的责任大小与受益大小对各辅助服务成本进行了合理分摊,但未提出辅助服务市场实施方案及其可行性。时下热议的分布式发电会改变备用购买、调度计划,文献 [9] 提出了在输配分离的电力市场中存在多种电力双边合同和分布式发电时配电公司的中长期购电优化模型,得到配电公司从各个不同电能来源处的最优购电比例以使得购电费用最小。文献 [2] 将分布式电源细化至备用电源,基于电力不足概率对分布式电源配置方案进行可靠性评估,给出不同可靠性目标下的最优配置方案,并对用户不同停电成本对配置方案的影响进行了敏感性分析。

基于以上文献成果提出了智能电网备用市场直接交易操作平台概念,将备用服务单独于主能量市场直接交易,由购销双方协商或经交易中心撮合完成,计及分布式电源因素,根据等效用原则和决策理论建立联合优化模型,达到系统安全性、经济性和环保性三位一体的最终目标。

1 备用直接交易操作平台整体架构

试点初期只有少数大用户参与直接交易,但随着经济发展以及准入条件放低,大用户数量增多将形成“大用户库”,直接交易操作平台由电网公司和电监办联合组建,负责大用户库内成员交易和高度的监管工作,主要有主能量交易和节能发电调度原则要求下的发电权交易及补偿。备用平台作为其一个重要板块,主要负责备用调用,分布式电源调度,备用不足的网购工作(见图 1)。

1.1 备用市场结构

在中国传统的调度机制下,备用被作为一种保证电力系统可靠的措施,是属于指令性的无偿服务,各

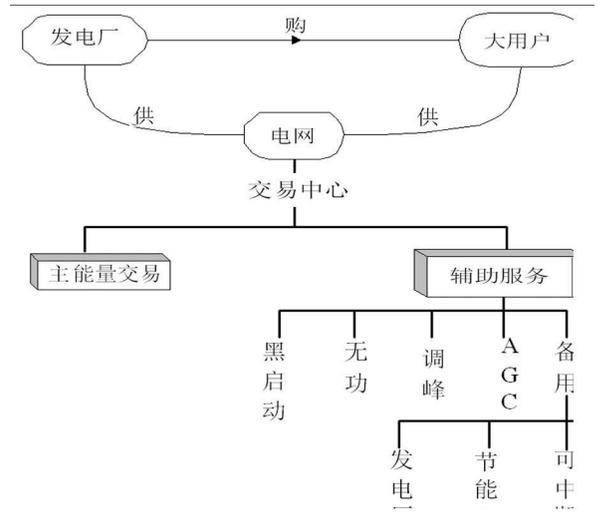


图 1 操作平台职能图

发电厂被指定安排一定容量的备用(一般比例为 5%~10%),在发生紧急情况时听从调度下达命令。所以,发电企业没有参与备用辅助服务的积极性。

智能电网备用市场不再建立集中交易的备用市场,而由购销双方协商完成,交易量和交易价格不再由集中的市场统一确定。具体说来即是大用户向发电厂直购主能量和相应的备用电量,而在购买之后交由操作平台统一调度。在这里,各大用户所购买的备用应被视为同质同等级地位,调用时完全受平台支配(不按合同中指定供方和需方)。在备用调用时电网公司收取过网费,同主能量,故不赘述。当备用被调用时,由平台统一调度。由于不同时段内备用调用率不同,电量价格也分为峰、平、谷三个时段价格,调用时电价等同现货电价。

1.2 分布式电源

具有中国特色的分布式电源不仅受供电公司调度,并且可直接连入输电网低压侧参与电网调度运行。其面临的电力市场结构如图 2 所示。

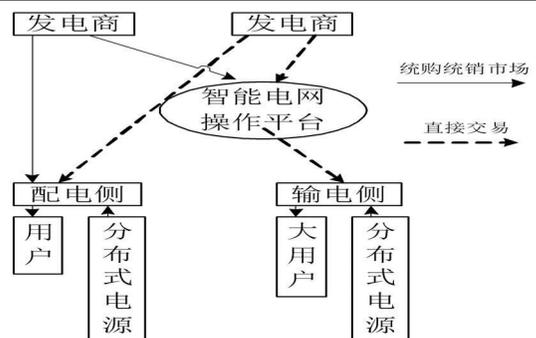


图 2 含分布式电源的市场结构

分布式发电分两种情况,一是由独立分布式发电

商所有,另外就是由供电公司所有。独立分布式发电商可以与供电公司或操作平台签订双边合同,也可以在短时间内提供电能支持。

2 最优备用容量模型

操作平台作为调度主体,倡导购销双方成交备用容量最优,保障可靠性和经济性。增加备用成交电量可提高系统的可靠性,但大用户的成本就会因此加大,降低资源利用率,不符合“节能减排”趋势。在追求容量经济性的同时重视供电安全性,体现了风险理念的重要性。风险是指在一定条件下和一定时期内,由于各种结果发生的不确定性而导致行为主体遭受损失的大小以及这种损失发生可能性的大小^[7]。为量化风险值,将其定义为停电概率与停电后果的乘积,反映了损失的数学期望值。可建立如下模型。

$$\min C(Q) = L(Q) + C_c(Q) + B(Q_y) \quad (1)$$

$$\text{其中 } C_c(Q) = P_c^T Q + \lambda P_c^T Q_x; \quad (2)$$

$$B(Q_y) = b_t \times Q_y; \quad (3)$$

$$L(Q) = R_{\text{loss}} E_{\text{econs}} \quad (4)$$

式中, P_c^T 为容量价格, P_e^T 为电量价格; Q 为备用成交电量, Q_x 为备用调用量 ($Q_x \leq Q$); λ^T 为备用调用概率; $T=1, 2, 3$ 表示峰时段、平时段、谷时段; 大用户购入备用 Q 后,由于电力不足或停电响应滞后仍面临停电损失, $L(Q_x, Q)$ 为停电损失函数; b_t 为分布式电费,单位为元 / (kW · h); Q_y 为其发电量。

2.1 约束条件

1) 备用容量平衡约束 $\sum R_i - \sum M_j = 0$, 式中 R_i 为大用户申报的第 i 段备用成交电量, M_j 为发电厂的第 j 段备用成交电量。

2) 备用调用容量约束 $0 \leq M_j \leq M_{j\max}$, 式中 $M_{j\max}$ 为本合同签订的备用成交电量。

3) 备用容量约束 $M_{\min} \leq M_j \leq M_{\max}$, 式中 M_{\min} , M_{\max} 分别为机组所能提供的备用上下限。

4) 功率平衡约束 $P_i - D_i \geq 0$, 表示在任意时刻 t 时发电侧机组功率上限必满足用户侧需求功率。

5) 电力不足概率 $P_{\text{LOLP}} \leq P_s$, 即风险度, 须满足系统电力不足概率 P_s 要求。

6) 电量不足期望值 $E_{\text{econs}} \leq E_{\text{so}}$

7) 废物排放约束, 发电产生的污气 (如 SO_2 , CO_2 等) 被限制到某一水平, 即排放量在一定限制之内。

2.2 模型求解

对于某一停电故障, 引起的备用调用量一定, 故寻求最优备用成交量, 既不剩余, 也不缺少。对式 (1) 求导, 得

$$\frac{\partial C}{\partial Q} = \frac{\partial L}{\partial Q} + \frac{\partial C_c}{\partial Q} + \frac{\partial B}{\partial Q}$$

当上式等于 0 时得到备用代价最小, 即最优备用容量条件。进一步可得到

$$R_{\text{loss}} \Delta E_{\text{econs}} + \Delta C_c + \Delta B = 0$$

其中 R_{loss} 值针对大用户类型近似为固定常数; ΔE_{econs} 为购买备用前后的电量不足期望值之差; 当发电厂为燃煤机组时, 可能面对被替代, ΔB 为被购买后得到的补偿增加值。

设置判定指标 $\omega = R_{\text{loss}} \Delta E_{\text{econs}} + \Delta C_c + \Delta B$, 该指标表明了当购入一定备用容量后, 备用调用所引起的费用变动, 可以有效地得到最优备用成交量。当 $\omega = 0$ 时, 得到最优配置方案; 当 $\omega < 0$ 时, 应继续购买备用。

2.3 算法步骤

算法步骤见框图 3。

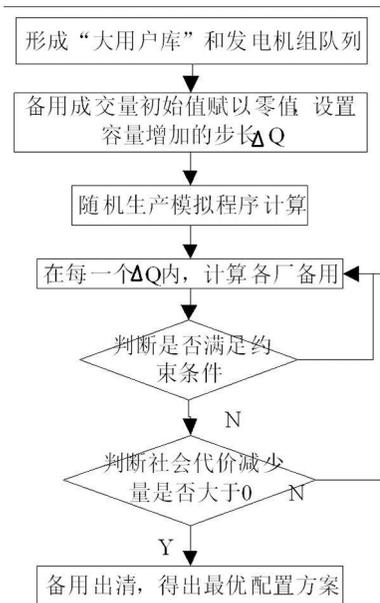


图 3 算法步骤框图

3 算例

这里采用一个简单算例, 假设大用户库中有六名成员 (其中四名为水电机组, 两名为火电机组), 签定长期合同和直购电合同, 并且在必要时从现货市场、自备电厂购电, 以双边交易模式参与交易。直购电用户与电厂采用多对多方式交易。电网供电有保证, 电

网转运费保持恒定,非直购电用户购电方式不变。电力不足概率通过 Monte-Carlo 随机模拟方法来得出,如表 1。

表 1 电力不足概率

时段	调用率	时段	调用率	时段	调用率
1	0.015	9	0.015	17	0.007
2	0.020	10	0.008	18	0.018
3	0.008	11	0.011	19	0.015
4	0.007	12	0.008	20	0.009
5	0.009	13	0.010	21	0.012
6	0.020	14	0.005	22	0.013
7	0.006	15	0.016	23	0.008
8	0.015	16	0.019	24	0.018

全天被分为峰时段、平时段、谷时段,各时段电价不同,反映出发电厂将机组用作备用所产生的机会成本也不相同,即容量价格不同。被调用时备用价格等同于现货电价。

以某时段为例,一用户购买备用容量曲线如图 4 所示。当备用购买量较小时,电力不足期望值较大,容易发生由于电力不足而导致的切负荷情况,停电损失赔偿远高于备用价格。随着备用容量增多,停电概率减小使得总费用减少。当备用成交量充足时,系统不易发生电力不足,总费用主要体现在备用购买上。

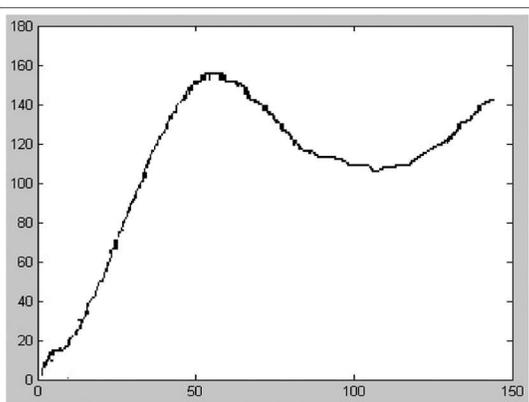


图 4 最优备用容量求解过程

按照《电力系统稳定导则》规定,备用容量为最大负荷的 10%。以模型进行备用容量优化的模拟分析,火电机组由于节能原则被替代,并根据“谁得益,谁补偿”原则得到水电机组补偿。基于动态规划算法,解得备用市场出清结果如表 2 所示。

表 2 备用容量

时段	预测负荷	备用容量	比例	时段	预测负荷	备用容量	比例
1	1 231	91	0.074	13	1 817	145	0.08
2	1 211	102	0.084	14	1 797	148	0.082
3	1 172	89	0.076	15	1 758	167	0.095
4	1 133	87	0.077	16	1 719	148	0.086
5	1 153	145	0.126	17	1 758	173	0.098
6	1 270	136	0.107	18	1 797	123	0.068
7	1 406	96	0.068	19	1 875	157	0.084
8	1 660	90	0.054	20	1 914	159	0.083
9	1 856	151	0.081	21	1 875	137	0.073
10	1 934	183	0.095	22	1 758	115	0.065
11	1 953	197	0.101	23	1 563	121	0.077
12	1 934	188	0.097	24	1 367	114	0.083

结果表明最优备用容量比例明显小于 10%,平均备用比率为 8.4%,低了 1.6 个百分点,为社会多创造效益共 149.868 1 万元。最优备用同时保证了可靠性和清洁性,但无法能耗最优。

火电机组在低谷时段没有进入机组组合,仅在系统腰荷时段承担了部分旋转备用,清洁能源机组在计及分布式电源时所承担的备用要远大于按成本最优原则。不考虑分布式发电后,可大大减少发电对环境的影响。

4 发展方向

(1) 储能技术应用。在传统电力系统中电能不能够储存,制约了电能的大规模生产,储能技术的应用可以打开制约发电量增长的瓶颈,将使电网运行的安全性、经济性、灵活性得到大幅度的提高。

分布式发电在可靠性和供电连续性上有待提高,为大规模应用储能技术成为必需技术,以支撑电源发展。分布式电源作为备用电源要求响应速度快,功率密度大,长期待机耗能少,抗恶劣环境;也就要求储能装置效率高,储能量大,可适应清洁能源不稳定性变化。

(2) 分布式智能电网构建。分布式智能电网是指依靠分布式电源、微网、储能系统的新型智能电网,可独立运行,也可与传统大电网相连接。广泛的说,分布式电源还可是大型电容、电池等等。分布式智能电网将成为清洁能源发挥作用,为大电网供电的主要途径。随着国家能源政策对新能源发展的激励,电力市场的扩大以及分布式电源技术发展使得分布式智能电网正成为下一步电网建设的必要补偿。风电

组并网运行提供了分布式电网的相关经验,实际证明大电网系统和分布式智能电网相联可节省投资,降低能耗,提高系统安全性和灵活性。

表 3 智能电网备用发展

发展阶段	传统	现在	智能未来
规划方式	传统方法	各种能量系统	微电网
发电方式	集中	分散	分散
负荷特性	就地备用电源	传统备用为主,小部分分布式电源	较高、多分布式电源
配网特性	有变电站供电的被动网络	半自主的网络	自主网络,具有双向能量交换能力
紧急状态管理	机组强迫停运	切负荷,切分布式机组	孤岛自治运行

(3)先进技术。分布式智能电网技术发展先进的电力电子技术、计算机控制技术、通信技术紧密相联,其整体智能水平非常之高。其主要包括几大部分:①集控中心:为可视化监控全网,实现双向通讯,提供智能运行及监视多重功能;②分布式电源,储能装置,自备发电机组等等;③智能化用户:具有双向通信功能的智能电表(高级量测体系),并入一体化通讯网络,支持需求侧管理,自主切换;④具有系统重构能力:故障发生时重构速度快,多重监测开关实时通讯电网状态,通过调度管理实现故障隔离、恢复供电和故障定位诊断等等;⑤新型电力电子设备支撑:改善电能质量,适应分布式新能源接入。

5 结 论

DG联合了多种清洁能源,具有很好的经济性和环保性,减少了不可再生能源消耗,能够解决常规能源无法解决的问题,是现今世界能源战的有力武器。智能电网环境下,DG将随着微网的发展发挥巨大的作用。风电并网后为今后各种能源发电技术提供了发展经验,DG必将成为 21 世纪电力行业的生力军。

这里提出智能电网交易模式采用协商式的双边交易,并在此基础上提出智能电网备用交易平台概念,加入了分布式电源作为备用电源,分析了备用市场直接交易的现实意义和重要性,搭建了备用成交量寻优算法模型,最后用算例进行验证,为灵活的备用市场进一步细化奠定了良好的基础。

中国应该加大对该方面研究的重视程度及支持力度,使得这一关系到生态环境和能源可持续供应的国计民生重大问题的研究工作得以全面开展。

参考文献

- [1] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考 [J]. 电力系统自动化, 2009, (9): 1—4.
- [2] 赵国波, 刘天琪, 李兴源. 分布式发电作为备用电源的优化配置 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 85—88.
- [3] 黄兴, 翟绘景, 路晓明. 大用户直购电所面临的三个核心问题探讨 [J]. 电力需求侧管理, 2007, 19(3): 78—80.
- [4] 何永秀, 黄文杰, 赵晓丽, 等. 大用户直购电辅助服务成本分摊机制 [J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(4): 70—74.
- [5] 曾芳, 并网发电厂辅助服务研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- [6] 安玲. 电力市场环境备用辅助服务的需求和调度问题的研究 [D]. 合肥工业大学, 2007.
- [7] 齐先军, 丁明. 发电系统中旋转备用方案的风险分析与效用决策 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 9—13.
- [8] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述 [J]. 电网技术, 2009, (8): 1—7.
- [9] 魏玲, 杨明皓. 含分布式发电和多种合同的配电公司中长期购电策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 53—57.
- [10] 魏玲, 杨明皓. 输配分离电力市场中含分布式发电的配电公司购电模型 [J]. 电网技术, 2008, 32(8): 71—76.
- [11] 王建学, 王锡凡, 张显. 电力市场中弹性运行备用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 20—27.
- [12] 宋云亭, 郭永基, 程林. 大规模发输电系统充裕度评估的蒙特卡罗仿真 [J]. 电网技术, 2003, 27(8): 24—28.
- [14] 时珊珊, 鲁宗相, 周双喜, 等. 中国微电网的特点和发展方向 [J]. 中国电力, 2009, (7): 21—25.
- [15] 肖立业, 林良真. 构建全国统一的新能源电网, 推进我国智能电网的建设 [J]. 电工电能新技术, 2009, 28(4): 54—59.
- [13] PANG C K, SHEBLE G B. Evaluation of dynamic programming based methods and multiple area representation for thermal unit commitments. IEEE Trans on Power Systems 1981, 100(3): 1212—1218.
- [14] Ettore Bompard, Yuchao Ma. Modeling Bilateral Electricity Markets: A Complex Network Approach. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS VOL. 23, NO. 4, NOVEMBER 2008.
- [15] Sameh ElKhatib, Francisco D. Negotiating Bilateral Contracts in Electricity Markets. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS VOL. 22, NO. 2, MAY 2007.

(收稿日期: 2009—11—04)

超导储能技术对智能电网电压稳定的影响

徐 建¹, 邱晓燕¹, 汪兴旺²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 宜宾电业局, 四川 宜宾 644000)

摘 要: 风力场并网是智能电网建设非常重要的一步, 针对风力场接入电网后对系统电压稳定性构成的影响, 提出在并网点加装超导储能装置 SMES 用以改善电压稳定性, 最后通过使用 PSASP 软件的 EPRI-36 节点系统作为仿真算例, 验证了超导储能装置在控制风速波动对电网电压稳定影响方面的有效性, 说明了超导储能技术对构建智能电网的作用。

关键词: 超导储能技术 SMES; 风力场并网; 电压稳定

Abstract: The wind farm integration is very important for smart grid but it has the undesirable influence on the voltage stability of power grid. Superconducting magnetic energy storage (SMES) is proposed to improve the voltage stability. The EPRI-36 system in power system analysis software package (PSASP) is taken for an example. The results indicate that the voltage stability of wind farm with SMES has been improved obviously, so SMES is proved highly effective in smart grid.

Key words: superconducting magnetic energy storage (SMES); wind farm integration; voltage stability

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0028-04

0 前 言

目前, 随着全球资源环境压力不断增大, 电力行业在安全运行、能源环保、市场竞争、企业管理等方面面临的压力日益突出, 随着计算机科学的发展, 以及材料、信息、电力电子等领域新技术带来的新驱动力, “智能电网”的概念应运而生, 已成为全球电力行业共同的研究课题。中国也开始逐步加大对智能电网的研究力度。与传统电网相比, 智能电网将以可靠、坚强、通畅的实体电网架构和信息互动平台为基础, 以服务生产全过程为目标, 并整合系统各种实时生产和运营信息, 通过加强对电网动态的分析、诊断和优化, 为电网运行和调度人员提供更为全面、更为完整和精细的电网运营状态图, 并给出辅助决策支持, 以及控制实施方案和应对预案, 最大可能实现更为精细、及时、准确、绩优的电网运行和管理^[1~3]。

以风能等可再生能源为代表的分布式电源 (distributed generation) 就是实现智能电网概念很好的办法。它是一种与传统集中供电模式完全不同的新型供电系统^[4]。以分散的方式布置在负荷所在的配电网中, 并具有可再生、占地少、清洁环保、供电可靠和发电方式灵活等特点^[5]。虽然风能因其储量巨大、

环保优势和规模效益等独特优势得到了长足发展, 但风电场并网引发诸如电压失稳等一系列电网运行安全问题也引起了人们广泛的关注^[6~9]。

超导储存装置 (superconducting magnetic energy storage SMES) 能够有效提高风力场并网后电网电压稳定性^[10~12]。早在电力工业发展初期, 储能技术就有了应用。目前, 超导储能装置因其容量大、效率高、响应快、无污染、控制方便、使用灵活等诸多优点开始在电力调峰、保障系统稳定和提高电能质量上发挥作用。随着智能电网研究和建设力度的加大, 超导储能技术迎来了蓬勃发展的新机遇^[13]。特别与如风能等可再生能源和分布式发电领域结合, 可以成为对提高系统运行稳定性、调整频率、补偿负荷波动的一种强有力的手段。

针对风力场并网后, 因风速等随机变化因素对电网电压暂态稳定的影响, 提出在并网点利用超导储能装置 SMES 提高电压稳定性, 通过 EPRI-36 节点系统作为算例, 并模拟风速的影响, 对比验证了超导储能装置对控制风力场并网口电压稳定的有效性, 说明了超导储能技术在构建智能电网的作用。

1 风力发电机模型

1.1 风力机空气动力模型

稳态情况下, 风力机从风能中捕获的功率由风速决定。

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S C_p v_m^3 \quad (1)$$

其中, ρ 是空气密度 (kg/m^3); $S = \pi R^2$ 是风机叶片的桨叶扫风面积 (m^2); C_p 是与气动性能有关的风能利用系数, 即单位时间内风轮所吸收的风能与通过风轮旋转面的全部风能之比。它是叶尖速比 λ 的函数。其定义为

$$\lambda = \frac{R \omega_{WT}}{v_w} \quad (2)$$

其中, ω_{WT} 为风力机转速 (rad/s)。

C_p 与 λ 的关系如图 1 所示。

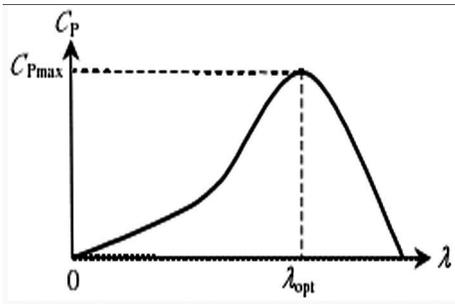


图 1 C_p 与 λ 的关系

在实际工程中, λ 和 β 与风能利用系数 C_p 有关系, 可以用下式表示。

$$C_p = c_1 (c_2 - c_3 \beta - c_4 \beta^2 - c_5) e^{-c_6 \beta} \quad (3)$$

其中, $\alpha = 2$, $c_1 = 0.5$, $c_2 = \lambda$, $c_3 = 0$, $c_4 = 0.22$, $c_5 = 0.17\lambda$, 这是通过风机的实际测量数据拟合的函数。

1.2 异步风力发电机 RX 模型

传统电力系统潮流计算将风力发电机组等值成为 PQ 节点, 并认为风力场的功率因素恒定不变。但是风电场多采用异步风力发电机, 发出有功的同时要吸收一定的无功, 必须在接入点加上无功补偿设备, 而吸收无功功率的大小和机端电压、发出的有功功率以及滑差等有关, 因此简单的将风力机处理成功率恒定的 PQ 节点会忽视风力场对电网特有的影响。

相对 PQ 模型, RX 模型把异步发电机的滑差表示成机端电压和有功功率的函数, 在给定初始滑差和风速的情况下, 将发电机看成阻抗型负荷加入潮流, 得到风力发电机的电磁功率, 再由风速计算出风电机的机械功率, 从而由两个功率之差值修正滑差, 反复迭代, 最终使得风电机机械功率与发电机电磁功率达到平衡。

1.3 风力场模型

对于一个安装有 n 台风力发电机的风电场, 为了简化计算, 忽略风电场内部线路损耗和变压器损耗, 不考虑风力发电机组分布的相对位置、风力场内部电网结构对计算的影响, 并假定所有机组具有相同的机端电压, 并且等于待求的风场母线电压。这样, 再则可以用一台发电机模型来表示风力场。

风力场总的有功功率就等于风力场内每台机组的有功功率之和, 总的无功功率等于风力场内每台机组的无功功率之和。

$$P_f = \sum_{i=1}^n P_{ei}(v_i) \quad (4)$$

$$Q_f = \sum_{i=1}^n Q_{ei}(P_{ei}, U_f) \quad (5)$$

其中, P_f , Q_f 分别为风电场总的有功和无功功率; P_{ei} , Q_{ei} 分别为第 i 台风电机组注入电网的有功和无功功率; v_i 为第 i 台风力机处的风速。

1.4 风速模型

风速对风力场出力影响最大, 目前一般采用简化的四分量模型来模拟风速随时间变化的特征^[14]。这里只简单介绍后面算例将会考虑的阵风模型。

阵风用于描述风速突变的特性。在风电系统的动态仿真中, 通常可以用它来考察风电系统在突变性风速扰动下的动态特性。

$$v_{wg}(t) = 0, \quad t < T_{sg} \quad (6)$$

$$v_{wg}(t) = \frac{A_{wg}}{2} \left(1 - \cos 2\pi \left(\frac{t - T_{sg}}{T_{eg} - T_{sg}} \right) \right), \quad T_{sg} \leq t \leq T_{eg} \quad (7)$$

$$v_{wg}(t) = 0, \quad t > T_{eg} \quad (8)$$

其中, $v_{wg}(t)$, T_{sg} , T_{eg} , A_{wg} , 分别表示阵风风速、阵风启动时间、结束时间、阵风幅值。

2 超导储能装置模型 (SMES)

超导储能装置是将能量以电磁能的形式储存在超导线圈中的一种储能装置。与其他储能装置相比, SMES 具有容量大、效率高、响应快、无污染、控制方便、使用灵活等诸多优点, 在风力场并网处使用 SMES 能够起到稳定电压的作用^[15, 16]。

2.1 超导储能装置的原理

SMES 的基本原理图如图 2 所示。当开关 K_1 闭合、 K_2 打开时, 超导线圈处于充放电状态; 当 K_1 打开、 K_2 闭合时, 超导线圈处于短路状态。因为超导线圈的电阻为 $R=0$, 所以电流可以在线圈中无衰减地永久流通。而超导储能装置一般可分为滤波器、超导线圈、变流器、制冷装置、失超保护及监控系统等 7 部

分。

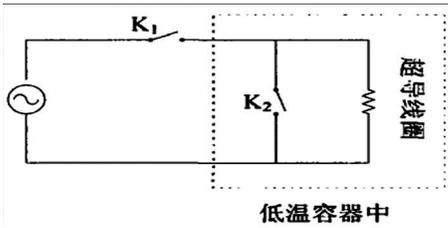


图 2 超导储能装置原理图

2.2 采用超导储能的风力场系统

具有超导储能装置的风力场系统如图 3 所示，SMES 单元接在异步发电机母线后，再与大电网相连接^[17]。

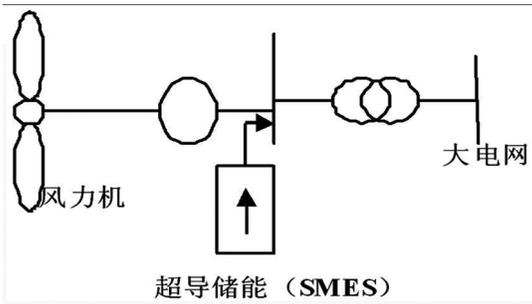


图 3 采用 SMES 的风力场系统

3 算例仿真计算与分析

3.1 算例模型

结合电力系统综合程序 (PSASP)，以软件自带的 EPR I-36 节点系统为算例，分析风力场接入对电网电压影响情况，并对比拥有超导储能装置情况下电压波动情况，以说明超导储能装置对提高电压稳定性的作用。EPR I-36 节点系统如图 4 所示。

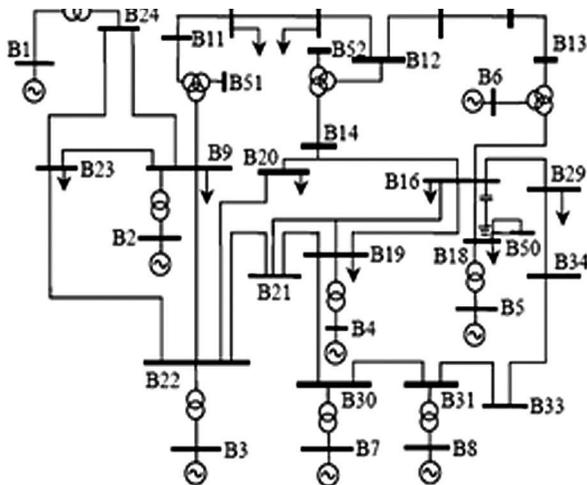


图 4 EPR I-36 节点系统

3.2 模型的处理

对于风速突变对电压的影响，将异步风力发电机按照 RX 模型处理，并模拟风力场在阵风扰动下的响应，以 0.05 s 为抽样步长，得出风力场的输出功率随风速的变化拟合曲线，用以模拟风速突变引起发电机出力的变化^[18]。

风力场的输出功率在阵风扰动时，功率变化的拟合曲线如图 5 和图 6 所示。

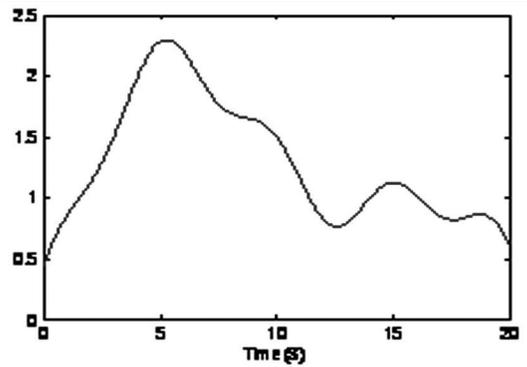


图 5 有功功率变化曲线

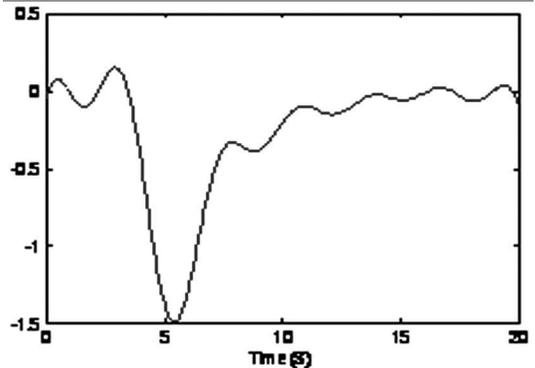


图 6 无功功率变化曲线

对于装有超导储能装置 SMES 的风力场，采用 PQ 模型以简化计算，并选取适当的接入电网的容量。

3.3 仿真计算

EPR I-36 节点系统基准容量为 100 MVA，风力场采用容量为 1 MW 的异步电机，设定台数为 50 台，全部投入使用时，总装机容量为 50 MW，占系统最大负荷 1%，并将风力场通过 34 节点接入系统^[7]。

在 PSASP 软件上，将风力场在阵风扰动下有功和无功短时的变化情况以节点扰动形式输入软件仿真，并和装有超导储能装置情况经运行对比，最后仿真结果和对比情况如图 7 所示。

3.4 结果分析

从上面仿真结果看出，风速的变化对系统电压影响较大。随风速的增加，母线电压增加，随后逐渐才稳定。而装备有超导储能装置的风力场能够有效地

控制电压的波动。

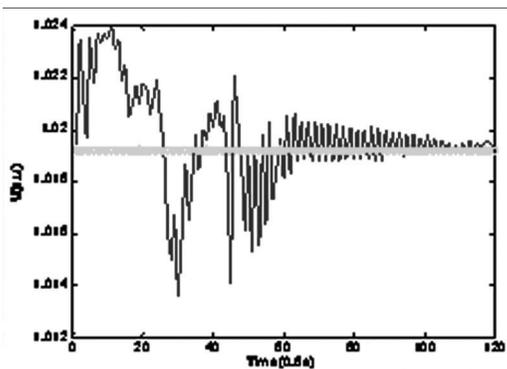


图 7 母线电压波动情况

4 结 论

风力场并网是建设智能电网非常重要的手段,模拟了风力场在风速突变后有功和无功输出的变化,通过算例仿真出其导致系统短期电压波动情况,并和采用超到储能装置的风力场进行了对比,说明了超导储能装置控制风力场并网电压暂态稳定性的作用。当然,为了方便对比,将采用超导储能装置的风力场简单地设定为 PQ 节点,没有考虑超导储能装置的控制策略和储能容量的选取,而这两个因素却对超导储能装置在智能电网中的应用前景有很大的影响,笔者在以后的研究中还将继续深入探讨下去。

参考文献

[1] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.

