

★四川省一级期刊

- 万方数据数字化期刊群入网期刊
- 《中国学术期刊（光盘版）》入编期刊
- 《中国期刊全文数据库》收录期刊

• 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊

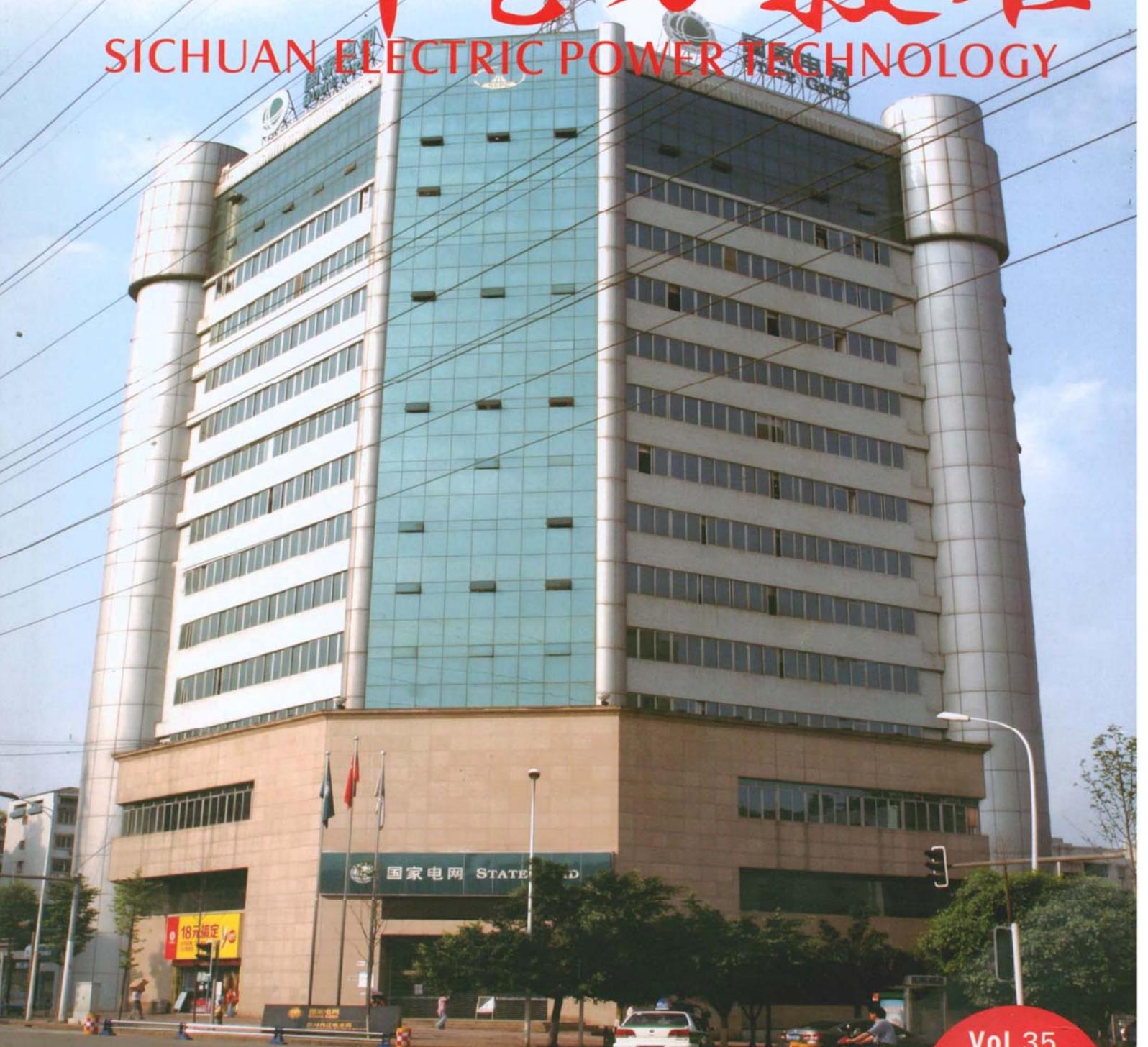
- 北极星中华期刊网入网期刊
- 中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊
- 中国农村电气化信息网

• 重庆维普中文科技期刊数据库

- 《超星数字图书馆》入网期刊
- 《中国核心期刊（遴选）数据库》收录

# 四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954

内江电业局大楼

四川省电机工程学会 四川电力科学研究院



9 771003 695128

Vol.35  
2012  
No.4

《四川电力技术》  
编辑委员会名单

主任委员 王平  
副主任委员 张伟  
                  刘俊勇

委员

(按姓氏笔画为序)

方文弟 王卓 白家棣  
刘勇 朱白桦 朱国俊  
朱康 邓亚军 鄢小端  
李兴源 李建明 严平  
胡灿 徐波 唐茂林  
韩晓言 谢舫 甄威  
秘书 李世平  
          吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN1003-6954  
CN51-1315/TM

2012年第35卷第4期(总220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  
          四川电力科学研究院

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:四川电力科学研究院情报室

地 址:成都市青华路24号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传 真:(028)87082036

E-mail:cdscdljs@163.com

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册6.00元

[期刊基本参数] CN51-1315/TM\* 1978\*

b\* A4\* 94\* zh\* P\* ¥6.00\* 4300\* 23\*

2012-08

目 次

·基金栏目·

微网并网运行存在的问题及应对措施 ..... 安典强 常喜强 李梅等(1)  
不同控制策略下含直驱机组风电场的系统电压稳定研究

..... 赵海岭 王维庆 姚秀萍等(5)

双馈风电机组的建模仿真及其等值方法研究 ..... 李智才 李凤婷(10)

·电网技术·

考虑系统峰谷时变区间特性的电压暂降频次评估 ..... 张忠 徐培栋(15)  
计及分布式电源的配电网可靠性分析..... 张燃 吕林 李勇等(21)

电网黑启动方案关键问题探讨 ..... 张莉 王晋 卢政尧(25)

浅议美国智能配电网建设及其关键技术 ..... 武云霞 余熙 田伟(31)  
接有小电源上网的110 kV系统故障分析和保护调整方案

..... 周建 彭燕 曾俊(35)

备用调度可视化系统的数据同步解决方案初探 ..... 李成鑫 刘俊勇(38)

500 kV输电线路光纤保护联调探讨 ..... 李凡红 庄秋月(41)

四川电网二次设备在线监视与分析系统实用化浅析 ..... 陈愚(46)

基于混合遗传神经网络的电动汽车充电站最优选址的研究

..... 李海峰 康中敏(49)

电力系统外网一种控制个人移动设备的网络准入实现 ..... 母继元(53)

·高压技术·

电流互感器油中氢气产生机理研究 ..... 蒋福佑 袁鹰(56)

BP神经网络在油浸式变压器过热性故障诊断中的应用

..... 曾成碧 蒲维 曾先锋(60)

一起因雷击导致变压器停运的分析 ..... 李源 冯藩(64)

·电能计量·

电能计量装置错误接线查找及追补电量计算方法 ..... 熊晓岚 李琦(68)

CPU卡在智能电表中的应用 ..... 肖丽(73)

无线防窃电系统研制及应用 ..... 万忠兵 赵智辉(76)

·电厂技术·

不确定度分析在电站锅炉效率计算中的应用 ..... 韩伟 刘慧超(80)

NFPA12标准水电站发电机CO<sub>2</sub>灭火管路设计探讨 ..... 王伟 曹静(84)

大型火力发电厂主系统继电保护可靠性分析 ..... 张蓉(87)

锅炉尾部烟道振动原因分析及处理 ..... 楼杰 蒋建伟(91)

## CONTENTS

Problems Existing in Integrated Operation of Microgrid and Its Countermeasures .....	An Dianqiang Chang Xiqiang Li Mei et al(1)
Research on Voltage Stability of Power System Including D - PMSG Wind Farm with Different Control Technologies .....	Zhao Hailing Wang Weiqing Yao Xiuping et al(5)
Research on Double - fed Wind Turbine Modeling Simulation and Its Equivalent Method .....	Li Zhicai Li Fengting(10)
Analysis on Voltage Sag Frequency Considering Peak - valley, Time - varying and Interval Characteristics .....	Zhang Zhong Xu Peidong(15)
Analysis of Distribution Network Reliability Considering Distributed Generation .....	Zhang Ran Lü Lin Li Yong et al(21)
Discussion on Key Problems of Black - start Schemes for Power Grid .....	Zhang Li Wang Jin Lu Zhengyao(25)
Superficial Discussion on Construction of Smart Distribution Grid and Its Key Skills in U. S .....	Wu Yunxia Yu Xi Tian Wei(31)
Fault Analysis and Protection Adjustment Scheme for 110 kV System Interconnected with Small Power Supply .....	Zhou Jian Peng Yan Zeng Jun(38)
Discussion on Data Synchronization Solution for Standby Visual Dispatching System .....	Li Chengxin Liu Junyong(41)
Discussion on Joint Commissioning of Fiber Optical Protection in 500 kV Transmission Line .....	Li Fanhong Zhuang Qiuyue(46)
Research on Optimal Selection of Charging Station for Electric Vehicle Based on Hybrid Genetic Artificial Neural Network .....	Li Haifeng Kang Zhongmin(49)
Realization of Network Admission Control for BYOD in External Network of Power System .....	Mu Jiyuan(53)
Study on Generating Mechanism of Hydrogen in Current Transformer Oil .....	Jiang Fuyou Yuan Ying(56)
Application of BP Neural Network to Overheating Fault Diagnosis for Oil - immersed Transformer .....	Zeng Chengbi Pu Wei Zeng Xianfeng(60)
Analysis on Transformer Shutdown Caused by Lightning Stroke .....	Li Yuan Feng Fan(64)
Discussion on Error Wiring Inspection of Electric Energy Metering Device and Calculation Method of Recover from Electricity Quantity .....	Xiong Xiaolan Li Qi(68)
Application of CPU Card to Smart Meter .....	Xiao Li(73)
Study of Wireless Electricity - stealing Prevention System and Its Application .....	Wang Zhongbing Zhao Zhihui(76)
Application of Uncertainty Analysis to Utility Boiler Efficiency Calculation .....	Han Wei Liu Huichao(80)
Discussion on CO <sub>2</sub> Fire - fighting Pipeline Design of Generators in Hydropower Station under NFPA12 Standard .....	Wang Wei Cao Jing(84)
Reliability Analysis for Relay Protection of Primary System in Large - scale Thermal Power Plant .....	Zhang Rong(87)
Cause Analysis on Vibration of Convection Flue Gas Pass in Boiler and Its Treatment .....	Lou Jie Jiang Jianwei(91)

**SICHUAN ELECTRIC POWER  
TECHNOLOGY**

2012 Vol. 35 No. 4

(Ser. No. 220)

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

# 微网并网运行存在的问题及应对措施

安典强<sup>1</sup>, 常喜强<sup>2</sup>, 李梅<sup>3</sup>, 张新燕<sup>1</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆电力调度通信中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 自治区计量测试研究院 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 介绍了微网的定义及特点。针对微网并网运行存在的问题进行分析研究, 并提出相应应对措施及建议, 为微网并网运行提供参考。

**关键词:** 微网; 并网; 技术措施

**Abstract:** The definition and characteristics of microgrid is introduced. The problems existing in integrated operation of the microgrid are analyzed and studied. The corresponding countermeasures and suggestions are put forward, which will provide a reference for the integrated operation of microgrid.

**Key words:** microgrid; grid connection; technical measures

中图分类号: TM744 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)04-0001-04

## 0 引言

随着全球常规能源的逐渐枯竭和环境的污染, 世界各个国家能源结构也在逐渐调整。分布式发电逐渐登上历史舞台, 分布式发电具有灵活、分散、小型、靠近用户、使用清洁能源、可与环境兼容等优点, 能提高局部供电可靠性、减少输电损耗、提高一次能源的利用率以及减少废气排放, 在配电网中得到广泛的应用, 具有很好的应用前景。但是 DGs 的大规模渗透也产生了一些负面影响。如分布式发电单机接入成本较高, 控制较复杂<sup>[1]</sup>。另外, 从系统的角度来分析, DGs 是不可控的发电单元, 因此系统总是试图采取隔离、切机的方式来控制微型发电系统, 以消除其对大系统的电压和频率的冲击<sup>[1]</sup>。微网的提出整合了分布式发电的优势, 削弱了分布式发电对电网的冲击和负面影响, 充分发挥了 DGs 的效益和价值。但微网并网运行还存在很多问题, 根据微网的定义、特点, 对微网并网运行存在的问题进行分析研究并提出相应应对措施及建议。

## 1 微网的定义及特点

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51010105064 2011211 A016, BS100122)

### 1.1 微网的概念

微网, 顾名思义, 也称微电网, 是指由分布式电源(DG)、储能装置、能量转换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型发配电系统。

### 1.2 微网的特点

微电网将发电机、负荷、储能装置及控制装置整合在一起, 弥补了分布式发电系统的不足, 具有低成本、低电压、低污染等优点。微网并网甚至能起到削峰填谷的作用。但由于分布式电源的间歇性、复杂性、多样性、不稳定性, 微网并网存在并网、离网两种运行方式, 使得微网并网还存在许多问题。

## 2 微网并网存在问题分析研究及应对措施

### 2.1 对电网电压、频率的影响及应对

传统的配电网是一个放射状结构的无源网络, 潮流是单向流动的, 为了使配电网在不同的负荷下维持相对稳定的电压水平, 其电压调整主要依靠上级变电站内变压器有载调压分接开关的切换及无功补偿电容器的投退来实现, VQC 装置根据主变压器负载情况、电压水平等因数来自动调节分接开关位置, 一般采用逆调压方式即当主变压器负荷增大时, 调高主变压器二次侧电压<sup>[1]</sup>。微网接入后, 其内的 DG 向电网注入有功功率和无功功率改变了配电网

单向潮流流向。微网接入电网后电网无功增加所以节点电压升高。 $U' = U + \Delta U$  ( $U'$ 为接入微网后节点电压;  $U$ 为未接入微网时节点电压)。现在就需要根据电压波动情况来调节变压器分接头以适应变化,增加了电网调度的难度。而当微网突然退出时,无功补偿迅速减少,使电网电压下降很大,给电网稳定运行带来威胁。同时微网内部的风电、光伏等电源出力一方面受天气等影响,一定程度上也受用户或业主控制,给电网的控制和管理又增加了困难。此外,微网不同的接入点与微网容量的大小都会对电网电压带来不同的影响。

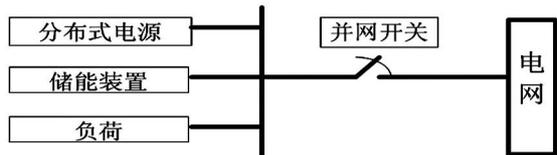


图1 微网并网结构图

微网内分布式电源实际上一个谐波源,微网内电力电子器件产生的大量谐波也注入电网<sup>[5]</sup>,给电网频率稳定带来挑战。现阶段电网对微网的接纳还很差,只能是电网选择它能接受的微网,而不能随机大量的微网接入电网,最主要原因在于微网并网还不能达到柔性并网。为克服这些问题,应从以下几点做起。

- (1) 研制产生谐波尽量少的的电力电子器件;
- (2) 进行无功动态补偿(SVC,SVG,STATCOM等);
- (3) 根据实际情况合理设置微网容量,使电网尽可能消纳微网产生的问题;
- (4) 考虑微网蓄电池储能。

## 2.2 对电网保护整定的影响及对策

微网即是“电源”又是“负载”。当微网内分布式电源能够满足微网内负载供电时向大电网送电,呈现“电源”特性。当不能满足时电网向微网馈电,呈现“负荷”特性。微网的接入改变了配电网功率单向流动的特点(成为双向潮流)。大量微网的接入使电网产生了大量的随机性潮流,使电网潮流流向和分布发生改变。传统的配电系统在微电网接入前是辐射状单端电源供电系统,无源放射性网络配电网的继电保护是根据配电网这个特点来设计和运行的。馈线上的保护不需要安装方向元件,且多为三段式电流保护。<sup>[5]</sup>微网引入后,配电网成为一个有源网络(active distribution),使得原来的继电保护不能满足要求,当

电网发生系统故障后其原有的故障电气特征将发生巨大变化,此时微电网可能呈现电源特性,即向故障供出故障电流。传统的检测故障方法和继电保护不能再满足要求。现做如下分析。