[2] 张文亮, 刘壮志, 王明俊, 等. 智能电网的研究进展及发展趋势 [J]. 电网技术, 2009, 33(13): 1-11.

[3] 钟金, 郑睿敏, 杨卫红, 等. 建设信息时代的智能电网 [J]. 电网技术, 2009, 33(13): 12-18.

[4] 丁明, 王敏. 分布式发电技术 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 31-36.

[5] 钱科军, 袁越. 分布式发电技术及其对电力系统的影响 [J]. 继电器, 2007, 35(13): 25-29.

[6] 陈海焱, 段献忠, 陈金富. 分布式发电对配网静态电压稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2006, 30(19): 27-30.

[7] 李斌, 刘天琪, 李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2009, 33(3): 84-88.

[8] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.

[9] 刘杨华, 吴政球. 分布式发电及其并网技术综述 [J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.

[10] Kyung S K, McKenzie K J, Liu Y L et al. A study on applications of energy storage for the wind power operation in power systems [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting Montreal Quebec Canada 2006.

[11] Billinton R B. Reliability considerations in the utilization of wind energy solar energy and energy storage in electric power systems [C]. International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems Stockholm, Sweden 2006: 1-6.

[12] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.

[13] Jewell W T. Electric industry infrastructure for sustainability: climate change and energy storage [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting Tampa USA, 2007.

[14] Bongers PM. Modeling and Identification of Flexible Wind Turbines a Factorizational Approach to Robust Control [M]. Delft University Press June 1994.

[15] Ha Thu Le, Surya Santoso. Analysis of voltage stability and optimal wind power penetration limits for a non-radial network with an energy storage system [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting Tampa USA, 2007.

[16] Cesar A. Luongo. Superconducting storage systems: an overview [C]. IEEE Transactions on magnetics July 1996.

[17] 陈星莺, 刘孟觉, 单渊达. 超导储能单元在并网型风力发电系统的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 63-66.

[18] 徐娇. 异步风力发电系统并网运行研究 [D]. 四川大学硕士学位论文, 2008.

[19] 刘天琪, 邱晓燕. 电力系统分析理论 [M]. 科学出版社, 2004.

[20] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 中国电力出版社, 2004.

作者简介:

徐建 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统电压稳定及无功优化计算。

邱晓燕 (1964-), 女, 教授, 主要研究方向: 电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2009-10-10)

传统变电站检修向数字化变电站状态检修转变

刘 阳¹, 刘俊勇¹, 张建明²

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

2 四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 智能电网的研究依赖于各种基础设施的完善, 数字化变电站建设是实现智能电网的必由之路。根据建立在 IEC 61850 通信规范上的数字化变电站的结构特点, 总结数字化变电站状态检修的进展和不足。现阶段数字化变电站研究集中在各种运行状态的监测, 但要进行全面的状态检修, 面临数字化故障诊断、通信等难题, 还有待进一步研究。

关键词: 智能电网; 数字化变电站; IEC 61850; 状态检修

Abstract: Smart grid depends on the improvement of various infrastructures. The construction of digital substation is a significant way to achieve the intelligent grid. The progress and shortcomings of condition-based maintenance of digital substation based on IEC 61850 are analyzed. In the end, it is concluded that the study of digital substation focus on condition monitoring at this stage. In order to achieve a comprehensive condition-based maintenance, which faces with the challenges of digital faults and communication, further studies need a lot of work.

Key words: smart grid; digital substation; IEC 61850; condition-based maintenance

中图分类号: TM 631 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0037-05

0 前 言

随着市场改革的推进, 数字经济的发展, 电网的信息化, 网络化迫在眉睫。在北美和欧洲已经组成强大的研究群体, 迅速开展智能电网 (Smart Grid) 的研究^[1, 2]。从发展路径来看, 如果以变电站为焦点, 则常规变电站—数字化变电站—数字化电网—智能化电网是一条符合技术规律和电网特性的发展道路^[3]。数字化变电站研究势在必行, 主要集中在建设和检修两大方面, 着重探讨检修方面的研究现状。

现今变电站检修由事后维修发展到周期性预防维修^[4, 5], 但传统的周期性检修在新的形式下已经不适应。①某些需要检修的设备没有检修, 不需要的反复检修, 造成了检修过剩。②设备的检测大多都是离线检测, 检测过程中的停电造成了电网供电的可靠性降低。③随着检修设备数量的增加, 造成人力和物力投入过大。④在构建智能电网大环境下, 电压、电流等各种模拟量已转化为光纤传输的数字信号, 检修模式迫切需要转变。

数字化变电站具有智能化的一次设备, 网络化的二次设备。在运行过程中的各种实施状态是数字化

后通过网络传递给二次设备, 需要微电子技术、计算机技术、通信技术、测量检测技术等发展的支持。一方面传统的检修模式迫切需要转变, 另一方面应运而生的数字化变电站急需探讨其检修模式, 而状态检修是实现的最佳途径, 即数字化变电站检修就是新形式下的状态检修。分析数字化变电站各层特点基础上, 总结了现有检修的研究情况, 旨在对数字化变电站实行状态检修提供参考。

1 数字化变电站的状态检修

数字化变电站是由电子式互感器、智能开关等智能化一次设备、网络化二次设备分层构建, 建立在 IEC 61850 通信规范基础上, 能够实现变电站内智能电气设备间信息共享, 互操作的现代化变电站。结构分为站控层、间隔层以及过程层。变电站检修由传统的事后维修, 周期性预防维修发展到适应于数字化变电站的状态维修。文献 [6] 提出了变电站的状态检修以开发检测技术为主或者以制定状态检修导则为主, 指出系统需要的数据主要来自变电站生产管理系统、在线监测系统以及变电站 PDA 巡视系统。指明数字化变电站状态检修是基于在线检测和测量技术

的研究方向。

文献 [7] 针对数字化变电站的一次设备和二次设备, 对数字化变电站状态的检修进行初步探讨。从状态检修的定义可以看出, 状态检修策略应包含以下三个组成部分: 状态信息采集、状态诊断方法和检修策略应用。但是如何科学合理地建立变电设备健康评价体系, 是贯穿整个状态检修维护策略的核心内容。指出数字化变电站虽然具备了状态检修的实施基础, 但是和传统的变电站检修的区别很大, 特别是电气二次设备的状态监测对象不是单一的元件, 而是一个单元或一个系统。监测的是各元件的动态性能, 微机保护和微机自动装置的自诊断技术的发展为保护设备的状态监测奠定了技术基础, 但也是数字化变电站二次设备状态检修的难点。可以看出, 对数字化变电站的检修, 即对数字化变电站的基本结构, 站控层、间隔层以及过程层的状态信息采集、状态诊断和检修, 打破了依据传统一、二次设备的检修模式。

1.1 过程层设备状态检修

过程层由电子式互感器, 智能化的一次设备组成。数字化变电站中传统的电磁式电流和电压互感器被电子式互感器代替^[8, 9]。电子式互感器测量的精度和可靠性与智能电网需求的经济和可靠性密切相关。文献 [10] 提出一种高电压电路的冗余设计, 提高电子式互感器稳定和可靠性。文献 [11] 提出当下对电子式互感器测试的两种方法: 一种将电磁式互感器输出的模拟量转变为数字量与电子互感器输出的数字量进行比较测量; 另一种是将电子互感器输出的数字量转变为模拟量与传统互感器输出进行比较, 两种方法的核心是必须保证转换过程的准确度。文献 [12] 利用 NI4070 6 位半高精度模拟量采集插件, RJ45 接口的以太网作为采集通道, 把传统的电磁式互感器模拟量转化为标准量, 与电子式互感器的数字量比较测试, 实现电子式互感器的比差、角差测量。测试结构框图如图 1 所示。但是测试依赖与传统互感器的数模转换, 转换精度还需进一步提高。

过程层重在智能设备在线监测, 目前国内外对变压器、容性设备、高压断路器等电力设备的在线监测都做了大量深入研究, 监测量的范围也越来越广泛。在线监测的主要项目有: 变压器、断路器、电容器、MOA 以及 GIS 等。对于变压器, 在线监测项目主要有油中气体分析、局部放电、微水含量。断路器的监测内容有操作回路的完整性、绝缘特性、开断能力、机

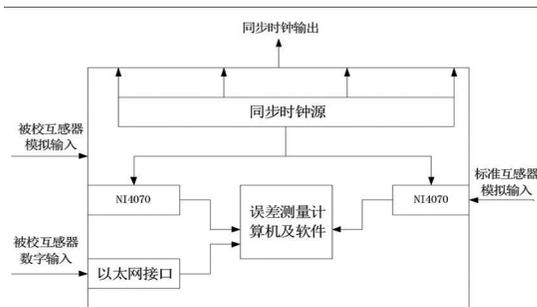


图 1 电子式互感器测试系统结构框图

械特性。容性设备 (包括氧化锌避雷器) 的在线监测, 主要测量容性设备的电容、电容电流、介质损耗、不平衡电压等参量和氧化锌避雷器 (MOA) 的全电流、阻性电流、功耗等参量。对于 GIS 主要监测其局部放电以及机械振动特性^[13~14]。

文献 [15] 基于智能电网的数字化变电站, 提出智能开关设备 (包括断路器和刀闸) 是过程层数字化的重要组成部分。开关设备配有电子设备、数字通讯接口、传感器和执行器, 不但具有分合闸基本功能, 而且在监测和诊断方面具有附加功能。智能控制功能是保护测控一体化, 一、二次功能一体化。检测包括断路器灭弧室的局放和介损监测, 机构动作特性的监测, 断路器触头和刀闸的行程、速度, 控制回路断线监视, 弹簧储能时间, 开关工作时间、开关动作次数、切断电流累积, 开关柜内温度、触头接触部位的温度监测, 分合闸线圈的电流、电压, 其监测目的在于实现状态检修。

对于以上的监测, 现阶段建立了基于动量因子的标准 BP 算法, Bold Driver 算法、superSAB 算法和 RPROP 算法的算法模型。探索了变压器故障诊断模型的应用价值^[16, 17], 取得较好的效果。但是存在问题就是收敛速度慢, 文献 [18] 成功运用 DGA 故障模式识别中 RPROP 算法, 对主变压器进行故障诊断, 进一步提高了收敛速度。

1.2 间隔层设备状态检修

间隔层主要包括数字化保护测控装置、继电保护及安全稳定装置、数字式电能表校验。

数字化保护测试装置包括线路测试保护系统、母差保护测试系统、主变压器保护测试系统^[19]。

线路测试保护, 将测试仪输出的模拟量转化为数字量, 经合并单元同步合并后传送给数字接口的 PCS-900 系列保护, 同时保护测试仪的模拟量接入另一台常规接口保护, 两台保护间通过光纤通道相连, 构

成差动保护,如图 2 所示。

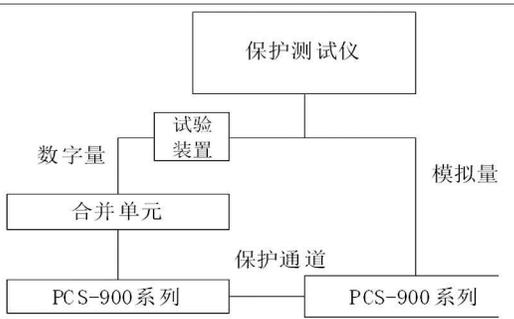


图 2 线路保护测试系统图

母差保护接入三个间隔,两个为电子式互感器,一个来自常规互感器,经各自合并单元接入 PCS-915 母差保护,测试所有保护功能,如图 3 所示。

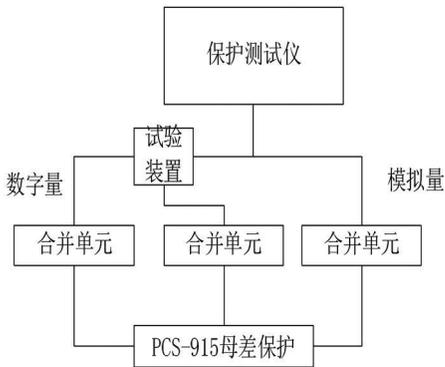


图 3 母差保护测试系统图

主变压器保护模拟一个两卷变压器,高压侧为电子式互感器,低压侧为常规保护,经各自合并单元接入 PCS-978 主变压器保护,测试所有保护功能,如图 4 所示。

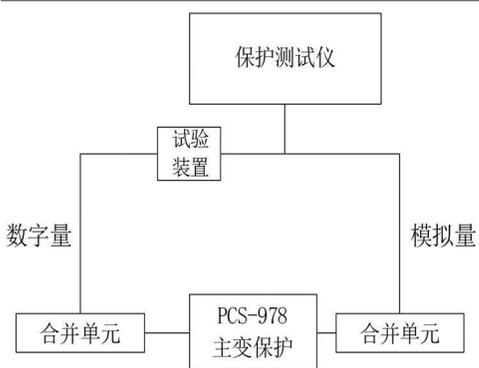


图 4 主变压器保护测试系统图

以上三大测试系统,满足基于电子式互感器数字化变电站测试需要。文献 [20] 进一步提出能量计量问题讨论,对失真的电压、电流测量的时候,考虑斜波的数字化测量,这些问题迫切需要解决。

继电保护及安全装置,文献 [21~23] 提出变电站二次设备检测的难点,文献 [24] 着重指出试

验设备、测试方法、检验标准,特别是 EMC(电磁干扰与兼容)控制与试验还是薄弱环节。文献 [25] 提出,每个制造商对 IEC 61850 不同的理解,全国范围内并没有普及数字化保护,精确的抽样测试并没有进行。文献 [26] 利用 SEL 保护的可编程逻辑功能实现操作回路监视和保护状态的方式,指出微机保护自诊断技术的使用,使设备的状态监测技术上具备了实施的基础。

数字化变电站,最为革命性的转变就是 GOOSE 报文的使用。测量装置之间,一次设备之间,各保护设备之间都是经过采用了 GOOSE 机制快速通信。在需要执行安全措施的相关回路上必须要有明确的断开点,但是原有的电缆已被光纤代替,文献 [27] 提出通过退出相关保护 GOOSE 压板来断绝相应 GOOSE 报文的收信和发信。文献 [28] 给出了数字化变电站 GOOSE 技术继电保护应用方案,用逻辑来实现压板功能,如图 5、图 6 所示,GOOSE 发送、接收压板设置在保护逻辑一侧,发送压板退出时发送的相关信号值始终为 0;接收压板退出或 GOOSE 通信故障时,信号取保护内部逻辑设定的强制位,就能有效保证保护逻辑可以根据相关压板的状态正确处理,解决设备运行检修“隔离”的问题。可见,把 GOOSE 应用到继电保护中,在于实现检修时断开待校装置与交换机之间的联系。安全性提高的同时,数字化变电站发送、接收端均设置了较多 GOOSE 压板,这与传统设置差异较大。

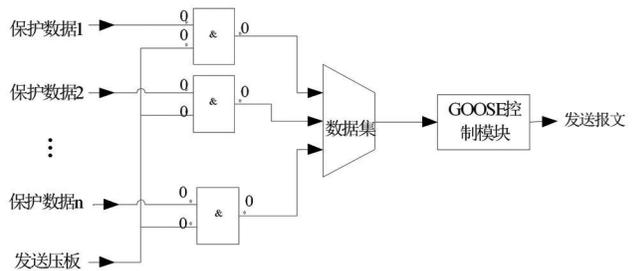


图 5 GOOSE 发送压板示意图

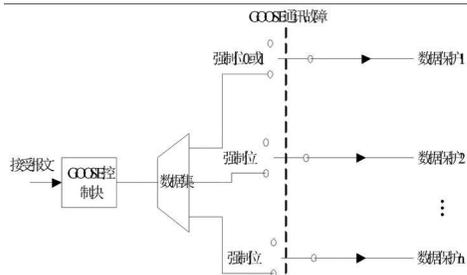


图 6 GOOSE 接收压板示意图

数字式电能表的研究刚刚开始^[29,30],它的诞生是基于智能电网的信息化,电力市场互动交易,数字化变电站中信息的采集、传输和处理全数字化。针对其校验的方式,文献[31]提出两种方式。方式一:由传统的电能表标准装置提供标准电压、电流输出,数模转换后与电能表对比。方式二:直观地测试出数字电能表的计量误差,但并没具体提出实施的方法。对于数字式电能表,关键在于电力市场方面实现“峰”“谷”期电价反馈,实现智能需求侧响应;电力系统方面实现数字化电压、电流、频率等数字信号输入的精确计量。可见,数字式电能表在研制和校验方面都有待深入的研究。

1.3 站控层设备状态检修

站控层包含变电站监控系统 and 网络监测系统,设备均采用 100 M 工业以太网,并按照 IEC 61850 通信规范进行系统建模并进行信息传输^[19]。运行监视,事故顺序记录,事故追忆,运行管理和远动功能运行管理等一系列功能的实现,需要采集记录变电站运行的各种数据,电能量,继电保护装置、故障录波器等相关信息,并进行就地处理、显示和分析。由于大量的数据,文献[32]提出基于 CAN 总线,文献[33]提出城域网的分布式 SCADA 系统,用于探讨解决变电站集中监控时的可靠性、通信“瓶颈”等问题。

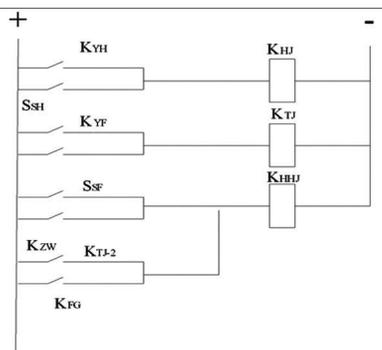


图 7 测控装置原理图

目前监控系统实现变电站事故总信号的 3 种方式,即保护动作信号启动方式、信号定义方式、不对应启动方式。文献[34]针对误发事故给值班运行人员带来的操作安全隐患,提出了组态处理、硬件电路处理的解决方案。组态处理方式实现了断路器分、合操作和 SGZ(变电站自动化系统需向上级调度和集控站自动化系统传送事故总信号)复归、置位操作的逻辑点号、对象的分离,如图 7 所示。设计测控装置电路实现断路器分、合操作和 SGZ 复归、置位操作的物理分离。

为适应新的生产、技术要求,进一步提出了实现测控装置自动识别断路器事故跳闸功能的建议和方案供探讨。变电站监控系统的故障处理,现阶段只是理论上的探讨,自动识别断路器事故也是研究难点。

2 相关的问题和展望

数字化变电站的状态检修技术尚处于探讨阶段。过程层重点在于智能化的一次设备,电子式互感器状态检修。通过继承传统变电站状态检修方式和智能化一次设备结合,在在线检测基础上利用各种算法模型,建立数据统一平台进行故障诊断。电子式互感器的应用研究比较多,但其测量技术的精度有待进一步的提高。

间隔层主要是各种测量和保护装置的检修。①三大测试系统满足基于电子式互感器的数字化变电站的测试要求,为实现检修提供可靠的检测数据。②数字化变电站的继电保护部分,由于二次设备的网络化,仅对实现检修是需要的“明确断点”方式进行了探讨。继电保护除装置本身还有各种网络回路,状态检修也必须作为一个系统性的问题来考虑,检修范畴不能仅局限在装置本身,可以采用校验法、比较法等故障测试的方法,在保护装置中加载诊断程序,提出了设想,还没有相关的研究。③智能电表功能不仅仅是变电站各种数字信号的测量,从智能电网角度看,还不能实现信息交互,而校验的原理也是基于传统模拟信号的模数转换,并没有发生质的转变。

站控层的监控系统和网络监测系统急需解决通信“瓶颈”问题。无人值班变电站监控系统中,图像的传输是个关键问题,图像在传输过程中容易出现延时、抖动、失真等,这些问题的检测,需要结合通信技术进一步深入研究。统一的平台需要新一代的总线技术和测量系统^[35]。

在研究构建智能电网的大环境下,大胆提出“一个世界、一套标准”,在 IEC 61850 标准下,逐渐实现全世界变电站数字化改造。数字化变电站状态检修是一项复杂的系统工程,涉及到通信、在线监测、数据分析、专家系统、可视化等技术领域,具有广阔的发展前景。在现有的数字化变电站检测技术基础上,还需加大对诊断技术、控制技术等更深入的探索和研究。

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] 林宇锋, 钟金, 吴复立. 智能电网技术体系探讨 [J]. 电网技术, 2009, 33(12): 8—14.
- [3] 陈建民, 周健, 蔡霖. 面向智能电网愿景的变电站二次技术需求分析 [J]. 华东电力, 2008, 36(11): 37—39.
- [4] 林松, 王庆红, 刘然. 数字化变电站状态检修技术 [J]. 电网技术, 2007, (31): 137—140.
- [5] 阮志荣, 罗艳. 数字化变电站的状态检修 [J]. 贵州电力技术, 2006, (7): 46—48.
- [6] 林承华. 变电设备状态检修管理系统的设计与实现 [J]. 福建电力与电工, 2006, 3(26): 57—59.
- [7] 倪强冰, 容保娣. 探讨继电保护的状态检修及实施 [J]. 电力与水利建设, 2007, (11): 136—138.
- [8] PCS—221A 电子式互感器合并单元技术和使用说明书 [Z].
- [9] 顾正纲, 刘刚, 王学申. 电子式互感器在数字化变电站中的应用 [J]. 电力与能源, 2008, (34): 366—368.
- [10] Zheng Qian, Chao Liu, Yuling Li, Shaoyu Liu. Multifunction realization of active electronic current transformer [J]. IEEE Trans on Power Systems 2009, 1084—1087.
- [11] 谢岳, 徐璟. 电子式电流互感器模拟量输出校验技术研究 [J]. 电测与仪表, 2007, (9): 25—28.
- [12] 曹敏, 梁仕斌, 李毅, 陈郑, 张忠才. 电子互感器测试方法的研究 [J]. 电测与仪表, 2007, (12): 33—36.
- [13] 李岩. 变压器在线状态监测系统研究 [D]. 华中科技大学电气工程系, 2005.
- [14] 梁甲文. 电气设备的绝缘在线监测与状态检修 [D]. 山东大学电气工程系, 2005.
- [15] 数字化变电站的建设说明书 [Z]. 南瑞继保有限公司.
- [16] 黄鞠铭, 朱子述, 胡文华. BP 网络在基于 DGA 变压器故障诊断中的应用 [J]. 高电压技术, 1996, 22(2): 21—23.
- [17] 丁晓群, 林钟云. 神经网络应用于电力变压器故障诊断 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(2): 32—35.
- [18] 章剑光. 变电设备状态检修应用研究 [D]. 浙江大学电气工程系, 2004.
- [19] 数字化方案说明 (二次部分) [Z].
- [20] JUN RONG I, GUI-XIN ZHANG I, XIAO-MEI ZHUI PENG WANG I. Electric Energy Measurement in Digital Substation on A Number of Issues Discussed [J]. IEEE Trans on Power Systems 2008, 6(16): 1—5.
- [21] 李辉桃, 曹蕤, 梁双印. 电力系统继电保护现状研究及发展探索 [J]. 中国电力教育, 2008, (z2): 200—202.
- [22] 王海玲, 王瑞. 电气二次设备的状态检修 [J]. 黑龙江电力, 2005, 27(1): 78—80.
- [23] 吴杰余, 张哲, 尹项根, 胡文平. 电气二次设备状态检修研究 [J]. 继电器, 2002, 30(2): 22—24.
- [24] 丁书文, 史志鸿. 数字化变电站的几个关键技术问题 [J]. 继电器, 2008, 36(10): 53—56.
- [25] BAO-FENG TANG, YUAN-YUAN KANG, HUI FAN. The Debugging Technique of Relay Protection of Digital Substation [J]. IEEE Trans on Power Systems 2008, 3(12): 1—8.
- [26] 高翔, 刘韶俊. 继电保护状态检修及实施探讨 [J]. 继电器, 2005, 33(20): 23—27.
- [27] 周国庆, 邱子平, 李赛丹, 温信强. 数字化变电站的实现及检修模式探讨 [J]. 浙江电力, 2008, (6): 73—76.
- [28] 朱炳铨, 刘军, 等. 基于 IEC61850GOOSE 技术的继电保护工程应用 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 104—107.
- [29] 赵威. 数字式电能表的设计 [J]. 三峡学院学报, 2006, 3(22): 109—110.
- [30] 钟严平, 高玉良, 等. 数字式电能表研制中的问题探讨 [J]. 1997, (3): 5—7.
- [31] 窦明智. 浅谈数字式电能表的运用 [J]. 云南电力技术, 2009, (37): 27—28.
- [32] 杨如锋, 伍爱莲, 朱华伟. 基于 CAN 总线的变电站监控系统 [J]. 电力自动化设备, 2005, (1): 43—45.
- [33] 许琰, 沈晓东, 钱海峰, 黄申. 220kV 无人值班变电站监控系统建设初探 [J]. 2009, (31): 41—44.
- [34] 朱骏. 变电站监控系统事故总信号解决方案探讨 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(1): 112—114.
- [35] Martin Schumacher, Clemens Hoga. Future digital substation with all signals via one digital platform [J]. IEEE Trans on Power Systems 2007, 7(6): 1—8.

作者简介:

刘阳 (1986—), 男, 四川泸州人, 硕士研究生。主要研究方向为电力系统稳定与控制。

刘俊勇 (1963—), 男, 四川成都人, 教授, 博士生导师。主要从事电力市场、分布式发电、灵活输电与电力系统可视化等方面的研究。

(收稿日期: 2009—10—10)

传统变电站检修向数字化变电站状态检修转变

刘 阳¹, 刘俊勇¹, 张建明²

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

2 四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 智能电网的研究依赖于各种基础设施的完善, 数字化变电站建设是实现智能电网的必由之路。根据建立在 IEC 61850 通信规范上的数字化变电站的结构特点, 总结数字化变电站状态检修的进展和不足。现阶段数字化变电站研究集中在各种运行状态的监测, 但要进行全面的状态检修, 面临数字化故障诊断、通信等难题, 还有待进一步研究。

关键词: 智能电网; 数字化变电站; IEC 61850; 状态检修

Abstract: Smart grid depends on the improvement of various infrastructures. The construction of digital substation is a significant way to achieve the intelligent grid. The progress and shortcomings of condition-based maintenance of digital substation based on IEC 61850 are analyzed. In the end, it is concluded that the study of digital substation focus on condition monitoring at this stage. In order to achieve a comprehensive condition-based maintenance, which faces with the challenges of digital faults and communication, further studies need a lot of work.

Key words: smart grid; digital substation; IEC 61850; condition-based maintenance

中图分类号: TM 631 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0037-05

0 前 言

随着市场改革的推进, 数字经济的发展, 电网的信息化, 网络化迫在眉睫。在北美和欧洲已经组成强大的研究群体, 迅速开展智能电网 (Smart Grid) 的研究^[1,2]。从发展路径来看, 如果以变电站为焦点, 则常规变电站—数字化变电站—数字化电网—智能化电网是一条符合技术规律和电网特性的发展道路^[3]。数字化变电站研究势在必行, 主要集中在建设和检修两大方面, 着重探讨检修方面的研究现状。

现今变电站检修由事后维修发展到周期性预防维修^[4,5], 但传统的周期性检修在新的形式下已经不适应。①某些需要检修的设备没有检修, 不需要的反复检修, 造成了检修过剩。②设备的检测大多都是离线检测, 检测过程中的停电造成了电网供电的可靠性降低。③随着检修设备数量的增加, 造成人力和物力投入过大。④在构建智能电网大环境下, 电压、电流等各种模拟量已转化为光纤传输的数字信号, 检修模式迫切需要转变。

数字化变电站具有智能化的一次设备, 网络化的二次设备。在运行过程中的各种实施状态是数字化

后通过网络传递给二次设备, 需要微电子技术、计算机技术、通信技术、测量检测技术等发展的支持。一方面传统的检修模式迫切需要转变, 另一方面应运而生的数字化变电站急需探讨其检修模式, 而状态检修是实现的最佳途径, 即数字化变电站检修就是新形式下的状态检修。分析数字化变电站各层特点基础上, 总结了现有检修的研究情况, 旨在对数字化变电站实行状态检修提供参考。

1 数字化变电站的状态检修

数字化变电站是由电子式互感器、智能开关等智能化一次设备、网络化二次设备分层构建, 建立在 IEC 61850 通信规范基础上, 能够实现变电站内智能电气设备间信息共享, 互操作的现代化变电站。结构分为站控层、间隔层以及过程层。变电站检修由传统的事后维修, 周期性预防维修发展到适应于数字化变电站的状态维修。文献 [6] 提出了变电站的状态检修以开发检测技术为主或者以制定状态检修导则为主, 指出系统需要的数据主要来自变电站生产管理系统、在线监测系统以及变电站 PDA 巡视系统。指明数字化变电站状态检修是基于在线检测和测量技术

的研究方向。

文献 [7] 针对数字化变电站的一次设备和二次设备, 对数字化变电站状态的检修进行初步探讨。从状态检修的定义可以看出, 状态检修策略应包含以下三个组成部分: 状态信息采集、状态诊断方法和检修策略应用。但是如何科学合理地建立变电设备健康评价体系, 是贯穿整个状态检修维护策略的核心内容。指出数字化变电站虽然具备了状态检修的实施基础, 但是和传统的变电站检修的区别很大, 特别是电气二次设备的状态监测对象不是单一的元件, 而是一个单元或一个系统。监测的是各元件的动态性能, 微机保护和微机自动装置的自诊断技术的发展为保护设备的状态监测奠定了技术基础, 但也是数字化变电站二次设备状态检修的难点。可以看出, 对数字化变电站的检修, 即对数字化变电站的基本结构, 站控层、间隔层以及过程层的状态信息采集、状态诊断和检修, 打破了依据传统一、二次设备的检修模式。

1.1 过程层设备状态检修

过程层由电子式互感器, 智能化的一次设备组成。数字化变电站中传统的电磁式电流和电压互感器被电子式互感器代替^[8,9]。电子式互感器测量的精度和可靠性与智能电网需求的经济和可靠性密切相关。文献 [10] 提出一种高电压电路的冗余设计, 提高电子式互感器稳定和可靠性。文献 [11] 提出当下对电子式互感器测试的两种方法: 一种将电磁式互感器输出的模拟量转变为数字量与电子互感器输出的数字量进行比较测量; 另一种是将电子互感器输出的数字量转变为模拟量与传统互感器输出进行比较, 两种方法的核心是必须保证转换过程的准确度。文献 [12] 利用 NI4070 6 位半高精度模拟量采集插件, RJ45 接口的以太网作为采集通道, 把传统的电磁式互感器模拟量转化为标准量, 与电子式互感器的数字量比较测试, 实现电子式互感器的比差、角差测量。测试结构框图如图 1 所示。但是测试依赖与传统互感器的数模转换, 转换精度还需进一步提高。

过程层重在智能设备在线监测, 目前国内外对变压器、容性设备、高压断路器等电力设备的在线监测都做了大量深入研究, 监测量的范围也越来越广泛。在线监测的主要项目有: 变压器、断路器、电容器、MOA 以及 GIS 等。对于变压器, 在线监测项目主要有油中气体分析、局部放电、微水含量。断路器的监测内容有操作回路的完整性、绝缘特性、开断能力、机

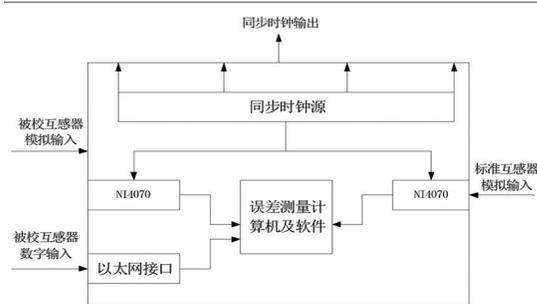


图 1 电子式互感器测试系统结构框图

械特性。容性设备 (包括氧化锌避雷器) 的在线监测, 主要测量容性设备的电容、电容电流、介质损耗、不平衡电压等参量和氧化锌避雷器 (MOA) 的全电流、阻性电流、功耗等参量。对于 GIS 主要监测其局部放电以及机械振动特性^[13~14]。