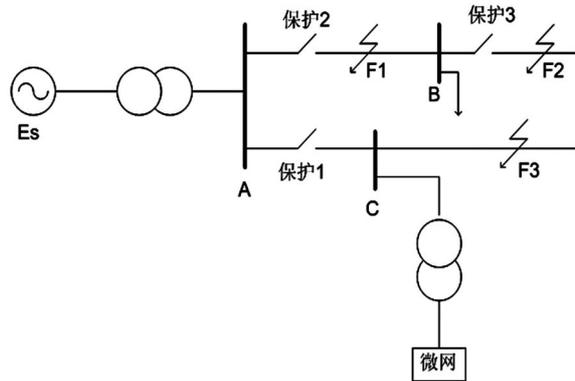


图2 含微网电网不同点的故障示意图

(1) 微网接入可能会导致误动作,而且当微网DG输出功率越大,影响越严重。

如图2所示, $F_1$ 处发生短路故障,未接入微网时,由系统电源向其提供短路电流,对保护1没有影响。当短路电流足够大时,保护2动作切除故障。接入微网后,微网内的DG也向 $F_1$ 提供短路电流,当微网DG功率足够大时,由微网DG向 $F_1$ 提供的短路电流大于保护1电流整定值时,保护1动作,造成误动<sup>[4]</sup>。

(2) 微网接入可能会导致保护灵敏度降低,而且当微网DG输出功率越大,影响越严重。

如图2所示,当 $F_3$ 处发生短路故障时,没有接入微网系统电源向故障点提供短路电流,短路电流大于保护1的整定电流时保护1动作,切除故障。并入微网后,微网内DG可能同时与系统电源向故障点提供短路电流,由于DG分流作用,流过保护1的故障电流减小,使其灵敏度降低,微网DG输出功率越大保护1感受到的短路电流越小,灵敏度也越差,甚至造成拒动<sup>[4]</sup>。

(3) 当故障点位于DG上游,由于没有方向元件,DG上游的各保护之间可能会失去选择性。

如图2所示,当 $F_2$ 处发生短路,未接入微网时,有系统电源向其提供短路电流,保护2、3协同作用,由保护3切除故障。当微网接入后,微网DG也向其提供短路电流,流过保护2的短路电流变大,微网DG功率越大,流经保护2的短路电流越大,当达到一定值时,保护2动作,切除故障,保护2、3失去选择性,并使停电面积增大。

此外,当微网接入电网馈线始端母线、末端母线时对电网保护也有不同影响,这里不再赘述。

因此对微网接入电网的保护应借鉴输电系统的一些保护设计原则,例如方向、阻抗、差动等加以分析并重新配置;对传统保护系统的适应性和技术进行改造;制定电网、微网保护的协调配合机制。

### 2.3 对重合闸的影响

众所周知,在电力系统中发生的故障大多为瞬时性故障,重合闸的应用提高了系统供电可靠性,减少了电网维护的工作量。在传统电网结构下,重合闸的工作不会对电网产生任何冲击和破坏。当微网接入后,由于 DG 的存在可能产生威胁。下面就重合闸与继电保护的两种配合方式(自动重合闸前加速和自动重合闸后加速)进行分析。

#### (1) 对自动重合闸前加速的影响

在某些情况下,当线路断路器断开后,微网未能解列,造成非同期合闸,使电网与微网遭受非同期合闸的冲击,如图 3。

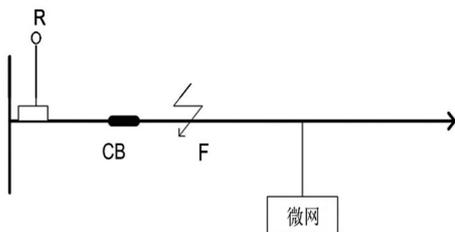


图 3 自动重合闸前加速故障

如图 3 所示,当 F 处发生故障断路器 CB 跳闸后微网并未解列,微网 DG 与系统电势有可能失去同步,使电网与微网受到非同期合闸的冲击。同时反向电流可能对设备造成损坏。

#### (2) 对自动重合闸后加速的影响

与前加速保护不同的是当线路发生故障后,保护有选择性地切除故障,重合闸进行一次重合后恢复供电。而且每台断路器都配有完备的保护系统和重合闸装置。

如图 4 所示,当 F 处故障时, CB1 断开。微网 DG 向其提供短路电流,使故障点电弧不能熄灭。当微网 DG 提供的短路电流大于 CB2 处整定电流后 CB2 动作增大停电面积。然而 CB1 重合后又可能造成非同期重合问题。

应对措施如下。

(1) 对自动重合闸装置进行改进。在微网 DG 处安装低周期、低压解列装置;

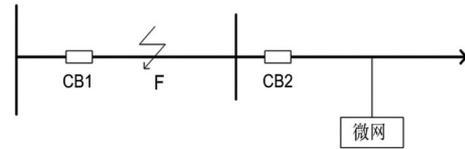


图 4 自动重合闸后加速故障

(2) 研究一种新的继电保护与重合闸配合方式,使微网在重合闸之前解列,或加设通讯线路使微网解列。

### 2.4 对短路容量的影响及对策

微网即是“电源”又是“负载”。当微网内分布式电源能够满足微网内负载供电时向大电网送电,呈现“电源”特性。当电网故障时,微网内的 DG 会向故障点注入短路电流,如果并网的大量微网都呈现“电源”特性,会对电网的短路容量产生很大的影响。

(1) 将增加电网的短路容量,可能会对电气设备的动热稳定产生不利影响。

(2) 对于短路容量接近额定遮断容量的断路器而言,其影响甚至是危险的。

对策如下。

(1) 改变配电网的运行方式,或在适当地点装设限流电抗器;

(2) 在选址阶段,根据电网状况选择合适的 DG 接入位置。

### 2.5 孤岛效应

孤岛效应是指由于某种原因电网断电而微网继续向电网提供电能。微网接入电网运行有可能会产生孤岛效应。孤岛效应的产生会对电网、工作人员等产生很大影响。

(1) 孤岛效应发生后微网内电压、频率失去电网的支撑会发生较大波动,从而损坏配电设备和用户设备<sup>[7]</sup>。而当电网回复时,可能会产生很大冲击电流给设备带来损坏。

(2) 干扰电网的正常合闸。

(3) 孤岛效应发生后微网内的 DG 有可能对电网故障点继续供电,这给维修工作人员带来危险。

应对孤岛效应的危害主要是预防为主,通过各种检测方法提前知道是否发生孤岛效应。主要的检测方法有:被动检测、主动式检测。

### 2.6 对供电可靠性的影响及对策

微网即是“电源”又是“负载”。当微网内分布式电源能够满足微网内负载供电时向大电网送电,

呈现“电源”特性。当不能满足时电网向微网馈电,呈现“负荷”特性。因此微网接入电网会对电网的供电可靠性也会存在一定的影响。

当在电网供电能力不足的情况下,而微网又呈现“电源”特性,微网向电网输送电力,满足了本来须限电用户的用电需求。同时,在电网多发时而微网呈现“负荷”特性。消纳了电网的出力。这时微网起到了削峰填谷的作用,对提高供电可靠性及稳定起到了重要作用。反过来说微网则会对电网的供电可靠性及稳定带来危害。

对策如下。

(1) 合理配置微网容量,并设置蓄电装置尽量减少对电网的不利影响;

(2) 通过有规划的孤岛运行模式提高电网供电的可靠性<sup>[11]</sup>。

### 3 结 论

根据微网运行经验及自身特点,大规模并网带来的主要问题是微网内分布式电源的波动性和随机性,引起微网内功率的不平衡随时间变化而导致的安全隐患及薄弱系统的稳定性与电能质量问题,对电网的规划、建设、保护、运行调度、分析控制、经济运行和电能质量等产生一定的影响。

微网技术虽然在中国还不成熟,还有很多技术方面的、政策方面的、管理方面的问题有待解决,但它顺应了中国大力促进可再生能源发电、走可持续发展道路的要求,因此对其进行深入研究具有重大意义。

#### 参考文献

[1] 黄伟,孙昶辉,吴子平,等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术 2009 33(9):14-18.  
[2] 洪峰,陈金福,段献忠. 微网发展现状研究及展望[C]. 中国高等学院电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会论文集(新能源发电):2661-2666.  
[3] 赵波,李鹏,童杭伟,等. 从分布式发电到微网的研究

综述[J]. 浙江电力 2010 29(3):1-5.

[4] 刘林,李建兵,刘靖涛,等. 分布式发电对配电网继电保护和重合闸的影响[J]. 四川电力技术,2011,34(1):44-46.  
[5] 张献斌,王丽娟. 浅谈分布式发电对配电网及重合闸的影响[J]. 工业科技 2009 38(6):60-61.  
[6] 庞建业,夏晓宾,房牧. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 继电器 2007 5(11):6-8.  
[7] 姚丹,张兴. 分布式发电系统孤岛效应的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2006:12-13.  
[8] Iasserter R, akhil A, marnay C, et al. The CERTS Micro-grid Concept [EB/OL]. [2008-10-18]. CERTS. <http://certs.lbl.gov/pdf/50829.pdf>.  
[9] Laaksonen Hannu, Kauhaniemi Kimmo. Voltage and Current THD in Microgrid with Different DG Unit and Load Configurations [C] // SmartGrids for Distribution, CIR-ED Seminar, Austria, 2008.  
[10] 盛鹄,孔力,齐智平,等. 新型电网-微电网(Microgrid)研究综述[J]. 继电器 2006 35(12):75-81.  
[11] 顾定军. 分布式发电对电网的影响及对策[J]. 电力系统 2010(8):140-144.  
[12] 李鹏,张玲,王伟,等. 微网技术应用与分析[J]. 电力系统自动化 2009 33(20):109-115.  
[13] 丁明,张颖媛,茆美琴. 微网研究中的关键技术[J]. 电网技术 2009 33(11):6-11.  
[14] 裴玮,李澍森,李惠宇,等. 微网运行控制的关键技术及其测试平台[J]. 电力系统自动化 2010 34(1):94-99.  
[15] 李鹏,张玲,盛银波. 新能源及可再生能源并网发电规模化应用的有效途径——微网技术[J]. 华北电力大学学报 2009 36(1):10-14.

作者简介:

安典强(1986),男,硕士研究生,研究方向为电工理论与新技术;

常喜强(1978),男,高级工程师,从事电力系统安全稳定性的研究;

张新燕(1964),女,教授,硕士研究生导师,从事风力发电机组故障诊断方面的研究。

(收稿日期:2012-05-07)

欢迎订阅 欢迎投稿

# 不同控制策略下含直驱机组风电场的系统电压稳定研究

赵海岭<sup>1</sup>, 王维庆<sup>2</sup>, 姚秀萍<sup>3</sup>, 常喜强<sup>3</sup>

(1. 新疆电力公司昌吉电业局 新疆 昌吉 831100; 2. 新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047;  
3. 新疆电力调度通信中心 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 运行连续潮流计算的  $PV$  及  $VQ$  曲线法, 对不同控制策略下含直驱机组风电场的系统静态电压稳定性进行了研究。通过对新疆一个实际地区电网进行仿真计算, 绘制了直驱风电机组构成的风电场分别采取恒功率因数为 1、恒功率因数为 0.99、恒功率因数为 -0.99 及电压控制模式下地区电网电压中枢点、重要变电站、风电场公共接入点 (point of common coupling, PCC) 的  $PV$  曲线及  $VQ$  曲线。通过仿真分析可以得出, 当风电场在处于低出力水平时, 电网的静态电压稳定性较好; 在风电场注入功率较大时, 电网无功裕度减少, 导致电网静态电压稳定性降低。直驱机组风电场采取恒电压控制策略要优于恒功率因数控制策略下的电网静态电压稳定性。

**关键词:** 静态电压稳定; 直驱永磁同步风力发电机; 风电场; 控制策略

**Abstract:** The  $P-V$  curve and  $V-Q$  curve methods are generally applied to research on the steady-state voltage stability including D-PMSG wind farm with different control strategies. By means of simulating a certain regional power grid located in Xinjiang Uygur Autonomous Region, the  $P-V$  curves and  $V-Q$  curves at the point of common coupling, the key buses and important substations are plotted while wind farm respectively using constant power factor 1, power factor 0.99, power factor -0.99 and constant voltage control strategies. It can be seen from the simulation results that the steady-state voltage stability is better while the wind farm is in low power; but when wind farm output level is high, the steady-state voltage of power system is decreasing. And the steady-state voltage of power system including D-PMSG wind farm with constant voltage control strategy has the precedence over that with the constant power factor control strategy.

**Key words:** steady-state voltage stability; permanent magnet synchronous generator (PMSG); wind farm; control strategy

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0005-05

## 0 引言

风力发电是目前技术最成熟、最具开发规模和商业化发展的可再生能源利用形式<sup>[1]</sup>。大规模地开发和利用风能成为世界新能源领域的一大重要研究课题。然而在电网接纳不断增加的风电穿透功率时, 致使风电并网的电压稳定问题逐渐凸显。

变速永磁直驱发电机中全功率变频器的采用, 使得该风机有功与无功可控, 拥有多种灵活控制策略<sup>[2]</sup>, 具有的优势越来越凸出, 在实际风电场中占据比例越来越高, 大规模基于直驱风电机组并网风电场越来越多, 在基于直驱机组风电场与电网弱联系时, 其对电力系统电压稳定影响值得研究。

电压失稳的根源在于线路输送功率与负荷所需的功

率无法平衡, 最终导致电压崩溃<sup>[3]</sup>。文献[4-6]对风电场接入电力系统的稳态进行了仿真, 其中文献[5]主要是分析风电场的输出功率随风速间歇性和波动性变化对所接入地区电网电压的影响。风电场接入对于含风电场的电网电压稳定、风电注入功率不定与其本身无功特性使得与传统电压稳定问题有着机理上<sup>[7-9]</sup>的一致。国内外进行了大量细致的研究。文献[10]分析了随风电场容量的不断增加对地区电网电压稳定的不利影响, 若系统不能提供足够的无功支持, 将会导致地区电网电压瓦解, 采用连续潮流计算得出  $P-V$  曲线, 对地区电网关键母线电压与风场不同出力水平的关系进行了详尽分析, 并对某些节点加与不加无功补偿装置对节点电压的影响进行了仿真。文献[11-13]通过得出风场的不同出力下系统相关节点电压, 采用描点法绘制  $P-V$  曲线, 详细研究了含风电系统的电压稳定问题。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50867004); 863 计划资助项目(2009AA05Z445)

针对永磁直驱风力发电技术不同控制策略进行研究,首先建立了永磁直驱同步风力发电机的数学模型,并对其构成的风电场进行等值,通过连续潮流计算,绘制风电场公共接入点(point of common coupling, PCC)、电网重要节点的 PV 及 VQ 曲线,针对直驱机组变频器的完善的控制技术,对不同控制策略下含直驱机组风电场的电网静态电压稳定性进行了深入研究。

## 1 风电电网静态电压稳定机理分析

风电系统静态电压稳定分析的机理是采用连续潮流计算的方法<sup>[14]</sup>,研究并网风电场在小扰动情况下的风电电网电压稳定问题。其实质是风电机组的有功和无功功率特性、电网坚强程度、电网或风电机组本身是否能够在风电机组连续运行中提供足够的无功电压支持,以便在小扰动情况下保证机组与电网的电压稳定性。图 1 是单台永磁直驱风力发电机与无穷大系统的接线连接图,采用较为广泛的是 PV 及 QV 曲线分析法。

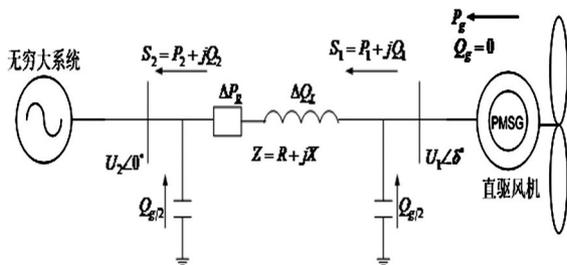


图 1 直驱风机连接无穷大系统电压分析简图

图 1 中,风电场与无穷大系统经一等值线路连接,  $U_2$  为无穷大系统母线电压,  $Z=R+jX$  为等值线路电抗,因为这里的主要研究内容是电压稳定问题,故忽略某些次要因素,将风电场与等值线路看做是电网的一部分,这样,可以从电力系统端开始着手,经过最终分析可得出下面的公式。

$$U_1 \approx U_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,假设无穷大电网电压  $U_2$  一定时,风电场端电压由等值线路的电阻、电抗及风电场送出的有功、无功水平决定。在风电场与电网的连接网架结构已确定时,风电场的出口电压仅与风电场的有功、无功出力存在密切关联。

## 2 直驱机组风电场数学模型

### 2.1 永磁直驱风力发电机数学模型

在 dq 坐标系下,建立的永磁同步发电机组数学模型为<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_a}{L_d} i_d + \omega_e \frac{L_q}{L_d} i_q + \frac{1}{L_d} u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_a}{L_q} i_q - \omega_e \left\{ \frac{L_d}{L_q} i_d + \frac{1}{L_q} \psi_0 \right\} + \frac{1}{L_q} u_q \end{cases} \quad (2)$$

式中  $i_d$  和  $i_q$  分别为发电机的 d 轴与 q 轴电流;  $L_d$  和  $L_q$  分别为发电机的 d 轴和 q 轴电感;  $R_a$  为定子电阻;  $\omega_e$  为电角频率;  $\omega_e = n_p \omega_g$ ,  $n_p$  为发电机转子极对数;  $\psi_0$  为永磁体的磁链;  $u_d$  为  $u_g$  的 d 轴分量;  $u_q$  则为  $u_g$  在 q 轴的分量。定义 q 轴的反电势  $e_q = \omega_e \psi_0$ , d 轴的反电势为  $e_d = 0$ ,假设发电机 d 轴与 q 轴电感相等,即  $L_d = L_q = L$ ,则式(2)可以写成式(3)。

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_a}{L} i_d + \omega_e i_q + \frac{1}{L} u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_a}{L} i_q - \omega_e \left\{ i_d + \frac{1}{L} \psi_0 \right\} + \frac{1}{L} u_q \end{cases} \quad (3)$$

直驱风电机组的电磁转矩表达式为

$$T_{em} = 1.5 n_p [(L_d - L_q) i_d i_q + i_q \psi_0] \quad (4)$$

若  $L_d = L_q = L$ ,则式(4)可以简化为

$$T_{em} = 1.5 n_p i_q \psi_0 \quad (5)$$

### 2.2 直驱机组风电场模型处理

根据直驱风电机组变频器控制策略的不同,当直驱机组风电场(即该风电场全部由同步直驱风电机组构成,下同)恒功率因数控制方式时,其等效于火电机组发有功的同时,吸收或发出一定的无功,此时在潮流计算中将风电场模型处理为 PQ 节点<sup>[16]</sup>,同理,直驱机组风电场采取恒电压控制方式时,将风电场模型处理为 PV 节点。则含风电场的等值系统见图 2。图 2 中,平衡点恒定电压标幺值  $U_2 \angle 0^\circ$ 。

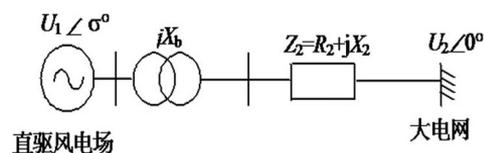


图 2 风电场等值系统

风电场经变压器  $jX_b$  升高电压,经输电线路  $Z_2 = R_2 + jX_2$  接入系统;风电场低压侧电压为  $U_1 \angle \delta$ 。

### 3 算例分析

#### 3.1 新疆某地区电网概况

新疆中部地区风力资源较为丰富,目前在该地区建成的风电场一期与二期共包括 66 台单机 1.5 MW 的直驱风电机组,总容量为 99 MW。该地区电网处在电网的中部,是新疆主电网的枢纽,该地区主要电源为吐鲁番电厂,将整个风电场等值处理为两台较大直驱同步机组,风机出口经箱式变压器(690 V/35 kV)升压,集电线路采取直埋电缆与架空线混合的形式送至风电场升压主变压器(35/110 kV),升压后经过 50 km 单回输电线路(LGJ-200)送至 110 kV 小草湖变电站。吐鲁番地区电网与风电场的地理接线图如图 3 所示。

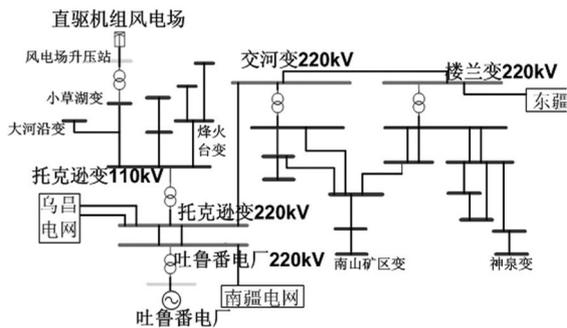


图 3 直驱风电场与某地区电网的地理接线图

#### 3.2 仿真结果及分析

本算例选取吐鲁番地区电网 2008 年冬大运行方式,风电场接入小草湖变电站,在整个地区电网负荷缓慢增加时,以风机机端、风场升压站、风电场接入点、发电厂母线和中枢变电站母线以及电网末端神泉变电站母线电压作为电压监测点,绘制了吐鲁番电厂 220 kV 母线、托克逊 110 kV 母线及神泉变电站 110 kV 母线作为重点监测母线,分别就以下不同算例做连续潮流计算。上述风电场接入系统后,在全网负荷成倍增长的方式下,绘制了重要节点的 PV 曲线,以分析系统的静态电压稳定性,如图 4 所示。图 4 中 P 为风电场发出的功率;U 为节点电压。

1) 基于直驱机组并网风电场采用恒功率因数 ( $\cos\varphi = 1$ ) 控制方式

风电场的功率注入改变了地区电网各变电站之间的潮流流向,使各线路传输功率大小发生改变,各变电站母线电压的变化趋势是先升后降,但总体均未出现电压越限的情况。在风电场出力水平由 0 逐

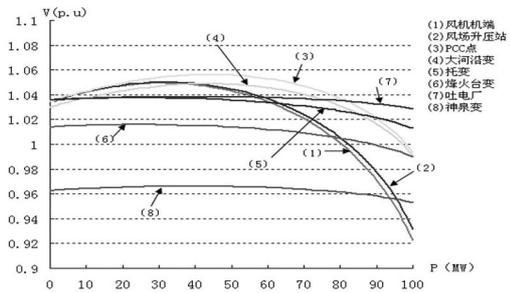


图 4 风电场恒功率因数 1 控制模式下的各变电站 P-V 曲线

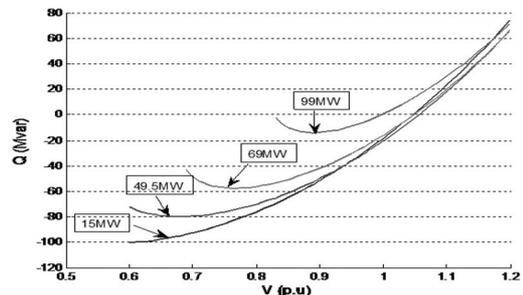


图 5 风电场恒功率因数 1 控制模式下的并网节点 V-Q 曲线

表 1 风电场恒功率因数 1 控制模式下风电场出力与风电场并网节点电压对应关系表

风电场出力 /MW	风电场并网节点 PCC 电压 /p. u.
5	1.038
15	1.046
35	1.054
49.5	1.055
65	1.050
80	1.037

渐增加到 49 MW 时,其为风电接入地区的负荷供电,减少了由吐鲁番主网馈送至风电接入地区的传输功率,减少了线路的无功损耗,使各变电站母线电压有所上升。但随着风电场的出力不断增大,风电接入地区与吐鲁番电网潮流反向,风电接入地区开始由受端系统变为送端系统,随着线路传输功率的不断增大,无功损耗不断增大,最终引起各站电压水平出现下降的趋势,由表 1 也可以看出。

表 2 风电场恒功率因数 1 控制模式下风电场出力与风电场并网节点无功裕度对应关系表

风电场出力 /MW	风电场并网节点无功裕度 /Mvar
15	102
49.5	80
69	58
99	13

由图 5 风电场并网节点的 V-Q 曲线可以看出,当风电场出力为 49.5 MW 时,其并网节点的无功裕度

为 80 Mvar,如表 2 所示。但随着风电场注入功率的不断增大,并网点的无功裕度呈逐渐减少趋势。在风电出力为 99 MW 时,同样由表 2 其无功裕度仅为 13 Mvar 左右。这同样说明随着风电场注入功率的增大,线路消耗的无功功率增加,系统无功功率匮乏。综上所述,从  $P-V$  曲线及对应的  $V-Q$  曲线可以得出一致的结论:随着风电场注入功率的增加,地区电网的电压稳定裕度减小。

2) 基于直驱机组并网风电场采用恒功率因数 ( $\cos\varphi = 0.99$  滞相) 控制方式

将风场内所有的永磁直驱风电机组的功率因数设置为恒功率因数滞相 0.99 运行,所计算出的各变电站  $P-V$  变化曲线如图 6。图 7 为对应风电场并网点的  $V-Q$  曲线。

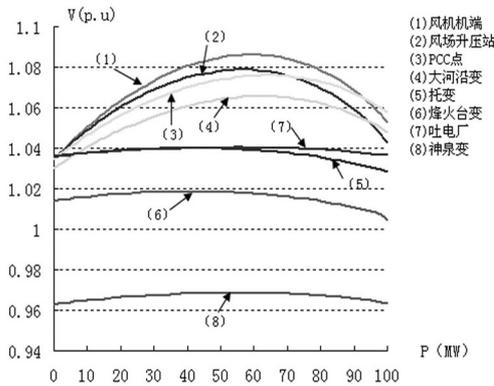


图 6 风电场功率因数滞相 0.99 控制模式下的各变电站  $P-V$  曲线

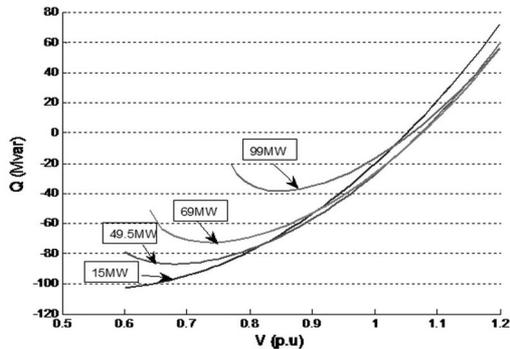


图 7 风电场功率因数滞相 0.99 控制模式下的并网点  $V-Q$  曲线

由  $P-V$  曲线可以看出,当所有直驱风电机组采取恒定功率因数滞相 0.99 运行时,各变电站的电压总体也是先升后降。但是与恒定功率因数 1 的计算相比,由于滞相运行后风电机组发出有功的同时,也在发出一部分无功功率,导致部分变电站母线电压超过了标准规定的电压上限。与之对应风电场并网点  $V-Q$  曲线也得出了一致的结论:和恒定功率

因数 1 方式相比,在风电场出力为 99 MW 时,恒定功率因数 1 运行时无功裕度为 13 Mvar,功率因数滞相 0.99 运行时,由表 3 可以得出,无功裕度增大为 38 Mvar,电网的无功裕度充足,导致部分母线电压越限。因此在实际电网出现此方式运行时,不建议直驱机组并网风电场采取滞相功率因数运行。

表 3 风电场功率因数滞相 0.99 控制模式下  
风电场出力与风电场并网点无功裕度对应关系表

风电场出力 /MW	风电场并网点无功裕度 /Mvar
15	106
49.5	87
69	71
99	38

3) 基于直驱机组并网风电场采用恒功率因数 ( $\cos\varphi = -0.99$  进相) 控制方式

将风场内所有的永磁直驱同步风电机组的功率因数设置为恒功率因数进相 0.99 运行,图 8 为计算出的各变电站  $P-V$  变化曲线,从图 8 可以看出,随着风电场有功出力增加,各变电站母线电压幅值逐渐降低,但总体均在规定的电压范围内,只是在风电场出力大于 80 MW 时,机端与风电场升压站电压出现越下限的情况。

图 9 为与之对应风电场并网点的  $V-Q$  曲线,风电场注入系统功率越大,其无功裕度越小,在风电场出力水平为 69 MW 时,其无功裕度约为 40 Mvar,在出力水平相同时,恒功率因数 1 的无功裕度为近 60 Mvar,由此可见,直驱风电机组进相功率因数运行时,其无功功率裕度减少了约 20 Mvar。这是因为进相运行使直驱风机在发出有功的同时,吸收电网的无功功率,导致整体电压偏低。

4) 基于直驱机组并网风电场采用恒电压控制方式

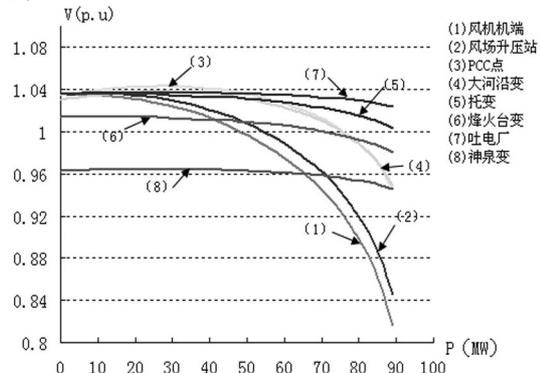


图 8 风电场功率因数滞相 0.99 控制模式下的各变电站  $P-V$  曲线

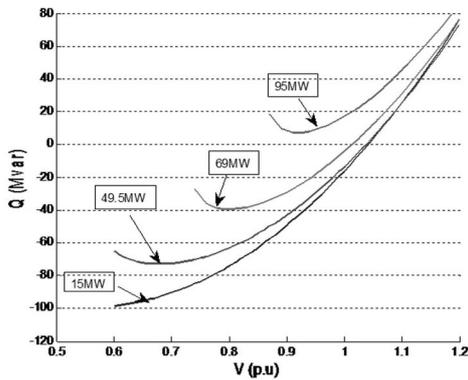


图9 风电场功率因数滞相0.99控制模式下的并网点V-Q曲线

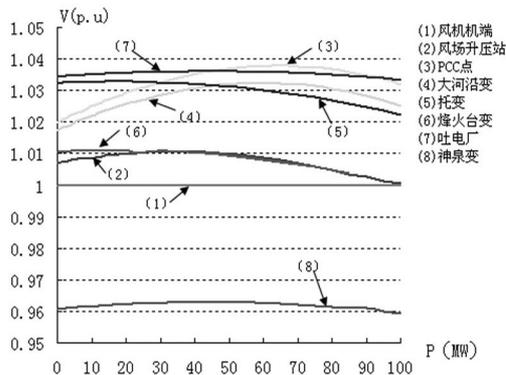


图10 风电场恒电压控制下各变电站P-V曲线

由图10的P-V曲线明显可以看出,当直驱机组采取恒电压控制方式运行时,直驱机组机端电压始终为1.0 p.u.。风电场注入系统功率在100 MW以内时,地区电网各变电站母线电压均在规定的偏差范围内,不会出现越上限或越下限的情况。与之前的恒定功率因数下的电网电压稳定水平相比,显而易见,基于直驱机组风电场采取恒电压控制方式的系统静态电压稳定性要优于恒定功率因数控制方式下的电网电压稳定性。

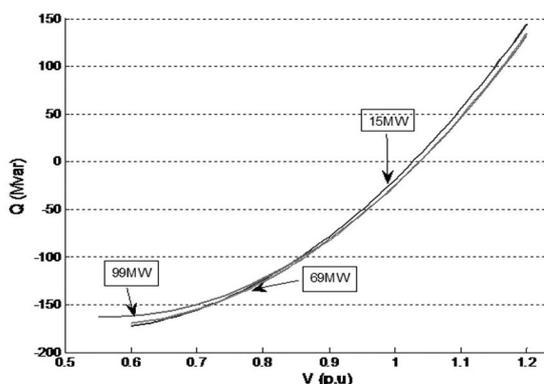


图11 风电场恒电压控制下并网点的V-Q曲线

从图11并网点的V-Q曲线也可以看出,风电场出力水平分别为15 MW、69 MW、99 MW时,其对

应的电网无功裕度相差不大。这是由于直驱风电机组网侧变频器采取恒电压的控制策略。在实际运行中风电场相当于电网中的PV节点,随着机组出力的增加,当机端电压或电网电压有变化时,直驱风电机组的无功功率可以在较大范围内变化调整,以保证机组端电压始终为1.0 p.u.,使电网电压近似维持不变。这也是恒电压控制方案下所得出的风电电力系统电压静态稳定性好的原因。

## 4 结论

风电场穿透功率的增加使其对电网的影响逐渐扩大。尤其是在风电场与电网弱联系时,其对地区电网电压稳定性的影响不容忽视。通过调整直驱机组风电场的不同控制策略,其对含直驱机组风电场的系统静态电压稳定性进行了详细研究,得出的结论如下。

① 风电场在处于低出力水平时,可以较好地改善地区电网的静态电压稳定性。但随着风电场注入功率的增加,线路的无功损耗增大,致使风电场接入地区需要从地区主网受入大量无功功率,电网无功裕度减少,最终导致电网静态电压稳定性降低。

② 基于直驱机组并网风电场采取恒功率因数与恒电压两种调控方案相比,恒电压控制方式下含直驱机组风电场的电压稳定性要优于恒功率因数控制方式下的。

## 参考文献

- [1] 王承熙,张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] Ki-Chan Kim, Seung-Bin Lim, Ki-Bong Jong, Sung-Gu Lee, Ju Lee, Yeoung-Gyu Son, Young-Kil Yeo, Soo-Hyun Baek. Analysis on the Direct-Driven High Power Permanent Magnet Generator for Wind Turbine [J]. 2008, 243-247.
- [3] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [4] 王海超,周双喜,鲁宗相,等. 含风电场的电力系统潮流计算的联合迭代方法及应用[J]. 电网技术, 2005, 29(18): 59-62.
- [5] 张义斌,王伟胜,戴慧珠. 基于PV曲线的风电场接入稳态分析[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 61-65.