文献 [15] 基于智能电网的数字化变电站, 提出智能开关设备 (包括断路器和刀闸) 是过程层数字化的重要组成部分。开关设备配有电子设备、数字通讯接口、传感器和执行器, 不但具有分合闸基本功能, 而且在监测和诊断方面具有附加功能。智能控制功能是保护测控一体化, 一、二次功能一体化。检测包括断路器灭弧室的局放和介损监测, 机构动作特性的监测, 断路器触头和刀闸的行程、速度, 控制回路断线监视, 弹簧储能时间, 开关工作时间、开关动作次数、切断电流累积, 开关柜内温度、触头接触部位的温度监测, 分合闸线圈的电流、电压, 其监测目的在于实现状态检修。

对于以上的监测, 现阶段建立了基于动量因子的标准 BP 算法, Bold Driver 算法、superSAB 算法和 RPROP 算法的算法模型。探索了变压器故障诊断模型的应用价值^[16,17], 取得较好的效果。但是存在问题就是收敛速度慢, 文献 [18] 成功运用 DGA 故障模式识别中 RPROP 算法, 对主变压器进行故障诊断, 进一步提高了收敛速度。

1.2 间隔层设备状态检修

间隔层主要包括数字化保护测控装置、继电保护及安全装置、数字式电能表校验。

数字化保护测试装置包括线路测试保护系统、母差保护测试系统、主变压器保护测试系统^[19]。

线路测试保护, 将测试仪输出的模拟量转化为数字量, 经合并单元同步合并后传送给数字接口的 PCS-900 系列保护, 同时保护测试仪的模拟量接入另一台常规接口保护, 两台保护间通过光纤通道相连, 构

成差动保护,如图 2 所示。

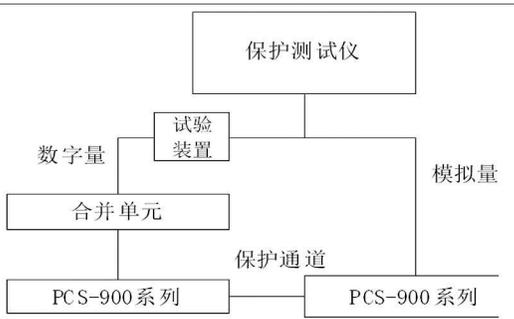


图 2 线路保护测试系统图

母差保护接入三个间隔,两个为电子式互感器,一个来自常规互感器,经各自合并单元接入 PCS-915 母差保护,测试所有保护功能,如图 3 所示。

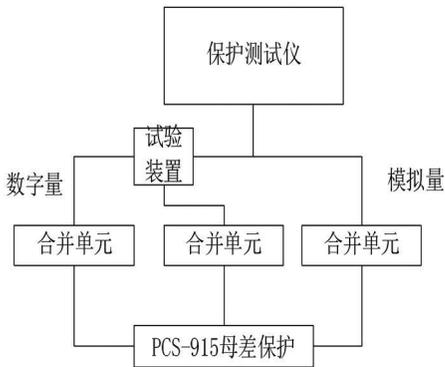


图 3 母差保护测试系统图

主变压器保护模拟一个两卷变压器,高压侧为电子式互感器,低压侧为常规保护,经各自合并单元接入 PCS-978 主变压器保护,测试所有保护功能,如图 4 所示。

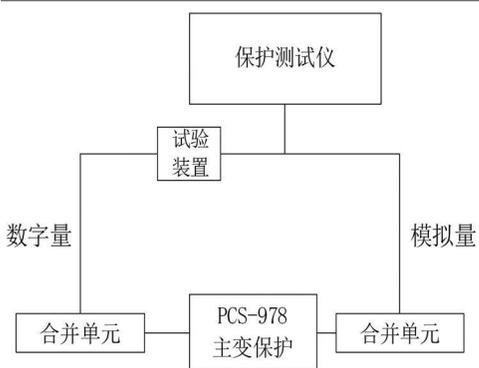


图 4 主变压器保护测试系统图

以上三大测试系统,满足基于电子式互感器数字化变电站测试需要。文献 [20] 进一步提出能量计量问题讨论,对失真的电压、电流测量的时候,考虑斜波的数字化测量,这些问题迫切需要解决。

继电保护及安全稳定装置,文献 [21~23] 提出变电站二次设备检测的难点,文献 [24] 着重指出试

验设备、测试方法、检验标准,特别是 EMC(电磁干扰与兼容)控制与试验还是薄弱环节。文献 [25] 提出,每个制造商对 IEC 61850 不同的理解,全国范围内并没有普及数字化保护,精确的抽样测试并没有进行。文献 [26] 利用 SEL 保护的可编程逻辑功能实现操作回路监视和保护状态的方式,指出微机保护自诊断技术的使用,使设备的状态监测技术上具备了实施的基础。

数字化变电站,最为革命性的转变就是 GOOSE 报文的使用。测量装置之间,一次设备之间,各保护设备之间都是经过采用了 GOOSE 机制快速通信。在需要执行安全措施的相关回路上必须要有明确的断开点,但是原有的电缆已被光纤代替,文献 [27] 提出通过退出相关保护 GOOSE 压板来断绝相应 GOOSE 报文的收信和发信。文献 [28] 给出了数字化变电站 GOOSE 技术继电保护应用方案,用逻辑来实现压板功能,如图 5、图 6 所示,GOOSE 发送、接收压板设置在保护逻辑一侧,发送压板退出时发送的相关信号值始终为 0;接收压板退出或 GOOSE 通信故障时,信号取保护内部逻辑设定的强制位,就能有效保证保护逻辑可以根据相关压板的状态正确处理,解决设备运行检修“隔离”的问题。可见,把 GOOSE 应用到继电保护中,在于实现检修时断开待校装置与交换机之间的联系。安全性提高的同时,数字化变电站发送、接收端均设置了较多 GOOSE 压板,这与传统设置差异较大。

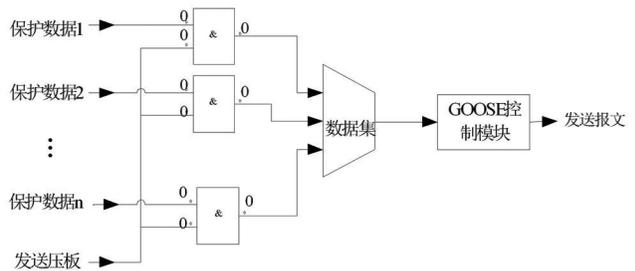


图 5 GOOSE 发送压板示意图

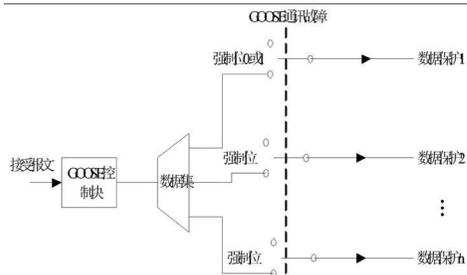


图 6 GOOSE 接收压板示意图

数字式电能表的研究刚刚开始^[29,30],它的诞生是基于智能电网的信息化,电力市场互动交易,数字化变电站中信息的采集、传输和处理全数字化。针对其校验的方式,文献[31]提出两种方式。方式一:由传统的电能表标准装置提供标准电压、电流输出,数模转换后与电能表对比。方式二:直观地测试出数字电能表的计量误差,但并没具体提出实施的方法。对于数字式电能表,关键在于电力市场方面实现“峰”“谷”期电价反馈,实现智能需求侧响应;电力系统方面实现数字化电压、电流、频率等数字信号输入的精确计量。可见,数字式电能表在研制和校验方面都有待深入的研究。

1.3 站控层设备状态检修

站控层包含变电站监控系统 and 网络监测系统,设备均采用 100 M 工业以太网,并按照 IEC 61850 通信规范进行系统建模并进行信息传输^[19]。运行监视,事故顺序记录,事故追忆,运行管理和远动功能运行管理等一系列功能的实现,需要采集记录变电站运行的各种数据,电能量,继电保护装置、故障录波器等相关信息,并进行就地处理、显示和分析。由于大量的数据,文献[32]提出基于 CAN 总线,文献[33]提出城域网的分布式 SCADA 系统,用于探讨解决变电站集中监控时的可靠性、通信“瓶颈”等问题。

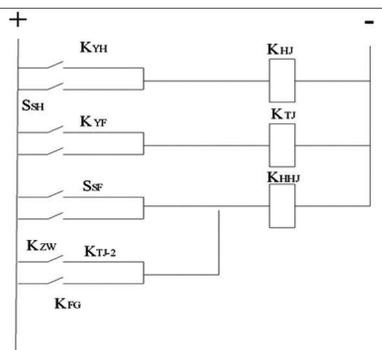


图 7 测控装置原理图

目前监控系统实现变电站事故总信号的 3 种方式,即保护动作信号启动方式、信号定义方式、不对应启动方式。文献[34]针对误发事故给值班运行人员带来的操作安全隐患,提出了组态处理、硬件电路处理的解决方案。组态处理方式实现了断路器分、合操作和 SGZ(变电站自动化系统需向上级调度和集控站自动化系统传送事故总信号)复归、置位操作的逻辑点号、对象的分离,如图 7 所示。设计测控装置电路实现断路器分、合操作和 SGZ 复归、置位操作的物理分离。

为适应新的生产、技术要求,进一步提出了实现测控装置自动识别断路器事故跳闸功能的建议和方案供探讨。变电站监控系统的故障处理,现阶段只是理论上的探讨,自动识别断路器事故也是研究难点。

2 相关的问题和展望

数字化变电站的状态检修技术尚处于探讨阶段。过程层重点在于智能化的一次设备,电子式互感器状态检修。通过继承传统变电站状态检修方式和智能化一次设备结合,在在线检测基础上利用各种算法模型,建立数据统一平台进行故障诊断。电子式互感器的应用研究比较多,但其测量技术的精度有待进一步的提高。

间隔层主要是各种测量和保护装置的检修。①三大测试系统满足基于电子式互感器的数字化变电站的测试要求,为实现检修提供可靠的检测数据。②数字化变电站的继电保护部分,由于二次设备的网络化,仅对实现检修是需要的“明确断点”方式进行了探讨。继电保护除装置本身还有各种网络回路,状态检修也必须作为一个系统性的问题来考虑,检修范畴不能仅局限在装置本身,可以采用校验法、比较法等故障测试的方法,在保护装置中加载诊断程序,提出了设想,还没有相关的研究。③智能电表功能不仅仅是变电站各种数字信号的测量,从智能电网角度看,还不能实现信息交互,而校验的原理也是基于传统模拟信号的模数转换,并没有发生质的转变。

站控层的监控系统和网络监测系统急需解决通信“瓶颈”问题。无人值班变电站监控系统中,图像的传输是个关键问题,图像在传输过程中容易出现延时、抖动、失真等,这些问题的检测,需要结合通信技术进一步深入研究。统一的平台需要新一代的总线技术和测量系统^[35]。

在研究构建智能电网的大环境下,大胆提出“一个世界、一套标准”,在 IEC 61850 标准下,逐渐实现全世界变电站数字化改造。数字化变电站状态检修是一项复杂的系统工程,涉及到通信、在线监测、数据分析、专家系统、可视化等技术领域,具有广阔的发展前景。在现有的数字化变电站检测技术基础上,还需加大对诊断技术、控制技术等更深入的探索和研究。

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] 林宇锋, 钟金, 吴复立. 智能电网技术体系探讨 [J]. 电网技术, 2009, 33(12): 8—14.
- [3] 陈建民, 周健, 蔡霖. 面向智能电网愿景的变电站二次技术需求分析 [J]. 华东电力, 2008, 36(11): 37—39.
- [4] 林松, 王庆红, 刘然. 数字化变电站状态检修技术 [J]. 电网技术, 2007, (31): 137—140.
- [5] 阮志荣, 罗艳. 数字化变电站的状态检修 [J]. 贵州电力技术, 2006, (7): 46—48.
- [6] 林承华. 变电设备状态检修管理系统的设计与实现 [J]. 福建电力与电工, 2006, 3(26): 57—59.
- [7] 倪强冰, 容保娣. 探讨继电保护的状态检修及实施 [J]. 电力与水利建设, 2007, (11): 136—138.
- [8] PCS—221A 电子式互感器合并单元技术和使用说明书 [Z].
- [9] 顾正纲, 刘刚, 王学申. 电子式互感器在数字化变电站中的应用 [J]. 电力与能源, 2008, (34): 366—368.
- [10] Zheng Qian, Chao Liu, Yuling Li, Shaoyu Liu. Multifunction realization of active electronic current transformer [J]. IEEE Trans on Power Systems 2009, 1084—1087.
- [11] 谢岳, 徐璟. 电子式电流互感器模拟量输出校验技术研究 [J]. 电测与仪表, 2007, (9): 25—28.
- [12] 曹敏, 梁仕斌, 李毅, 陈郑, 张忠才. 电子互感器测试方法的研究 [J]. 电测与仪表, 2007, (12): 33—36.
- [13] 李岩. 变压器在线状态监测系统研究 [D]. 华中科技大学电气工程系, 2005.
- [14] 梁甲文. 电气设备的绝缘在线监测与状态检修 [D]. 山东大学电气工程系, 2005.
- [15] 数字化变电站的建设说明书 [Z]. 南瑞继保有限公司.
- [16] 黄鞠铭, 朱子述, 胡文华. BP 网络在基于 DGA 变压器故障诊断中的应用 [J]. 高电压技术, 1996, 22(2): 21—23.
- [17] 丁晓群, 林钟云. 神经网络应用于电力变压器故障诊断 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(2): 32—35.
- [18] 章剑光. 变电设备状态检修应用研究 [D]. 浙江大学电气工程系, 2004.
- [19] 数字化方案说明 (二次部分) [Z].
- [20] JUN RONG I, GUI-XIN ZHANG I, XIAO-MEI ZHUI PENG WANG I. Electric Energy Measurement in Digital Substation on A Number of Issues Discussed [J]. IEEE Trans on Power Systems 2008, 6(16): 1—5.
- [21] 李辉桃, 曹蕤, 梁双印. 电力系统继电保护现状研究及发展探索 [J]. 中国电力教育, 2008, (z2): 200—202.
- [22] 王海玲, 王瑞. 电气二次设备的状态检修 [J]. 黑龙江电力, 2005, 27(1): 78—80.
- [23] 吴杰余, 张哲, 尹项根, 胡文平. 电气二次设备状态检修研究 [J]. 继电器, 2002, 30(2): 22—24.
- [24] 丁书文, 史志鸿. 数字化变电站的几个关键技术问题 [J]. 继电器, 2008, 36(10): 53—56.
- [25] BAO-FENG TANG, YUAN-YUAN KANG, HUI FAN. The Debugging Technique of Relay Protection of Digital Substation [J]. IEEE Trans on Power Systems 2008, 3(12): 1—8.
- [26] 高翔, 刘韶俊. 继电保护状态检修及实施探讨 [J]. 继电器, 2005, 33(20): 23—27.
- [27] 周国庆, 邱子平, 李赛丹, 温信强. 数字化变电站的实现及检修模式探讨 [J]. 浙江电力, 2008, (6): 73—76.
- [28] 朱炳铨, 刘军, 等. 基于 IEC61850GOOSE 技术的继电保护工程应用 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 104—107.
- [29] 赵威. 数字式电能表的设计 [J]. 三峡学院学报, 2006, 3(22): 109—110.
- [30] 钟严平, 高玉良, 等. 数字式电能表研制中的问题探讨 [J]. 1997, (3): 5—7.
- [31] 窦明智. 浅谈数字式电能表的运用 [J]. 云南电力技术, 2009, (37): 27—28.
- [32] 杨如锋, 伍爱莲, 朱华伟. 基于 CAN 总线的变电站监控系统 [J]. 电力自动化设备, 2005, (1): 43—45.
- [33] 许琰, 沈晓东, 钱海峰, 黄申. 220kV 无人值班变电站监控系统建设初探 [J]. 2009, (31): 41—44.
- [34] 朱骏. 变电站监控系统事故总信号解决方案探讨 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(1): 112—114.
- [35] Martin Schumacher, Clemens Hoga. Future digital substation with all signals via one digital platform [J]. IEEE Trans on Power Systems 2007, 7(6): 1—8.

作者简介:

刘阳 (1986—), 男, 四川泸州人, 硕士研究生。主要研究方向为电力系统稳定与控制。

刘俊勇 (1963—), 男, 四川成都人, 教授, 博士生导师。主要从事电力市场、分布式发电、灵活输电与电力系统可视化等方面的研究。

(收稿日期: 2009—10—10)

基于 Google Earth 的电网信息可视化研究及实现

黄媛¹, 刘俊勇¹, 何迈¹, 杨嘉湜², 王民昆²

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

2 四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要: 电网整体运行趋势性的数据构成主要是融合若干调度自动化系统的实时及历史数据, 采用灵活界定的数据选择展示, 提供电网运行的直观性、可阅性、提示性和概括性信息。利用编程工具实现了 Google Earth 和电网可视化的无缝连接, 在融合多个系统数据的可视化平台下, 为电网信息的可视化展示提供了一个新的手段。

关键词: Google Earth; 电网; 分区统计; 可视化

Abstract: The operation trend of the whole power grid can be exposed by its data through the combination of real-time data with history ones from dispatch automation system and showing them with flexibility, thus it has the features of intuitionism, readability, inspiration and summation. The seamless connections between Google Earth and visualization in power grid are realized and a new method is provided by which the information can be visualized with the integration of several platforms.

Key words: Google Earth; power grid; sectional statistics; visualization

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2009)增-0042-04

0 引言

随着互联系统规模的日趋扩大和结构复杂程度的增加, 调度员需要监控的数据量呈指数级增长。面对海量的实时信息和各类经过分析、处理、筛选的二次信息, 如何对其进行直观的展示, 近年来得到了国内外众多学者的关注, 同时也做了很多相应的探索。从最初的电网单线图的数据原始表示及列表表示, 逐步考虑了颜色、动画、地理位置等因素以及从二维向三维发展, 形成了一系列与电力系统运行相对应的可视化表达方式^[1~2]。

随着电网可视化功能从静态监视—动态监视—安全控制分析—辅助决策发展, 根据现场的需求, 对各种分区、分类的指标体系也提出了新的可视化表达手段。

提出了在考虑空间地理信息的 Google Earth 上的电网信息的可视化表达的思想并予以实现。一改传统的表格统计, 采用数字化的虚拟仪表技术展示信息的方式, 给调度员提供了快速、准确的信息显示平台, 满足其直观性、可阅性、提示性和概括性要求。

1 Google Earth 与传统 GIS 平台的比较

始于 20 世纪 60 年代的传统 GIS 在数据采集和

输入、空间数据的分析与处理以及数据输出等方面表现了强大的功能, 在输配电管理方面已经有一定的应用, 但它本质上是基于抽象符号的系统, 不能给人以自然界的原本感受。

三维 GIS 对客观世界的表达能给人以更真实的感受, 它以立体造型技术向用户展现地理空间现象, 不仅能够表达空间对象间的平面关系, 而且能描述和表达它们之间的垂向关系。但在二维模型转换为三维模型以及因特网上三维空间数据的标准化与互操作上还未完全实现^[8]。电力系统本质上是一个跨越广大区域的实时动态系统, 传统的 GIS 虽然能够提供电网所处的各种空间环境信息 (如山脉、道路、水域、建筑物、架空线路和通信线路等), 以便了解各种电力设备的环境特征, 但二维的表现手段在本质上是与电力系统在时空性上的四维本质所不同的, 而 Google Earth 卫图影像与现实世界更为贴近。

Google Earth 是一款强大的三维地图软件^[4], 它将卫星图片与全球卫星定位数据、地理信息系统、图形、视频流以及 3D 等技术结合在一起, 能实时地为用户提供三维空间信息和数据。同时由于 Google Earth 的开放性及通用性为它的广泛应用提供了广阔的前景。

目前, 在电力系统的勘测设计中 Google Earth 已

得到一定程度的应用^[5],在厂变工程的勘测设计项目中,可通过 Google Earth 构建的三维地面高程模型进行选址、方案比选,而不必到现场;也可对勘测任务书中的勘测范围、面积进行确认,不会因未到现场使得勘测范围太大或太小,有效地节省勘测工作量和勘测周期。在输电线路工程的勘测设计中,可利用 Google Earth 对线路路径做优化选线,避让各类规划区、军事区,有效提高线路路径方案的可行性,同时,也可利用 Google Earth 的三维地面高程模型剖切断面,满足投标和方案比选之用,此外也可用来绘制输电线路地理平面图^[6]。

2 关于 KML

KML 全称 Keyhole Markup Language 是一种 Google 公司开发的、基于 XML (eXtensible Markup Language 可扩展标记语言)语法和文件格式的、用来描述和保存地理信息如点、线、面、3D 模型等的编码规范,并在 Google Earth 客户端中显示。

KML 是一种用来在地图浏览器中展示地理数据的文件格式,使用一种基于标签(名称和属性)的语法格式来描述地理标注信息,KML 文件采用简单易理解的文本文件来描述地理信息结构化数据,可以使用简单的文本编辑程序或 XML 编辑程序进行读写和编辑。它支持 3D 图形,且 KML 文件中的图像可以选择随着视角高度的变化而缩放,甚至平躺,也可以选择随视角高度的变化而放缩,其实现过程较其他 3D 专业软件更容易。

在 Google Earth 中各种信息是通过不同的图层(layer)添加进去的。通过编写制作不同的数据图层,并在相应的图层上加载相应的数据信息,图层打开就会在相应的位置呈现所加载的电网数据。Google Earth 实现它的核心内容是 KML 语言。KML 被 Google Earth Viewer 显示的过程和 HTML 网页被浏览浏览器处理差不多,而且和 HTML 一样。通过 KML 建立各种不同的数据层,可以实现各种属性数据的分拣、归类、查询、标识。

KML 基本特点功能为^[7]:

指定一个地点的图标和标注来区分每一个地点;

为每一个视图指定明确的视角来创建不同的特写镜头;

使用指定到屏幕或地理位置的图片标注;

为特定种类的标注定义显示样式;

为标注指定基于简单 HTML 语法的描述,支持超链接和图片的显示;

使用目录对标注进行树形的分类管理,时间戳记的标注可以用来进行动态播放;

从本地或远程的网络地址动态的加载 KML 文件。

客观世界各种复杂的地理对象可以抽象为点、线、多边形(面)等几种空间几何类型。KML 通过 Geometry 抽象元素定义了几种基本的几何图形元素,提供了点(point)、线(LineString)、环(LinearRing)、多边形(polygon)、三维模型(Model)等基本几何图形,还可以通过 MultiGeometry 聚合不同形态的基本几何图形形成复合的几何图形从而定义复杂的几何实体,见图 1。

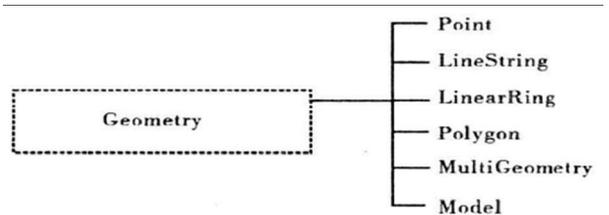


图 1 KML 几何对象

KML 提供的常用的地理元素如下。

(1) Coordinates 元素,即坐标序列元素,一个地理坐标对定义为:经度、纬度、高度。坐标序列的坐标对之间用以空格为分隔符。

(2) Point 元素,即点元素,用来编码几何点类,每一个 Point 元素包括一个 coordinates 元素,包括一个而且仅仅一个坐标对。

(3) LineString 元素,即折线元素,是由一序列的坐标对所组成的直线段连接起来的折线。

(4) LinearRing 元素,即环元素,是一个简单的线形闭合环,是由起点坐标与终点坐标相同的一序列的坐标对所组成的直线段连接起来的折线环。

(5) Polygon 元素,即多边形元素,是一个连接的平面,按面域之间的包含关系可分为无岛面域、有岛面域,其外边界由 outerBoundaryIs 定义,内边界由 innerBoundaryIs 定义。

(6) MultiGeometry 元素,即复合对象元素,作为包含任意几何元素(点、线、面等几何图形)的容器,一个 MultiGeometry 元素可以包含基本的几何元素如: Point LineString Polygon 等,甚至包括其他 MultiGeometry 元素。

3 电网信息可视化实现的结构

3.1 电网信息

电网可视化的信息主要包括 SCADA /EMS 的电网运行的一次信息以及电网根据分区信息所形成的电网运行状态的趋势信息。其中的分区可以根据预先设定的(主要按行政管辖界定),也可以是从图形上灵活设置电网的分区。电网的分区运行信息主要包括容载比分析、负荷水平分析、电力电量平衡分析、电压合格率分析、重载设备分析。这些分区统计信息均从系统角度为调度员提供电网运行状态的信息,是宏观掌握电网变化的重要信息,其定义如下。

容载比分析是指所有设备(主要包括线路、变压器、发电机、无功补偿设备)按类区分计算其当前运行容量与允许最大容量(即额定容量)之比。

负荷水平分析包括对所画区域负荷总量的累加,该负荷总量占全网负荷总量的百分比以及该负荷总量占电网历史最高负荷总量的百分比。

电力电量平衡分析是用来分析本区内的负荷总量、本区内发电机的装机容量、检修容量、备用容量、受阻容量、区间联络线的交换功率。它将揭示出这些数据之间既相互依存,又相互独立的内在关系。

电压合格率分析是统计本时段区内所有电压监视点的电压合格的个数占全网所监视的节点个数的比例。电压合格率一直是调度考核的重要指标,电网在线可视化预警调度系统^[3]中采用等高线等对其进行了表示,对越线或告警信息也通过报警界面给出了提示,而电压合格率分析则提供了非常灵活的统计信息。

重载设备分析是指扫描所有设备超过自定义重载容量参数的个数和设备名。这些设备的分析和统计将为后续的设备可利用小时、可靠性分析提供相关信息。具体的重载设备信息可放在预警界面给出、定义灵活。

自定义断面监视。电网中存在若干的区域之间的联络线和稳定监控的断面,传统的方式是调度员靠头脑记住这些值,而这个统计功能定制和灵活设定的使用将极大地解放调度员的劳动强度。

其中分区可以是对电网地理接线图任意指定分区,以图元为单位,利用图元、设备模型、分区信息之间的关联关系,更形象、直观、更符合面向对象的设计

思想,体现了“所见即所得”的特点。

这些分区信息是通过可视化数据平台融合了 SCADA /EMS、MIS 等系统的数据,在后台进行搜索、整理、判断、分析、综合后放入实时数据库中,以便于展示。这些分区信息将有助于调度员对全网运行的把握和控制。

3.2 可视化系统结构

基于 Google Earth 的电网信息可视化表达建立在已有的电网可视化系统之上^[3],利用三维建模工具生成电网设备的三维模型,包括输电线路、变电站、发电厂等,然后与电网可视化系统的实时数据相关联,通过 KML 文件实时刷新和显示电网的信息。

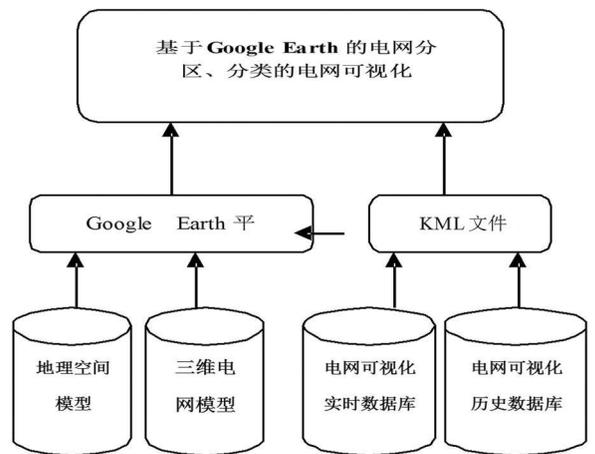


图 2 基于 Google Earth 的电网分区、分类指标可视化结构图

电网可视化实时数据库实际上是融合 SCADA /EMS、MIS 等的一个数据平台,它由物理隔离装置和调度自动化系统 I 区相隔离。使用 VC++ 开发环境来生成电网实时运行数据的 KML 文件,该文件能动态生成和刷新。利用 Google Earth 提供的三维建模工具 Sketch Up 生成电网的三维模型。

4 电网信息可视化实现的步骤

在 Google Earth 上实现的电网信息可视化的关键是如何将各类电网设备及数据映射至 Google Earth 平台并在其上展示分析,通过五步解决此难点。第一步是控制 Google Earth 以便自动下载区域内的高程数据;第二步是利用 API 中查询点的三维坐标的功能,按一定的距离,获取区域内各点的高程,存入文本文件;第三步是将提取的高程数据,采用专业软件

建立三维数字地面模型;第四步是利用 sketch up 建立电网模型的三维表达;第五步是将电网的实时信息用 KML 动态生成和刷新加载到 Google Earth 上进行显示。其数据加载如图 3 所示。

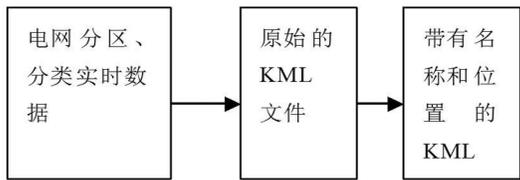


图 3 数据加载流程

在这个实现过程中需要对大量的电网模型的数据进行整理,包括按电压等级分类线路、对大量的发电厂、变电站、线路的位置参数的定位等,然后再形成需要的 KML 文件。在电网实时分区、分类数据统计结果的加载过程中其相关统计数据来自电网可视化实时数据库,从中读取数据后可根据内容指定展示的位置,形成 KML 文件。在这个数据的展示上,由于它和实时数据库连接在一起,因此该 KML 文件将随实时数据库而自动生成。

5 电网信息的电网可视化实例

已经在某省级电网上实现了 500 kV 主干电网数据的可视化展示以及分区信息的统计显示,该系统充分利用了 Google Earth 所提供的卫星照片和高效的三维渲染引擎,实现了三维场景的无缝漫游、图形显示的流畅等操作。利用了 Google Earth 集成的遥感、地理信息系统 (GIS) 和全球定位系统 (GPS) 三种高新技术的功能,从地理信息上反映出电网的运行状态,为电网的分区信息提供了新的展示手段。

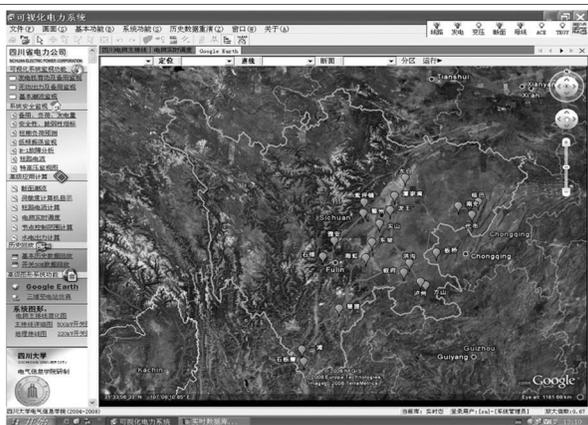


图 4 基于 GE 的电网实时数据的可视化展示

图 4 为在 Google Earth 上建立的电网模型,图 5

为在 Google Earth 上显示的电网分区统计信息。

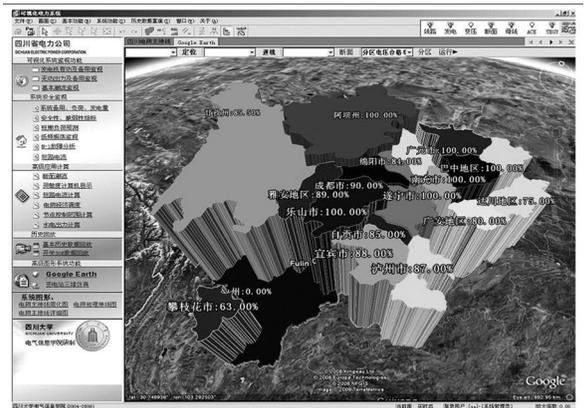


图 5 基于 GE 的电网分区信息的可视化展示

6 结论

在 Google Earth 上实现了电网可视化实时数据和 Google Earth 搜索和地理图形的有机结合。融入了电网设备信息、电网设备的地理空间信息、电网拓扑结构信息、电网运行状态信息,为调度员提供了更丰富的数据信息,对各种分区信息的统计更灵活方便,表达方式更直观。

参考文献

- [1] WEBER J D, OVERBYE T J. Voltage contours for power system visualization [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 404-409.
- [2] OVERBYE T J, WEBER J D. Visualization of power system data [C]// Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences Hawaii USA: IEEE, 2000, 1228-1234.
- [3] 刘俊勇,陈金海,沈晓东,等. 电网在线可视化预警调度系统 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 1-5.
- [4] <http://code.google.com>
- [5] 邓加娜,胡茂林,等. 数字地球及其在电力勘测设计中的应用 [J]. 岩土工程·勘测, 2006, (10): 48-52.
- [6] 邢文忠,罗嘉嘉. 利用 GPS 接收机和 Google Earth 软件制作输电线路地理平面图 [J]. 广东电力, 2008, 21(4): 47-48.
- [7] <http://earth.google.com>
- [8] 施加松,刘建忠. 3D GIS 技术研究发展综述 [J]. 测绘科学, 2005, 30(5): 117-119.