(下转第30页)

启动方案的编制是一项复杂的系统性工作。需统筹考虑多方面问题才能切实保证黑启动方案的有效性。为辅助电网调度运行部门正确处置大面积停电事故、确保恢复控制的实效性,方案的制定方式应由离线决策逐步转变至在线实时决策。开发黑启动辅助决策系统是适应上述需求的途径之一。通过探讨当前黑启动方案编制中的一些关键问题,以期为进一步做好电网黑启动工作提供一种新思路。

参考文献

[1] 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 ,http://www.gov.cn/yjgl/2006-01/24/content\_168998.htm.

[2] 赵炜炜,张建华,尚敬福,等. 电网大面积停电应急评价指标体系及其应用. 电力系统自动化,2008,32(20):27-30.

[3] 周云海,唐立春,胡翔勇. 黑启动的定性推理模型[J]. 中国电力,2008,41(11):10-13.

[4] 袁川,刘俊勇,张国松,等. 东西关电厂作为南充遂宁

电网黑启动电源点的可行性分析[J]. 四川电力技术,2012,35(1):48-53.

[5] 林振智,文福拴. 基于加权复杂网络模型的恢复路径优化方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(6):11-15.

[6] 杨可,刘俊勇,贺星棋,等. 黑启动中考虑动态过程的负荷最优恢复[J]. 电力自动化设备,2009,29(10):88-92.

[7] 刘连志,赵灿,韩振明. 黑启动过程中操作过电压分析[J]. 四川电力技术,2009,32(3):28-31.

[8] 刘映尚,张碧华,周云海,等. 黑启动过程中继电保护和自动装置的特性和运行[J]. 中国电力,2005,38(5):25-28.

[9] 刘艳,顾雪平. 评估黑启动方案的层次化数据包络分析方法[J]. 电力系统自动化,2006,30(21):33-38.

作者简介:

张莉(1962),女,工程师,从事电网运行管理和负荷预测工作;

王晋(1978),女,工程师,从事电力系统继电保护工作;

卢政尧(1957),男,高级工程师,从事电网调度运行管理工作。  
(收稿日期:2012-05-22)

(上接第9页)

[6] 吴俊玲,周双喜,孙建锋,等. 并网风力发电场的最大注入功率分析[J]. 电网技术,2004,28(20):28-32.

[7] Chai Chompoo-inwai,Wei-Jen Lee,Fuangfoo P,et al. System Impact Study for the Interconnection of Wind Generation and Utility System[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2005,41(1):163-168.

[8] HA L T,SAHA T K. Investigation of power loss and voltage stability limits for large wind farm connections to a subtransmission network [C]. Power Engineering Society General Meeting,IEEE,Vol 2,Jun 6-10,2004,Denver,USA,2004:2251-2256.

[9] SMITH J,BROOKS D. Voltage impacts of distributed wind generation on rural distribution feeders [C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition,IEEE/PES,Vol 1,Oct 28-Nov 2,2001,Atlanta,USA,2001(1):492-497.

[10] Le Thu Ha,Tapan Kumar Saha. Investigation of power loss and voltage stability limits for large wind farm connections to a subtransmission network [J]. IEEE,2007.

[11] Magnip P. Large-scale wind power integration and voltage stability limits in regional networks [C]. IEEE power engineering society summer meeting 2002.

[12] 于德龙,赵海翔,曹娜. 风电场接入地区电网的电压

问题分析[J]. 中国电力,2006,39(6):10-14.

[13] 张红光,张粒子. 风电场接入电网的安全稳定分析[J]. 中国电力,2007,40(5):105-109.

[14] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,陈默子,戴慧珠. 风电接入对电力系统影响的研究[J]. 电网技术,2006,48(5):38-44.

[15] 杨国良,李惠光. 垂直轴永磁同步风力发电系统建模及瞬时功率控制策略[J]. 电力自动化设备,29(5),39-42.

[16] 林莉,孙才新,王永平,等. 大容量风电场接入后电网电压稳定性的计算分析与控制策略[J]. 电网技术,2008,32(3):41-46.

作者简介:

赵海岭(1984),男,硕士研究生,工程师,研究方向为风力发电及并网技术、微机继电保护;

王维庆(1959),男,教授,博士生导师,主要从事风力发电技术、大规模风电并网及微机继电保护等方面的研究工作;

姚秀萍(1959),女,高级工程师,硕士生导师,国家电网公司专家,研究方向为电力系统稳定与控制、新能源并网技术;

常喜强(1977),男,高级工程师,国家电网公司专家,主要研究方向电力系统稳定与控制、风电等新能源技术。  
(收稿日期:2012-04-16)

# 双馈风电机组的建模仿真及其等值方法研究

李智才 李凤婷

(新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 分析了双馈风力发电机组的数学模型及控制模型,基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建了双馈风力发电机组仿真模型,以阵风和渐变风为例,对风力发电机组并网运行端口的稳态特性和故障特性做了仿真,能够实现定子侧有功、无功解耦控制及电压的恒定,验证了所建模型的正确性。在考虑尾流效应的情况下,研究了不同类型的双馈风电机组等值思路,搭建了等值模型,对其等值前后的稳态、暂态特性进行对比分析,结果表明了该等值方法的有效性,为大规模并网型双馈机组风电场进一步研究提供了有力条件。

**关键词:** 双馈风力发电机组; 风电场; 建模; 等值

**Abstract:** The mathematical model and control model of double-fed wind turbine are analyzed. Based on PSCAD/EMTDC platform, a single double-fed wind turbine simulation model is built. Taking the gusty wind and gradient wind for example, the steady-state characteristics and failure characteristics of the wind turbine integrated to power grid are simulated, and the active and reactive decoupling control and constant voltage in stator side can be achieved, then, the correctness of the model is verified. The equivalent method of different types of double-fed wind turbine is studied considering the wake effect, an equivalent model is built, and the steady-state and transient characteristics are compared and analyzed before and after the equivalents. The effectiveness of the equivalent methods is verified by the results, which provides the favorable conditions for the further research of large-scale grid-connected wind farm.

**Key words:** double-fed wind turbine; wind farm; modeling; equivalent

中图分类号: TM743 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0010-05

## 0 引言

双馈风力发电机与电网柔性连接,可以根据风速的变化最大限度地捕获风能,也参与电力系统的无功调节,实现有功、无功功率的灵活控制,而且与转子绕组相连的变频器容量小,成本较低,已成为风力发电的研究热点和市场主流<sup>[1]</sup>。建立正确的双馈风机模型,正确模拟风机的端口特性是进行风机并网运行特性等后续研究的基础。目前普遍采用的双馈风电机组的建模及控制目标为:通过控制转子侧变流器,实现双馈电机定子绕组有功功率和无功功率解耦;通过控制网侧变流器,保持变换器直流电压恒定,交流侧相电压和电流同相位,交流侧相电流为正弦波的控制目标<sup>[2]</sup>。

随着风电技术的快速发展,风电场容量逐渐增大,在大型风电场并网系统的仿真分析中,若对每台

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50967004)

双馈风电机组及其控制系统进行详细建模,将导致计算时间长、资源利用率低。因此,有必要对双馈机组风电场等效等值建模方法进行深入研究<sup>[3]</sup>。

这里在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上进行双馈风力发电机组的建模,以阵风和渐变风为例,对风力发电机组并网运行的端口特性做了仿真分析,验证了模型的有效性。以此模型为基础,对双馈机组风电场进行等值建模,仿真分析了在稳态、暂态情况下等值模型的有效性。

## 1 双馈风电机组的数学模型

### 1.1 风力机输出功率和转矩

风力机是用来截获流动空气所具有的动能,并将风力机叶片迎风扫风面积内的一部分动能转换为机械能,其捕获风能所产生的机械输出功率为<sup>[4]</sup>

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为空气密度;  $R$  为叶片半径;  $V$  为风速;  $C_p$  为风能利用系数。

输出的机械转矩为

$$T_m = \frac{P_w}{\omega} \times \frac{\omega_N}{P_N} = \frac{P_w}{P_N} \cdot \frac{\omega}{\omega_N} \quad (2)$$

式中,  $\omega_N$  为风力机额定机械角速度;  $P_N$  为风力机的额定功率。

### 1.2 双馈风力发电机的数学模型

三相绕组中各量均对称, 定转子绕组均采用电动机惯例, 不考虑零轴分量, 则两相同步旋转的 dq 坐标系下的 DFIG 数学模型可表示如下<sup>[5]</sup>。

定子绕组电压方程为

$$\begin{cases} u_{sd} = \frac{d\psi_{sd}}{dt} + R_s i_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = \frac{d\psi_{sq}}{dt} + R_s i_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} \end{cases} \quad (3)$$

转子绕组电压方程为

$$\begin{cases} u_{rd} = \frac{d\psi_{rd}}{dt} + R_r i_{rd} - \omega_s \psi_{rq} \\ u_{rq} = \frac{d\psi_{rq}}{dt} + R_r i_{rq} + \omega_s \psi_{rd} \end{cases} \quad (4)$$

其中  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$ 、 $u_{rd}$ 、 $u_{rq}$  为定、转子  $d$ 、 $q$  轴电压;  $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 、 $i_{rd}$ 、 $i_{rq}$  为定、转子  $d$ 、 $q$  轴电流;  $\psi_{sd}$ 、 $\psi_{sq}$ 、 $\psi_{rd}$ 、 $\psi_{rq}$  为定、转子  $d$ 、 $q$  轴磁链;  $R_s$ 、 $R_r$  为定、转子绕组电阻;  $\omega_1$  为  $d$ 、 $q$  轴坐标系旋转角速度, 此时等于同步转速;  $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$  为  $d$ 、 $q$  轴坐标相对于转子的转差电气角速度,  $\omega_r$  为转子旋转的电气角速度。

## 2 双馈风力发电机的控制模型

双馈风力发电机的控制部分主要是对转子侧和电网侧变换器进行控制, 实现最大风能效率。转子侧变换器的控制目标是实现有功功率和无功功率的解耦控制, 从而实现定子侧输出电压恒定, 频率稳定为 50 Hz; 网侧变换器的控制目标是控制交流侧功率因数, 保证直流母线电压恒定<sup>[6]</sup>。

### 2.1 转子侧变换器的矢量控制

转子侧采用定子磁链定向矢量控制,  $d$  轴沿定子磁场方向, 定子磁通的  $q$  轴分量为零, 则  $u_{sd} = 0$ ,  $u_{sq} = U_s$ 。忽略定子侧电阻, 定子有功功率  $P_s$  和无功功率  $Q_s$  为

$$\begin{cases} P_s = -\frac{2}{3} U_s \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = \frac{2}{3} \left( \frac{U_s^2}{\omega_1 L_s} - \frac{L_m}{L_s} U_s i_{rd} \right) \end{cases} \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 转子侧的电流分量  $i_{rq}$  可以控制定子侧的有功功率  $P_s$ , 转子侧的电流分量  $i_{rd}$  可以控制定子侧的无功功率  $Q_s$ , 从而实现了发电机定子有功与无功的解耦控制<sup>[7]</sup>。

### 2.2 网侧变换器的矢量控制

网侧采用定子电压定向矢量控制,  $d$  轴沿定子电压方向,  $q$  轴在旋转方向上超前  $d$  轴  $90^\circ$ , 则  $u_d = U_s$ ,  $u_q = 0$ , 进而可以得到电网侧变换器与电网交换的有功与无功表达式如下。

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} u_d i_d \\ Q_g = -\frac{3}{2} u_q i_q \end{cases} \quad (6)$$

其中  $u_d$ 、 $u_q$ 、 $i_d$ 、 $i_q$  分别为电网电压、网侧变换器电流在  $d$ 、 $q$  轴上的分量。由式(6)可知, 若认为电网电压恒定, 电网侧变换器与电网交换的有功功率与无功功率分别受控于网侧变换器的电流  $i_d$ 、 $i_q$ 。根据瞬时功率理论可知, 影响直流电压的是有功功率, 所以可以通过有功电流  $i_d$  控制直流电压, 通过无功电流  $i_q$  控制交流侧电压与电流的相位<sup>[8]</sup>。

## 3 单台风电机组的仿真与分析

基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台, 对一台单机额定容量为 1.5 MW 的风力发电机组接入无穷大系统进行仿真, 系统的具体参数: 空气密度为 1.229 km/m<sup>3</sup>, 叶片半径  $R = 40$  m, 齿轮箱机械效率为 0.97, 切入风速为 3 m/s, 额定风速为 13 m/s, 切出风速为 25 m/s, 额定电压为 0.69 kV, 额定频率为 50 Hz, 定子电阻  $R_s = 0.005876$  p.u., 转子电阻  $R_r = 0.006613$  p.u., 定子电抗  $X = 0.0976$  p.u., 转子电抗  $X = 0.1634$  p.u., 互感电抗  $X_m = 5.136$  p.u.。为了验证所建立模型的准确性, 分别对稳态和暂态两种情况下风电机组并网特性进行仿真分析。

### 3.1 系统稳态情况下风电机组并网特性仿真

基本风速为 9 m/s, 第 2 s 阵风启动, 阵风风速峰值 2 m/s, 持续 1 s, 第 4 s 渐变风启动, 渐变风风速峰值 2 m/s, 持续 1 s, 之后以此风速运行, 如图 1

所示。图2~图4分别显示了在风速不断变化过程中,风电机组有功功率、无功功率及电压电流变化曲线。

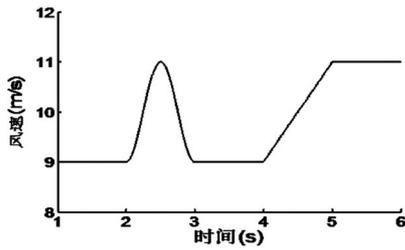


图1 风速的变化

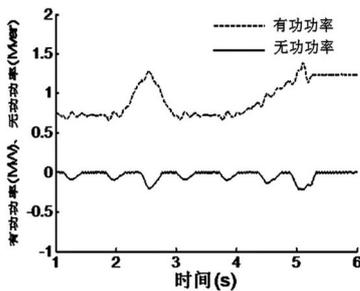


图2 定子的有功功率和无功功率

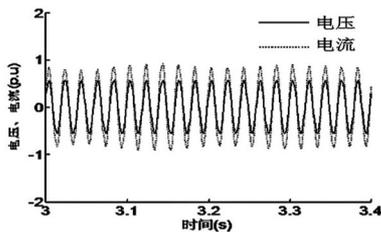


图3 定子侧电压电流曲线(1)

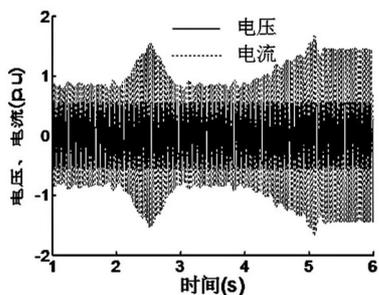


图4 定子侧电压电流曲线(2)

由图2可以看出,风力发电机的输出有功功率随着风速的变化而变化且波形相似。从响应曲线中可以看出双馈发电机的有功功率的变化并不在时间与扰动风速一致,这是由风电机组本身存在惯性导致一定延时。在有功功率随着风速变化时,无功功率基本保持不变,维持在0左右。另外,在图3中也可以看出,定子侧输出的电压、电流同相位,功率因数维持在1左右,说明该控制策略能够实现定子侧有功与无功的解耦控制。无功不随有功的变化而变化,风机不从系统吸收无功。在图4中可以看出,

在有功随着风速变化的过程中,定子侧电压维持不变,说明风速的变化对电压基本没有影响;定子侧电流随着有功的变化而变化且波形相似,说明风速的变化对电流产生影响,进而影响有功输出,说明了所建双馈机组模型的准确性。

### 3.2 系统故障情况下风电机组动态特性仿真

输入风速为基本风速9 m/s,风机并网处在 $t = 1.5$  s时发生三相接地故障,持续时间0.2 s。在该暂态过程中,发电机定子电压、定子电流、发电机输出的有功功率、无功功率的动态过程如图5~图6所示。