作者简介:

黄媛 (1974-), 女, 汉族, 四川洪雅人, 硕士, 研究方向为电力系统稳定和控制。

刘俊勇 (1963-), 男, 汉族, 四川成都人, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制、电力市场、灵活交流输电等。

(收稿日期: 2009-10-10)

巡线机器人的研究综述 及面向智能电网技术的一些探讨

佃松宜¹, 翁桃¹, 廖云杰², 陈波²

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

2 四川省电力公司超高压运行检修公司, 四川 成都 610041)

摘要: 在讨论高压/超高压/特高压架空输电线路常用巡检方法和巡线机器人的典型组成结构的基础上, 回顾和分析了国内外架空线巡线机器人的研究和应用现状。面向智能电网这一新的战略规划, 探讨了研究和开发满足高压/超高压/特高压应用领域巡线机器人应关注的一些关键技术。

关键词: 架空输电线路; 巡线机器人; 智能电网; 关键技术

Abstract: Based on the discussion on the inspection methods commonly used in HV/EHV/UHV overhead transmission lines and the typical configuration of inspection robots, the development and the present situation of mobile robots for overhead line inspection at home and abroad are reviewed and analyzed. Catering to the new strategic project of smart grid, some vital techniques concerned in inspection robots are investigated and developed so as to meet the requirements of HV/EHV/UHV overhead line inspection.

Key words: overhead transmission line; inspection robot; smart grid; vital technique

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0046-05

0 引言

采用高压/超高压/特高压 (high-voltage/extra high-voltage/ultra high-voltage 缩写为 HV/EHV/UHV) 架空电力线是长距离输配电的主要方式。电力线及杆塔附件长期暴露在野外, 因受到持续的机械张力、材料老化的影响而产生断股、磨损、腐蚀等损伤, 如不及时修复更换, 原本微小的破损和缺陷就可能扩大, 最终导致严重事故, 造成大面积的停电和巨大的经济损失。因此输电线路巡检是保证电力系统安全运行的一项基础工作, 目的就在于掌握线路运行状况及其周围环境的变化、发现线路设备的缺陷及线路安全的隐患。电力公司要定期对线路设备巡检, 及时发现早期损伤和缺陷并加以评估, 然后根据缺陷的轻重缓急, 以合理的费用和正确的优先顺序, 安排必要的维护和修复, 从而保证电力设施工作寿命最大化, 确保供电可靠性和电网运行安全。另一方面, 高压/超高压/特高压线路往往需要穿越各种复杂的地理环境, 如经过大面积大型水库、湖泊和崇山峻岭等, 这些都给电力输电线路的巡检带来极大困难^[1,2]。

传统的电力输电线路的巡检主要采用两种方法, 即地面人工目测法和直升飞机航测法^[3,4]。前者的巡检精度低, 劳动强度大, 且存在巡检盲区; 后者则存在飞行安全隐患且巡线费用昂贵。随着机器人技术的发展, 巡线机器人可以克服上述技术手段的各种缺陷, 因此, 巡线机器人已成为特种机器人领域的一个研究热点。下面在叙述巡线机器人的典型组成结构的基础上, 综合了国内外在该领域的研究现状, 探讨了面向智能电网这一新的战略规划、针对 HV/EHV/UHV 应用领域的巡线机器人研究和开发中的关键技术。

1 巡线机器人的典型组成结构

巡线机器人是一套复杂的机电一体化系统, 涉及机械结构、多传感器系统及信息融合、自动化、通信、电源技术等诸多领域, 主要由机械结构、控制系统、导航与定位、巡视扫描装置、电源与屏蔽封闭机箱和通信系统等几部分组成^[1,5]。

1.1 机械结构

机械结构是整个系统的基础, 要重量轻巧、结构简单, 同时必须提供在电力输电线路全行程行驶所需

的全部机械运动;能在高压输电线路以一定的速度平稳运行;能灵活地跨越输电线路上的防震锤、耐张线夹、悬垂线夹等典型障碍;能跨越跳线和转弯,具备一定的爬坡能力;能自带电源和各种探测、分析处理和记录仪器设备。

1.2 控制系统

由机器人执行机构上的位置检测传感器和各种力传感器构成的位置与力反馈单元、导航系统的伺服控制反馈单元、运动控制单元和任务规划与决策单元等组成,实现巡线机器人的自主控制与遥控操作,故障状态下能可靠自锁防止机器人摔落和事故发生。

1.3 导航与定位

导航就是规划巡线机器人的行走路径,一般包括全局路径规划和局部越障规划等。巡线机器人沿架空电力线路爬行,要跨越防震锤、悬垂绝缘子、线夹、杆塔等障碍,行走环境介于结构化和非结构化环境之间,因此导航问题主要为局部越障规划。局部越障规划就是利用环境传感器(如超声传感器、激光测距仪、视觉传感器等)提供机器人周围的局部环境信息,产生下一时刻机器人位姿信息。由于巡线机器人环境中障碍物反射面较小,基于 CCD 摄像机的视觉传感器更适合作为巡线机器人的环境传感器。另外,悬挂在导线上的机器人,由于风力作用和自身姿态调整时重心的偏移会产生摆动,加大了越障控制难度。

1.4 巡视扫描检测装置

合理的机械结构、可靠的控制系统以及精准的导航与定位是巡线机器人能够顺利完成巡检任务的基本前提条件。为了对杆塔、导线及避雷线、绝缘子、线路金具、线路周围环境等电气设备或环节进行巡视检查,必须给机器人配备巡视扫描检测系统,包括配备高清晰度可见光摄像机、红外热成像仪及二自由度扫描云台等仪器用于线路的外观、机械故障的扫描成像。

1.5 电源和屏蔽封闭机箱

为了减轻巡线机器人的重量,不能携带过重的电源装备,一般考虑用可充电蓄电池。巡线机器人在静止或运行状态下,由能实现机械开合运动的取电装置将高压线路单导线周围的磁场能转换为电能,并向蓄电池充电。应该采取防雨、防尘和电磁兼容一体化设计。为适应全天候的电力作业巡检任务,主控制器和各种检测部分应置于封闭机箱中。另外,为了在电气上达到电磁场的屏蔽,封闭机箱应与机械系统和导线

构成等电位体。

1.6 通信系统

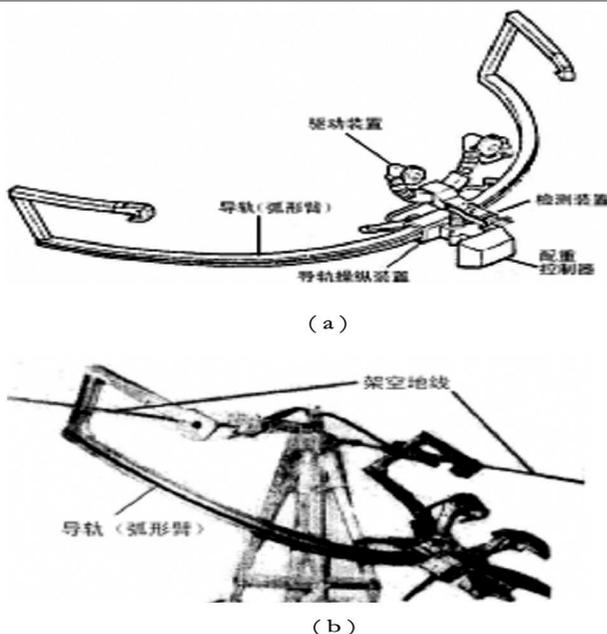
一般而言,巡线机器人的通信系统由数据无线收发装置和图像的无线发送装置两部分组成,还与地面遥控接收移动站构成数据的半双工无线数据传输和图像传输。

2 国内外研究现状

2.1 国外巡线机器人的研究现状

20 世纪 80 年代末,国际上开始关注和研制高压输电线路巡线机器人。日本、美国和加拿大等国相继开发了不同用途的巡线机器人,取得了一些成果。

1988 年东京电力公司的 Sawada 等人首先研制了具有初步自主越障能力的光纤复合架空地线巡检移动机器人^[6],如图 1 所示。该机器人利用一对驱动轮和一对夹持轮沿地线爬行,能跨越地线上防震锤、螺旋减震器等障碍物。当遇到线塔时,机器人采用仿人攀援机理,先展开携带的弧形手臂,手臂两端勾住线塔两侧的地线,构成一个导轨,然后机器人本体顺着导轨滑到线塔的另一侧;待机器人夹持轮抱紧线塔另一侧的地线后,将弧形手臂折叠收起,以备下次使用。因为没有安装外部环境感知传感器,因而适应性较差。而且导轨约 100 kg 机器人自身过重,对电池供电也有较高的要求。



(a)机器人的组成;(b)机器人在架空地线上的巡检情况

图 1 弧形手臂巡线机器人

美国 TRC 公司 1989 年研制了一台悬臂自治巡检机器人的样机系统^[7],如图 2 所示,能沿架空线路较长距离地爬行,可进行电晕损耗、绝缘子、结合点、压接头等视觉巡检任务,并将探测到的线路故障参数进行一定处理后传送给地面指挥人员。遇到杆塔时,只能利用手臂采用仿人攀援的方法从侧面越过,不能跨越如防震锤、悬垂线夹、耐张线夹和绝缘子等输电线路上的典型障碍。由日本 Sato 公司生产的输电线路损伤探测器也采用了单体小车结构(如图 3 所示)^[8],能在地面操作人员的遥控下,沿输电线路行走,利用车载探测仪器探测线路损伤程度及准确位置,将获取的数据和图片资料存储在数据记录器中。地面工作人员可回放复查,进一步确定损伤情况。

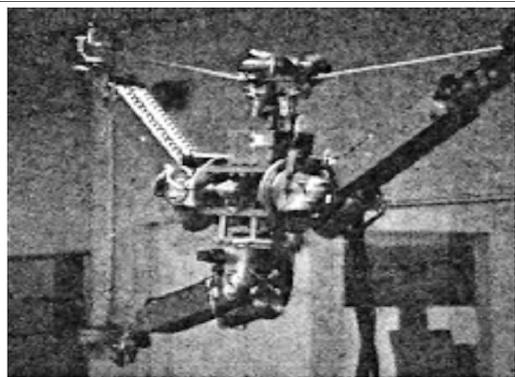


图 2 美国 TRC 公司悬臂自治巡检机器人样机

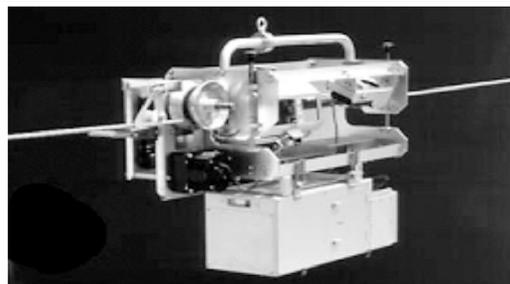


图 3 日本 Sato 公司生产的输电线路损伤探测器

加拿大魁北克水电研究院的研究人员 2000 年开始了 HQ LineRover 遥控小车的研制工作^[9],如图 4 所示,遥控小车起初用于电力传输线地线的除冰作业,逐步发展为用于线路巡检、维护等多用途移动平台。该移动小车驱动力大,能爬上 52° 的斜坡,通信距离可达 1 km。小车采用灵活的模块化结构,安装不同的工作头即可完成架空线视觉和红外检查、压接头状态评估、导线清污和除冰等带电作业。但是, HQ LineRover 无越障能力,只能在两杆塔间的输电线路工作。此外,日本的 Hideo Nakamura 等研制了蛇

形运动机器人^[10]。泰国 Peungsungwal 等人 2001 年设计的自给电巡线机器人^[11],采用电流互感器从爬行的输电线路获取感应电流作为机器人的工作电源,从而解决了巡线机器人长时间驱动的动力问题。

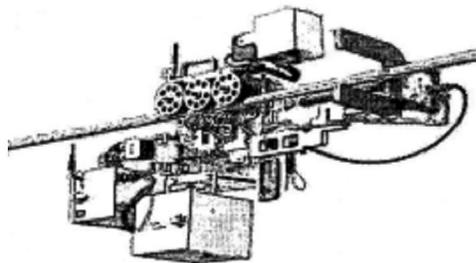


图 4 加拿大魁北克水电研究院的遥控小车

2.2 国内巡线机器人的研究现状

20 世纪 90 年代末,在“十五”国家高新技术发展计划(863 计划)的支持下,武汉大学、中科院自动化所、中科院沈阳自动化所等先后开展了巡线机器人的研制工作。武汉大学在 863 计划的支持下,与汉阳供电公司合作,针对 220 kV 单分裂相线,进行了巡线机器人关键技术的研究,在机器人越障机构、智能控制、移动导航、机器视觉技术、电能在线补给等方面取得了全面的突破^[5,12],如图 5 所示。

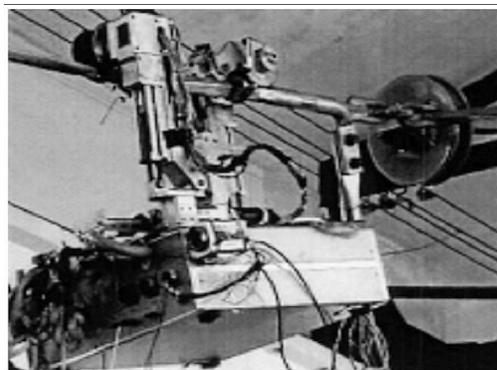


图 5 武汉大学研制的巡线机器人

在 863 计划以及国电东北电网有限公司的支持下,中国科学院沈阳自动化研究所开展了“沿 500 kV 地线巡检机器人”的研制^[13~15],如图 6 所示。课题组成成功地开发出由巡检机器人和地面移动基站组成的系统,并与锦州超高压局合作进行了现场带电巡检试验,完成了超高压实际环境下的巡检试验。该样机的成功研制,在系统电源、机器人本体、控制系统、检测设备和通讯设备、地面控制与数据后台处理等方面积累了丰富的经验。

“十五”期间,中科院自动化所开展了“110 kV 输电线路巡检机器人”的研究^[16~18],如图 7 所示。其研

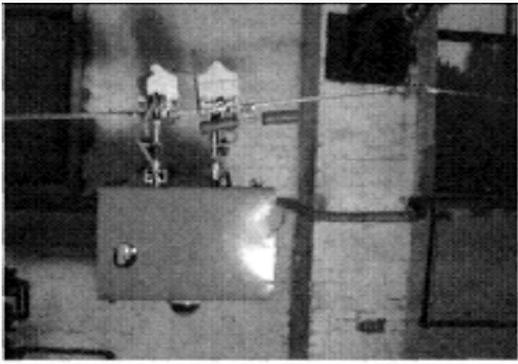


图 6 中科院沈阳自动化研究所沿 500 kV
地线巡检机器人样机

究成果主要表现在:一是设计了三臂悬挂式移动机器人机构;二是采用“基于知识库的自动控制”和“基于视觉的远程遥控主从控制”的混合控制系统,实现了典型障碍的越障;三是采用多层神经网络分类器,实现了实验室复杂环境下绝缘子开裂、破损视觉检查。

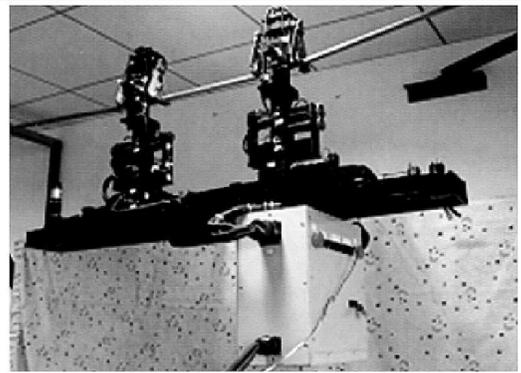


图 8 中科院自动化所的 110 kV 输电线路
二臂回转式巡检机器人

3 面向智能电网技术的探讨

3.1 智能电网技术

随着电力行业在能源、环境、安全运行、市场竞争、企业管理等方面面临的压力日益增大,以及材料、信息、电力电子等领域新技术蓬勃发展带来的驱动力,新一代电力网络“智能电网”应运而生,已成为全球各国电力行业发展的共同目标。2003年北美大停电后,美国电力行业决心利用信息技术对陈旧老化的电力设施进行彻底改造,开展智能电网研究,以期建设满足智能控制、智能管理、智能分析为特征的灵活应变的智能电网。2004年欧盟委员会启动了相关的研究与建设工作,提出在欧洲建设智能电网的定义。中国国家电网公司也于2009年初提出了“建设坚强智能电网”的总体发展目标和规划。在这一新的战略规划中,从确保电网安全稳定运行和可靠供电的战略高度,突出建立针对输配电领域电力设备状态数字化评价体系 and 具有自诊断功能的智能设备技术体系,实现包括电力输电线路在内的电力设备定期检修向状态检修转变的重要性。

3.2 面向智能电网的巡线机器人应具备的关键技术

针对目前高压 超高压 特高压线路巡检机器人存在的问题和研究现状,为了实现巡检机器人的小型化和提高智能化水平,归纳整理了如下的关键技术。

1) 巡检机器人体系结构的小型化技术与模块化技术。体系结构的小型化包括整体机械与驱动机构的小型化与轻量化,采用或研制各类小型先进传感器(如 MEMS 位置、速度、视觉传感器),开发小型化控制系统硬件模块和使用小型化工作电源等。另外,为

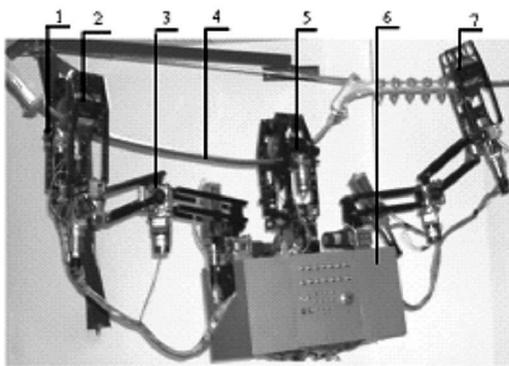


图 7 中科院自动化所的 110 kV 输电线路巡检机器人

目前,中科院自动化所复杂系统与智能科学重点实验室新研制的 110 kV 输电线路巡检机器人采用二臂回转式悬挂机构,如图 8 所示,增加了臂距调整机构、夹持轮抱线机构等,可实现旋转、俯仰等运动功能,爬坡能力强。机器人携带的检测用摄像机,可进行障碍物的检测和越障时的辅助指导工作,有效地克服了三臂机器人的不足,当然两臂机器人的行为规划复杂,增加了控制电路设计及运动控制的难度。

从国内外已取得的研究成果可以看出,国外无越障功能的架空电力线路巡线机器人技术较为成熟,已处于实用阶段。这类机器人一般需人工参与,只能完成两线塔之间电力线路的检查,作业范围小,自治程度低。自主巡线机器人能跨越线路附件、线塔等障碍物,可实施大范围、长时间的线路巡检作业,国内对具有自主越障功能的机器人研究投入力量大,取得了多项研究成果。

了适应高压、超高压、特高压输配电线路的不同特点,研制与开发不同的功能模块,以便于在通用的机器人平台上针对不同的应用搭载不同的功能模块实现巡线机器人通用化。

2)基于先进控制方法的导航定位与姿态控制技术。巡线机器人在输电线路应自主行走、跨越典型障碍,还需要在强电磁干扰、线路因风力产生不同程度的舞动情况下正常工作,这就要求巡线机器人具备高度有效的导航定位方法和强鲁棒性的行走姿态控制算法。如何在巡检机器人的导航定位与姿态控制中尝试应用一些先进控制方法(如智能控制、滑模变结构控制等)也是关键技术之一。

3)基于多传感器信息融合的线路损伤探测技术。巡检机器人运用多种传感器同时扫描电力线路,传感器信息融合技术以更高的辨别率和可靠性发现各种类型的早期故障并加以评估,为维护人员实时提供架空电力线设施的工作状态报告。

4)分布式多巡线机器人系统技术。多机器人有组织的协作,使巡线机器人产生高性能的智能行为,通过群体间的知识共享和交换,可进一步提高线路故障的探测灵敏度和可靠性。

5)基于新的互联协议的巡线机器人。随着智能电网的提出,电网的信息化逐渐成为一种共识。以 IEEE P2030 和 IEEE 1547 标准为代表的新一代电网设备互联标准日益受到重视^[19]。这就要求巡线机器人必须具备基于这些新标准互连到智能电网信息网络的能力,快速高效地与其他设备通信,实现网络化巡线机器人。

5 结论与展望

从国内外研究现状来看,迄今为止国内外对架空输电线路巡线机器人的研究大都还处于实验室研制或改进阶段,尚无成熟的产品应用于实际输电线路的巡检作业。虽然存在诸多困难,但研制智能化水平高、自身重量轻、体积小、运行稳定可靠的巡线机器人仍是今后 HV/EHV/UHV 输电线路巡检技术的重点研究方向之一。前面简要概括巡线机器人的研究背景及其典型组成结构,在调查和分析国际国内在该领域最新研究成果的基础之上,结合智能电网的概念,探讨了在中国坚强智能电网总体建设规划中研制、开发巡线机器人应关注的一些关键技术。

参考文献

- [1] Jaka K, Franjo B, et al. A survey of mobile robots for distribution power line inspection [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, in press
- [2] 张运楚, 梁自泽, 谭民. 架空电力线路巡线机器人的研究综述 [J]. 机器人, 2004, 26(5): 467-473.
- [3] Jaensch G, Hoffmann H, Markees A. Locating defects in high voltage transmission lines [C]. Proceedings of the 1998 IEEE 8th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 1998, 179-186.
- [4] Whitworth C C, Duller A W G, Jones D I, et al. Aerial video inspection of overhead power lines [J]. Power Engineering Journal, 2001, 15(1): 25-32.
- [5] 吴功平, 肖晓辉, 肖华, 等. 架空高压输电线路巡线机器人样机研制 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 90-93, 107.
- [6] Sawada J, Kusumoto K, Maikawa Y, et al. A mobile robot for inspection of power transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(1): 309-315.
- [7] Robots repair and examine live lines in sever condition [J]. Electrical World, 1989, (5): 71-72.
- [8] Sato Kensetsu Kogyo Co., Ltd. Automatic Overhead Power Transmission Line Damage Detector Website. (<http://www.sato-k.co.jp/technology/sonshou-e.htm>).
- [9] Montambault S, Pouliot N. The HQ LineRover: Contributing to innovation in transmission line maintenance [C]. Proceedings of 2003 IEEE ESMO - IEEE 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 2003, (1): 33-40.
- [10] Nakamura H, Shimada T, Kobayashi H. An inspection robot for feeder cables - snake like motion control [C]. Proceedings of the 1992 International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, 1992, (1): 849-852.
- [11] Peungsungwal S, Pungsiri B, Channongthai K, et al. Autonomous robot for a power transmission line inspection [C]. The 2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Sydney, 2001, (1): 121-124.
- [12] 伍洲, 方彦军. 高压巡线机器人电磁导航系统研究与设计 [J]. 高压电技术, 2008, 34(9): 1959-1963.

(下转第 60 页)



图 9 虚拟现实变电站展示与电网可视化调度系统

“军事集团”进行分类,确定人员与设备编制,并进行相应的专业训练;其对应的救援设备也效仿军队作战,利用集装箱进行“集成化”;针对不同的灾害因素,编制不同的应急预案和战术,使应急救援的目标更明确、效率更高。这种“集团化”、“集成化”的准军事应急管理将大大提高应急处置的效率,增强队伍的应急作战能力。

6 结 语

四川省电力公司充分总结抗冰保电、抗震救灾的应急抢险经验,结合四川电网实际情况,利用先进通信手段和特种装备,建设了“天地空一体化”立体应急通信网。目前应急培训基地与通信自动化中心已联合进行多次演练,全面展示出了“一体化”立体应急通信网络高效、可靠的通信能力,为电力系统应急体系开创了国内领先的管理和建设模式。在 2009 年 10 月举行的第一届中国国际电力安全发展暨应急管理论坛中,四川省电力公司应急体系建设的汇报得到了电力行业专家广泛的认可。四川省电力公司也将积极参与电力行业应急管理的行业规范、标准的制

订,努力成为电力行业安全生产、应急管理的领跑者。

参考文献

- [1] 杨洪. 关于电力应急通信体系建设的几点建议 [J]. 电力系统通信, 2009, 30(6): 6-8.
- [2] 元翔. 贵州电力应急通信网建设思路探讨 [J]. 电力系统通信, 2009, 30(2): 37-40.
- [3] 谷坊祝. 卫星通信技术在电力应急通信中的应用 [J]. 电力系统通信, 2009, 30(6): 29-32.
- [4] 崔燕明, 刘孝先, 吴维农, 等. 电力应急通信指挥系统的建设方案 [J]. 电力系统通信, 2009, 30(6): 33-36.
- [5] 四川新闻网. 二郎山电网“告急”, 四川电力实施立体应急战. <http://scnews.newsse.org/system/2009/01/23/011501514.shtml>
- [6] 薛禹胜. 从更广的视角看电力系统稳定性 [C]. 第一届中国国际电力安全发展暨应急管理论坛. 2009, 10.
- [7] 卢强. 智能电力调度控制系统与电力系统安全运行 [C]. 第一届中国国际电力安全发展暨应急管理论坛. 2009, 10.
- [8] 刘俊勇, 陈金海, 沈晓东, 等. 电网在线可视化预警调度系统 [J]. 电力自动化设备, 2008, (1): 1-5.

(收稿日期: 2009-10-10)

(上接第 51 页)

- [13] 王鲁单, 王洪光, 等. 一种输电线路巡检机器人控制系统的设计与实现 [J]. 机器人, 2007, 29(1): 7-11.
- [14] 王鲁单, 王洪光, 等. 基于视觉伺服的输电线路巡检机器人抓线控制 [J]. 机器人, 2007, 29(5): 451-455.
- [15] 付双飞, 王洪光, 等. 超高压输电线路巡检机器人越障控制问题的研究 [J]. 机器人, 2005, 27(4): 341-346.
- [16] 周风余, 吴爱国. 架空输电线路自动巡线机器人 [J]. 农村电气化, 2008, (2): 59-60.
- [17] 周风余, 吴爱国, 李贻斌. 110kV 输电线路巡线机器人控制方法及实现 [J]. 山东大学学报, 2007, 37

(6): 31-35.

- [18] 周风余, 吴爱国, 李贻斌, 等. 高压架空输电线路自动巡线机器人的研制 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 89-91.
- [19] Richard D. Cherry T. Standards for the Smart Grid [C]. IEEE Conference on Global Sustainable Energy Infrastructure 2008, 1-7.

作者简介:

佃松宜 (1973-), 男, 湖北松滋人, 博士, 副教授, 主要从事精密运动控制、智能机器人等方面的教学和科研工作。

翁桃 (1987-), 男, 四川简阳人, 硕士研究生, 研究方向为检测技术与自动化装置。

(收稿日期: 2009-11-04)

数字化变电站网络选型设计

罗小东¹, 郑旭², 舒勤¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016)

摘要: 遵循 IEC 61850 相关规则, 对数字化变电站的基本网络拓扑结构的网络可靠性、延时性进行了分析, 为中大型数字化变电站网络结构选型提供了借鉴。

关键词: IEC 61850; GOOSE; NS-2; 数字化变电站; 网络拓扑

Abstract: Following the relevant principles of IEC 61850, the reliability and the time delay characteristics of network topology of digital substation are analyzed, which provides a method to select the network structure for the medium and large digital substation.