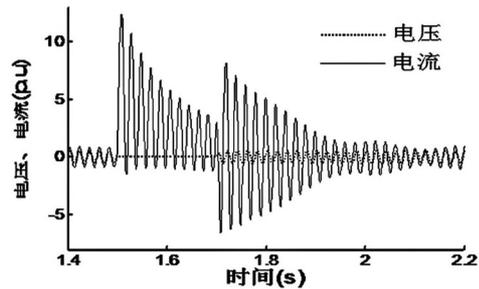


图5 定子的电压和电流

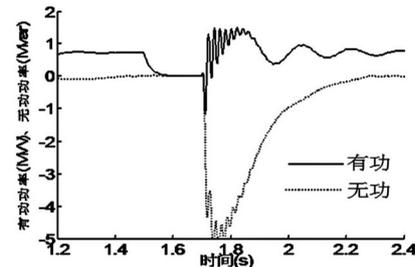


图6 定子的有功功率和无功功率

由图5可以看出,在 $t = 2$  s发生故障时,电网电压瞬间跌落,定子电压受到影响,下降到0,持续0.2 s。定子电流瞬间突变,在故障期间按照指数规律衰减。在 $t = 2.2$  s时故障清除后,发电机经过振荡后重新建立起机端电压,电流在经过振荡后恢复到稳定状态。在图6中得知,在故障时,风机有功出力快速跌落,持续0.2 s,无功维持为0,故障清除后,有功出力快速振荡回升,无功瞬间落后后,快速恢复到0附近,这是因为在故障消除后,风机需要一定无功支持来恢复机端电压。

## 4 双馈风机机组的等值

目前,关于风电场等值建模研究较多,但主要集中在恒速恒频异步机的风电场中<sup>[9-11]</sup>,对于双馈风力发电场等值研究仍较为单一、没有系统、明确的等

值方法。风电场等值主要包括风能分布模型、等值机群的划分、发电机组等值模型以及风电场内部电网参数等值模型<sup>[12]</sup>。

#### 4.1 尾流效应模型

以 Jensen 模型考虑尾流效应的影响,如图 7 所示,  $X$  是两台风电机组之间的距离;  $R$  和  $R_w$  分别为风电机组叶片半径和尾流半径;  $V_0$  为吹向风电机组的风速;  $V_T$  为通过转子的风速;  $V_x$  为受尾流影响的风速。由 Jensen 模型可知

$$V_x = V_0 [1 - (1 - \sqrt{1 - C_T}) (\frac{R}{R + KX})^2] \quad (7)$$

式中,  $C_T$  为风电机组推力系数;  $K$  为衰减系数,一般由公式(9)计算。

$$K = \frac{0.5}{\ln(h/z)} \quad (8)$$

式中  $h$  为轮毂高度;  $z$  为粗糙度,一般取 0.002 m。

在下面的研究中,风轮机高 80 m,叶轮半径 40 m,风机间距 500 m,取各台风机的  $C_T$  为 0.2,则  $V_x = 0.958 2 V_0$ 。

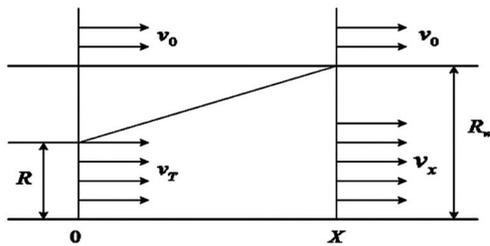


图 7 尾流效应模型

等值风速的计算公式为<sup>[13]</sup>

$$V_{eq} = [\frac{1}{AC_p} \sum_{i=1}^n A_i C_{pi} V_i^3]^{1/3} \quad (9)$$

式中  $A = \sum_{i=1}^n A_i$ ;  $C_p = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C_{pi}$ ;  $A_i$  为第  $i$  台风力机扫风面积;  $C_{pi}$  为第  $i$  台风力机转换效率;  $V_i$  为第  $i$  台风力机风速。

#### 4.2 等值机功率

对于双馈风力发电机构成的风场,等值前后容量不变、额定容量不变。

$$S_{eq} = \sum_{i=1}^n S_i \quad (10)$$

$$P_{eq} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (11)$$

对于无功功率,整个风电场根据系统整体需求、单机运行状态对每台风电机组进行无功分配。如果双馈机风力发电机各单机系统控制系统的参考无功不同,则等值机组参考无功功率为所有单机参考无

功功率之和。

$$Q_{eqref} = \sum_{i=1}^n Q_{iref} \quad (12)$$

#### 4.3 发电机等值参数求取

这里研究风电场所有风力发电机组接于同一母线上,在风电场并网运行时不考虑双馈发电机内部的功率损耗,所以在求取等值发电机参数时采用加权平均的方法。每台双馈机的等值电路为 T 型等值电路,它与普通异步发电机等值电路的唯一区别在于其转子侧多出一个励磁电压。可以得出,计算定转子及励磁回路阻抗时可沿用异步机等值方法。

根据加权平均法可得发电机定子阻抗等值参数为<sup>[14]</sup>

$$R_{seq} = \frac{a_s}{a_s^2 + b_s^2} \quad (13)$$

$$X_{seq} = \frac{b_s}{a_s^2 + b_s^2} \quad (14)$$

$$\text{其中 } a_s = \sum_{i=1}^m \frac{\rho_i R_{si}}{R_{si}^2 + X_{si}^2} \quad b_s = \sum_{i=1}^m \frac{\rho_i X_{si}}{R_{si}^2 + X_{si}^2}$$

同理,计算出转子阻抗的等值参数  $R_{req}$ 、 $X_{req}$ 。等值发电机的励磁电抗为

$$X_{meq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \rho_i / X_{mi}} \quad (15)$$

另外,还可以求出等值机的惯性时间常数、阻尼系数、运行滑差,其分别为

$$T_{jeq} = \sum_{i=1}^m \rho_i T_{ji} \quad (16)$$

式中,  $T_{jeq}$  为等值发电机惯性时间常数;  $T_{ji}$  为第  $i$  台发电机的惯性时间常数。

$$K_{Deq} = \sum_{i=1}^m \rho_i K_{Di} \quad (17)$$

式中,  $K_{Deq}$  为等值发电机阻尼系数;  $K_{Di}$  为第  $i$  台发电机的阻尼系数。

$$s_{eq} = \frac{a}{a'} \cdot \frac{a'^2 + b'^2}{a^2 + b^2} \quad (18)$$

其中,

$$\left\{ \begin{aligned} a &= \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i R_{ri}}{R_{ri}^2 + X_{li}^2} \\ b &= \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i X_{ri}}{R_{ri}^2 + X_{li}^2} \\ a' &= \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i R_{ri} / S_i}{(R_{ri} / S_i)^2 + X_{li}^2} \\ b' &= \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i X_{li}}{(R_{ri} / S_i)^2 + X_{li}^2} \\ X_{li} &= X_{si} + X_{ri} \end{aligned} \right. \quad (19)$$

研究中,由于所等值双馈发电机台数较少,风电场内电网的功率损耗可忽略不计,因此,可忽略风电场内部集电线线路的等值。

#### 4.4 算例分析及仿真

为了验证等值方法的有效性,本算例中将两台 1.5 MW(1、2 号)和两台 2 MW(3、4 号)的双馈机组等值为一台机组进行分析。仿真所用的系统如图 8 所示,两种类型风力发电机的参数和用前方法得到的等值机参数列于表 1。

仿真参数为:联络线线路型号为 LGJ240,联络线电阻  $r=0.132 \Omega/\text{km}$ ,电抗  $x=0.401 \Omega/\text{km}$ ,电纳  $b=2.85 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ ;风电场主变压器额定容量为 10 MVA,短路电压百分比为 10.5%;集电线线路型号为 LGJ150,集电线路电阻  $r=0.21 \Omega/\text{km}$ ,电抗  $x=0.398 \Omega/\text{km}$ ,电纳  $b_2=2.9 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ 。

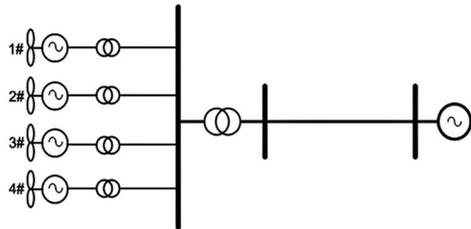


图 8 风电场全模型

表 1 风力发电机及等值机的参数

参数	单台机参数		等值机参数
	两台	两台	
$P_N/\text{MW}$	1.5	2	7
$U_N/\text{V}$	690	690	690
$f/\text{Hz}$	50	50	50
$T/\text{s}$	5.04	3.5	4.116
$K/\text{p.u.}$	0.01	0.01	0.01
$r_s/\text{p.u.}$	0.005 876	0.004 88	0.005 649
$x_s/\text{p.u.}$	0.097 6	0.138 6	0.117 47
$r_r/\text{p.u.}$	0.006 613	0.005 49	0.005 934
$x_r/\text{p.u.}$	0.163 4	0.149 3	0.155 03
$x_m/\text{p.u.}$	5.139 57	3.952 7	4.387 18
$s$	0.2	0.2	0.2

表 2 受尾流效应影响的风速及等值风速

风机	WG1	WG2	WG3	WG4	等值机
风速	10.5	10.06	9.64	9.24	9.88

#### 4.4.1 稳态运行时比较

设风电场全模型和风电场等值模型在如表 2 所示的风速下进行仿真,则稳态时其等值前后有功功率、无功功率和电压的波形如图 9 所示。

在图 9 中可以看出,在稳态运行时,风电场并网

点处的有功功率、无功功率及电压在等值前后基本吻合,说明在稳态运行时等值模型能够很好的反应出风电场特性。

#### 4.4.2 暂态运行时比较

在  $t=1 \text{ s}$  时风电场并网处发生三相接地短路,

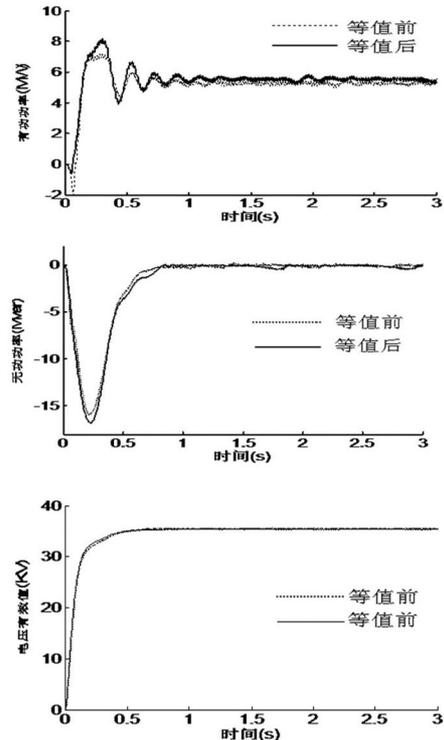


图 9 稳态时等值前后有功、无功及电压曲线

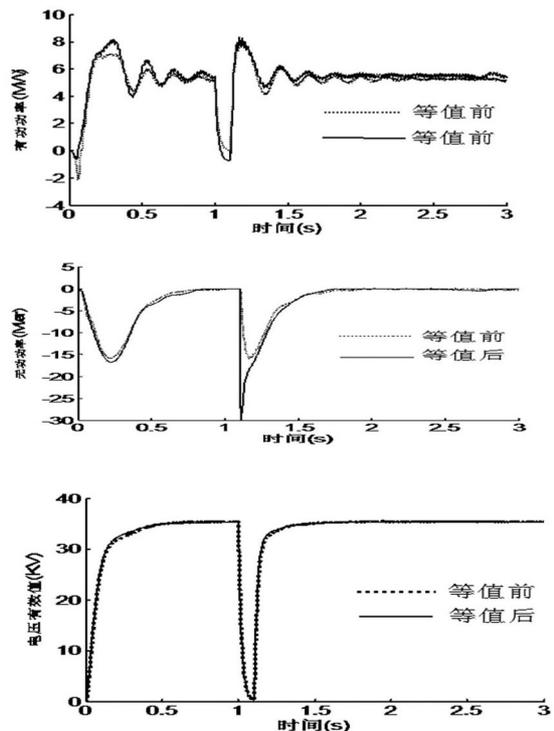


图 10 暂态时等值前后有功、无功及电压曲线

(下转第 45 页)

重大反事故措施》(试行) 继电保护专业重点实施要求 [S]. 2005.

[4] 许继电气股份有限公司. WGQ-871A 微机故障启动装置技术说明书 [R]. 2008.

作者简介:

李凡红(1984) 男, 助理工程师, 研究方向为电力系统

(上接第 14 页)

风速不变时, 分别对风电场全模型和风电场等值模型进行仿真, 有功功率、无功功率和电压的波形如图 10 所示。

由仿真曲线可知: 机群出口 PCC 处发生三相短路扰动时, 风电场 PCC 处有功出力、无功变化和电压幅值在等值前后基本吻合, 只是在扰动发生前后有较为明显的局部误差, 各种动态过程都具有较好的精度。等效风电机组参数对系统扰动具有良好的适应性。说明暂态运行时等值模型也能够很好的反应出风电场特性。

## 5 总 结

以上建立了变速恒频双馈风电机组的模型, 对阵风风和渐变风下端口的稳态、暂态特性进行了仿真, 仿真结果表明: 双馈风电机组可以实现有功的最大功率跟踪, 有功和无功解耦控制, 输出功率因数为 1, 端口电压稳定, 从而验证了模型的正确性。其次, 在考虑尾流效应的情况下, 对基于不同容量双馈风电机组的风电场进行等值, 在稳态、暂态运行情况下进行仿真分析, 结果表明, 等值前后风电场的有功功率、无功功率及电压基本吻合, 误差较小, 等值模型能够很好反应出风电场特性, 对各类动态过程仿真具有较好的适用性, 这为大规模含变速恒频双馈型机组风电场的等值提供方法参考。

### 参考文献

[1] 陈雷, 邢作霞. 大型风力发电机组技术发展趋势 [J]. 可再生能源, 2003(1): 27-30.

[2] 冯双磊, 赵海翔, 任普春. 基于 PSCAD/EMTDC 的双馈式变速恒频风电机组动态模型仿真 [J]. 电网技术, 2007, 31(17): 30-35.

[3] 李光允, 陈小虎, 唐国庆. 大型风力发电场等值建模研究综述 [J]. 华北电力大学学报, 2006, 31(1): 42-46.

智能运行及控制理论研究, 从事继电保护及控制方面的工作;

庄秋月(1986) 女, 助理工程师, 研究方向为电力系统运行及暂态分析。

(收稿日期: 2012-01-11)

[4] Yu Zou, Malik Elbuluk, Yilmaz Sozer. A Complete Modeling and Simulation of Induction Generator Wind Power Systems [C]. Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), IEEE, 2010: 1-6.

[5] 张照彦, 马永光. 双馈异步风力发电机建模与仿真研究 [J]. 电力科学与工程, 2010, 26(1): 5-9.

[6] 万航羽, 黄梅. 双馈风力发电机建模及谐波分析 [J]. 电气应用, 2008, 27(6): 53-57.

[7] 徐园. 基于 PSCAD/EMTDC 变速恒频双馈风力发电机组运行及特性分析 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2008: 17-20.

[8] 高一丹, 张步涵. 并网双馈风力发电机组的建模与仿真 [J]. 湖北工业大学学报, 2010, 25(1): 75-80.

[9] 苏常胜, 李凤婷, 晁勤, 等. 异步风力发电机等值及其短路特性研究 [J]. 电网技术, 2011, 35(3): 177-182.

[10] 李环平, 杨金明. 基于 PSCAD/EMTDC 的大型并网风电场建模与仿真 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 62-66.

[11] L. M. Fernandez, C. A. Gareia, J. R. Saenz. Equivalent Models of Wind Farms by Using Aggregated Wind Turbines and Equivalent Winds [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 12(4): 691-704.

[12] 孙蕾. 变速恒频风力发电机组建模与控制策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009: 47-52.

[13] Daniel J T, Andrew G, Jawad M K and Eric M. Petritz. Fixed-speed Wind-generator and Wind-park Modeling for Transient Stability Studies [J], IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1911-1917.

[14] 张慧群. 基于遗传算法的风电场异步发电机动态等值研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007: 23-31.

作者简介:

李智才(1986) 男, 硕士研究生, 研究方向为洁净能源发电与风电并网技术;

李凤婷(1965) 女, 教授, 工学博士, 硕士生导师, 研究方向为风电并网技术与电力系统继电保护。

(收稿日期: 2012-05-11)

# 考虑系统峰谷时变区间特性的电压暂降频次评估

张 忠<sup>1</sup> 徐培栋<sup>2</sup>

(1. 四川省电力公司超(特)高压运行检修公司, 四川 成都 610065;  
2. 江苏省电力公司检修分公司无锡分部, 江苏 无锡 214000)

**摘要:** 故障前电压是影响系统电压暂降频次评估的重要原因之一。现有电压暂降频次随机评估方法,通常假定发生故障前系统母线电压为额定值,而实际故障前电压在电压曲线区间范围内变化,且不同运行方式下随着峰谷变化有不同区间边界。针对故障前电压实际特征,建立故障前电压的数学模型——幅值区间矩阵和时间权重重点值矩阵,体现了故障前电压峰谷、时变、区间三大特征。在此模型基础上提出用区间分析的方法评估电压暂降频次的一般步骤。通过对实际区域电网仿真分析,并与故障前电压为额定值和实际截面电压评估结果比较,证明了该模型和算法的正确性和有效性。采用提出方法对电压暂降进行评估,更符合工程实际。

**关键词:** 电压暂降; 区间算法; 故障前电压; 幅值区间矩阵; 时间权重重点值矩阵; 随机评估

**Abstract:** Prefault voltage is one of the most important factors which will affect the assessment of voltage sag frequency in power system. The current stochastic assessment methods usually assume the prefault voltage to be the rated value. In practice, however, the prefault voltage is varying over a range. The range is always changing during peak and valley period everyday under different operating modes. Aiming at the characteristics mentioned above, a mathematical model of the prefault voltage is established with the interval matrix of voltage magnitude and the time weighted matrix, which reflects the three characteristics, that is, peak-valley, time-varying and interval. For the typical characteristics of the prefault voltage, the common process to assess the voltage sag frequency is proposed in detail on the basis of interval algorithm. The proposed method is performed in the actual power grid. It is proved that it needs only one time of interval iteration process. The simulation results indicate that this method is reasonable and effective.

**Key words:** voltage sag; interval algorithm; prefault voltage; interval matrix of voltage magnitude; time weighted matrix; stochastic assessment

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0015-06

## 0 引言

随着电力系统中敏感负荷的增多,因电压暂降引起的经济损失越来越大<sup>[1,2]</sup>,电压暂降已成为最严重的电能质量问题,引起了国内外广泛关注<sup>[3,4]</sup>。系统故障是引起电压暂降最主要原因<sup>[5,6]</sup>。因此准确评估系统电压暂降频次成了迫切需要研究的重要课题。

现有评估方法:实测法<sup>[7]</sup>、临界距离法<sup>[8]</sup>、故障点法<sup>[9,10]</sup>、解析式法<sup>[11-13]</sup>。实测法的结果直观、可靠,但测试成本高,所需时间长,推广性和预见性不强;后面3种方法属较典型的随机估计法,以仿真建模为基础进行评估,有较强的预见性和推广性;但现有方法几乎均假设发生暂降前系统母线电压为额定

值,而实际中,随着系统运行方式和负荷水平的变化,系统母线电压总在运行规程允许的范围内变化,这种变化虽然相对发生停电事件很小,但对于评估可能造成敏感负荷设备不正常运行的电压暂降频次的影响很大,因此,评估电压暂降频次时,故障前母线电压必须考虑。

影响电压暂降频次的因素很多,包括故障前电压<sup>[13]</sup>、网络拓扑、运行方式<sup>[14]</sup>、线路故障率<sup>[15,17]</sup>、故障位置<sup>[15,16]</sup>等。现有评估方法在评估频次时,通常假定故障前各母线电压为额定值<sup>[8-12]</sup>,文献[13]提出用某一潮流截面计算后的母线电压作为暂降前电压,这些对故障前电压的刻画均与实际不符。系统每年均对重要母线制定电压运行曲线,各母线电压均在该电压曲线区间范围内波动<sup>[21]</sup>,这说明正常运行时,各母线的运行边界具有时变特性。当某变量

的具体值不能精确知道而仅知道其界定范围,或本身是一区间值而非点值时,用区间数分析更合理<sup>[17-19]</sup>。文献[17-19]通过建立负荷及元件的区间模型,通过前推回代计算母线电压区间范围,但区间模型建立困难,其推广性不强。

由于在系统不同运行方式下,随着峰谷的变化,母线电压的变化具有区间时变特性,下面用幅值区间矩阵和时间权重点值矩阵,建立故障前母线电压模型,以确定不同运行方式和负荷水平下暂降前的母线电压,以此为依据确定发生故障时母线电压暂降幅值,通过区间分析法评估母线电压暂降频次。以某地区级实际区域电网为例,并与故障前电压为 1 p. u. 和实际截面电压的评估结果比较,验证该方法的有效性和正确性,采用所提方法对电压暂降进行评估,更符合工程实际,评估结果为决策者提供了更加充分的决策信息。

## 1 区间数与区间运算

区间估计法利用区间数学和区间分析法来处理外延明确、内涵不明确的信息,即只知道变化范围而不知其确切的信息。

对给定数,对  $x_d, x_p \in R, R$  为实数域,若满足条件  $x_d \leq x_p$ , 则闭有界数集合为

$$\tilde{X} = [x_d, x_p] = \{x \in R \mid x_d \leq x \leq x_p\} \quad (1)$$

称为有界闭区间数<sup>[18]</sup>。其中  $x_d, x_p$  分别为区间数  $\tilde{X}$  的上下端点。

若  $x_d = x_p$ , 则定义  $\tilde{X}$  为点区间数,将实数域  $R$  上所有的有界闭区间数的集合记为  $I(R)$ 。对任意给定区间数  $\tilde{X} = [x_d, x_p], \tilde{Y} = [y_d, y_p] \in I(R)$ , 其四则运算为

$$\tilde{X} + \tilde{Y} = [x_d + y_d, x_p + y_p] \quad (2)$$

$$\tilde{X} - \tilde{Y} = [x_d - y_p, x_p - y_d] \quad (3)$$

$$\tilde{X}\tilde{Y} = [\min(x_d y_d, x_d y_p, x_p y_d, x_p y_p), \max(x_d y_d, x_d y_p, x_p y_d, x_p y_p)] \quad (4)$$

$$\tilde{X}/\tilde{Y} = [x_d, x_p] [1/y_d, 1/y_p] \quad 0 \notin \tilde{Y} \quad (5)$$

为便于表达,以  $\tilde{X}$  表示区间数,以区别于普通的点值。

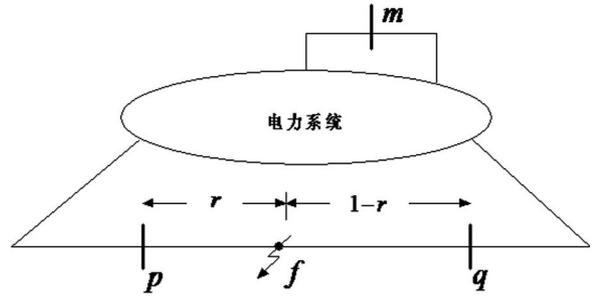


图 1 线路  $p-q$  上  $f$  点发生故障

## 2 电压暂降幅值计算

假定线路  $p-q$  上  $f$  点处发生短路故障,故障点  $f$  到母线  $p$  的距离为  $r, 0 \leq r \leq 1$  (标么值 p. u.)。故障点  $f$  对敏感负荷接入母线  $m$  的互阻抗和自阻抗分别为<sup>[13]</sup>

$$Z_{mf}^k = (1-r) Z_{mp}^k + r Z_{mq}^k \quad (6)$$

$$Z_{ff}^k = (1-r)^2 Z_{pp}^k + r^2 Z_{qq}^k + 2r(1-r) Z_{pq}^k + r(1-r) z_{pq}^k \quad (7)$$

式中  $k=0, 1, 2$  分别表示零序、正序和负序;  $Z_{pp}^k, Z_{qq}^k, Z_{mm}^k$  为母线  $p, q, m$  的自阻抗;  $Z_{mp}^k, Z_{mq}^k, Z_{pq}^k$  为各母线的互阻抗;  $z_{pq}^k$  为线路  $p-q$  的阻抗。

故障点  $f$  故障前的电压幅值为

$$V_f^{pf} = (1-r) V_p^{pf} + r V_q^{pf} \quad (8)$$

式中  $V_p^{pf}$  和  $V_q^{pf}$  为母线  $p, q$  故障前的电压幅值。

以三相短路故障为例说明,母线  $m$  的电压幅值与故障距离  $r$  的解析表达式为

$$V_m = V_m^{pf} - \frac{Z_{mf}^1}{Z_{ff}^1} V_f^{pf} \quad (9)$$

当线路发生其他类型短路故障时,母线电压暂降幅值与故障距离的解析式这里就不赘述。

## 3 故障前电压不确定性

### 3.1 故障前电压对电压暂降幅值的影响

电压是保证电能质量的重要指标。为保证用户安全生产和电网安全运行,电力系统各级母线和用户受端电压都是在规定允许偏差值内。由公式(8)、(9)知道,母线  $m$  故障后电压暂降幅值受到母线  $m, p, q$  故障前电压的影响。为说明故障前电压波动对电压暂降幅值的影响,以文献[12]中 5 节点系统为例说明。

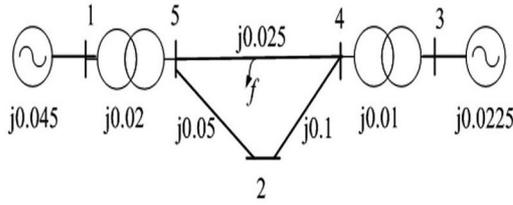


图2 5节点系统

传输线2-5在0.5 p. u. 位置 $f$ 点发生三相短路故障,假定母线2、4、5均为10 kV 母线。由文献[21]知,母线3、4、5故障前电压可在系统额定电压内变化,则故障点 $f$ 故障前电压也在 $[0.93, 1.07]$  p. u. 区间内变化。由公式(9)画出母线2故障后电压关于故障点 $f$ 和母线2故障前电压三维关系图。如图3 随着母线2和故障点 $f$ 故障前电压在 $[0.93, 1.07]$  p. u. 的电压区间内变化,母线2故障后的电压在 $[0.0567, 0.311]$  p. u. 的电压区间内变化,因此正确客观刻画故障前电压对提高电压暂降幅值评估的精确度和客观性有着重要意义。

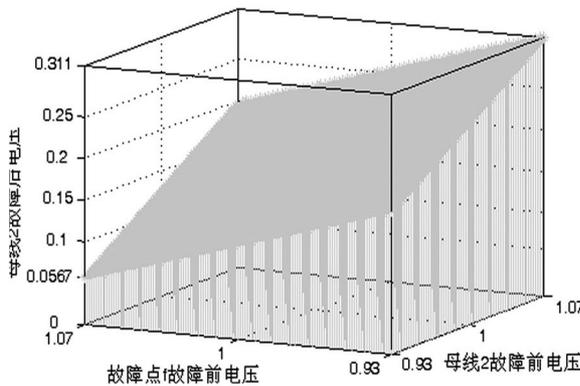


图3 母线2故障后电压三维图

### 3.2 故障前电压数学模型

国家《电力系统电压和无功电压管理条例》规定如下。

- (1) 电力系统各级网络,必须符合电压允许偏差值的要求(特殊负荷电压偏差由供电合同规定)。
- (2) 在电压偏差内实现逆调压,即供电电压在电网负荷高峰和低谷时段有不同的电压偏移要求。
- (3) 不同运行方式下(负荷变化、发电方式变化等)制定不同的电压曲线。

这说明系统不同运行方式(负荷变化、发电方式变化)下,随着峰谷的变化,母线电压的变化具有区间时变特性。由此首先建立故障前电压的幅值区间矩阵为

$$\tilde{V}_{n \times 2m} = \begin{bmatrix} \tilde{V}_{11} & \tilde{V}_{12} \\ \dots & \dots \\ \tilde{V}_{j1} & \tilde{V}_{j2} \\ \dots & \dots \\ \tilde{V}_{n1} & \tilde{V}_{n2} \end{bmatrix}$$

其中 $n$ 表示提前制定的电压曲线套数; $1 \leq j \leq n$ 表示第 $j$ 套电压曲线; $m$ 表示电网实际节点总数;矩阵所有元素均为区间数; $\tilde{V}_{j1} = [\tilde{V}_{j1}, \tilde{V}_{j2}, \dots, \tilde{V}_{jm}]$ 表示第 $j$ 套电压曲线峰期各节点电压幅值区间数矩阵; $\tilde{V}_{j2} = [\tilde{V}_{g1}, \tilde{V}_{g2}, \dots, \tilde{V}_{gm}]$ 表示第 $j$ 套电压曲线谷期各节点电压幅值区间数矩阵。

$\tilde{V}_{n \times 2m}$ 只是刻画了故障前电压幅值峰谷、区间特性,并没有反应故障前电压时变特征。随着每天峰谷变化,每年运行方式变化,系统母线电压区间边界均在变化,由此建立了时间权重点值矩阵为

$$w_{n \times 3} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} \\ \dots & \dots & \dots \\ w_{j1} & w_{j2} & w_{j3} \\ \dots & \dots & \dots \\ w_{n1} & w_{n2} & w_{n3} \end{bmatrix}$$

其中 $w_{j1}$ 、 $w_{j2}$ 、 $w_{j3}$ 表示第 $j$ 套电压曲线峰期权重系数、谷期权重系数、全年权重系数。

$$w_{j1} = j \text{ 套电压曲线每天峰期持续小时} \quad (10)$$

$$w_{j2} = j \text{ 套电压曲线每天谷期持续小时} \quad (11)$$

$$w_{j3} = j \text{ 套电压曲线每年运行天数} \quad (12)$$

系统中,母线电压运行曲线方式由调度部门提前下达,根据下达曲线经过简单计算即可建立故障前电压的数学模型——幅值区间矩阵和时间权重点值矩阵。

## 4 电压暂降幅值与频次区间计算

### 4.1 电压暂降幅值区间计算

临界距离法仅适用于辐射型电网;解析式法当故障前电压为区间数时,反复迭代会造成区间扩大并且会出现不收敛的情况;故障点是通过在系统中设置故障点,短路分析计算研究母线故障后的电压来确定凹陷域和电压暂降频次。当故障前电压为区间数时,仅需一次简单区间加减乘除运算计算得到故障后电压的电压幅值区间,从而确定暂降频次区

间,由此这里选择了故障点法。

以图1中*f*点发生单相接地故障,且故障前电压均为区间数为例说明如下。

故障点*f*故障前电压幅值区间数表示为<sup>[13]</sup>

$$\tilde{V}_f^{pf} = (1-r)\tilde{V}_p^{pf} + r\tilde{V}_q^{pf} \quad (13)$$

母线*m*故障后电压幅值区间数与故障点距离的解析式为

$$\tilde{V}_m = \tilde{V}_f^{pf} - \frac{Z_{mf}^0 + Z_{mf}^1 + Z_{mf}^2}{Z_{ff}^0 + Z_{ff}^1 + Z_{ff}^2} \tilde{V}_f^{pf} \quad (14)$$

其他故障类型类似,由公式(13)、(14)计算出的故障后电压不再是一个点值,而是反映故障前电压波动的一个区间数。

#### 4.2 电压暂降频次区间计算

故障点法是通过在每条线路上设置故障点把线路分成多个区间段,用短路分析计算故障点发生指定故障类型时,研究母线电压幅值与给定耐受电压幅值的关系。如果母线电压幅值小于等于给定耐受电压幅值,则线路区间段在凹陷域内,反之则在凹陷域外。由4.1节可知,当故障前电压在一个区间内变化时,母线故障后的电压幅值也在一个区间内变化。对于给定的耐受电压值,故障后电压会出现以下3种情况。

(1) 当故障后电压值区间最大值小于等于  $V_{th}$ , 则设置故障点对应的距离区间在凹陷域内。

(2) 当故障后电压值区间最小值大于  $V_{th}$ , 则设置故障点对应的距离区间在凹陷域外。

(3) 当  $V_{th}$  落在故障后电压值区间内, 则设置故障点对应的距离区间不确定是否落在凹陷域内。

由此,每条线路对于给定耐受电压幅值的凹陷域随着故障前电压的波动,也在一个区间内变化,用区间数  $\tilde{l} = [l_s, l_s + l_{us}]$  来表示。 $l_s$  表示肯定会产生电压暂降距离长度; $l_{us}$  表示不确定会产生电压暂降距离长度。

假设各条线路上故障点服从均匀分布,不考虑发电计划的影响,故障前电压为区间数矩阵  $\tilde{V}_{j1}$ , 则第*j*套电压曲线峰期,母线*m*电压暂降的频次为

$$\tilde{N}_{j1}^m = \sum_{i=1}^s \delta_i \tilde{l}_i \quad (15)$$

式中  $\delta_i$ 、 $\tilde{l}_i$  分别表示第*i*条线路故障率和第*i*条线路落在凹陷域内长度区间数;*s*为线路总数。又由  $\tilde{V}_{n \times 2m}$  知,同一电压曲线每天峰谷时段和不同电压曲线都对应着不同的凹陷域区间和频次区间,于是把

$\tilde{V}_{n \times 2m}$  作为输入变量可以建立母线*m*频次区间矩阵:

$$\tilde{N}_{n \times 2}^m = \begin{bmatrix} \tilde{V}_{11}^m \tilde{N}_{12}^m \\ \dots \\ \tilde{N}_{j1}^m \tilde{V}_{j2}^m \\ \dots \\ \tilde{V}_{n1}^m \tilde{V}_{n2}^m \end{bmatrix}$$

其中,  $\tilde{V}_{j1}^m$ 、 $\tilde{V}_{j2}^m$  分别表示全年正常运行电压都为  $\tilde{V}_{j1}$  或  $\tilde{V}_{j2}$  时母线*m*电压暂降频次区间数。