Key words: IEC 61850; GOOSE; NS-2; digital substation; network topology

中图分类号: TM1269 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0051-03

数字化变电站是建立在统一通信规约 IEC 61850 基础上, 通过对二次设备、非常规互感器、智能一次设备的网络化连接, 具有良好互操作性的自动化变电站^[1]。基于 IEC 61850 标准的通信网络是新一代的变电站网络通信体系, 采用面向对象建模技术和独立于网络结构的抽象通信服务接口, 可以在不同厂家的设备之间实现无缝连接, 是数字化变电站的关键技术之一。以下探讨了中大型 220 kV 数字化变电站 GOOSE 网络结构选型及其稳定性、实时性、可靠性等问题, 以为 220 kV 数字化变电站网络建设、设计选型提供借鉴。

1 数字化变电站通信网络的要求

1.1 功能要求

在 IEC 61850 中, 数字化变电站可以抽象为一个分层的网络体系。通过面向对象的统一建模, 每一个变电站对象 (包括所有一次、二次设备) 可以分解为一个或多个逻辑节点 (例如断路器, 在 IEC 61850 中就被视为一个逻辑节点)。变电站的功能 (例如断路器操作) 是通过不同层次的多个逻辑节点共同完成的。逻辑节点间的信息交互是通过网络来完成的, 也就是说数字化变电站的各种功能应用都依赖于网络。通信网络必须具备传输各种节点信息的功能, 包括站控层的 MMS、过程层的 GOOSE、采样值等。

1.2 性能要求

通信网络的性能要求主要体现在以下几个方面^[2]。

1.2.1 快速的实时响应能力

测量数据、保护信号、控制命令等都要求实时传送。特别是出现故障时要求信息能在站内通信网络上快速传送, 保证严格的时限要求。实时性要求有以下 3 个方面: ① 传输速度快, 指单位时间内传输的信息多。② 响应时间短, 指事件发生时, 传输到网络上及执行器接收到该信息马上执行所需的时间。响应时间由 4 个方面的因素决定: 执行器控制中断的能力; 信息在通信协议的应用层与物理层之间的传输时间; 等待网络空闲的时间; 避免信息在网络上碰撞的时间, 这个时间对大多数通信协议是一个随机数。③ 巡回时间短, 指系统与所有通信对象都至少完成一次通信所需要的时间。

1.2.2 高可靠性

网络的可靠性表示网络连续无故障工作的能力, 主要从网络设备、链路、网络拓扑结构等方面来保证。由于电力生产的连续性和重要性, 站内通信网络的可靠性是第一位的, 应避免一个装置损坏导致站内通信中断。

① 作为链路层, 保证网络的可靠性主要是向网络提供可靠的数据传送基本服务, 使用户免去对丢失信息、干扰信息及顺序不正确的担心, 将物理层的可能出错的物理连接改造成为逻辑上无差错的数据链路, 使之对网络层表现为无差错的线路。

② 网络拓扑结构对确保网络可靠性有很重要的意义, 可根据需要由星型、总线型和环型网络结构派

生出负荷可靠性需要的网络结构。同时,也可以采用网络冗余的手段,对比较重要的网络使用双网结构。

③ 以太网接口一般有两种:一种是 BASE T 双绞铜线;一种是 BASE F 光缆。一般场合基本选择光缆,主要是考虑其信号传输能力强、抗干扰能力强等因素;有时选择铜缆主要基于费用少、接口简单等考虑因素。

1.2.3 良好的开放性

站内通信网络为调度自动化的一个子系统,除了保证站内 IED 设备互连、便于扩展外,它还应服从电力调度自动化的总体设计,硬件接口应满足国际标准,选用国际标准的通信协议,方便用户的系统集成。

1.2.4 支持优先级传输

数据有轻重缓急之分,重要的数据须优先于其他数据传输,要求支持优先级调度,以提高时间紧迫性任务的信息传输可确定性。

1.2.5 良好的电磁兼容性

变电站是一个具有强电磁干扰的环境,存在电源、雷击、跳闸等强电磁干扰,通信环境恶劣,数据通信网络必须注意采取相应措施消除这些干扰的影响。

2 数字化变电站组网原则

数字化变电站尤其是中大型数字化变电站的组网原则一般如下:①站控层网络和过程层网络分别独立组网,物理隔离②站控层网络双网冗余配置;③过程层网络分为采样值网络和 GOOSE 网,IEC 分别独立组网,物理隔离;④采样值网络根据保护装置要求,采用 IEC 61850-9-1 或 IEC 60044-8(单向多路点对点);或者采用 IEC 61850-9-2 通过交换机组网;⑤ GOOSE 网按电压等级分为 220 kV GOOSE 网和 110 kV GOOSE 网,分别独立组网,物理隔离;⑥ 220 kV GOOSE 网和 110 kV GOOSE 网均双网冗余配置;⑦ GOOSE 网不按单间隔配置,采用多间隔连接于一台交换机的方式,同一间隔的设备(网络节点)应连接于一台交换机上。

3 数字化变电站网络拓扑的基本结构

根据数字化变电站组网原则,数字化变电站的 GOOSE 网拓扑的基本结构主要由星型和环型拓扑结构,示意图如图 1、图 2 所示。

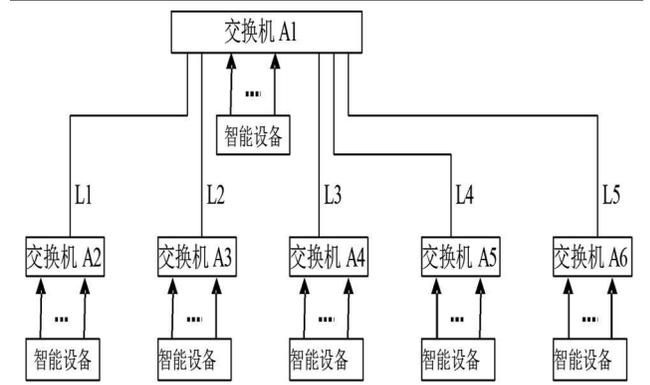


图 1 星型拓扑结构示意图

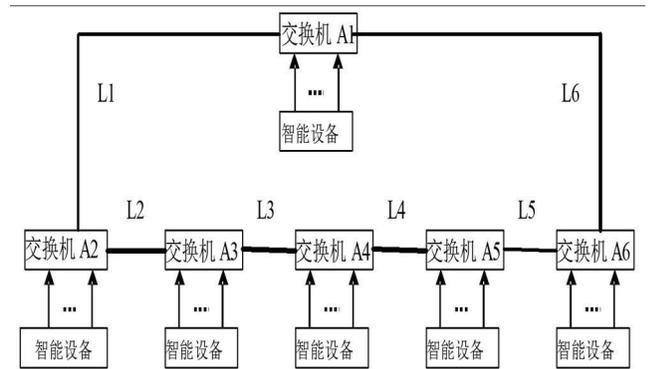


图 2 环型拓扑结构示意图

4 可靠性分析

网络可靠性表示网络连续无故障工作的能力,其判断依据主要有:网络的任意两节点之间至少存在一条可通信的链路。通信网络的可靠性是一项非常重要的指标,它直接决定了数字化变电站系统的可用性。而通信网络的可靠性主要需要从网络设备、链路、网络拓扑结构等方面来保证。由于网络结构复杂多变,通信网络的可靠性分析一直是个棘手的问题。贝叶斯分析法是常用的网络可靠性分析方法。

贝叶斯网络方法^[3]是基于概率、图论的一种不确定性表达和推理模型。贝叶斯网络不但能进行前向推理,由原因导出结果,更重要的是进行后向推理,也就是由结果分析原因。其推理是根据贝叶斯网络模型和已知的网络节点信息子集,利用贝叶斯定理中条件概率的计算方法,得出需要决策节点子集的条件分布概率,然后把结果用于决策分析。利用后验概率往往可以得出一些非常有用的结论。其数学描述为,对于一个论域 $A = \{a_1 \cdots a_n\}$, $a_1, a_2 \cdots a_n$ 对应于贝叶斯网络中各节点。

根据贝叶斯定理, 有条件概率: $P(a_i/A) = \frac{P(A/a_i)P(a_i)}{P(A)}$, $P(a_i/A)$ 表示, 当 A 已经发生时, a_i 发生的概率。

5 延时分析

网络延时^[4]定义为一帧报文从发送者到接收者的网络传输花费的全部时间。网络延时由以下 4 部分组成。

(1) 发送延时 (T_0): 定义为交换机发送节点在通信链路上从发送帧的第 1 个比特开始至发送完最后一个比特所需的时间。这个延时与被发送的帧的大小成正比, 与速率成反比。

$$T_0 = FS/BR \quad (1)$$

这里 T_0 是发送延时, FS 是以位计算的帧大小, BR 是以位/秒为单位计算的速率。

(2) 交换机制延时 (T_1): 以太网交换机的内部是交换机制。交换机制由复杂的硬件电路执行存储转发引擎、MAC 地址表、VLAN、CoS 及其他的功能, 执行这些逻辑功能便产生了延时。各个厂商交换机的交换机制延时各不相同, 同一厂商的产品基本相同。交换机制延时一般为几个 μs 到十几个 μs 。

(3) 线路传输延时 (T_2): 数据位在光纤链路上的传输速度大约是光速 (3×10^8 m/s) 的 $2/3$ 。当部署很长距离以太网线路时, 这个延时值得注意。对于 $100 \text{ km} / 1 \text{ km} / 100 \text{ m}$ 的链路延时可以计算出:

$$T_2(100 \text{ km}) = 1 \times 10^5 / (2/3 \times 3 \times 10^8) \approx 500 \mu s$$

$$T_2(1 \text{ km}) = 1 \times 10^3 / (2/3 \times 3 \times 10^8) \approx 5 \mu s$$

$$T_2(100 \text{ m}) = 1 \times 10^2 / (2/3 \times 3 \times 10^8) \approx 0.5 \mu s \quad (2)$$

对于局域网中的传输距离而言, 这个延时和其他延时相比很小, 可以忽略不计。

(4) 帧排队延时 (T_3): 帧冲突在广播式以太网中存在, 以太网交换机用队列结合存储转发机制来消除共享式以太网中存在的帧冲突问题。而队列给延时引入了非确定性, 原因归结于队列长度、网络负荷等因素。为了减轻重要数据帧的排队延时, 引入了数据帧优先级机制, 然而并不能保证服务的质量。

以上 4 种延时中, 前 3 种延时由网络本身的硬件和软件决定, 只有排队延时具有不确定性。要分析以

以太网延时, 就必须分析出影响排队延时的因素, 通过减小排队延时将有利于提高整个网络系统的实时性能^[5]。影响以太网通信延时的主要因素是节点数目和通信速率, 也就是说网络负荷是造成通信延时的主要原因。在电力系统中站点之间传输的主要是短信息帧, 当节点数目较少时, 通信延时很小, 随着节点数目的增加, 延时也随之增大; 同时, 在数据吞吐量相同的情况下, 通信速率的提高意味着网络负荷的减轻和网络延时的减小, 从而改善以太网的实时性能。

6 总结

对这两种网络结构可靠性、网络延时分析比较见表 1。

表 1 网络拓扑结构比较

网络结构	可靠性	网络延时
星型	较低	最小
环型	较高	较大

环型拓扑结构由于网络自愈性、可靠性比星型拓扑结构好。但通过网络双重化, 可以大大提高网络可靠性, 满足数字化变电站要求; GOOSE 网络对实时性的要求是非常严格的, 在网络节点数量较多的情况下星型网络的实时性要优于环型; 同时由于结构上的原因, 环型网络容易产生网络风暴。经过综合考虑, 推荐双星型拓扑结构作为数字化变电站 GOOSE 网的拓扑结构。

参考文献

- [1] 高翔. 数字化变电站技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 林达. 基于 IEC 61850 标准的变电站通信体系研究 [D]. 华北电力大学, 2005.
- [3] 刘从洪. 基于 IEC 61850 的数字化变电站通信研究 [D]. 西南交通大学, 2008.
- [4] 徐成斌, 孙一民. 数字化变电站过程层 GOOSE 通信方案 [J]. 电力系统自动化, 2007, (10): 91-94.
- [5] 张婷. 数字化变电站的通信研究 [J]. 武汉科技学院学报, 2008, (12): 34-36.

作者简介:

罗小东, 四川大学电气信息学院硕士研究生。

郑旭, 四川电力设计咨询有限责任公司工程师。

舒勤, 四川大学电气信息学院、四川省智能电网实验室教授。
(收稿日期: 2009-11-10)

四川省电力公司应急通信建设管理概况及思考

邓 创, 肖行谏

(四川省电力公司通信自动化中心, 四川 成都 610041)

摘 要:近年来地震和冰雪等重大自然灾害对电网安全运行提出了新的挑战,各电网公司都开始大力建设应急抢险与应急通信系统,保障灾害发生时的指挥调度和通信通畅。介绍了四川省电力公司在总结 2008 年抗冰保电和抗震救灾的宝贵经验上,充分利用卫星、短波、无人航空器、近程接入通信等高科技、特种装备建立起的全国电力系统第一个天地空立体综合电力应急通信网。四川电力全国领先的应急通信网将为应急救援提供广泛、全面地通信保障,为国家电网应急体系的建设提供了宝贵独特的参考经验。

关键词:电力应急通信;天地空一体化;特种装备;可视化预警系统

Abstract: The power grids are confronting new challenges after 2008 snow-ice strike and Sichuan 5.12 earthquake. The application of Sichuan power emergency management and telecommunication system based on the experiences of emergent rescues in last year's earthquake is introduced. The system consists of VSAT communications, short-wave communications, wireless unmanned air vehicle surveillances, TETRA, wireless video transmission and wireless LAN, etc., formulating an integrated ground-air-space telecommunication system dedicated to power system. Most of the equipment are novel applications in power industry. Combined with the novel management philosophies, Sichuan Electric Power Corporation provides the significant and unique experiences for the construction of emergency management system of State Grid.

Key words: power systems emergency telecommunication; integrated ground-air-space; special equipment; visual warning system

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0054-06

2008 年来发生的冰灾、地震等自然灾害给电力应急通信提出了新课题,灾情勘察、指挥救援、灾后重建均给应急通信提出了挑战。结合电网设施所处位置存在地形复杂、自然条件恶劣等现状,电力应急通信系统的建设成为必要和紧迫的任务。2008—2009 年,各地电网均兴起了电力应急通信建设的高潮^[1~4]。四川在冰雪灾害和地震灾害中受灾最为严重,也经历了严酷的抗震救灾任务的考验,在应急通信和指挥上获得了宝贵经验,并于 2008 年底建立起了应急指挥中心和全国电力系统第一个应急培训基地,利用先进的应急管理理念,采用大量高科技特种装备,在电力系统应急体系的建设上走到了全国的前列,以应急管理为重要支撑体系之一为电网公司建设坚强智能电网的战略决策贡献了独特的力量。

kV 变电站 15 座。包括配网线路在内 10 kV 及其以上线路 2751 条停运,其中 500 kV 线路 4 条,220 kV 线路 59 条。四川地震带大多分布在东经 104°以西地区,随着川西地区水电开发,该地区将建设许多大型、中型和小型水电站群并通过高压输电线路输出,未来这些地震带一旦发生地震极可能导致位于该区域的电网设施损毁。

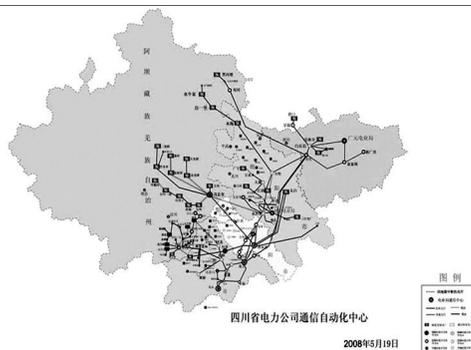


图 1 四川电力通信地震受灾分布图

四川地区也是覆冰最严重的地区,川西地区重覆冰可能经常遇到,且是水电送出、西电东送的主通道。一旦冰雪灾害对电网造成破坏,轻者造成某些通信电路的中断,重者造成通信网络的瘫痪。

1 四川电力通信 2009 受灾状况

2009 年 5.12 地震共造成四川电网 35 kV 及其以上变电站停运 171 座,其中 500 kV 变电站 1 座,220

本文部分内容于 2009 年 10 月第一届中国国际电力安全发展与应急管理论坛上公开演讲并获科技组征文一等奖(省部级)

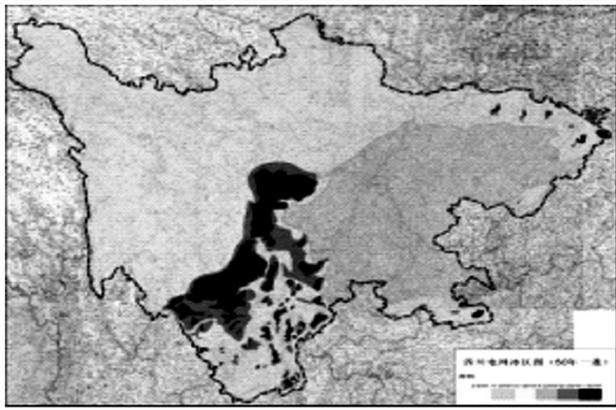


图 2 四川重覆冰区分布图

2 四川电力应急体系建设概况

为应对严重的自然灾害,四川省电力公司于 5.12 地震后立即着手应急体系建设,应急通信系统、应急培训基地相继立项建设,截至目前已演练数十次。

四川电力应急通信建设总体思路以“打造天地空立体应急通信网”为骨干,远程和近程通信相结合,高速率通信与高可靠通信相结合,结合应急特种设备构建应急通信多业务平台,服务应急指挥和电力生产建设。

应急通信具有突发性强、地域分布广阔、机动灵活、受自然或人为条件因素影响大等特点,因此有必

要采取多种通信方式配合共同发挥作用。四川电力天地空应急通信骨干网建设主要由卫星通信、短波通信、空中飞行器无线链路、本地集群、无线单兵图传、无线局域网构成,可以实现语音、视频、数据的传输。

2.1 卫星通信

卫星通信是四川电力应急通信网络“天地”高速通信的骨干。四川电力采用适用于专网的 VSAT 卫星通信系统,采用 TDMA 或 SCPC 制式和完全的数字化 IP 通信协议,由中心站、车载站和便携站组成,根据业务的具体需求,采用星状网和网状网混合组网,确保任两站点之间均能通信。中心站是全网的业务网管中心,设在四川省调应急指挥中心,具有调度卫星链路带宽、资源等作用。便携站承担网络的远端话音、数据等业务的接入功能,并且轻便易于携带;车载站将语音、视频、数据通信接入集成化并通过卫星传回至主站,可作为前线指挥部。便携站主要设置处于灾害易发点的重要厂站和调度中心。第一期应急通信系统共配置 8 个远端卫星小站,包括省调、应急培训基地车载站各 1 个,映秀湾电厂、备用调度中心、应急培训基地各 1 个便携站,其余 3 个便携站部署在成都作为应急机动。

按上述设置原则配置的 VSAT 卫星通信系统组成了应急通信系统中“天地”通信的骨干网络,具备高速率、高质量传输等特点。

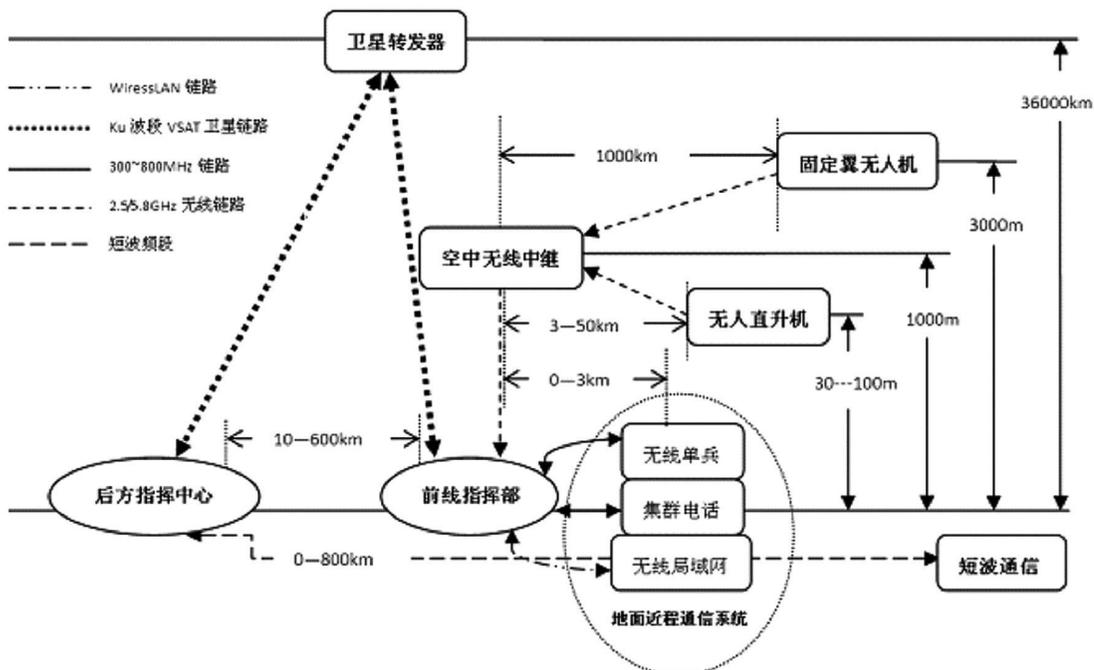


图 3 天地空立体应急通信系统示意图

2.2 短波通信

短波通信是四川电力应急通信“天地”通信骨干的重要组成部分。短波依靠地球电离层反射进行通信,不受地形和距离限制,能覆盖山区、戈壁等地形复杂的地区,特别适于四川地形。短波运行成本低,是唯一不受网络枢纽和有源中继体制约的远程通信手段,其抗毁能力和自主通信能力优于其他任何通信手段。

短波通信配置原则为:作为卫星通信的补充通信手段在暂未配置卫星通信的地区配置短波基地台,保障基本应急通信能力。根据四川的地理位置,短波覆盖范围以成都为圆心,覆盖半径 600 km。在省调设置大功率广播电台,在绵阳、德阳、阿坝等 14 个地调设置便携短波电台。

2.3 空中无线通信

空中无线通信是四川电力“空地”通信的组成部分。空中特种设备主要包括固定翼飞行器、无人直升机、动力三角翼、无人飞艇等多种低空飞行器设备,在高度 500~3 000 m 空中进行航行拍摄,并通过无线数据链路(超短波或微波频段模拟视频)将实时视频回传至地面。若传输距离太远或存在阻挡,还可以使用空中无线中继实现无线信号的转发,例如使用遥控飞艇、热气球搭载无线信号转发器上升 1 000 m 高度悬停,可实现 50 km 覆盖半径内的视频实时传输。该系统构成了四川电力“空地”通信网,形成以灾害点为中心半径覆盖 50 km 的视频通信。

2.4 集群电话、单兵图传与无线局域网

集群电话、单兵图传与无线局域网是“地地”近程接入通信的组成部分。集群电话可以实现 5 km 内的语音对讲、广播,单兵图传可实现 3 km 内高清晰视频图像和语音的传送,无线局域网可实现周边 2 km 内数据通信的无线接入。这些通信设备集成在应急通信车上,可以在通信车机动范围内的任意地点实现以通信车为指挥中心,半径 5 km 的应急通信作业点,满足周边语音、视频和数据的接入。

3 四川电力应急通信系统的特点

有别于传统的简单应急通信手段,四川电力应急通信系统针对了电力需求构建了“天地空一体”的立体网状应急通信系统,覆盖半径具备 1~3 km、50 km、600 km、1 000 km 多种层次,实现语音、视频、数

据多种业务,全面提供灾害现场信息并形成调度指挥能力。具体特点如下。

3.1 远程通信与近程通信相结合

卫星通信是应急通信的骨干网,也是实现远程通信的首要手段,覆盖范围广、数据速率高、误码率低,可以在灾害现场和指挥中心建立高速通信。同时,灾害现场的近程接入通信,如集群电话、单兵图传、无线数据传输、各种航空飞行器的航拍画面等,也可以通过现场应急通信车转发至后方应急指挥中心,可以实现前线、后方同时具备接收现场信息的能力,便于前后方协同应急指挥。这样可形成“后方应急指挥中心—前线指挥部—第一现场”的三级应急指挥与作战层次。

3.2 高速率与高可靠通信系统相结合

卫星通信虽有上述优点,但需要借助国外的卫星转发器资源,可能存在资源不足、寿命到期、卫星故障、国际政治因素等风险,无法保障极端条件下的基本通信。短波通信作为卫星通信网络的补充弥补了卫星通信这一缺陷。短波通信无需任何中继和运营商,是极端条件下进行长距离通信的唯一手段。因此虽然短波通信速率较低、质量较差,但其不受外界破坏的特点使其具备高抗毁能力,结合卫星通信则大大加强了应急通信网络的可靠性。

3.3 特种设备在应急通信中的应用

航空器可在高空中对地面电力设施情况进行航拍勘察和物资投放,大大提高了电网的地理、空间等立体信息的搜集工作,为救灾提供极为宝贵的资料。四川电力是引进的这批特种航空设备的电力系统首家单位,经应急培训基地半年来的演练,已能熟练进行特种作业,为特种航空设备在电力系统的应用提供了第一手的宝贵经验。



图 4 载人动力三角翼

动力三角翼:载人飞行器,最高时速 120 km/h

用于在发生重大自然灾害人员不能通过地面及时到达,且天气状况良好的情况下,利用动力三角翼机动力灵活,留空时间长、低空低速的飞行特点搭载摄像系统进行空中侦查、探测,并将视频通过无线链路实时传回地面。



图 5 搭载稳定摄像云台的无人直升机

无人直升机:用于在发生重大自然灾害人员不能通过地面及时到达,且天气状况相对恶劣,载人飞行器不能完全保障人员安全的情况下,通过无人直升机搭载的摄像系统进行空中侦查、探测及搭载相关通讯设备保障前方人员同后方指挥中心的通讯畅通。无人直升机系统依靠惯性导航系统及 GPS 定位,通过地面站精确设定飞行航线,通过稳定云台搭载的高清摄像或红外热成像仪,可近距离地观测输电线路、变电站、铁塔及相关金具、附件。



图 6 无人遥控飞艇

无人遥控飞艇:用于重大自然灾害通讯中断的情况下,搭载相关通讯中继设备来保障前方人员同后方指挥中心通讯的畅通。遥控飞艇中继通信是一种非常有效的空中平台中继通信方式,中继飞行高度约 1 000 m 左右,覆盖范围可达到方圆 200 km。利用遥控飞艇的通信中继,可起到灾害现场信息通报和无人直升机系统的中继转发平台的作用,用以解决其他通信手段难以完成的山区快速指挥通信问题。

4 四川电力应急通信系统应用场景分析

四川电力应急通信系统的战略定位不仅限于灾害发生时的应急通信,更要在日常的电力生产建设方面发挥作用,尽力提高设备利用率,全面提高电网建设效率和科技水平。典型的应用场景如下。

4.1 针对突发自然灾害的应急通信

2009年初针对“二郎山 220 kV 输电线路覆冰塔杆倒塌”为预想事故演习,应急通信车建立现场指挥中心,并与后方指挥中心以卫星链路传输语音、视频、现场照片,现场集群电话进行抢险指挥,单兵系统进行近程视频监控,无人机或飞艇在 100 m 高空航拍输电线路整体状况。所有视频信息通过无线中继回传至卫星通信车并通过卫星链路回传至后方指挥中心,实现了天地空一体的立体应急通信体系,大大提高指挥效率^[5]。

4.2 针对电厂生产备用接入的通信系统

四川地区水电站众多、所处位置偏僻,很多水电站只能通过单路由接入电网,极不可靠。利用应急通信系统的卫星通信骨干网,在偏远水电站设置便携站,可以建立与电厂与省调的卫星通信,结合语音网关、IP 协议转换器开通调度电话、调度自动化信息对省调的备用接入,在常规通信中断时实现备用通信。卫星中心站至少可支持 50~100 个远端小站的接入,可以大大提高电厂通信系统接入的双通道覆盖率、提高通信可靠性。

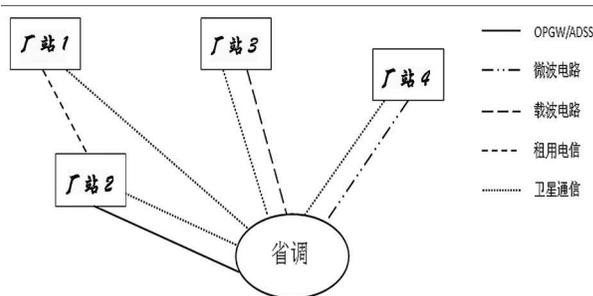


图 7 卫星通道作为厂站备用接入

4.3 针对电力输电线路勘测与巡检的通信系统

输电线路巡检是维护电网的重要手段,传统人工方式的巡检费时费力,且无法看到线路的整体状况,在四川部分山区因气候和复杂地理条件无法进行近距离人工巡检。飞艇、无人直升机、固定翼飞行器等航空设备可以在不同飞行高度利用高清照相机、摄像

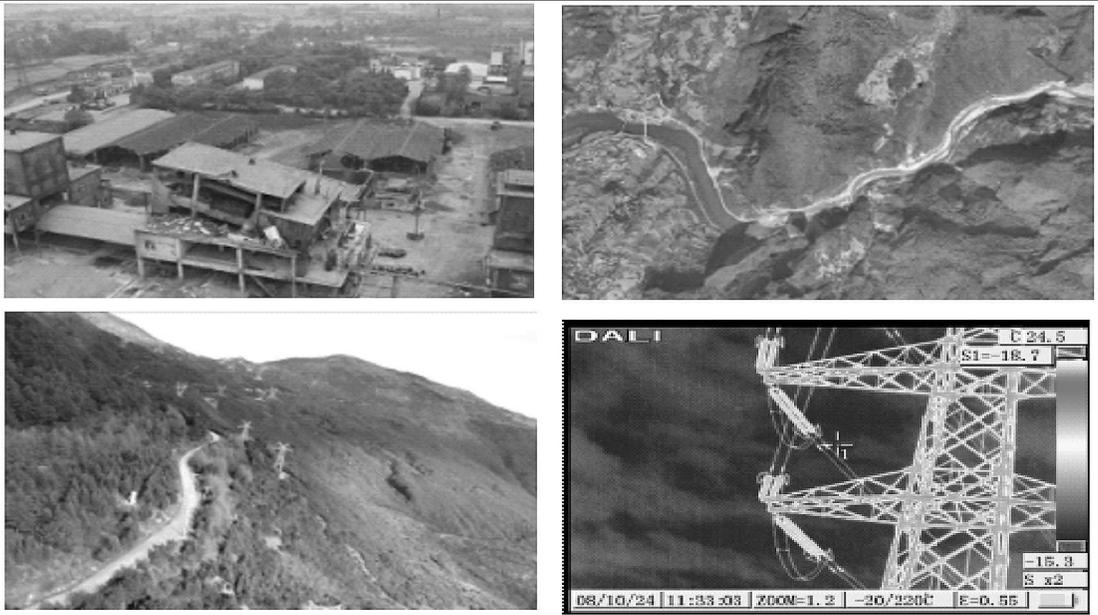


图 8 各种飞行器航拍的地震灾害和输电线路图片

机、红外热成像仪航拍输电走廊地理信息、线路、杆塔情况,并通过无线中继回传至监控室并接入电力通信网,可以在省调监控中心实时监控全省输电线路的状态,便于故障的快速判断定位。

5 四川电力应急体系的远景规划

“应急救援”仅仅是四川电力应急建设管理的部分内容,今后的四川电力应急管理将发展为“灾害预警—事故救援—恢复重建”的全过程处置体系。为贯彻国网公司“安全第一、预防为主”的安全生产原则,预警体系将是今后建设发展的重点。

5.1 电网可视化在线预警系统

电网具有规模大、范围广、系统复杂等特点,所处的外部环境极为复杂,且受天气、地质、人为等各种因素影响。因此如何选取合理的监控参数,以最小的投资代价和最低复杂度实现最大化的智能信息指导预警和救援,成为一个值得研究的问题。经历了去年的自然灾害后,电力行业内对电网稳定性的定义进一步延伸,将不仅仅包括电压、频率、潮流等稳定,还包括了外部环境(如雷击、泥石流、台风等)对电网稳定的影响、人员因素对电网稳定的影响(如误操作等)、电力市场对电网稳定的影响(如可中断负荷、辅助服务等)^[6~7]。因此电网稳定的定义将进化为“广域电网稳定性”。对传统电网参数进行稳定分析已成熟多年,但外部环境、电力市场等对电网的影响,目前尚缺乏相关研究。鉴于此,采用虚拟现实技术的灾害预警将是四川省电力公司应急管理今后的发展重点。

虚拟现实技术(Virtual Reality)是指将各种实际的物理设备(输电线路、杆塔、变电站设备)按实际情况绘制并采用三维建模的方式在计算机上呈现,结合 Google Earth 等地理信息系统(Geographic Information System, GIS),可以将整个电网完全真实地用计算机显示出来。结合可视化调度系统、系统脆弱性分析软件、在线环境监控、视频监控、航空器勘测等系统,将电网的内部潮流、功率、电压和电网的外部环境信息如天气、风速、湿度、地质状况等结合到一起,利用最优化理论如贝叶斯估计等实现从“内”“外”两方面信息的结合进行灾害的评估和判断,可以帮助及早发现电网的脆弱部分,以及在灾害发生时迅速定位和确定灾害原因^[8]。

5.2 重要变电站和地区供电局的通信备用接入地市局和偏远地区重要变电站都将接入应急通

按照四川省电力公司通信规划,未来几年内各信系统,通过卫星传输设备进行双通道、多路由改造,提高通信可靠性。卫星通信将按照国家电网公司安全分区和防护原则,提供多种生产和行政通信业务的传输通道,增强四川电力通信网的可靠性和容灾能力。

5.3 电力应急救援集成化建设

电力应急救援的集成化是另一部分重点工作。灾害后电监会和各地电网公司都针对应急救援的管理提出了一些规定和制度,但尚未形成行业标准。四川省电力公司将按照“准军事化”的应急管理目标进行应急体系的建设。将救援中从事不同工作的队伍(如设备抢修、航空勘察、应急通信、后勤保障)仿照



图 9 虚拟现实变电站展示与电网可视化调度系统

“军事集团”进行分类,确定人员与设备编制,并进行相应的专业训练;其对应的救援设备也效仿军队作战,利用集装箱进行“集成化”;针对不同的灾害因素,编制不同的应急预案和战术,使应急救援的目标更明确、效率更高。这种“集团化”、“集成化”的准军事应急管理将大大提高应急处置的效率,增强队伍的应急作战能力。

6 结 语

四川省电力公司充分总结抗冰保电、抗震救灾的应急抢险经验,结合四川电网实际情况,利用先进通信手段和特种装备,建设了“天地空一体化”立体应急通信网。目前应急培训基地与通信自动化中心已联合进行多次演练,全面展示出了“一体化”立体应急通信网络高效、可靠的通信能力,为电力系统应急体系开创了国内领先的管理和建设模式。在 2009 年 10 月举行的第一届中国国际电力安全发展暨应急管理论坛中,四川省电力公司应急体系建设的汇报得到了电力行业专家广泛的认可。四川省电力公司也将积极参与电力行业应急管理的行业规范、标准的制

订,努力成为电力行业安全生产、应急管理的领跑者。

参考文献

- [1] 杨洪. 关于电力应急通信体系建设的几点建议 [J]. 电力系统通信, 2009, 30(6): 6—8.
- [2] 元翔. 贵州电力应急通信网建设思路探讨 [J]. 电力系统通信, 2009, 30(2): 37—40.
- [3] 谷坊祝. 卫星通信技术在电力应急通信中的应用 [J]. 电力系统通信, 2009, 30(6): 29—32.
- [4] 崔燕明, 刘孝先, 吴维农, 等. 电力应急通信指挥系统的建设方案 [J]. 电力系统通信, 2009, 30(6): 33—36.
- [5] 四川新闻网. 二郎山电网“告急”, 四川电力实施立体应急战. <http://scnews.newsse.org/system/2009/01/23/011501514.shtml>
- [6] 薛禹胜. 从更广的视角看电力系统稳定性 [C]. 第一届中国国际电力安全发展暨应急管理论坛. 2009, 10.
- [7] 卢强. 智能电力调度控制系统与电力系统安全运行 [C]. 第一届中国国际电力安全发展暨应急管理论坛. 2009, 10.
- [8] 刘俊勇, 陈金海, 沈晓东, 等. 电网在线可视化预警调度系统 [J]. 电力自动化设备, 2008, (1): 1—5.