由时间权重点值矩阵知,频次区间矩阵各元素仅仅是表征了系统某一段时间的运行状态。母线*m*全年暂降频次是各种运行状态的综合体现,由此全年电压暂降频次为

$$\tilde{V}^m = \sum_{j=1}^n (\tilde{V}_{j1}^m w_{j1} + \tilde{V}_{j2}^m w_{j2}) w_{j3} \quad (16)$$

#### 4.3 评估流程

考虑故障前电压峰谷、时变、区间特性的电压暂降频次评估一般过程如下。

(1) 根据电力部门提前制定的电压曲线,计算形成故障前电压幅值区间矩阵  $\tilde{V}_{n \times 2m}$  和时间权重矩阵  $w_{n \times 3}$ 。

(2) 根据系统设置故障点,故障率计算考察母线电压暂降频次区间矩阵  $\tilde{N}_{n \times 2}^m$ 。

(3) 由公式(16)计算考察母线全年电压暂降频次变化区间。

评估流程见图4。

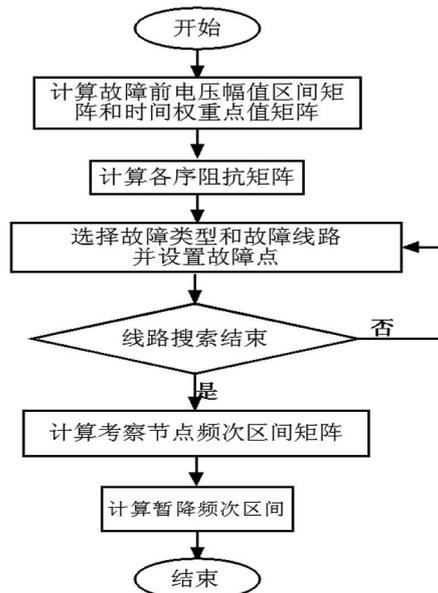


图4 电压暂降频次评估流程

## 5 算例仿真

以某区级实际电网为例,用该文评估算法对该电网进行仿真分析。电网如图 5 所示,包括 38 条母线,17 条线路,17 台变压器,不考虑变压器接线方式。在评估该电网时,以产生最严重不对称电压暂降的单相接地短路为例进行说明。

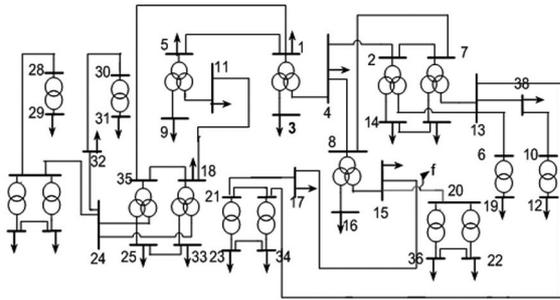


图 5 电网结构图

仿真以该电网丰水期电压运行曲线作为输入参数,假定图 5 线路 15-20 故障点  $f(0.5 \text{ p.u.})$  处发生单相短路故障,分别计算故障前电压为 1 p.u. 和为丰水期幅值区间矩阵时母线 9、13、16、18 故障后的电压幅值,结果如表 1 所示。

表 1 故障后电压幅值

母线 编号	故障前 电压 /p.u.	丰水期曲线	
		峰期	谷期
9	0.428 9	[0.337 7 0.440 8]	[0.345 7 0.481 0]
13	0.314 2	[0.255 4 0.357 6]	[0.260 1 0.338 0]
16	0.206 6	[0.163 4 0.234 1]	[0.181 7 0.247 3]
18	0.455 9	[0.413 8 0.504 7]	[0.395 9 0.487 6]

表 1 计算结果表明,与粗略假设故障前电压为 1 p.u. 相比,通过建立故障前电压丰水期电压曲线幅值区间矩阵计算结果是在前者周围区间变化。

为了说明故障后电压暂降幅值区间结果的正确性和客观性,用实际电压截面计算结果来比较。实际电压截面计算通过 SCADA 系统实际采集的各母

线电压,取多个时间点全网电压截面为故障前电压。最终,计算出指定故障点发生故障时,研究母线电压暂降幅值的波动范围。

以该区域电网丰水期中 3 天为例,每 1 min 全网电压截面作为故障前电压,通过每天 1 440 次点值计算,故障后电压的实际波动范围。由表 2 的计算结果可知,母线 9、13、16、18 每天峰谷时段故障后电压区间边界均在表 1 计算区间之内。由于每天负荷变化规律不一样,造成每天实际计算峰谷时段电压幅值区间相对计算结果要保守,但是 3 天各条母线峰谷时段最大区间边界均与计算结果相差无几。由此证明了算法基于故障前电压的时变区间模型的故障后电压幅值区间计算的完备性。

当研究母线故障后电压幅值在一定区间范围内变化时,它每年遭受的电压暂降频次也在一个区间范围内变化。以 2009 年 7 月份为例进行评估,当月运行有两套电压曲线(丰水期电压曲线和节假日电压曲线),假定耐受电压幅值为 0.4 p.u.,限于篇幅这里就不给出故障前电压的幅值区间矩阵,仅仅给出时间权重矩阵:  $\begin{bmatrix} 0.542 & 0.458 & 0.71 \\ 0.625 & 0.375 & 0.29 \end{bmatrix}$ ; 在系统中模拟 1 000 个故障点,分别计算故障前电压为 1 p.u.,每 10 min 一个截面的实际电压和幅值区间矩阵的情况,频次计算结果如表 3。

10 min 一个截面通过 4 464 次实际电压截面计算得到暂降频次区间,反应了研究母线暂降频次随系统暂降前母线电压区间波动是以区间波动的客观实际。且算法通过一次区间计算得到区间边界与经过大量实际电压截面计算得到的区间边界相差无几,证明了该方法的正确性和高效性。相对于粗略假定故障前电压为 1 p.u.,由于该算法考虑故障前电压的变化区间,因而可以方便地计及故障前电压变化对系统暂降频次的影响。算法所得的结果包含的信息量大,采用评估结果进行决策,更加符合工程实际。

表 2 实际电压截面计算结果

母线 编号	7 月 14 日		7 月 15 日		7 月 16 日	
	峰期	谷期	峰期	谷期	峰期	谷期
9	[0.346 1 0.444 2]	[0.348 2 0.452 5]	[0.340 3 0.404 5]	[0.335 7 0.424 9]	[0.348 1 0.431 2]	[0.356 7 0.455 4]
13	[0.257 4 0.335 5]	[0.263 5 0.297 0]	[0.254 3 0.348 4]	[0.269 2 0.313 3]	[0.282 0 0.357 0]	[0.288 3 0.328 3]
16	[0.183 1 0.216 3]	[0.184 0 0.233 8]	[0.169 7 0.222 8]	[0.187 0 0.235 0]	[0.209 7 0.231 2]	[0.193 0 0.225 5]
18	[0.435 0 0.488 1]	[0.413 7 0.484 2]	[0.424 7 0.481 4]	[0.430 4 0.486 4]	[0.438 1 0.491 0]	[0.438 8 0.473 5]

表3 7月电压暂降频次

母线 编号	故障前 电压为1	10 min 一个截面	采用 方法
9	0.196 4	[0.195 9 0.283 2]	[0.189 2 0.290 7]
13	0.237 5	[0.218 7 0.286 5]	[0.208 0 0.295 2]
16	0.282 5	[0.255 7 0.294 4]	[0.250 2 0.305 5]
18	0.195 0	[0.193 8 0.216 6]	[0.189 3 0.218 5]

## 6 结 论

(1) 考虑了故障前电压实际特点,建立了故障前电压的数学模型——幅值区间矩阵和时间权重重点值矩阵,反应了故障前电压峰谷、时变、区间三大特性,更加符合工程实际。

(2) 基于故障前电压的幅值区间矩阵和时间权重重点值矩阵,提出了用区间分析的方法评估母线电压暂降频次,并给出了评估的一般流程。

(3) 对某区级实际电网仿真并与故障前电压为1 p.u.和实际电压截面评估结果比较证明,评估算法仅需一次区间评估就能得到随故障前电压实际波动暂降频次的区间范围,具有快速、准确、客观的特点。采用所提出方法对电压暂降进行评估,评估结果更符合工程实际,为决策者提供了更加充分的决策信息。

### 参考文献

[1] 刘颖英,徐永海,肖湘宁.地区电网电能质量综合评估新方法[J].中国电机工程学报,2008,28(22):130-136.

[2] 周林,吴红春,孟婧,等.电压暂降分析方法研究[J].高电压技术,2008,34(5):1010-1016.

[3] 陶顺,肖湘宁,刘晓娟.电压暂降对配电系统可靠性影响及其评估指标的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(11):63-69.

[4] Xianyong Xiao,Fangwei Xu,Honggeng Yang.Short Duration Disturbance Classifying Based on S-transform Maximum Similarity[J].International Journal of Electrical Power& Energy Systems,2009,30(7):374-378.

[5] 沈广,陈允平,李欣.基于电能质量实时监测系统的电压暂降研究[J].高电压技术,2006,32(5):97-99.

[6] 李妍,段余平,邱军,等.电压暂降的计算及故障点电压暂降系数确定[J].高电压技术,2006,32(7):113-124.

[7] Martinez J A,Martin-Arnedo J.Voltage Sag Stochastic Prediction Using an Electromagnetic Transients Program[J].IEEE Trans on Power Delivery,2004,19(4):1975-1982.

[8] M.H.J.Bollen.Method of Critical Distances for Stochastic Assessment of Voltage Sags[J].IEE Proceedings Genera-

tion,Transmission & Distribution,1998,145(1):70-76.

[9] Gupta C P,Milanovic J V.Probabilistic Assessment of Equipment Trips Due to Voltage Sags[J].IEEE Trans on Power Delivery,2006,21(2):711-718.

[10] Bollen M H J.Fast Assessment Method for Voltage Sags in Distribution Systems[J].IEEE Trans on Industry Applications,1996,32(6):1414-23.

[11] Qader M R,Bollen M H J,Allan R N.Stochastic Prediction of Voltage Sags in a Large Transmission System[J].IEEE Trans on Industry Applications,1999,35(1):152-162.

[12] Elisa E J,Araceli H.An Analytical Approach for Stochastic Assessment of Balanced and Unbalanced Voltage Sags in Large Systems[J].IEEE Trans on Power Delivery,2006,21(3):1493-1500.

[13] Chang Hyun park,Gilsoo Jang.Stochastic Estimation of Voltage Sags in Large Meshed Network[J].IEEE Trans on Power Delivery,2007,22(3):1655-1664.

[14] 肖先勇,李皖,马超,等.受系统不确定因素影响的电压暂降频次评估[J].高电压技术,2009,35(7):1600-1606.

[15] Chang-Hyun Park,Gilsoo Jang,Robert J.Toms.The Influence of Generator Scheduling and Time-varying Fault Rates on Voltage Sag Prediction[J].IEEE Trans on Power Delivery,2008,23(2):1243-1250.

[16] Milanovic J V,Aung M T,Gupta C P.The Influence of Fault Distribution on Stochastic Prediction of Voltage Sags[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(1):278-285.

[17] 肖先勇,马超,李勇.线路故障引起电压凹陷的频次最大熵评估[J].中国电机工程学报,2009,29(5):87-93.

[18] 肖先勇,徐培栋,陈卫东,等.配电系统电压凹陷幅值与频次的区间评估[J].电力自动化设备,2009,29(9):7-10.

[19] 王守相,王成山,刘若沁.基于模糊区间算法的配电网潮流计算[J].电力系统自动化,2000,25(2):19-23.

[20] 王成山,王守相.基于区间算法的配电网三相潮流计算及算例分析[J].中国电机工程学报,2002,22(3):58-62.

[21] 刘天琪,邱晓燕.电力系统分析理论[M].北京:科学出版社,2005:161-162.

作者简介:

张忠(1976)男,现在四川省电力公司超(特)高压运行检修公司,长期从事电力生产工作;

徐培栋(1986)男,现在江苏省电力公司检修分公司无锡分部,长期从事电力生产工作。

(收稿日期:2012-05-22)

# 计及分布式电源的配电网可靠性分析

张 燃<sup>1</sup>, 吕 林<sup>2</sup>, 李 勇<sup>2</sup>, 李志奇<sup>2</sup>

(1. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**大量的分布式电源接入配电网会对配电网的可靠性带来深刻的影响。针对分布式电源建立了配电网可靠性模型, 结合计及停电用户数最优孤岛划分策略, 对传统的最小割集法进行改进, 分析分布式电源的位置以及容量对可靠性指标的影响, 指出在实际的运行过程中, 应该综合考虑各种因素的影响, 合理利用分布式电源来提高配电网可靠性。

**关键词:** 分布式电源; 配电网; 可靠性; 孤岛

**Abstract:** A large number of distributed generation (DG) have a profound impact on the reliability of distribution network. The island operation model is established aiming at the reliability for DG. The traditional minimal cut method is improved combined with the optimal island partition strategy considering the number of customer affected by interruption. The reliability for the four different simulation programs of IEEE RBTS BUS 6 is analyzed, which indicates that DG positions and its capacity will bring different influence on the reliability index. It is also pointed out that the practical operation should take all these factors into consideration so as to lay out the DG to improve the reliability of distribution network.

**Key words:** distributed generation (DG); distribution network; reliability; island

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0021-04

## 0 引言

随着大量的分布式电源接入配电系统, 配电系统从传统的辐射型的单源网络变成一个遍布负荷和电源的多源新型配电系统。分布式电源接入增加了配电网潮流不确定性, 给配电网的可靠性带来显著影响<sup>[1, 2]</sup>。

分布式电源由于其本身的机组类型及所采用的一次能源的多样化, 如何确定其给配电网可靠性带来的何种影响, 是电力公司及用户关心的问题。研究分析分布式电源的接入对配电网可靠性的影响具有十分重要的意义。

目前, 定量分析含分布式电源的配电网可靠性方面的研究较少。文献[3]建立了分布式电源的状态空间模型, 并采用状态枚举的方法对配电系统进行可靠性评估。文献[4]根据分布式电源自身的特性, 提出了符合实际的可靠性评估模型, 并指出分布式电源特性、负荷特性等因素对可靠性评估影响很大。文献[5]通过网络等效化简, 对风电及光伏发电混合系统的配电网进行序贯的蒙特卡洛模拟, 着重考虑分布式电源模型不同的因素。文献[6]采用

区间数的处理方法, 对参数不确定性进行了分析, 验证了分布式电源可以改善配电网可靠性。

下面针对分布式电源, 建立了含分布式电源的配电网可靠性模型; 结合计及停电用户数的孤岛划分策略, 对传统的最小割集法进行改进, 分析分布式电源的位置以及容量对可靠性指标的影响。

## 1 配电网可靠性评估指标

按照评估对象的不同, 可靠性指标可分为负荷点指标和系统指标。这里将分别选取两类指标中的部分指标进行计算。

负荷点指标: 平均故障率  $\lambda$ 、平均停电持续时间  $r$  以及年平均停电时间  $U$ 。具体计算式<sup>[1, 2]</sup>如下。

$$\lambda_i = \sum_j \lambda_j \quad (1)$$

$$U_i = \sum_j \lambda_j r_j \quad (2)$$

$$r_i = \frac{U_i}{\lambda_i} \quad (3)$$

系统指标: 系统平均停电频率 (SAIFI)、系统平均停电持续时间 (SAIDI)、平均供电可用率 (ASAI)、期望故障受阻电能 (EENS)。具体计算式<sup>[7, 8]</sup>如

下。

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad (4)$$

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} \quad (5)$$

$$ASAI = \frac{\sum 8760 N_i - \sum U_i N_i}{\sum 8760 N_i} \quad (6)$$

$$EENS = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} L_i U_i}{T_{sum}} \quad (7)$$

在上述所有的计算式中:  $L_i$ 、 $U_i$ 、 $c_i$  分别为负荷点  $i$  的负荷量、年停电持续时间、单位电量停电损失;  $T_{sum}$  为统计的周期。

## 2 计及分布式电源的配电网可靠性分析模型

### 2.1 计及停电用户数的孤岛划分模型

孤岛是分布式电源 (distributed generation, DG) 接入配电网出现的一种新的运行方式。孤岛的出现可以减小停电面积, 提高系统的供电可靠性。电力公司对可靠性进行评价时, 往往是以用户平均停电时间、用户平均停电次数以及供电可用率等指标来进行参考。可见, 用户的数量对可靠性评估有较大的影响, 但部分重要负荷点的用户数可能较少。现有的孤岛划分模型仅从负荷重要性出发, 不考虑节点的用户数量, 可能使整个配电网系统的可靠性不能达到最优。所以, 提出一种计及停电用户数的孤岛划分模型, 综合考虑负荷重要程度和孤岛的用户数量, 从而使配电系统的可靠性尽可能高。孤岛划分模型如下。

$$\begin{cases} \max \sum_{i \in D} \lambda(i) L_a(i) \\ \max \sum_{i \in D} N_i \end{cases} \quad (8)$$

$$s. t. \begin{cases} \sum_{i \in D} L_a(i) \leq P_{DG} \\ \text{区域 } D \text{ 连通} \\ j \in D \end{cases} \quad (9)$$