(收稿日期: 2009—10—10)

(上接第 51 页)

- [13] 王鲁单, 王洪光, 等. 一种输电线路巡检机器人控制系统的设计与实现 [J]. 机器人, 2007, 29(1): 7—11.
- [14] 王鲁单, 王洪光, 等. 基于视觉伺服的输电线路巡检机器人抓线控制 [J]. 机器人, 2007, 29(5): 451—455.
- [15] 付双飞, 王洪光, 等. 超高压输电线路巡检机器人越障控制问题的研究 [J]. 机器人, 2005, 27(4): 341—346.
- [16] 周风余, 吴爱国. 架空输电线路自动巡线机器人 [J]. 农村电气化, 2008, (2): 59—60.
- [17] 周风余, 吴爱国, 李贻斌. 110kV 输电线路巡线机器人控制方法及实现 [J]. 山东大学学报, 2007, 37

(6): 31—35.

- [18] 周风余, 吴爱国, 李贻斌, 等. 高压架空输电线路自动巡线机器人的研制 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 89—91.
- [19] Richard D. Cherry T. Standards for the Smart Grid [C]. IEEE Conference on Global Sustainable Energy Infrastructure 2008, 1—7.

作者简介:

佃松宜 (1973—), 男, 湖北松滋人, 博士, 副教授, 主要从事精密运动控制、智能机器人等方面的教学和科研工作。

翁桃 (1987—), 男, 四川简阳人, 硕士研究生, 研究方向为检测技术与自动化装置。

(收稿日期: 2009—11—04)

光伏发电的政策与技术浅析

杜新伟

(四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘要:随着能源需求不断加大和气候、环境问题日益严重, 加快可再生能源发展已成为全球实施可持续能源战略的重要举措。对近年来光伏发电的发展进行了概述, 对国内外光伏政策进行了分析, 并分类对光伏发电的相关技术进行了综述。

关键词:光伏发电; 太阳能政策; 光伏发电技术; 分布式发电

Abstract: As the energy demands have increased and the environment problems are becoming more serious, accelerating the development of renewable energy has become an important measure of global sustainable energy strategy. The development status of photovoltaic generation in recent years is summarized, the photovoltaic policies at home and abroad are analyzed, and the technologies related to photovoltaic generation are also classified and discussed.

Key words: photovoltaic generation; solar photovoltaic policy; photovoltaic technology; distributed generation

中图分类号: TK512 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0060-03

0 引言

随着能源需求的不断加大和气候、环境问题的日益严重, 加快可再生能源发展已成为全球实施可持续能源战略的重要举措。而光伏发电具有资源普遍且丰富、洁净无污染等特点, 是各种可再生能源中最重要的、最基本的能源。经过多年发展, 光伏发电技术已日渐成熟, 并逐步由独立的补充电源向大规模并网系统发展^[1, 2]。而在目前智能电网的蓬勃发展浪潮, 也为光伏发电创造了前所未有的机遇, 可以预见, 光伏发电将具有广阔的发展前景。

光伏发电是指通过光伏组件将太阳能转化为电能, 再经逆变器向用户或电网输送的技术。从总体上来看, 中国太阳能电池产业快速发展壮大, 市场潜力也很大, 然而光伏发电的成本虽已大幅下降, 但仍远高于传统发电成本, 参照国际上光伏发展经验, 能源政策和支持将是推动中国光伏发电发展的重要因素。另外, 加强光伏领域技术研发, 提高光伏发电转换效率和控制调节能力, 解决光伏发电接入对电网所产生的一系列问题, 也是决定未来光伏发电发展的关键。

对近年来光伏发电的发展进行了概述, 对国内外光伏政策进行了分析, 并分类对光伏发电的相关技术进行了综述。

1 光伏发电发展概述与政策分析

1.1 光伏发电发展概述

随着能源危机、环境问题突显及光伏技术的飞速进步, 近十年间光伏发电取得了突破性的进展^[3]。截至 2008 年底, 全球光伏发电容量已将近 15 000 MW, 主要分布在光伏技术先进、电网发展成熟、政策支持力度较大的欧盟、日本、美国等国; 各国的光伏发电容量呈逐年快速上升的趋势, 仅 2008 年全球新增光伏容量就超过 5 500 MW; 大容量并网光伏电站逐步成为主导, 目前世界上最大的光伏电站为西班牙的 Omedilla 光电厂, 容量达到了 60 MW。

中国拥有丰富的太阳能资源, 理论储量达每年 17 000 t 吨标准煤, 全国总面积 2/3 的地区年日照时间都超过 2 000 h, 太阳能利用潜力很大; 但目前开发相对较少, 国内光伏发电容量仅 15 MW。相比光伏市场, 中国光伏组件生产能力发展迅速^[4], 2008 年产量近 2 600 MW, 已跃居世界前列。在 2007 年编制的《可再生能源中长期发展规划》^[5]中规划 2020 年中国光伏发电容量达到 1 800 MW; 但从目前发展的趋势和计划来看, 这一目标将提前实现, 预计 2020 年中国光伏容量将达千万千瓦以上。

1.2 国外光伏发电政策

光伏高额的发电成本决定其在发展之初必然需要政策的扶持和驱动, 光伏发展较快的德国、日本、美国等国都是通过制定各种政策大力推动太阳能光伏发电发展的^[6, 7]。

德国政府 2000 年颁布了《可再生能源法案》, 并

于 2004 年对其进行了修改,规定给予不同的太阳能发电形式为期 20 年 0.457~0.624 欧元/千瓦时的补贴,每年递减 5%~6.5%,从而极大地刺激了德国光伏市场的发展,使德国光伏发电容量 2006 年以来一直保持世界第一;但值得注意的是自 2009 年起,德国光伏上网电价下降比率增加到 8%~9%,德国光伏市场增速可能会有一定程度的下降。日本一贯对能源问题非常重视,新能源发展也较早,自 20 世纪 90 年代开始先后颁布的《新能源法》、《可再生能源比例标准》等为其新能源规划了发展框架,制定了新能源的总量的发展目标;另外日本政府还通过科技资助提升其新能源产业的科技竞争力。美国政府主要通过抵扣补贴和专项投资的政策扶持光伏产业发展,2001 年美国加州著名的《加州太阳能计划》预算 32 亿美金在 10 年内建造 100 个光伏系统,2005 年《联邦能源政策法案》规定了对光伏系统投入可采用抵扣税收的措施;美国政府同样也非常重视其科技的创新和研发,2006 年《总统太阳能美国计划》由总统下令增加研发费用,以增强美国在太阳能光伏技术上的竞争力。另外,西班牙、意大利、法国、希腊等国也都通过各种政策和制度促进了本国光伏发电的发展。

综上所述,国外光伏发展的政策支持主要包括了制定发展目标、较长期的价格保障机制、专项资金补助、优惠的税收制度、科技研究资助等手段。

1.3 中国光伏发电政策

在中国光伏发电的发展过程中,各种支持政策的制定也起到了很大的推动作用^[8],特别是 2006 年《可再生能源法》及其配套的相关法规,如《可再生能源发电管理办法》、《可再生能源上网电价及费用分摊管理试行办法》的实施,从法律制度和政策措施的高度对可再生能源的发展做出了比较完整的规定;随着可再生能源的快速发展,《可再生能源法》实施中也暴露出了一些问题,目前《可再生能源法修正案》已通过审议并即将出台,修正案中主要对统筹规划、市场配置与政府宏观调控相结合、国家扶持资金集中统一使用等三项原则进行了强调^[9]。

为配合《可再生能源法》的实施,中国也相应制定了新能源发展的战略规划,2007 年发布的《中国可再生能源中长期发展规划》中提出了中国可再生能源的发展目标,即将出台的《新兴能源产业发展规划》将根据新能源的最新发展情况,对发展目标进一步明确^[10]。2009 年 7 月,财政部、科技部、国家能源

局联合下发《关于实施金太阳示范工程的通知》^[11],安排了专项资金支持光伏发电技术在各类领域的示范应用及关键技术产业化,加速了中国光伏发电的发展。

在光伏发电发展的浪潮中,各个地方也纷纷出台了各种优惠政策,如江苏 260 MW_p 太阳能补助案、青海省太阳能产业发展及推广应用规划、江西光伏产业发展规划纲要等等,对目前中国光伏发电的促进体制起到了有效的补充作用。

目前中国正处于光伏发展的起步阶段,尽管国家和地方已出台了多项光伏发电的促进政策,但从总体上看,光伏发电的收购制度、定价和补偿机制、减税政策、接入标准等尚需进一步完善和明确,只有建立了完备的法律和制度体系,才能引领光伏发电更加科学、有序地发展。

2 光伏发电相关技术浅析

按照研究领域,光伏发电的相关技术可以分为光伏发电及其并网技术和大电网应对光伏接入措施研究两个层面。

2.1 光伏发电及其并网技术

一套完整的光伏发电系统通常包含太阳能电池板、逆变器和控制器等 3 个部分,因此光伏发电本身研究也可分为太阳能电池技术、逆变器技术、控制技术 3 个方面;另外,为保证光伏发电供电的安全与可靠,相关的研究还包括光伏发电保护、孤岛监测、储能等技术。

太阳能电池技术主要为了实现高效、低成本的能量转换,目前太阳能电池主要分为晶体硅电池和薄膜电池两类,其中晶体硅电池以其高效能量转换效率一直占据着太阳能电池产品的绝对主导地位,而薄膜电池具有低成本的优势,必将成为未来太阳能电池研究和应用的重点^[12]。

逆变器技术主要解决光伏并网的交直流转换问题,其主要研究内容为并网逆变器的拓扑结构及光伏组件的系统结构。其中逆变器拓扑结构主要研究逆变器类型、级数及其与隔离变压器、DC-DC、滤波器等器件组合的问题,以达到提高设备运行性能、降低成本和损耗、便于控制等目的。光伏组件系统结构主要研究光伏组件在整个发电系统中的组织形式,目前主要有集中型、串型、多串型、交流模块集中型等多种

形式^[13]。

光伏控制技术是目前研究的热点^[14],其目的在于尽量维持太阳能电池的最大输出功率和最小的输出谐波,并能够在电网需要时灵活控制输出的有功和无功以起到参与电网调节的作用。目前的研究主要包括光伏系统的最大功率点跟踪(MPPT)、电流控制、电压控制、功率控制等问题。

通常情况下,光伏发电并网系统与负载和配电网相连接,实现供电和与主网的能量交互,为保证供电的持续稳定一般配备有储能装置和能量控制主站,形成“微电网”^[15]。为保障微电网的安全可靠供电,必须研究含分布式发电微电网中的相关技术问题,包括由于系统故障或检修形成微电网孤岛运行时的检测手段^[16]、对光伏发电和储能装置实现的统一能量管理和调剂。

2.2 大电网应对光伏接入措施研究

除了研究光伏发电本身及微电网技术,如何保证大规模光伏发电接入后电力系统的稳定运行也是一项非常值得研究的课题,这是因为光伏发电具有显著的间歇性和随机性特点,其大规模接入电网必将导致潮流方向、配网结构、运行方式等的深刻变化,从而使系统运行的多个环节必须采取相应的措施应对^[17, 18]。

在大电网应对光伏接入的措施研究中,主要包括:(1)光伏发电的接入将抵消去一部分负荷,传统的负荷预测方法将不再适用,必须研究考虑光伏发电随机性的负荷预测新方法;(2)以光伏发电的经济型、对电网的影响等为优化目标,制定光伏发电规划和设计的方法;(3)目前光伏发电尚无标准的数学模型,研究其模型及含光伏发电模型的电网计算方法,对于系统的仿真分析和电网规划都具有重要的意义;(4)光伏发电出力的随机变化可能导致潮流大小和方向的改变,使传统电网调压方案难以满足需求;(5)其间隙性和随机性特点也给大规模光伏发电接入后的调峰调频和调度能力提出了更高的要求;(6)光伏发电系统大量运用电力电子器件,有可能增加系统的谐波污染,对电网电能质量有一定影响;(7)光伏发电的接入使传统辐射状电网变为多电源式网络结构,传统的继电保护原理也必然随之发生巨大变化,研究适应于多电源网络的保护原理是一项亟待解决的问题;(8)另外,光伏发电等分布式电源的兴起也将导致电力交易发生深刻的变化,完善的市场机制

和管理体系是未来电力市场科学、健康发展运营的保障。

另外,中国太阳能资源最为丰富的地区位于西部,集中在西藏、甘肃、宁夏、新疆等省,而这些地区大多负荷水平较低,因此中国太阳能开发将可能面临着大规模集中开发、远距离传输的情况,由此可能带来更加复杂的问题需要解决。

3 结 语

(1)随着能源危机、环境问题突显及光伏技术的飞速进步,近十年间光伏发电取得了突破性的进展。

(2)参照国外光伏发展经验,能源政策和支持将是推动光伏发电发展的重要因素,中国也出台了多项光伏发电的促进政策。

(3)按照研究领域,光伏发电的相关技术可以分为光伏发电及其并网技术和大电网应对光伏接入措施研究两个层面。其中光伏发电及其并网技术主要包括太阳能电池技术、逆变器技术、控制技术和微电网技术等,而大电网应对光伏接入措施研究则涉及到电力系统的规划、调度、运行、控制、市场等多个方面。

参考文献

- [1] 薛钮芝, 张力, 林纪宁. 太阳能光伏技术的研究与发展 [J]. 大连铁道学院学报, 2003, 24(4): 71-74.
- [2] Ball G. J., Hudson R. M., Behnke M. R. Recent application and performance of large grid-connected commercial PV systems Photovoltaic Specialists Conference 2002 Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE, 2002, 1710-1713.
- [3] 张希良, 常世彦, 柴麒敏. 新能源与可再生能源在我国可持续能源体系构建中的作用 [R]. 中国新能源产业年度报告 2008. 2008, 11.
- [4] 赵玉文. 2008中国光伏产业发展报告 [R]. 中国新能源产业年度报告 2008. 2008, 11.
- [5] 国家发展和改革委员会 [R]. 可再生能源中长期发展规划. 2007, 8.
- [6] 太阳能贸易网论坛. 各发达国家政府对光伏产业的支持政策. <http://www.solar8.net/bbs/viewthread.php?tid=10>, 2008-6-13.
- [7] 中国新能源网 [N]. 各国光伏产业补贴政策 <http://www.newenergy.org.cn/html/0094/470926378.html> 2009-4-7.

(下转第 76 页)

参考文献

[1] 中国道路与世界视野 [J]. 国家电网, 2009, 42(6): 22-49.

[2] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.

[3] 林宇锋, 钟金, 等. 智能电网技术体系探讨 [J]. 电网技术, 2009, 33(12): 8-12.

[4] x p zhang A Framework for Operation and Control of Smart Grids with Distributed Generation Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE 20-24

July 2008: 1 - 5.

[5] 张伯明, 吴素农, 等. 电网控制中心安全预警和决策支持系统设计 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 1-5.

[6] 苗新, 张恺, 等. 支撑智能电网的西悉尼通信体系. 电网技术, 2009, 33(17): 8-13.

[7] 谢开, 刘永奇, 等. 面向未来的智能电网 [J]. 中国电力, 2008, 46(6): 19-22.

作者简介

郑毅, 男, 成都电业局生产技术部、高级工程师、工学硕士、长期从事电网自动化通信和二次系统技术管理和工程建设。
(收稿日期: 2009-10-28)

(上接第 63 页)

[8] 李俊峰, 王仲颖, 胡润青, 等. 中国新能源与可再生能源政策法制建设 [R]. 中国新能源产业年度报告 2008. 2008, 11.

[9] 新华网. 可再生能源法修正案草案向社会公开征集意见(全文) [N]. http://news.xinhuanet.com/legal/2009-08/28/content_11959731.htm, 2009-8-28.

[10] 中国科技产业网 [N]. 新兴能源产业发展规划即将出台. <http://www.kejicy.com/cm/sreleasesys/zgkjcy/info-detailed.asp?id=5518>, 2009-8-10.

[11] 财政部, 科技部, 国家能源局. 关于实施金太阳示范工程的通知. 2009, 7.

[12] 电子工业专用设备编辑部. 薄膜太阳能电池前景 [J]. 电子工业专用设备, 2009, (1): 1-4.

[13] 赵朝会. 光伏发电技术的研究现状和应用前景 [J]. 上海电机学院学报, 2008, 11(2): 104-109.

[14] 张志强, 马琴, 程大章. 太阳能光伏发电系统中的控制技术研究 [J]. 低压电器, 2003, (12): 55-58.

[15] 彭方正. 变流技术在分布式发电和微电网上的应用 [J]. 变流技术与电力牵引, 2006, (2): 23-27.

[16] 曾议, 吴政球, 刘杨华, 等. 分布式发电系统孤岛检测技术 [J]. 电力系统及其自动化学报. 2009, 21(3): 106-110.

[17] 钱科军, 袁越. 分布式发电技术及其对电力系统的影响 [J]. 继电器, 2007, 35(13): 25-29.

[18] 刘杨华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述 [J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.

(收稿日期: 2009-10-10)

(上接第 72 页)

上述两种接线方式要实现自愈功能, 需要环网柜宜留有备用空间以安装控制、测量装置, 宜具备扩展

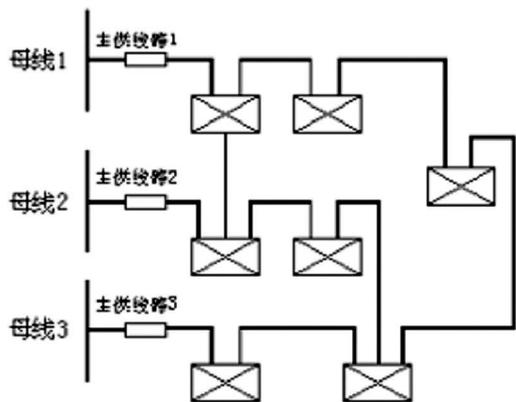


图 6 互为备用的三回馈线组接线方式

功能或接口; 负荷开关需配有电动操作机构, 直流操作, 电源由 10 kV 母线电压互感器提供。在环网柜的所有进线和出现负荷开关都安装 FTU, 并通过光纤接入主站系统, 由于开关数较多, 判断的逻辑顺序较为复杂, 必须开发相应的软件来控制负荷开关的动作。当线路上发生故障时候, 主站系统根据 FTU 传递的

信息, 通过软件计算遥控相应的负荷开关的开合, 以达到隔离故障, 恢复无故障段供电的目的。

3 结 论

以上对目前城市配电网要实现智能配电网的自愈功能进行了初步的探讨, 不同的配电网接线模式实现自愈功能的模式是不同的。随着中国城市化进程的加快, 对城市供电可靠性的要求越来越高, 因此对配电网的接线模式必须要有新的研究和突破, 尽量找到适合国情的配电网接线模式, 在此基础上实现智能配电网的自愈功能, 这样才能符合发展智能电网的总体需求。

参考文献

[1] 徐丙垠. 智能电网与配电自动化技术讲座, 2009.

[2] 能源部, 建设部. 《城市电力网规划技术导则》[M]. 北京: 水利水电出版社, 1995.

[3] DL/T 599-1996. 城市中低压配电网改造技术导则.

[4] 刘建. 配电自动化系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

(收稿日期: 2009-10-10)

提高初期特高压互联电网稳定性措施初探

丁理杰, 刘 洋, 杜新伟, 周惟婧

(四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:特高压电网形成初期,网架结构薄弱。为解决特高压投运初期线路静稳极限偏低和动态无功补偿能力不足的问题,探讨了提高特高压互联电网稳定性的措施。通过比较分析增加串联补偿电容、增加可控高压电抗器、新建特高压变电站等措施,提出采用可控高压电抗器和新建变电站能有效提高电网稳定水平。

关键词:特高压;静稳极限;固定串补;可控高压电抗器

Abstract: The structure of power network is weak in the initial interconnected UHV power grid. In order to improve the problems about the low limitation of transmission power and the lack of dynamical reactive power compensation, the measures are presented to enhance the stability of the interconnected power grid. Based on the analysis and comparison of fixed series compensation, controllable reactors and building UHV substation, an effective way that adopting the controllable reactors or building UHV substation is proposed to improve the stability of UHV interconnected power grid.

Key words: UHV; limitation of transmission power; fixed series compensation; controllable reactors

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0063-04

2003年,华北华中电网通过 500 kV 辛涇线实现了交流互联。2008年,特高压试验示范工程投产后,华北华中电网间新增一回更高一级电压等级的交流联络线。为避免山西、京津唐、河北南网以及河南、湖北电网形成多重电磁环网,辛涇线解环运行,华北华中电网由一回特高压相连。特高压工程投产初期,电气联系薄弱,1 000 kV 动态无功支持不足,特高压线路输电能力偏低。当然,这是任何高一电压等级投产后都要面临的问题,只有当特高压网架结构得到加强,形成新的高电压等级供电网络,才能有效体现特高压送电的巨大优势^[1]。这里主要着眼于特高压投运初期,探讨提高互联电网稳定性的措施。

1 特高压投运初期存在问题

电网输送能力同时受到热稳定、暂态稳定、动态稳定和静稳定等限制。一般来讲,电气距离较短的线路主要受限于热稳定,而较长线路则受到暂态稳定和动态稳定的限制。一般来说,在高压输电网中,只有少数长距离、大功率送出系统需进行静稳定的校核和分析,特高压试验示范工程属于这样的线路。2009年华北华中特高压互联丰大方式下,在 PSASP 暂稳程序中分别在华中电网侧(三峡机组)不断增加发电机出力,而在华北电网侧(山西风陵机组等)不断减少发电机出力,计算得到特高压线路稳定极限在 3 000~3 100 MW 之间。按照《电力系统安全稳定导

则》的要求,静态功角稳定储备系数为^[2]:

$$K_p = \frac{P_i - P_z}{P_z} \times 100\% \quad (1)$$

式中: P_i 、 P_z 分别为线路或断面的极限和正常传输功率。

静态功角稳定储备系数应满足如下要求:①在正常运行方式下,对不同的电力系统,按功角判据计算的静态功角稳定储备系数(K_p)应为 15%~20%。②在事故后运行方式和特殊运行方式下, K_p 不得低于 10%。特高压试验示范工程投运初期静稳极限偏低,大功率传输方式下,严重故障后可能引起互联电网失去同步,这一特点是其投产初期互联电网运行面临的主要问题之一。为避免出现工频过电压,特高压线路高抗补偿度 86%,这进一步降低了静稳极限。豫南阳作为开关站,缺少无功补偿设备,也无法从 500 kV 侧得到无功支撑,母线电压支撑较弱。当特高压大功率传输时,四川电网发生大扰动,特高压可能发生低压解列。根据理论分析,如提高荆门、东南落点电压,特高压静稳极限也将提高。因此,在特高压大功率运行时,必须将特高压系统运行电压保持在合理偏高范围,并且要求特高压落点近区电网机组多开、不进行特高压近区电网线路检修等。

2 提高特高压投运初期稳定性措施

特高压示范试验工程作为唯一线路连接中华

北两大区域电网,一旦解列,华北华中电网孤网运行,因此需要研究提高特高压互联电网稳定性的措施。

2.1 串联补偿

从理论分析考虑,提高线路静稳极限最有效的手段是减少电气距离,即减少特高压线路等效电抗^[3,4]。为此,可对特高压线路进行串联电容补偿。固定串补装置中最重要的保护装置是氧化锌避雷器(MOV),文中暂态计算时不考虑 MOV 的非线性及保护特性(电流过大时会旁路串补),只用一个负的电抗代替固定串补。

在鄂荆门、晋东南处安装固定串补,不同串联补偿度(仅指补偿特高压线路电抗,不包括变电站)下系统稳定性如表 1 所示。当串联补偿度 25% 时,四川电网洪山山侧故障后特高压不解列,但激发出华中电网内部多种振荡模式,危害反而变大,功角曲线如图 1 所示;补偿度 50%,洪山山侧故障后华北电网稳定,功角曲线衰减较快,但华中电网内部阻尼较弱,只有 0.94%,系统功角曲线如图 2 所示;进一步提高特高压串联补偿度至 75%,豫南阳最低电压提高到 0.81 pu,但提高串联补偿度却不能使华中电网内部阻尼得到有效加强。

可见,加装串补后,特高压线路静稳极限得到提高,华中华北电网间的暂态稳定能力得到提高。但严重故障后,特高压不解列可能激发川渝、渝鄂、豫鄂等多个省网间的负阻尼低频振荡模式。提高固定串补补偿度对抑制华中电网内部省际间的低频振荡没有明显作用。

表 1 不同串联补偿度下稳定能力

串联补偿度	静稳极限 /MW	豫南阳最低电压 /pu	稳定情况
25%	3 512	0.65	激发川渝、渝鄂、湘鄂、鄂赣等区间振荡
50%	4 022	0.70	稳定,华中电网阻尼弱
75%	4 706	0.81	稳定,华中电网阻尼弱

2.2 可控高压电抗器

由特高压解列原因分析可知,特高压静稳极限偏低是一方面;另一方面,故障后无功的大量传输降低了特高压落点电压,这降低了特高压线路的充电功率,也将进一步降低特高压落点电压。特别是豫南阳作为开关站,没有动态无功调节能力。因此,在特高压各落点增加可控电抗器能提高系统稳定能力。

2.2.1 固定高压电抗器问题

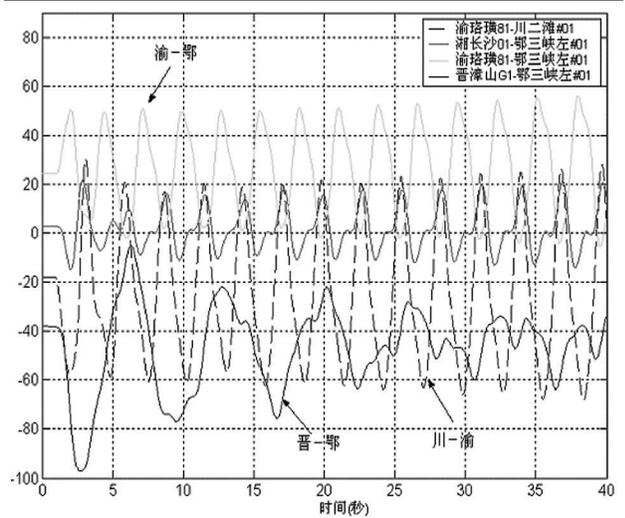


图 1 补偿度 25% 区间功角曲线

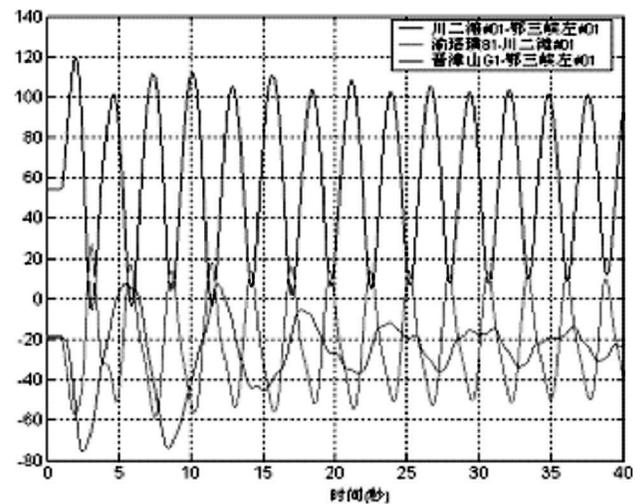


图 2 补偿度 50% 功角曲线

特高压交流线路单位长度充电功率大,是 500 kV 线路的 4~5 倍。为了限制过电压,必须在长距离特高压线路上装设高补偿度的高压电抗器。若按限制过电压的要求来配置特高压电抗器,则可能导致以下问题^[5]。

(1)电压调节问题。高压电抗器配置后,可能出现小方式运行电压偏高或大方式下运行电压偏低,尤其对于水电集中处的输电通道来说,丰枯季节潮流变化大,2 种情况可能都存在。通过在变压器的低压侧安装低压电抗器组或和低压电容器组,一方面增加无功补偿投资,另一方面,由于受变压器容量的限制,低压补偿可能无法满足要求。

(2)线路输送能力下降。在某一输送功率下,若线路与外部系统没有无功功率交换,定义此时传输的有功功率为线路的广义自然功率(线路没有高压电抗器时,此功率即为自然功率)。高压电抗器补偿度

越高,其广义自然功率下降越多。表 2 为特高压线路在不同的高压电抗器补偿度下,受端电压 ($U_N = 1050 \text{ kV}$)不同时,线路的广义自然功率。若按 85% 补偿度考虑,受端电压为 1.0 pu 时,特高压线路的广义自然功率为 1730 MW ,远小于其自然功率。

表 2 不同补偿度下线路广义自然功率

高压电抗器	广义自然功率 /MW		
补偿度	0.9 pu	1.0 pu	1.05 pu
无补偿	3 600	4 450	4 910
65%	2 140	2 640	2 910
75%	1 810	2 230	2 460
85%	1 400	1 730	1 910
90%	1 140	1 410	1 550

(3)电压稳定问题。特高压东南站和荆门站均配置 4 组低压电容器 (单组容量 160 Mvar)和 2 组低压电抗器 (单组容量 263 Mvar)。特高压工程高抗补偿度为 86%,感性补偿容量满足特高压线路低负荷运行的要求。特高压工程自身配备的容性无功补偿最大仅能满足特高压线路输送 2400 MW 的无功需求 (特高压荆门侧电压约 0.9 pu),特高压输送功率超过 2400 MW ,需从两侧 500 kV 系统吸收容性无功。此时系统内若发生严重故障,引起特高压潮流大范围波动,则需吸收的无功将大为增加,严重的话,可能会导致系统电压失稳。

2.2.2 可控高压电抗器

大容量的高压电抗器为系统重载运行带来了较大的无功负担,影响了特高压线路的输电能力,增加了电网运行的经济负担。根据可控电抗器原理,在特高压电网中投入一定比例的可控电抗器可在一定程度上解决以上问题。可控电抗器在运行期间,无功在一定的范围内可实现平滑或分级调节,在一定程度上抑制电压在小负荷方式下过高或大负荷方式下过低。在稳态情况下,利用可控电抗器可以根据运行工况灵活平衡特高压线路对无功补偿的需求;在动态情况下,利用其无功控制作用,可以为电网提供附加阻尼^[6]。根据文献 [5],这里可控高压电抗器控制参数取超前时间常数 0.5 s 滞后时间常数 2.5 s 控制增益取 300,可控硅触发延时 0.1 s 电压偏差有效区间取 $1 \Delta v > 0.1 \text{ v}$,忽略采样和滤波时间常数。则,可控高压电抗器传递框图如图 3 所示。文中按现有固定高压电抗器容量的 50% 配置可控高压抗器。

当四川电网九石雅地区水电满发,四川火电开机较少时,特高压北送功率 2600 MW 以上,尖山侧 N—

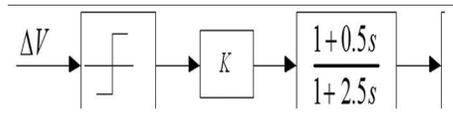


图 3 可控高压电抗器传递框图

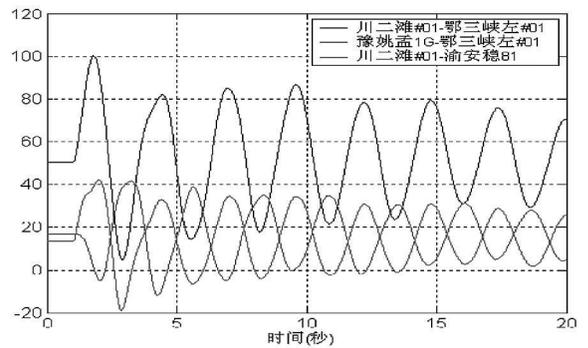


图 4 配置 50% 可控高压电抗器后功角曲线

1 故障可能引起特高压线路低压解列。当配置可控高压电抗器后,四川电网发生 N—1 故障后,豫南阳电压最低跌至 0.79 pu ,华北华中电网功角稳定,系统功角曲线如图 4 所示。可见,可控高压电抗器能提供快速无功支撑,提高系统暂态稳定能力。

2.3 建设豫南阳变电站

目前投运的特高压试验示范工程中 1000 kV 豫南阳站是开关站,低压侧没有无功补偿设备,大功率传输方式下电压较低,故障后电压跌落最严重,易引起特高压低压解列。另一方面,由于南阳站缺少无功补偿设备,故障后电压跌落导致鄂荆门、晋东南站点电压降低,特高压线路的静稳极限也被降低,容易引发静稳破坏。

2010 年,根据河南电网 500 kV 网架,假设新建 1000 kV 南阳站后,通过两回 500 kV 线路和平西站相连。相连后,华中—华北电网电气距离减小,特高压线路静稳极限也将得到提高;河南电网部分富余火电出力可以直接通过 1000 kV 南阳站北送华北电网;河南 500 kV 侧也可以为 1000 kV 南阳站提供动态无功支撑。仿真时,取川渝断面 6000 MW ,河南送出断面 4000 MW ,特高压北送华北电网 2400 MW 。

2.3.1 提高静稳极限

新建 1000 kV 南阳站后,特高压北送静稳极限由豫南阳—晋东南段决定,其近似标么电抗为

$$X_{22} = 2 \times X_T + X_L \text{ 晋南} = 0.02102 \quad (2)$$

新建南阳 1000 kV 变电站后,全接线方式下华北电网东南侧等值阻抗为 $X_{d1} = 0.003$,华中电网南阳侧等值阻抗 $X_{d2} = 0.0027$ (电压基准值为 525 kV),假定 U_1, U_2 均为 1.0 pu ,则静稳极限为

$$P_{MAX} = \frac{1}{X_c + X_d + X_e} = 37.2 \text{ pu} \quad (3)$$

进一步,通过仿真分析,得到豫南阳—晋东南的静稳极限约为 3 600 MW,由于受到发电机励磁、开机方式等影响,仿真得到静稳极限略低于理论的 3 720 MW。

2.3.2 提供动态无功支撑

2010年,取四川水电送出 6 000 MW,尖山侧故障将引起更大潮流波动,对特高压互联电网的冲击也将更严重。当保持特高压北送 2 400 MW,河南外送 4 000 MW 规模,特高压线路低压解列装置退出运行时,比较不同运行方式下系统稳定能力,如图 5 所示。

①无措施。豫南阳仍旧作为开关站运行,四川电网尖山侧故障后特高压豫南阳站电压迅速跌落,华中—华北电网失步振荡。②加可控高压电抗器。若增加 50%容量可控高压电抗器,尖山侧故障后电压也将跌落至 0.3 pu 在可控高压电抗器的调节作用下,豫南阳电压能回到正常值,但南阳站电压低于 0.75 pu 时间超过 1s 系统电压失稳。③新建 1 000 kV 南阳站,平西送南阳 1 200 MW。即平西送南阳 1 200 MW,特高压荆门至南阳 1 200 MW,尖山侧故障后电压跌落至 0.35 pu 略好于采用可控高抗时电压跌落,但系统仍旧电压失稳。④新建 1 000 kV 南阳站,平西送南阳 1 600 MW。即平西送南阳 1 600 MW,特高压荆门至南阳 800 MW,尖山侧故障后电压跌落至 0.6 pu 电压低于 0.75 pu 时间 0.9 s 电压严重跌落现象得到抑制,系统稳定。可见,新建 1 000 kV 南阳站后,特高压南阳侧电压得到支撑,特别是华中电网北送华北电网功率主要由河南特高压送出时,特高压互联电网稳定性得到更好支撑。

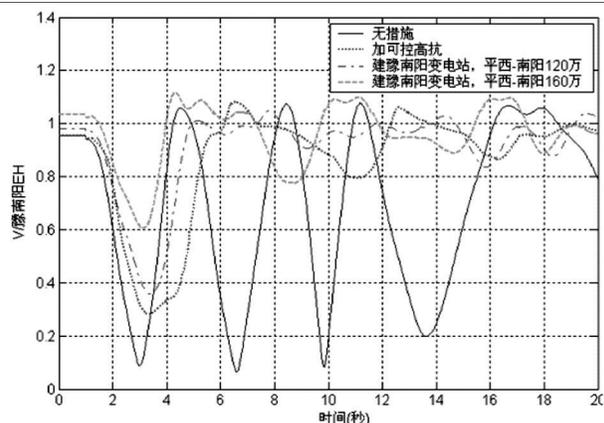


图 5 不同方式下特高压电网稳定性

3 小 结

任何高一级电压等级投产后都要面临新电压等级网络结构薄弱,系统稳定能力差的阶段。在新电压等级网架结构得到加强前,比较了一系列提高电网稳定能力的措施并得到初步结论:①串补是提高线路静稳极限最有效的手段之一。加装串补后,特高压线路静稳极限得到提高,华中华北电网间的暂态稳定能力相应得到提高。但严重故障后,增加固定串补补偿度对抑制华中电网内部省际间的低频振荡没有明显作用。特高压不解列可能激发川渝、渝鄂、豫鄂等多个省网间的振荡模式,造成更严重后果。②特高压线路装设可控高抗后,无功调节能力得到加强,系统暂态稳定能力得到提高,四川水电通道的外送能力得到增强。和串补相比,可控电抗器更能提高特高压互联电网的暂态及动态稳定水平。③特高压豫南阳开关站建设成变电站后,南阳站和河南电网相连,特高压沿线电压得到动态支撑,静稳极限也相应得到提高。特别是华中电网北送华北电网功率主要由河南特高压送出时,特高压互联电网稳定性得到更好提高。

参考文献

- [1] 周浩, 钟一俊. 特高压交、直流输电的适用场合及其技术比较 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 6-13.
- [2] DL/T723-2000, 电力系统安全稳定控制技术导则 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [3] 舒印彪, 张文亮. 特高压输电若干关键技术研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 1-5.
- [4] 张东辉, 谢小荣, 刘世宇, 等. 串补输电系统中次同步谐振的模式阻尼推导 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 5-8.
- [5] 周勤勇, 郭强, 卜广全, 等. 可控电抗器在我国超特高压电网中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 1-6.
- [6] 周勤勇, 郭强, 冯玉昌, 等. 可控高压电抗器在西北电网的应用研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(6): 48-52.

作者简介:

丁理杰,男,工程师,主要研究方向为电力系统稳定与分析。

刘洋,男,高工,主要研究方向为电力系统稳定与分析。

杜新伟,男,工程师,主要研究方向为电力系统稳定与分析。

析。

(收稿日期: 2009-10-10)

对智能电网概念的理解与四川发展智能电网的思考

杜新伟

(四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘要:从智能电网的驱动力和建设目的入手,对智能电网的内涵进行了探讨,阐述了作者对智能电网概念的理解;并结合四川电网实际,对四川如何发展智能电网进行了思考。

关键词:智能电网;四川电网;电网自愈;分布式发电

Abstract: By analyzing the driving force and the development aim of smart grid, the understanding on the concept of smart grid is discussed. And with the reality and the characteristics of Sichuan power grid, several suggestions of developing smart grid in Sichuan are also proposed.

Key words: smart grid; Sichuan power grid; grid self-healing; distributed generation

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0067-03

在电网安全可靠运行、能源与环境压力、电力市场化推进的驱动下,新一代电力网络“智能电网”应运而生,国家电网也提出了建设坚强智能电网的宏伟蓝图^[1,2]。随着交直流特高压建设,四川电网将形成全国联网系统大容量、远距离、多端馈出的送端电网,安全可靠要求高且控制难度大,非常有必要采用先进的技术手段增强电网控制水平和抗攻击能力;另外,四川小水电众多的特点也为未来分布式发电对电网影响及交易管理体制研究提供良好的平台。在四川发展智能电网必须结合自身特点和需求,建设有四川特色的智能电网。首先从智能电网的驱动力和建设目的入手,对智能电网的内涵进行了探讨,阐述了作者对智能电网概念的理解;并结合四川电网实际,对四川如何发展智能电网进行了思考。

1 智能电网的驱动力和建设目的

理解智能电网必须从探讨智能电网的驱动力入手,即回答为什么要发展智能电网的问题。智能电网最早由美国和欧洲提出,回顾国外发展智能电网的驱动力并分析中国电力所面临的严峻挑战^[3,4],将有助于对智能电网概念及其建设目的的理解。

1.1 美国与欧洲发展智能电网的驱动力

美国和欧洲发展智能电网的驱动力有所不同。美国电力系统发展较早,有相当一部分电力设备已经陈旧老化;同时,美国信息技术非常发达,电力市场推行也比较早。2003年美加大停电后,更加促使了电力行业对电力设施进行彻底改造的决心,提出了多种

智能电网的理解和行动计划建议,其中最为有代表性的是美国电力科学研究所提出的智能电网定义。奥巴马政府上台后,不仅将智能电网作为美国能源部的项目,而且将其提升到国家战略层面进行研究。

欧盟委员会于2004年提出在欧洲建设智能电网,并启动了相关研究与建设工作。一方面因为欧洲一些国家相继发生了一系列停电事故,另一方面,欧洲风电、太阳能等新能源发达,如德国、丹麦等国,因此欧洲更加致力于分布式电源发展及其接入电网的研究。另外,欧洲电力市场也较为成熟,智能电网的建设能够促进电力企业为社会提供更加优质的服务。

综上所述,智能电网建设的驱动因素可以归结为电网安全、新能源发展、市场需求等方面。

1.2 中国电力面临的挑战和智能电网的建设目的

相比于全球电力行业,中国电力也面临着巨大的挑战,既有共同点,也有自身特有的问题,如随着特高压电网建设,电网规模更大、等级更高、结构更加复杂,系统安全运行风险也加大,电网抗攻击和抵御自然灾害的能力需要加强;随着能源、环保意识的增强,使节能减排和积极发展新能源成为一种责任和趋势,应对分布式发电接入电网给传统电网带来的变革成为不可避免的问题;电力用户不但对供电可靠性和质量提出了更高的要求,而且参与电力管理的愿望也逐步增强等。

总的来说,中国电力面临的挑战主要反映了三方面,即社会、电力企业和用户的需求^[5],社会更加关注的是能源的可持续发展、环境保护等问题,电力企

业则更加注重于电网的安全可靠运行,而用户更加关心用电的可靠、电费的支出以及电力企业所能提供的服务等问题。因此,智能电网建设的目的就是要满足上述三个方面的需求,即能够在保障电网运行安全可靠的基础上,充分发展清洁能源实现更加环保和可持续发展,并为电力用户提供更优质的服务,提升用户的满意度。而参考国外智能电网发展的经验和中国所提出建设坚强统一智能电网的目标,智能电网作为新一代电力网络,涵盖了对电力设备、技术、新能源、信息平台、企业管理等全方位的改造和升级,无疑将是应对中国电力所面临巨大挑战的最好途径。

2 智能电网概念的理解

智能电网目前处于探索和起步阶段,各国对智能电网的理解并不统一^[6],智能电网的标准和规范也尚未形成。但根据其驱动因素和建设目的可看出,智能电网和传统电网相比主要在三个方面体现出了不同,即电网自愈、分布式发电及其接入、服务与管理。

2.1 电网自愈

随着特高压全国互联电网的逐步形成,供电的安全性和可靠性要求越来越高,而由于电网规模的扩大和结构的复杂,电网安全控制的难度则越来越大,构筑可靠、智能的安全防御体系成为迫切需要研究的课题。在智能电网的内涵中,对电网安全设想了一个高度自动化的体系,即电网的自愈,电网自愈是指利用信息、电力电子等技术实现完全自动地对电网潮流、节点电压等的监视和控制,并通过自分析、自诊断等方法及时发现和采用自动调节电网运行的手段排除故障隐患或外界干扰,以保证电网安全运行,减少事故的发生^[7]。实现自愈是电网可靠运行和增强抗攻击能力的需要,也是智能电网发展的基础,而电网自愈的实现则对电网信息技术和控制技术提出了更高的要求。

电网自愈首先需要能够及时感知和掌控电网运行的状况和变化,近来快速发展的广域测量系统可实现对系统的动态测量,为自愈电网配备了敏锐的眼睛。而更为重要的是需要在主站建设智慧的大脑,根据对电网的感知快速分析、准确判断,形成维护电网安全运行的方案。在拥有正确的判断后,就需要操控各种控制手段,如保护、安控系统、FACTS装置等协调配合,共同完成对电网安全的防御;需要指出的是,在未来的智能电网中,FACTS技术(包括HVDC)以其对电网能量流动、节点参量快速灵活调节的能力,

必将充当更为重要的角色。

2.2 分布式发电及其接入

全球能源危机的加剧和环境问题的日益严重促使了分布式发电的快速发展,分布式发电以其优秀的环保性和独立的供电方式能够满足能源清洁的要求和成为大电网系统的有力补充;但是,分布式发电间歇性和随机变动等特点必将导致大量分布式电源接入电网后对电力系统运营产生深刻的影响^[8]。因此,分布式发电的发展需要一个强大、智能的电网配合,而电网也必须采取积极的措施来应对分布式发电接入所带来的影响,实质上智能电网的内涵中有很大一部分都是为了解决分布式发电并网的问题的。

分布式发电的最大特征就是其间歇性,电网接纳分布式发电除了制定统一的接入标准和保证电网的足够坚强外,在电网的规划、调度、运行等多个方面都需要加强其适应性的研究,如研究较准确预测或控制分布式发电变化规律的方法,降低系统分析计算和运行方式确定的难度;适应多电源点的电网结构给各种保护机理带来的巨大变化;研究解决当分布式电源发展到一定规模所带来的电压、网损、短路电流等一系列电网运行的问题等。另外,为了维持供电平衡和系统稳定,在目前的技术手段下必须依靠传统发电为分布式发电接入系统提供一定的备用容量,比例可能高达1:1,从而加重了分布式发电的成本,限制了分布式发电的发展;解决这一问题,需要通过发展储能技术,包括大容量集中新能源发电的储能技术及分布式电能存储(如电动汽车技术)来提高分布式发电的可控能力,补偿分布式发电的不稳定性。

分布式发电接入电网还将转变传统的辐射状供电为互动的供电方式,也将引起电力交易和体制方面出现一系列新的课题。在智能电网的概念中,涵盖了在电力企业和电力消费者间形成一种双向的交流模式^[9],包括信息的交流和能量的互动,从而为充分提高分布式发电效率和客户的参与度创建基础和平台。

2.3 服务与管理

从长远来看,为用户提供更加优质和多样性的服务是智能电网的一个很重要的内涵,而实现该目标则需要建立在较成熟的电力市场、高效的信息平台和精细的企业管理体制基础上。优质用户服务不仅体现在电力供应更可靠、电能质量更高,更重要的应体现在一些新型的、智能化的服务领域,如利用智能电表或智能电器实现用户合理安排用电等,这已不单单是

技术问题,还是服务观念上的创新。

作为电力企业,为实现优质服务需要加强自身统一高效信息平台和管理体制的建设,目前正在逐步推行的“SG186”工程和 ERP 系统就反映了这个方面的需求。通过统一规范的平台实现电网信息的整合以及未来与用户的互动,将大大提升企业管理和电力运营的水平,从而保证为用户提供更加优质服务能力。

3 四川发展智能电网的思考

四川水电资源非常丰富,随着德宝直流、雅安至重庆特高压交流、向家坝等特高压直流送出等线路的规划和建设,四川电网将形成多端馈出、特高压交直流混联、大容量远距离输电的送端电网,安全可靠运行要求高且电网控制难度大;四川小水电规模大且产业优势明显,川西高原风能、太阳能资源也较为丰富;另外,四川电网在安控、FACTS、防冰抗灾、广域测量、数字化变电站等技术领域已开展了一定的研究,具备了建设智能电网的基础。在四川建设智能电网,一定要结合自身的特点,在一些具有发展优势的领域进行创新研究,建设有四川特色的智能电网。

在电网自愈方面,四川电网所独有多端馈出、特高压交直流混联的特点对其调度能力和控制水平提出了更高的要求,也为智能电网提供了研究和实践的优秀平台。实现电网自愈,首先要加强对广域测量系统的研究和应用,实现 PMU 的优化配置,提升实时监测和自分析、自诊断的理论水平和实用化程度;其次,作为未来智能电网的重要控制手段,应增强大功率输电电路上加装 FACTS 装置的分析,并对全网 FACTS 装置及特高压直流输电的协调控制策略进行研究;再次,根据电网实际,应积极探索电网分区、分层、逐级自愈的理论和实践;另外,四川外送线路多处于重冰和自然灾害频发区,提高电网抗攻击、快速防御及快速恢复能力也是一项非常有意义的课题。

在分布式发电及其接入方面,应首先对分布式发电装置本身的效率、可靠性、控制调节能力等深入了解和研究,并提升分布式发电的试验和检测手段;积极研究分布式发电接入系统后对电网各个环节造成的影响和应对措施,包括含分布式电源电网的规划、计算分析、调度、继电保护及运行等方面,并逐步建设分布式发电的试点,在实际电网中对分布式发电的特性、影响、控制方法等进行考察和试验;作为分布式发电的一种,结合四川小水电众多的优势,可以对大规

模分布式电源接入后的交易体制、电价机制、管理模式等问题开展前期研究;另外,四川具有东方电机、双流光伏基地、发达的信息技术等产业优势,如何在智能电网发展的浪潮中占领一席之地也是一个值得思考的问题。

在服务和管理方面,首先应配合国家电网公司“SG186”工程和 ERP 系统整体部署,提升电力企业的信息和管理水平;并积极开拓思想,开展智能电表、电力市场和互动电网理论的前瞻性研究和实践,为未来智能电网中的应用建立技术储备。

4 结 语

①通过分析美国、欧洲智能电网驱动力和中国电网所面临的严峻挑战可以看出,智能电网无疑将是应对中国电网所面临巨大挑战的最好途径。②目前全球各国对智能电网的理解并不统一,与传统电网相比,智能电网主要在电网自愈、分布式发电及其接入、服务与管理三个方面体现出其内涵的先进性。③在四川建设智能电网,一定要结合自身的特点,在一些具有发展优势的领域进行创新研究,建设有四川特色的智能电网。④智能电网目前处于探索和起步的阶段,实现坚强智能电网的宏伟蓝图必将是一个长期、艰难的过程。

参考文献

- [1] 张文亮,刘壮志,王明俊,等.智能电网的研究进展及发展趋势[J].电网技术,2009,33(13):1-11.
- [2] 国网公司“坚强智能电网体系研究”技术综合组[R].坚强智能电网综合研究报告,2009.4.
- [3] 汤奕,Manisa P.,邵盛楠,等.中国与美国和欧盟智能电网之比较研究[J].电网技术,2009,33(15):7-15.
- [4] 丁民丞,王靖,朱治中.方兴未艾的智能电网[J].国家电网,2008,(5):86-88.
- [5] 中国电力新闻网.智能电网(Smart Grid).http://www.xindianli.com.cn/html/wx/xuexi/kecheng/2009/0428/14782_2.html 2009-4-28.
- [6] 余贻鑫,栾文鹏.智能电网[J].电网与清洁能源,2009,25(1):7-11.
- [7] 郭志忠.电网自愈控制方案[J].电力系统自动化,2005,29(10):85-91.
- [8] 张文生,徐岩.分布式发电及其对配电网的影响[J].高科技与产业化,2009,(5):92-94.
- [9] 武建东.智能电网与中国互动电网创新发展[J].电网与清洁能源,2008,(4):6-10.

(收稿日期:2009-10-10)

典型接线方式下智能配电网自愈功能实施的探讨

都健刚

(成都电业局城网管理所, 四川 成都 610041)

摘要:探讨了目前城市配电网几种常见接线模式,并提出了如何实现智能配电网模式下的自愈功能。

关键词:电力系统;智能电网;智能配电网;自愈功能

Abstract: Several familiar connection modes of urban distribution network are introduced, and then how to realize the self-healing function of smart distribution grid is put forward.

Key words: power system; smart grid; smart distribution grid; self-healing function

中图分类号: TM64 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0070-02

近年来,智能电网是国际电力行业的热门话题,被认为是改变未来电力系统面貌的电网发展模式,在中国,国家电网公司也明确提出建设坚强的智能化电网的总体目标。那么什么是智能电网呢?智能电网(smart grid)是集成了传统和现代工程技术、高级传感和监视技术、信息与通信技术的输配电系统,具有更加完善的性能并且能够为用户提供一系列增值服务。它包括智能输电网和智能配电网(smart distribution grid)两部分。

智能配电网中要实现一个很重要的功能网络自愈功能,即:对配电网的运行状态进行连续的在线自我评估,并采取预防性控制手段,及时发现、快速诊断和消除故障隐患;故障发生时,在没有或少量人工干预的情况下,能够快速隔离故障,自我恢复,避免大面积停电的发生。

介绍了现有配电网的几种接线模式,并针对几种典型的接线模式探讨了智能配电网自愈功能实施。

中国中压配电网一般由架空线和电缆线混合组成。中国常用的中压配电网常用接线模式如下。

1 架空线路

1.1 单电源辐射接线

单电源辐射接线模式又叫树干式接线,干线可以分段,其原则是:一般主干线分为 2~3 段,负荷较密集地区 1 km 分 1 段,远郊区和农村地区按所接配电变压器容量每 2~3 MVA 分 1 段,以缩小事故和检修停电范围。

单电源线辐射接线的优点是高压开关数量较少,

比较经济,新增负荷也比较方便。但其缺点也很明显,主要是故障影响范围较大,供电可靠性较差。当线路故障时,部分线路段或全线将停电;当电源故障时,将导致整条线路停电。

对于这种简单的接线模式,由于不存在线路故障后的负荷转移,可以不考虑线路的备用容量,每条出线(主干线)均可以满载运行,即最大供电负荷不超过该线路的安全载流量。

该模式目前大量存在于城区结合部和广大的农村地区。

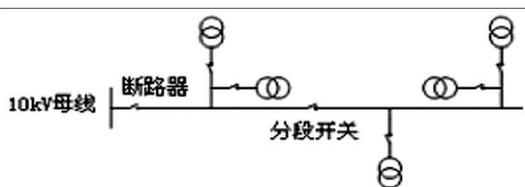


图 1 单电源辐射接线

这种接线方式要实现智能配电网的自愈功能,可采用重合器和分段器相互配合的方式,如图 2。

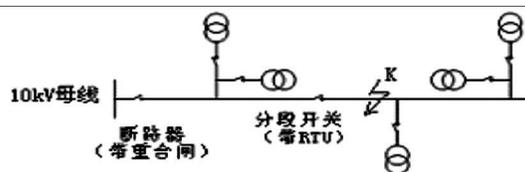


图 2 自愈功能单电源辐射接线

当线路在分段开关后发生短路后,线路断路器开关和分段开关一起跳开,线路开关通过分段开关 RTU 传回的分段开关的状态数据,判断分段开关是否跳开,若已经可靠跳开,则启动线路开关重合闸保证分段开关前段的线路保持正常供电;如果短路发生在变电站出口断路器和分段开关之间的线路,则变电

站出口断路器跳闸,重合闸启动,如果是瞬时故障重合闸成功,如果是永久性故障则断路器再次断开,并不在重合。该自愈功能保障的供电范围非常有限,线路的供电可靠性较低。

1.2 单环网接线

单环网接线又叫手拉手接线,这种模式中的两个电源可以取自同一变电站的不同母线段或不同变电站,采用环形接线,开环运行。这种接线的最大优点是可靠性比单电源辐射接线模式大大提高,接线清晰、运行比较灵活。主干线通常可分为二至三段,线路故障或电源故障时,通过开关切换操作可以使非故障段恢复供电。在这种接线模式中,线路的备用容量为 50%,即正常运行时,每条线路最大负荷只能达到该线路允许载流量的 50%。

它是目前城市里最广泛采用的接线方式。

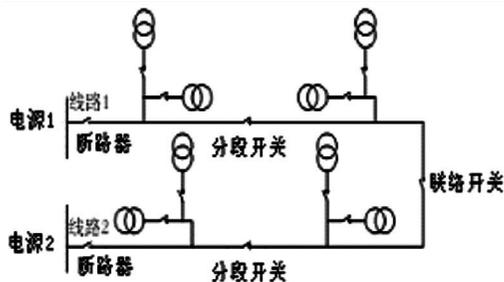


图 3 单环网接线

这种接线方式要实现智能电网的自愈功能,需要在变电站线路出口断路器上加装重合闸装置,在分段开关上加装分段器和 RTU,在联络开关上加装重合闸装置和 RTU,如图 4。

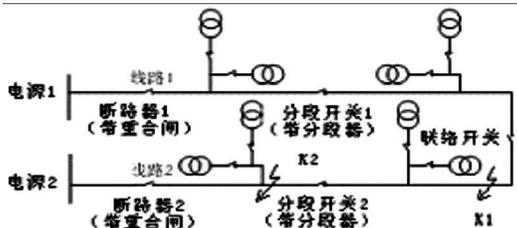


图 4 带自愈功能手拉手单环线

当短路发生在分段开关 2 和联络开关之间 K_1 处,分段开关 2 和断路器 2 瞬时跳开,断路器 2 通过分段开关 2 FTU 传递回来的数据判断分段开关 2 是否跳开,如果跳开则启动重合闸,断路器 2 合闸成功。联络开关检测到线路 2 无电压,启动重合闸,如果是瞬时故障,则合闸成功,如果是永久性故障则跳开后不再重合,要求,联络开关的动作较断路器 1 动作的速度要快。

当短路发生在断路器 2 和分段开关 2 之间 K_2 处,断路器 2 跳闸并重合,如果是瞬时故障,则断路器 2 启动重合闸成功;如果是永久性故障,则断路器 2 跳开不再重合,分段开关 2 通过 FTU 从断路器 2 传递回断路器 2 重合失败的信息后,跳闸,故障被隔离,联络开关通过 FTU 检测到分段开关 2 传递的分闸数据后,启动重合闸,转移供电成功。

2 电缆线路

随着城市的发展,美化城市、亮化城市的需求越来越高,因此目前国内很多大中城市的城市主干道都实施了架空线路下地,形成了电缆网,主要有以下两种配电网模式。

2.1 单环网接线

如图 5 所示,与架空线的单环网接线一样,两个电源可以取自同一变电站的 2 段母线或不同变电站。主供电线路由多台环网柜构成,并通过联络环网柜同相邻线路联络,联络环网柜开环运行。电缆单环网的环网点一般为环网柜,与单环网的架空线路相比它具有明显的优势,由于各个环网点都有两个负荷开关,可以隔离任意一段线路的故障,客户的停电时间大为缩短。在实际应用中,正常运行时,每条线路应留有 50% 的裕量。

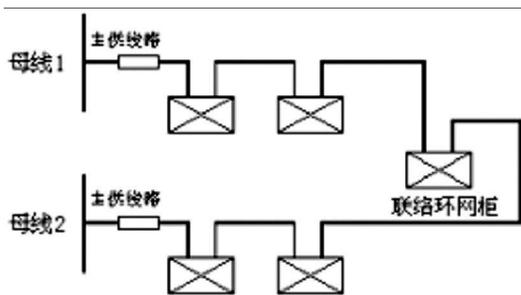


图 5 单环网接线模式(电缆)

2.2 三回馈线组接线方式

如图 6 所示电缆线路三回馈线组接线方式,两两互为联络,其中两个电源可以取自同一变电站的 2 段不同母线,另一个电源取自另一个变电站。这种接线方式同单环网的接线模式相比较,供电可靠性更高,每条馈线的最高负载率为 67%,线路的利用更高。它适用于负荷密度较大且供电可靠性要求高的城区供电。

2.3 电缆网接线实现智能电网的自愈功能探讨

(下转第 76 页)

参考文献

[1] 中国道路与世界视野 [J]. 国家电网, 2009, 42(6): 22-49.

[2] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.

[3] 林宇锋, 钟金, 等. 智能电网技术体系探讨 [J]. 电网技术, 2009, 33(12): 8-12.

[4] x p zhang A Framework for Operation and Control of Smart Grids with Distributed Generation Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE 20-24

July 2008: 1 - 5.

[5] 张伯明, 吴素农, 等. 电网控制中心安全预警和决策支持系统设计 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 1-5.

[6] 苗新, 张恺, 等. 支撑智能电网的西悉尼通信体系. 电网技术, 2009, 33(17): 8-13.

[7] 谢开, 刘永奇, 等. 面向未来的智能电网 [J]. 中国电力, 2008, 46(6): 19-22.

作者简介

郑毅, 男, 成都电业局生产技术部、高级工程师、工学硕士、长期从事电网自动化通信和二次系统技术管理和工程建设。
(收稿日期: 2009-10-28)

(上接第 63 页)

[8] 李俊峰, 王仲颖, 胡润青, 等. 中国新能源与可再生能源政策法制建设 [R]. 中国新能源产业年度报告 2008. 2008, 11.

[9] 新华网. 可再生能源法修正案草案向社会公开征集意见(全文) [N]. http://news.xinhuanet.com/legal/2009-08/28/content_11959731.htm, 2009-8-28.

[10] 中国科技产业网 [N]. 新兴能源产业发展规划即将出台. <http://www.kejicy.com/cm/sreleasesys/zgkjcy/info-detailed.asp?id=5518>, 2009-8-10.

[11] 财政部, 科技部, 国家能源局. 关于实施金太阳示范工程的通知. 2009, 7.

[12] 电子工业专用设备编辑部. 薄膜太阳能电池前景 [J]. 电子工业专用设备, 2009, (1): 1-4.

[13] 赵朝会. 光伏发电技术的研究现状和应用前景 [J]. 上海电机学院学报, 2008, 11(2): 104-109.

[14] 张志强, 马琴, 程大章. 太阳能光伏发电系统中的控制技术研究 [J]. 低压电器, 2003, (12): 55-58.

[15] 彭方正. 变流技术在分布式发电和微电网上的应用 [J]. 变流技术与电力牵引, 2006, (2): 23-27.

[16] 曾议, 吴政球, 刘杨华, 等. 分布式发电系统孤岛检测技术 [J]. 电力系统及其自动化学报. 2009, 21(3): 106-110.

[17] 钱科军, 袁越. 分布式发电技术及其对电力系统的影响 [J]. 继电器, 2007, 35(13): 25-29.

[18] 刘杨华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述 [J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.

(收稿日期: 2009-10-10)

(上接第 72 页)

上述两种接线方式要实现自愈功能, 需要环网柜宜留有备用空间以安装控制、测量装置, 宜具备扩展

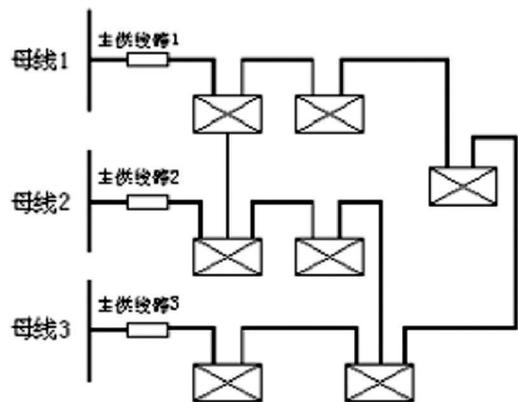


图 6 互为备用的三回馈线组接线方式

功能或接口; 负荷开关需配有电动操作机构, 直流操作, 电源由 10 kV 母线电压互感器提供。在环网柜的所有进线和出现负荷开关都安装 FTU, 并通过光纤接入主站系统, 由于开关数较多, 判断的逻辑顺序较为复杂, 必须开发相应的软件来控制负荷开关的动作。当线路上发生故障时候, 主站系统根据 FTU 传递的

信息, 通过软件计算遥控相应的负荷开关的开合, 以达到隔离故障, 恢复无故障段供电的目的。

3 结 论

以上对目前城市配电网要实现智能配电网的自愈功能进行了初步的探讨, 不同的配电网接线模式实现自愈功能的模式是不同的。随着中国城市化进程的加快, 对城市供电可靠性的要求越来越高, 因此对配电网的接线模式必须要有新的研究和突破, 尽量找到适合国情的配电网接线模式, 在此基础上实现智能配电网的自愈功能, 这样才能符合发展智能电网的总体需求。

参考文献

[1] 徐丙垠. 智能电网与配电自动化技术讲座, 2009.

[2] 能源部, 建设部. 《城市电力网规划技术导则》[M]. 北京: 水利水电出版社, 1995.

[3] DL/T 599-1996. 城市中低压配电网改造技术导则.

[4] 刘建. 配电自动化系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

(收稿日期: 2009-10-10)

供电企业建设坚强智能电网新技术应用策略的探讨

郑毅

(成都电业局, 四川 成都 610021)

摘要: 智能电网是对未来电网发展的美好愿景。供电企业将面对巨大挑战, 其中涉及发输变配用和储能等各个环节以及相关数字化、信息化和自动化控制等技术领域, 甚至可能影响电力体制的变革。对相关新技术应用策略进行阐述。建设智能电网应该考虑现有技术和配套社会经济发展实际情况, 从局部到整体逐步推进电网智能化进程。对指导当前开展智能电网工作具有意义。

关键词: 供电企业; 智能电网; 自动化技术; 电网监控

Abstract: The smart grid is the good vision of the future power system. Power supply enterprises will face huge challenges which involves the generation, transmission, substation, distribution and energy storage, as well as some field related to digitization, informationization and automation control technology, and may even affect the power system reform. The relevant strategies are described with regard to the new technology application of smart grid. The construction of a smart grid should take the existing technologies and the actual situation of supporting socio-economic development into account, and it should be built from the local to the whole step by step. It is meaningful to guide the construction of a smart grid at the present day.

Key words: power supply enterprises; smart grid; automation technology; supervisory control of power grid

中图分类号: TM71 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0072-04

0 引言

当前建设坚强智能电网已成为国家电网公司今后十年持续快速发展极为重要的重要战略部署, 国内外对此给予了高度关注。2009年5月特高压输电技术国际会议和高压直流输电技术委员会首次会议在中国召开, 国家电网公司首次向世界公布了智能电网的发展计划: “2020年建成统一的坚强智能电网”^[1], 供电企业将为此作出积极努力。但发展智能电网投资巨大, 而从事的智能电网从初级阶段到高级阶段不断发展的过程, 不能一蹴而就^[2]。智能电网的实现须有坚实的基础技术和功能, 涉及电力设备、量测和通信系统、信息化系统、决策与控制理论, 涉及智能控制中心、智能变电站、智能需求侧管理^[3]、智能配电网^[4]等很多方面。建设坚强智能电网将对电网新技术的研发和应用提供更大的发展空间。但是, 从哪些技术层面以及采取怎样的策略来指导智能化电网的工作成为问题的关键之一。应当结合实际的情况, 结合国网公司发展的总体部署, 提出符合自身特点发展地区电网智能化应用和发展纲要, 突出供电企业在技术应用和运行方面的优势。其中, 基于现有技术和配套社会经济发展, 从局部到整体逐步推进电网智能化

进程的策略尤为重要。这里主要探讨在建设坚强智能电网中, 供电企业能够重点研究开展的一些新技术领域的应用策略, 包括急需开展的输配电线路的智能化技术应用、配电网自动化初级阶段的监控技术应用、数字化变电站及其集中在线监测技术、调度智能化的初步实践应用、光纤通信及信息化技术、需求侧管理等几个主要方面。

1 输配电线路和电缆在线监测技术

特高压、超高压领域应用的电力电子技术, 科技含量高, 其应用地区也局限在部分地区, 而且大都由超特高压专门机构运行管理或建设, 这个领域是建设坚强智能电网的重要关注点, 但一般供电企业涉足不多。作为供电企业和研发单位却可以发展 220 kV / 110 kV 及以下电压等级的输配电线路、设备和电力电缆涉及智能化方面的科技应用, 研究技术集成技术, 总结智能化应用经验, 比如:

输电线路光纤在线监测预警技术, 提高巡视线路和故障查找的效率, 解决和预防覆冰或线路故障, 也解决电力线路在科技应用手段上相对比较薄弱的局面。该技术适用于山区、水域、沙漠等输电线路开展无人区远距离光纤在线监测应用, 体现各地区的自然

特性和线路维护管理特点。

发展电力电缆在线监测技术应用。重点在大型城市,特别是省会城市供电企业开展,这些城市供电企业通常拥有大面积、超长度的电力电缆和隧道运行维护工作量等特点。电力电缆在线监测技术具有广阔的应用前景。

2 配电网智能化初级阶段新技术

虽然中国在配电网自动化领域中已经有了十几年的应用经验,但是总体效果并不理想,一些示范工程先后出现维护和应用技术问题而退出运行。今天重提配电网智能化,应重新审视配电网自动化的应用范围和策略,而且宜在大中城市城区开展配电网智能化的初步应用。

配电网的智能化,必须分步实施,先从点再到线逐步开展:

首先建立地区统一配电网监控中心,一些地区还可能需建立配调中心。应先将配网中物理安装位置相对比较固定的点,即开关站或环网柜等,进行二次系统改造,现阶段可以借用变电站综合自动化技术进行改造或建设,分别配以光纤通信,实现配电网监控或调度中心对开关站进行实时监控。本阶段最基本也是重要的是把握建设配电网监控中心模式和配电网监控主站系统规模的策略。建议:建设集中监控中心,便于精细管理,以后扩展较为有利;宜一次性按照 3~6 年的应用规划水平年建设配电网监控主站系统应用环境,便于整体功能规划,其中优先考虑对配电网点的 SCADA 功能,也有利于节约整体项目投资。

在积累对配电网点监控经验的同时也给自己留下深入研究和整理地区配电网如何整体实施自动化的时间。这个阶段归纳起来主要完成:配电网 SCADA 以及实现与地区调度自动化系统的接口,将变电站 10 kV 信息采集进配电网。

第二步,扩充规模,从点再到线,实现配电网调度的部分智能化功能。同时研究实现配电网系统与 SG186 系统接口、与配电网 GIS 互联(接口)以及配电网自动化整体实现的问题。实实在在地在配电网的技术应用方面有所作为,而不至于理论脱离实际。扭转目前许多地区配电网设备由于没有信息采集手段来支撑远方监视运行工况,从而开关站维护巡视难

以做到巡视到位、抢修反应较慢以及配电网调度运行主要靠用户反馈信息和纸质图纸指挥生产的局面。

3 变电站智能化技术

3.1 数字化智能化变电站建设

这是讨论热烈、正在高速发展的领域,目前全国示范工程几乎遍及各个省区。虽然各地模式和建设原则尚未统一规定,但通过调研显示其运行效果总体较好。虽然国内的建设标准和检测标准暂时未出台,但基本认识比较统一,比如采用 IEC61850 数字化光电互感器等。数字化变电站技术的出现,打破了一次系统和二次系统关于专业界面的传统限制,事实上已经涉及到供电企业生产管理体制整合上的问题,包括专业整合。供电企业必须尽快加入这些示范工程建设中,不断积累经验推动数字化和智能化的发展。建议:如果新建数字化站,可以同时加入一次变电的新技术应用,比如 GIS、HGIS 与数字化设备结合的方式等。使变电站建设更加紧凑,技术综合应用能力更高。大中城市供电企业通常已经具备运行和维护数字化变电站的一些技术储备,关键在应用。同时智能化同类产品之间、一次和二次方面也开始形成多系统和多形态百花争艳的局面。小规模、专业化的研发应用将逐步走向大规模、集团化发展应用,走向多专业尤其是一、二次专业交叉复合型研发应用。标准化规范化建设贯穿了变电站智能化的全过程。

3.2 变电站集中在线监测

老旧和新建变电站均可以采用集中在线监测这种技术,为一次变电设备的状态检修和综合运行工况评判提供科学依据,提高一次过程控制的能力。在线监测集中监测所采集的数据可以通过光纤方式与站内监控系统通信或独立组网,传送到状态监测中心。这个领域的研究发展虽然已经走过了十几年时间,但还处于初步发展阶段,发展空间非常巨大。关键是光纤技术、传感器技术以及分析、处理技术的进一步提高,还涉及到通信网络技术的配套等。

4 调度智能化技术

中国地区调度自动化系统其应用功能大多比较丰富,具有几十年成功运行经验的调度生产 EMS 中国已经积累了丰富的经验,技术基础储备丰厚。可以

预测,调度自动化可能是全国智能化建设中率先达到智能化的领域之一,至少是应用比较成功的领域。其他方面如变电站自动化远方监控、电能量信息采集与处理、变电站视频技术等也将围绕调度自动化智能化的发展突出应用功能并进一步发展和完善。

但是一般供电企业 EMS 还仅仅是智能化的基础而已,它还必须辅以其它相关系统的完善和配合,比如调度预警、调度生产可视化、变电站自动化(智能化变电站)、光纤网络化等配套才能比较完善,实现传统 EMS 缺少自动跟踪电网运行状态、自动诊断电网问题、根据问题自动给出控制或调整建议以及在线暂态分析和电压稳定分析功能等。智能化调度需要在线预警系统的建立,地调自动化系统应当统一规划网络数据模型和可视化功能,实现在线安全稳定分析和安全预警,提高调度的辅助决策能力。调度员不能继续沿用经验和靠离线分析电网安全的方式来调度电网,必须依靠智能系统辅助分析和预警提示来控制电网安全运行,达到调度目标。尽管省调以上调度领域已经有些应用。但地区调度电网复杂性和安全压力实际上也相当大,需要研究应用的可能性。省会城市可以在省调和地调之间开展联合预警,相互支撑,互联的结果将会使在线预警分析系统的使用效率更高,更具应用价值。

5 光纤通信及信息化技术

5.1 光线通信

智能电网是将现代先进的传感测量技术、通信技术、信息技术、计算机技术和控制技术与物理电网集成而成的新型电网,需要全面建设高速、宽带、自愈的坚强电力信息通信网络,支持多业务的灵活接入,为电力智能化系统提供即插即用的店里信息通信保障。因此,光纤通信在整个坚强智能化电网的事业中,起着十分重要的作用,智能电网领域都与之关联,智能化首先要通信畅通、通信坚强。包括:

光纤网络通信到每座变电站和相关管理单位、部门;每条通道都能可靠自愈;超长距离光缆必须得到良好的维护管理,在线监测和资源管理技术手段必须配套;对于实时系统的通信通道还需在光纤通信的基础上完善调度数据网络,为电能量采集系统、变电站自动化系统、各站各单位视频系统等提供公共通道。光纤覆盖率要做到企业全覆盖、全自愈和智能化综合

网络管理、资源管理。

5.2 信息化技术

主要围绕 ERP、SG186 工程开展,国网公司同步实施。但是,信息网络的建设和完善需要进一步发展,主要应从网络设备上全面提升带宽、覆盖率和速率,配合各地区光纤传输通信骨干网络的建设完善,组建起电力专用的坚强信息网络物理链路层。其中专用骨干网络的资源管理系统和方案涉及到电力系统专用的资源、保密等环节,应当引入具有专门资质为电力服务的集团企业进入该领域,提供系统专业服务,参与大企业的核心技术管理。

6 需求侧智能化技术

在用户侧大量开展与用电有关的科技应用,是智能化电网重要的领域之一。智能化的结果就是让用户最终能够感受到电力智能化的成果。国家电网也在积极开展用电智能化技术标准和实施方案的研究,比如需求侧用电定制、集中或大宗用户的智能化负荷管理与电能量采集与电费交易的智能化和个性化等。智能化管理涵盖智能化抄表、计量智能化。逐步建立高级量测体系包括智能电表、通信、电表数据管理系统。实现智能需求侧管理包括用电状况收集、需求侧/电网双向通信、实时电价响应、智能家电控制、虚拟电厂和微网控制、防偷电等任务等。这些内容需要在一个地区整体研究并制定实施计划、调查分析地区用电分布尤其是地区特殊用电情况,研究可实施内容,形成能够分步实施的可行的需求侧方案。需求侧自动化和智能化管理的实施政策性很强,需要电力企业与地方政府充分衔接,并得到政策上的有力支持,共同推动智能化电网事业的进步,为民造福。

7 结 语

智能电网是一个前景广阔的世纪工程,利国利民。智能电网的技术通过与电力生产的各项业务实现有机结合,从而体现智能电网的优越性能,提高系统的运营绩效。初级阶段的技术应用策略应充分考虑本地区特点和研发企业的技术优势,因地制宜、统一规划、分布实施。统一标准、创新思路、革新产品。可以预料,智能电网将会极大推动电力科技应用和生产水平水平的提高,书写出令世人生活发生巨变的篇章。

参考文献

[1] 中国道路与世界视野 [J]. 国家电网, 2009, 42(6): 22-49.

[2] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.

[3] 林宇锋, 钟金, 等. 智能电网技术体系探讨 [J]. 电网技术, 2009, 33(12): 8-12.

[4] x p zhang A Framework for Operation and Control of Smart Grids with Distributed Generation Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE 20-24

July 2008: 1 - 5.

[5] 张伯明, 吴素农, 等. 电网控制中心安全预警和决策支持系统设计 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 1-5.

[6] 苗新, 张恺, 等. 支撑智能电网的西悉尼通信体系. 电网技术, 2009, 33(17): 8-13.

[7] 谢开, 刘永奇, 等. 面向未来的智能电网 [J]. 中国电力, 2008, 46(6): 19-22.

作者简介

郑毅, 男, 成都电业局生产技术部、高级工程师、工学硕士、长期从事电网自动化通信和二次系统技术管理和工程建设。
(收稿日期: 2009-10-28)

(上接第 63 页)

[8] 李俊峰, 王仲颖, 胡润青, 等. 中国新能源与可再生能源政策法制建设 [R]. 中国新能源产业年度报告 2008. 2008, 11.

[9] 新华网. 可再生能源法修正案草案向社会公开征集意见(全文) [N]. http://news.xinhuanet.com/legal/2009-08/28/content_11959731.htm, 2009-8-28.

[10] 中国科技产业网 [N]. 新兴能源产业发展规划即将出台. <http://www.kejicy.com/cm/sreleasesys/zgkjcy/info-detailed.asp?id=5518>, 2009-8-10.

[11] 财政部, 科技部, 国家能源局. 关于实施金太阳示范工程的通知. 2009, 7.

[12] 电子工业专用设备编辑部. 薄膜太阳能电池前景 [J]. 电子工业专用设备, 2009, (1): 1-4.

[13] 赵朝会. 光伏发电技术的研究现状和应用前景 [J]. 上海电机学院学报, 2008, 11(2): 104-109.

[14] 张志强, 马琴, 程大章. 太阳能光伏发电系统中的控制技术研究 [J]. 低压电器, 2003, (12): 55-58.

[15] 彭方正. 变流技术在分布式发电和微电网上的应用 [J]. 变流技术与电力牵引, 2006, (2): 23-27.

[16] 曾议, 吴政球, 刘杨华, 等. 分布式发电系统孤岛检测技术 [J]. 电力系统及其自动化学报. 2009, 21(3): 106-110.

[17] 钱科军, 袁越. 分布式发电技术及其对电力系统的影响 [J]. 继电器, 2007, 35(13): 25-29.

[18] 刘杨华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述 [J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.

(收稿日期: 2009-10-10)

(上接第 72 页)

上述两种接线方式要实现自愈功能, 需要环网柜宜留有备用空间以安装控制、测量装置, 宜具备扩展

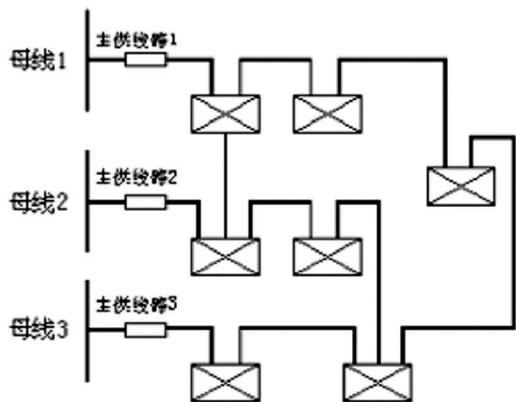


图 6 互为备用的三回馈线组接线方式

功能或接口; 负荷开关需配有电动操作机构, 直流操作, 电源由 10 kV 母线电压互感器提供。在环网柜的所有进线和出现负荷开关都安装 FTU, 并通过光纤接入主站系统, 由于开关数较多, 判断的逻辑顺序较为复杂, 必须开发相应的软件来控制负荷开关的动作。当线路上发生故障时候, 主站系统根据 FTU 传递的

信息, 通过软件计算遥控相应的负荷开关的开合, 以达到隔离故障, 恢复无故障段供电的目的。

3 结 论

以上对目前城市配电网要实现智能配电网的自愈功能进行了初步的探讨, 不同的配电网接线模式实现自愈功能的模式是不同的。随着中国城市化进程的加快, 对城市供电可靠性的要求越来越高, 因此对配电网的接线模式必须要有新的研究和突破, 尽量找到适合国情的配电网接线模式, 在此基础上实现智能配电网的自愈功能, 这样才能符合发展智能电网的总体需求。

参考文献

[1] 徐丙垠. 智能电网与配电自动化技术讲座, 2009.

[2] 能源部, 建设部. 《城市电力网规划技术导则》[M]. 北京: 水利水电出版社, 1995.

[3] DL/T 599-1996. 城市中低压配电网改造技术导则.

[4] 刘建. 配电自动化系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

(收稿日期: 2009-10-10)

智能电网初探

赖民昊¹, 刘 芸²

(1 成都电业局, 四川 成都 610021; 2 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘要:从智能电网的概念出发, 阐述了智能电网的特征以及国内的研究现状, 分析了中国发展智能电网的构建思路, 指出了建设智能电网在通信系统、测量计量体系、控制技术、电网设备、决策支持等领域需要解决的关键技术问题。

关键词:智能电网; 互动; 自愈; 信息化; 分布式能源

Abstract: According to the concept of smart grid, its features and the recent research status in China are described. The building ideas of smart grid in China are analyzed. And the key technical problems needing to be resolved are indicated in communication system, measurement system, control technology, grid equipment, decision support and other fields.

Key words: smart grid; interaction; self-healing; informationization; distributed energy resource

中图分类号: TM711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0076-03

进入 21 世纪之后, 中国经济发展的步伐逐渐加快, 电力的供需矛盾日益突出, 需要建设智能化电网, 发展特高压电网, 构建电力“高速公路”, 成为智能电网的必然选择。而如何在现有的成果上, 将建设特高压骨干输电网与建设智能化电网有机地结合起来, 成为当前中国电网发展面临的一个新课题。

情况下保证电网的安全, 它容许不同类型电源的接入, 扩大系统运行调节的可选资源范围, 允许“即插即用”连接任何电源, 适应多元化用户接入需求。智能电网能在不同区域间进行及时调度, 平衡电力供应缺口。实现电网信息高度集成和共享, 采用统一平台和模型, 降低投资成本和运行维护成本。

1 智能电网概念

智能电网, 有人把它称作“电网 2.0”, 顾名思义, 它是新生的“第二代”电网, 它是建立在集成的、高速的双向通信网络的基础上, 通过应用先进的传感和计量测量技术、设备技术、控制技术以及决策辅助支持系统技术, 从而实现电网的可靠、安全、优质、经济、高效、环境友好以及使用安全的目标。

2 智能电网的特征

中国发展现代化的智能电网共有六大特征: 自愈、互动、安全、兼容、集成、经济。

“自愈”是智能电网的“免疫系统”, 它把电网中有问题的元件从系统中隔离出来, 并且在很少或不用人为干预的情况下, 可以使系统迅速恢复到正常运行状态, 从而几乎不中断对用户的供电服务。互动电网是下一代全球电网的基本模式, 它依靠实时监控和数据整合, 在不同区域间进行及时调度、平衡电力供应缺口, 从而达到对整个电力系统运行的优化管理。现代化智能电网的安全性能抵御外界的物理攻击和网络攻击, 在自然灾害、外力破坏和计算机攻击等不同

3 构建智能电网的思考

3.1 智能化变电站建设

建设智能化变电站是实现变电站数字化。数字化变电站的主要特征是“一次设备智能化, 二次设备网络化, 自动化的运行管理系统”, 即数字化变电站内信息全部实现数字化, 信息传递实现网络化, 通信模型达到标准化, 使各种设备和功能共享统一的信息平台。

3.1.1 智能化的一次设备

设备的通信通过网口来实现, 通过网口可以实现对设备相关状态信息的读取, 通过网口可以实现对设备的监控与控制, 设备被检测的信号回路和被控制的操作驱动回路都采用微处理器和光电技术的设计。这使得传统的导线连接被数字程控器及数字公共信号网络所取代, 传统变电站二次回路中的继电器及其逻辑回路被可编程控制器取代, 常规的强电模拟信号和控制电缆被光电数字和光纤代替。

3.1.2 智能化数采系统

电流和电压数据首先进行数字化, 变电站形成光缆数字化数据网, 变电站各智能设备从数据化网中提取所需数据, 完成和实现电网保护、控制、测量、信号

等功能。

3.1.3 智能化的保护系统

变电站中常规的二次设备:继电保护装置、故障录波装置、电压无功控制、远动装置等,都是基于标准化、模块化的微处理机技术而设计制造,设备之间的通信连接全部采用高速的网络,各保护设备从变电站数据网中提取数字化的数据,以光缆双网口方式接入变电站公共光缆控制网二次设备,通过网络真正地实现了数据、资源的共享。

3.1.4 自动化的运行管理系统

变电站运行管理系统的自动化包括电力生产运行数据、状态记录统计的自动化、无纸化;变电站运行发生故障时,并且能够及时地提供故障分析报告,指出故障原因及相应的处理意见;系统能自动发出变电站设备检修报告。

3.2 输电线路建设

对于特高压输电线路实现智能化,可以使用以地理信息系统 GIS 为整体平台,以全球定位系统 GPS 为地理定位的技术手段,将掌上电脑、后台管理机,计算机和网络通信技术融为一体的智能化输电线路巡检系统来进行输电线路巡检,使它们的状态可以实现实时远程监控。另外,特高压输电线路的长距离输送功率受限、潮流分布不合理、系统稳定性变差等问题可以通过装有电力电子型和其他静止型控制装置的交流输电系统,在技术上加以解决。

3.3 电网控制建设

从控制论角度来看,电网是一个巨维数的典型动态大系统,它具有非线性、参数时变不确定的特征,且电网大部分元件具有延迟、磁滞、饱和等复杂的物理特性,对这样的系统实现有效决策控制是有一定难度的。这就要求电网调度指令可达任意变电站层,大电网控制系统应具有丰富的专家系统,具有人工智能功能,在线监控和判断运行状态,分析、诊断和预测电网中设备元件的状态并确定和采取适当的措施以消除、减轻和防止供电中断和电能质量扰动。

3.4 电网维护

电网可传送信息至维护端,在日常工作中就可在在线监视电网各有关设备,可监视电网线路的导线、绝缘子、铁塔,以及变电站中主变压器设备、断路器、电压互感器、电流互感器、继电保护等设备的运行状态,在正常运行时,就可以预防事故。实现状态检修等功能。

4 构建智能电网的关键技术

4.1 集成的通信技术

建立高速、双向、实时、集成的通信系统是实现智能电网的基础,当这样的通信系统建成后,它可以提高电网的供电可靠性,抵御电网受到的攻击,同时,可以使智能电网通过连续不断地自我监测和校正,从而实现其最重要的特征——自愈特征,系统还可以监测各种扰动,进行补偿,重新分配潮流,避免事故的扩大。

在这一技术领域主要有两个方面的技术需要重点关注:第一,就是通信架构的开放性,它形成一个“即插即用”的环境,使电网元件之间能够进行网络化的通信;第二,就是统一的技术标准,它能使所有的传感器、智能电子设备以及应用系统之间实现无缝的通信,实现设备和系统之间的互操作功能。

4.1.1 Internet 2

目前全世界广泛使用的是第一代国际互联网 IPv4 所提供的网址资源已近枯竭。而 Internet 2 是下一代高速互联网骨干网,它采用的是 IPv6 协议,能产生 2^{128} 次方个 IP 地址,地址资源极端丰富。

4.1.2 光纤以太网通信

“信息高速公路”的基础是光纤通信,传送的速率很高,电力公司在光纤环路架构可以经济有效地覆盖视频,在同步光纤网络骨干网上有效地进行模拟视频传输,并解决了在需要对变电站进行监视时通信远距离网络传输的问题。

4.1.3 电力线宽带通信(BPL)

利用在 2—50MHz 的频率下短距离 BPL 通信,在用户入口处可以实现 20 Mbps 至 100 Mbps 的数据传输速率,使用家庭电源插头和室内布线,使家庭插座允许象以太网网络一样的即插即用。

4.1.4 第四代(4G)WMax 无线通信

在数据传输速率为 75 Mbps 下, W Max 可以至少提供长达 16 km 的远距离通信,在某些情况下传输距离可超过 50 英里。W MAX 的可用性和功能,可作为支持变电站或配电自动化 W F 应用的输变电通信系统的骨干网。

4.2 传感、计量和测量技术

在智能电网中,采用各种先进的传感器,结合双向通信的智能表计与监视系统,用以监视用户端用电状况、电网设备的健全状态与网络安全状态,提供智能电网安全经济运行的最基础的功能。

4.2.1 广域意义上的测量和控制系统

由级联跳闸和人为处理不当而演变成的大停电事故,日益引起人们的关注。在存在风险的情况下,用以制止级联跳闸和缩小停电范围的主动解列、灵活分区等措施,以及从集中监视控制发展到分布协调控制,已成为目前电网安全控制的研究热点。广域的测量和控制系统是在功角遥测基础上发展起来的,此系统通过测量同步相量的手段,动态地监视电力系统的状态,以实时的方式评估正常和遭受应力时的系统状态并执行有效的动态控制。此系统的架构开发需要在变电站站端安装数据收集装置、可靠的广域通信网络、数据集中器以及可视化的决策设备。

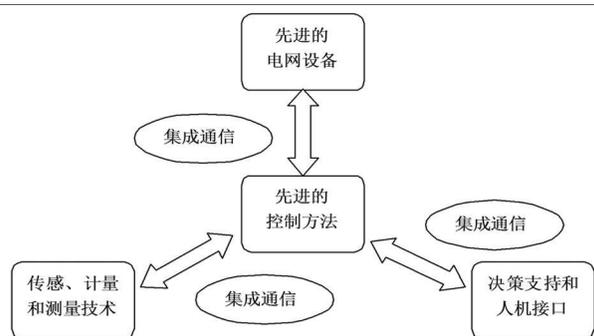


图 1 智能与传统电网对比图

4.2.2 电网设备的在线监测

电网设备在线监测技术包括电气量监测以及非电气量监测。电气量监测通过监测电网设备的电流、电压、相角、功率、功率因数等特性量;非电气量监测包括监测电气设备中介质的压力、流量、气体成分、温度等。主设备按电网要求可以输出状态信息量,接入变电站自动化系统,然后送往变电站维护中心,用于主设备状态监控和分析。在变电站的维护中心设置主设备在线状态分析和诊断系统,进行实时分析和监控,及时提出分析和和诊断报告,可实现提前预先处理设备隐患。

4.3 先进的电网设备

智能电网中应用的先进电网设备,将采用新材料技术、超导技术、电力电子技术、微电子技术等,以生产出高功率密度、高可靠性、改善实时诊断性能的新一代电力系统设备,包括超导输电电缆、故障电流限制器、复合导线、灵活交流输电系统设备(FACTS)、先进储能装置、分布式发电装置、先进变压器和断路器、先进保护控制设备等,以显著改进电网运行性能。

4.4 先进的控制方法

电力系统自动控制通过从所有电网主要设备中

收集数据,输入到计算机进行算法运算,可监视这些电网设备,并通过以确定性的和随机的观点分析数据去进行诊断和提供解决方案。这些先进控制方法应支持诸如分布式能源和需求响应调度、配电自动化和变电站自动化、自适应继电保护等系统。用于先进的控制方法的三类技术包括:分布式智能代理,即控制系统;分析工具,诸如软件算法、高速计算机等;运行应用,诸如 SCADA、变电站自动化、需求响应调度等。

4.5 决策支持和人机接口

现代电网需要专业的、无缝的、实时使用的应用工具,以满足电网操作和管理人员作出快速决策的需要。决策支持和人机接口技术主要包括可减少大量数据到易于理解的可视格式的可视化工具和系统以及当系统运行人员操作时需提供的多种方案软件系统,还可以用作演示的控制板、先进的控制室设计等等。

5 结 语

中国的智能电网建设,应该是依据中国能源资源的具体国情,适应国家发展的战略部署,考虑未来中国发展的预期远景,满足不断增长的电能需求,提高电网运营的安全性、可靠性和经济性,提高能源利用效率,实现节能减排,逐步建成具有中国特色的智能电网。中国发展智能电网是一项长期的系统性工程,不仅要涵盖欧、美智能电网的概念和范围,还要加强骨干电网建设,即建立一个以特高压电网为骨干网架的各级电网高度协调发展的智能电网。中国特色的智能电网必将引领国际智能电网的发展潮流。

参考文献

- [1] 谢开,刘永奇,朱治中,等.面向未来的智能电网[J].中国电力,2008,41(6):19-22.
- [2] 温哲.电力企业需要智能电网[J].广西电业,2007,(1).
- [3] 高毅,袁静中,范迪才.建设智能化现代电网的设想[J].华北电力技术,2009,(5):45-47.
- [4] 武建东.智能电网与中国互动电网创新发展[J].电网与清洁能源,2009,25(4):5-8.

作者简介:

赖民昊,男,1981年生,助理工程师。

刘芸,女,1982年生,助理工程师。

(收稿日期:2009-10-10)



实验室申报



实验室授牌

智能电网四川省重点实验室

智能电网四川省重点实验室 (Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory of Sichuan Province) 成立于2009年, 是由四川大学与四川省电力公司联合承建的省级重点实验室。本实验室依托四川大学, 整合了四川大学电气信息学院与四川电力试验研究院的人才与实验室资源, 拥有独立的专业实验大楼, 拥有教授14人, 副教授12人和一批在国内同行业中具有较高知名度的各类专业技术人员; 建有500kV超高压试验基地、电力系统动态模拟试验室、电测及热工计量标准室、大型火电机组全范围仿真模拟室等30余个大、中型实验室; 具有由上级权威部门批准授权进行质量监督、检验的高电压产品质量检验站、直流电源柜质量检验站、500kV超高压带电作业培训中心、火电专业职业鉴定中心等16个电力专业技术质量监督检验中心(站), 配备有一大批达到国内外先进水平的测试仪器与试验装备。

智能电网是国内外当前和未来发展的重要方向, 也是四川电网建设和发展的要求, 符合学科发展趋势。通过建立智能电网的研究平台, 解决四川电网面临的新问题, 加快理论和技术储备及高层次人才队伍建设, 保证四川电网的安全稳定和服务地方经济及社会发展, 具有重要理论意义和实际应用价值。



实验室评审会



四川省电力公司领导听取实验室建设工作汇报

在智能电网工作中发挥科技主力军作用

2009年9月4日，四川电力试验研究院领导、科技信息部、生产技术部、党委工作部以及各专业中心中层干部和相关科技人员等20余人在该院召开了智能电网工作会。会议由四川电力试验研究院院长卢昌华主持。

在工作会上，副院长胡灿详细传达了国家电网公司和省电力公司智能电网工作座谈会的会议精神，总结了该院开展的智能电网建设工作，按照“抢占先机、抓住重点、覆盖全面”的思路，安排部署了智能电网建设的下一阶段工作。

会上，该院各科室领导纷纷发言，认为国家电网公司建设的“统一坚强智能电网”就是要在调度、输电、变电、配电等四个环节上实现数字化和智能化，强调在智能电网工作中要把握国网公司的政策重点，结合四川电网的特点，加强科学规划，做好技术储备和消化。各专业技术中心负责人和技术人员在发言中认为智能电网是各种技术的融合，是知识的相互渗透，对技术人员提出了更高的素质要求，工作中还要加强学习，把握机遇，争取在专业领域有所建树。

四川电力试验研究院院长卢昌华指出，国家电网公司的智能电网建设是技术与管理的高度融合，充分体现国网公司在技术上做到“信息化、自动化、互动化”和管理上实现“集团化、集约化、精益化、标准化”的发展要求。他要求，四川电力试验研究院要严格按照国家电网公司和四川省电力公司的统一部署和要求，牢牢把握四川电网特点和重点，配合有关部门积极参与规划和有关技术标准的编制，发挥科技主力军作用。



四川大学电气信息学院院长刘俊勇作“智能电网”技术讲座



四川电力试验研究院智能电网工作会议