式中  $L_a(i)$  为负荷点  $i$  的负荷;  $P_{DG}$  为 DG 的额定容量;  $N_i$  为负荷点的用户数;  $D$  为孤岛内所有负荷点  $L_a(i)$  组成的区域;  $j$  为 DG 所在馈线编号;  $\lambda(i)$  为负荷重要度系数, 一类、二类、三类负荷重要度系数分别为 0.5、0.3、0.2。

### 2.2 孤岛求解方法

由 2.1 节所建立的孤岛划分模型可知, 其实是

一个多目标的问题。这里采用多目标加权组合的方法对上述模型进行求解。具体模型如下。

$$\max \sum_{i \in D} (w_1 \lambda(i) L_a(i) + w_2 N_i) \quad (10)$$

$$s. t. \begin{cases} \sum_{i \in D} L_a(i) \leq P_{DG} \\ \text{区域 } D \text{ 连通} \\ j \in D \end{cases} \quad (11)$$

多目标模型转换为单目标模型后, 在满足条件约束的情况下, 对单目标模型采用深度优先的搜索来求解。

在求解过程中, 根据重要负荷及负荷点用户数的重要程度,  $w_1$  取 0.7,  $w_2$  取 0.3。

### 2.3 计及分布式电源配电网的可靠性评估方法

文献 [9] 采用了最小割集法对配电网的可靠性进行评估。拟采用改进的最小割集法对可靠性指标进行计算。在最小割集法中, 所有导致负荷点故障的最小割集被列举出来, 然后再根据每个割集中元件的逻辑关系和失效概率对可靠性指标进行计算。这里对最小割集法进行改进, 使之适合于含分布式电源的配电网可靠性分析评估。

改进原则如下: 在求取各个负荷点的故障割集之后, 把分布式电源作为系统的备用电源, 依照孤岛划分策略, 求出各负荷点备用供电途径以及相应的备用割集。若故障割集发生且与备用割集为同一元件或者集合, 那么负荷点的停电持续时间为故障修复时间; 若故障割集发生且与备用割集为不同元件或者集合, 那么负荷点的停电时间为开关操作时间。

除此之外, 在孤岛范围内, 一般认为只有 DG 和主馈线同时出现才会导致负荷点故障, 此时孤岛内元件故障率按 DG 与馈线的二阶故障进行折算, 得到的负荷点  $i$  的故障率和年平均停电时间计算公式如下。

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^{ND} \lambda_{Dj} \lambda_{Sj} (r_{Dj} + r_{Sj}) \quad (12)$$

$$U_i = \sum_{k=1}^{ND} \lambda_{Dk} \lambda_{Sk} r_{Dk} r_{Sk} \quad (13)$$

对于每个负荷点, 不管 DG 存在与否, 与其相连的馈线段上的故障也会使该负荷点停电, 因此这种情况应作为一个最小割集加入到上面两式中。另外, 对于处在 DG 两侧的负荷点的可靠性也是不同的, 所以, 得到以下结论。

$$\lambda_i = \begin{cases} \sum_{k=1}^{ND} \lambda_{Dk} \lambda_{Sk} (r_{Dk} + r_{Sk}) + \lambda_{Sj} & \text{DG 上游侧负荷点} \\ \sum_{k=1}^{ND} \lambda_{Dk} \lambda_{Sk} (r_{Dk} + r_{Sk}) + \lambda_{Sj} + \sum_{j=1}^{NU} \lambda_{Sj} & \text{DG 下游侧负荷点} \end{cases} \quad (14)$$

$$U_i = \begin{cases} \sum_{k=1}^{ND} \lambda_{Dk} \lambda_{sk} r_{Dk} r_{sk} + U_{sk} & \text{DG 上游侧负荷点} \\ \sum_{k=1}^{ND} \lambda_{Dk} \lambda_{sk} r_{Dk} r_{sk} + U_{sk} + \sum_{j=1}^{NU} U_{sj} & \text{DG 下游侧负荷点} \end{cases} \quad (15)$$

$$r_i = \frac{U_i}{\lambda_i} \quad (16)$$

在式(12)~(16)中,  $\lambda_D$ 、 $r_D$ 、 $r_{sk}$ 、 $\lambda_{sk}$  分别是 DG 的平均故障率、DG 的故障平均修复时间、第  $k$  段馈线的故障率和故障平均修复时间;  $ND$ 、 $NU$  分别是在 DG 和负荷点之前的馈线段数量、在 DG 和负荷点的馈线段数量。

应用上述求得的负荷点等值故障率和故障停电持续时间, 进而可以求得其他的可靠性指标。

### 3 算例分析

#### 3.1 算例

选取如图2所示的IEEE RBTS BUS6系统<sup>[10]</sup>进行分析。该系统一共含有30条线路、23条负荷点、23个熔断器(装设在每条负荷支路首端,图中未标出)、21个隔离开关、4个断路器。馈电线路、负荷和其他设备的原始数据参考文献[11]。设断路器与熔断器均100%可靠动作。隔离开关的操作时间为0.5h。设接入DG的故障率均为4次/a, 平均修复时间为50h; 所有变压器均未设置备用。

为了全面分析分布式电源对配电系统可靠性的影响, 这里对如下4种不同的情况下配电系统可靠性进行分析。

方案1: 系统中不含任何DG。

方案2: 系统中在分支线20和分支线29处分别接入容量为1MW和1MW的DG。

方案3: 系统中在分支线20和分支线29处分别接入容量为0.5MW和0.5MW的DG。

方案4: 把方案2系统中接在分支线29处的DG改接在分支线26处, 电源容量不变。

#### 3.2 结果分析

所计算的配电网可靠性指标主要有: 负荷点平均故障率、负荷点平均停电持续时间、负荷点年平均停电持续时间、系统平均停电频率、系统平均停电持续时间以及系统平均供电可用率指标等。采用改进的最小割集的方法, 针对上述介绍的模型, 对算例进行计算。计算结果如表1~表5所示。

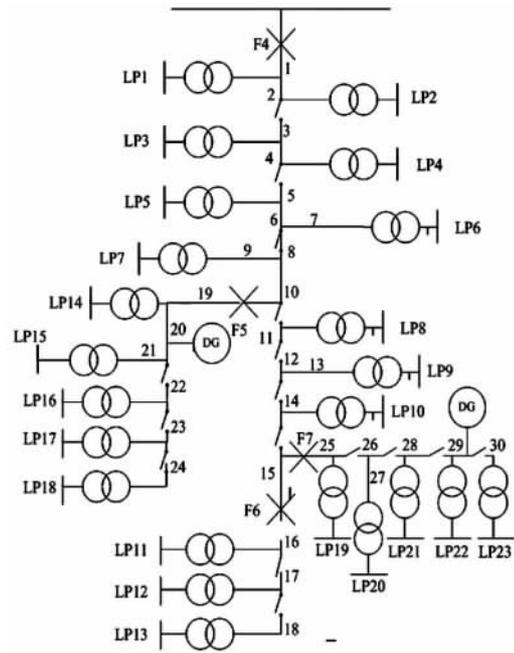


图2 含DG的RBTS Bus6配电网接线图

表1 方案1部分负荷点可靠性指标计算结果

负荷点	$\lambda/(次 \cdot a^{-1})$	$r/(h/次)$	$U/(h \cdot a^{-1})$
LP1	1.290	1.222 9	1.577 5
LP11	1.715	3.645 8	6.252 5
LP14	1.955	2.301 8	4.500 0
LP20	1.973	3.523 4	6.950 0
LP23	1.935	4.201 6	8.130 0

表2 方案2部分负荷点可靠性指标计算结果

负荷点	$\lambda/(次 \cdot a^{-1})$	$r/(h/次)$	$U/(h \cdot a^{-1})$
LP1	1.290	1.222 9	1.577 5
LP11	1.715	3.645 8	6.252 5
LP14	1.977	1.043 0	2.062 2
LP20	2.016	1.313 9	2.649 0
LP23	1.990	1.945 2	3.870 7

表3 方案3部分负荷点可靠性指标计算结果

负荷点	$\lambda/(次 \cdot a^{-1})$	$r/(h/次)$	$U/(h \cdot a^{-1})$
LP1	1.290	1.222 9	1.577 5
LP11	1.715	3.645 8	6.252 5
LP14	1.977	2.317 5	4.582 2
LP20	2.007	3.526 6	7.079 2
LP23	1.979	2.386 5	4.722 6

表4 方案4部分负荷点可靠性指标计算结果

负荷点	$\lambda/(次 \cdot a^{-1})$	$r/(h/次)$	$U/(h \cdot a^{-1})$
LP1	1.290	1.222 9	1.577 5
LP11	1.715	3.645 8	6.252 5
LP14	1.977	1.043 0	2.062 2
LP20	2.300	1.121 4	2.579 2
LP23	1.965	2.310 0	4.5392

表5 系统可靠性指标计算结果

	SAIFI	SAIDI	ASAI	EENS
方案1	1.524 9	4.201 5	0.999 50	22.976 8
方案2	1.534 2	3.307 8	0.999 62	17.8062
方案3	1.533 1	3.830 4	0.999 56	19.394 1
方案4	1.533 3	3.330 3	0.999 62	16.556 0

1) 对比方案1和方案2,由于增加了分布式电源,可以从表中看出,与分布式电源相近的负荷点的故障率略有增加,这是由于计及了分布式故障的影响。但是平均停电持续时间、年平均停电持续时间等负荷点的可靠性指标得到了提高;对比方案1与方案2的系统可靠性指标,可以看出虽然SAIFI有所增加,但是SAIDI、ASAI以及EENS等指标都得到了一定程度的改善,说明了分布式电源能提高配电网可靠性。

2) 对比方案3与方案2,可以看出在电源容量不同的情况下,方案2中负荷点和系统的各项可靠性指标均优于方案3的结果,说明分布式电源容量的不同对配电网的可靠性会产生影响且容量越大影响也越大。

3) 对比方案4与方案3,从表中可看出部分负荷点的可靠性指标均发生了改变。这说明,负荷点的可靠性与分布式电源接入配电网的位置有着密切关系,不同的接入点对配电网可靠性的影响不同。

## 4 结 论

建立了计及分布式电源的配电网可靠性模型,结合计及停电用户数的孤岛划分模型,并采用改进的最小割集法对算例进行了计算。结果说明分布式电源的接入对配电网可靠性影响很大,分布式电源

的容量的不同,接入位置的不同对其影响也不同,应当综合考虑各种因素,合理利用分布式电源来提高配电网的可靠性水平。

## 参考文献

- [1] 韦钢,吴伟力,胡丹云,等. 分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 36-40.
- [2] 郭永基. 电力系统可靠性[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [3] FOTUHI - FIRUZABAD M, RAJABI - GHANAVIE A. An Analytical method to Consider DG Impacts on Distribution System Reliability [C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific. Dalian, China: IEEE/PES, 2005: 1-6.
- [4] ANDRADE WS, BORGES CLT, FALCAO DM. Modeling Reliability Aspects of Distributed Generation Connected to Distribution Systems [C]//Power Engineering Society General Meeting. Montreal Que, Canada [s. n.], 2006: 6.
- [5] 王旭东, 林济铿. 基于网络化简的含分布式电源的配电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 38-43.
- [6] 钱科军, 袁越. 分布式发电对配电网可靠性的影响研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 74-78.
- [7] Ghajar R, Billinton R. Economic Costs of Power Interruptions: A Consistent Model And Methodology [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2006, 28(1): 29-35.
- [8] Charles W. R., Richard D. C., Vito J. L. Distribution System Reliability Assessment Due to Lightning Storms [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2153-2159.
- [9] 贺先强, 丁坚勇, 陈丹. 计及分布式发电影响的配电网可靠性评估[J]. 电气应用, 2008, 27(3): 60-64.
- [10] BILLINTON R, JOHNNAVITHULA S. A Test System for Teaching Overall Power System Reliability Assessment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.
- [11] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A Reliability test System for Educational Purpose: Basic Distribution System data and Results [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2): 813-820.

(收稿日期: 2012-05-15)

# 电网黑启动方案关键问题探讨

张莉,王晋,卢政尧

(成都电业局,四川成都 610021)

**摘要:** 作为四川电网的负荷中心,多种因素致使成都电网面临大面积停电事故的风险。制定切实可行的黑启动方案能保证严重停电事故后恢复控制的有效性。从电源恢复、路径寻优、负荷接入、安全校核、继电保护和方案评估等角度出发,就方案编制中存在的问题进行了针对性分析并提出相应改进建议。为使方案的制定方式由离线决策转变至在线实时决策,提出开发黑启动辅助决策系统将有利于调度运行部门正确处置大停电事故。在此基础上,探讨了黑启动辅助决策系统的体系架构和功能构成。

**关键词:** 黑启动; 电网恢复; 安全校核; 方案评估; 辅助决策系统

**Abstract:** As the load center of Sichuan power grid, several factors will cause Chengdu power grid to face the risk of large-scale service interruption. Drawing up the feasible black-start schemes can guarantee the effectiveness of restoration control after the severe service interruption. As viewed from the power source restoration, path optimization, load connection, safety check, relay protection and scheme assessment etc, the pertinent analysis has been carried out and the relevant improvement suggestions towards the problems of scheme compilation are proposed. In order to make the scheme compiling mode convert from off-line decision making to on-line real-time decision making, it is put forward that developing a black-start assistant decision-making system will benefit the dispatching and operation departments to handle the service interruption correctly. On this basis, the architecture and functions of black-start assistant decision-making system is discussed.

**Key words:** black start; power grid restoration; safety check; scheme assessment; assistant decision-making system

中图分类号: TM73 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0025-06

## 0 引言

在电力系统发生大面积停电事故后,切实有效的应急方案能够最大程度地降低大停电造成的损失,对于确保社会秩序稳定和经济正常运行具有十分重要的现实意义<sup>[1]</sup>。“黑启动”是电网大面积停电事故应急体系中最为关键的环节之一<sup>[2]</sup>。以成都电网为背景,从电源恢复、路径寻优、负荷接入、安全校核、继电保护和方案评估等角度<sup>[3-9]</sup>出发,就方案编制中存在的问题进行了针对性分析并提出相应改进建议。

近年来,成都电网负荷密度不断增加,短路电流水平逐年增长。随着部分500 kV变电站及其配套工程的投运,网内多个220 kV站短路电流已超过开关遮断容量。个别500 kV站主变压器跳闸将引发局部220 kV网络中各站母线电压跌落达20 kV以上,若无法保证110 kV及以下电网无功平衡,电压

跌落将更为严重,可能造成局部电网电压崩溃。在高峰负荷时段,网内许多主变压器容载比很低,重载及过载线路较多,系统稳定储备不足。综上所述,多种因素使成都电网存在因重要单一元件故障引发连锁性故障从而导致系统发生大面积停电事故的可能性。

针对预先编制的《电网黑启动方案》所存在的各种问题,阐述了黑启动方案的制定方式由离线决策逐步转变至在线实时决策的必要性,以适应电网大停电发生后有效辅助电网调度运行部门作出相应动态决策的需要,并提出了开发黑启动辅助决策系统对于提高调度运行部门应对大面积停电灾难的能力将具有重要现实意义。在此基础上,探讨了黑启动辅助决策系统的体系架构和功能构成等主要内容。

通过探讨当前黑启动方案编制中的一些关键问题,以期为进一步做好电网黑启动工作提供一种新思路。

# 1 电源恢复

## 1.1 黑启动电源的选择

为获得较满意的恢复效果,选择黑启动电源时应综合考虑下列因素:①选择调节性能好、启动速度快和具备进相运行能力的机组;②优先选择直调电厂作为启动电源;③尽量选择接入较高电压等级的电厂;④有利于快速恢复其他电源的电厂;⑤距离负荷中心较近的电厂。

图1至图3为成都电网各子网拓扑图。在子网1,黑启动电源为紫坪铺水电厂,现役装机规模为 $4 \times 190$  MW,调节库容大,可作系统主调频电源,对保证恢复过程中的频率稳定可发挥积极作用;在子网2,黑启动电源为雨城水电厂,现役装机规模为 $3 \times 20$  MW,由于机组装机容量较小,故应尽快创造条件与相邻子系统并网运行;在子网3,黑启动电源为冷竹关和小关子水电厂,现役装机规模合计340 MW,调节库容较大,完成自启动后可通过临兴线向隆兴站并网电源硃碛提供启动电能。

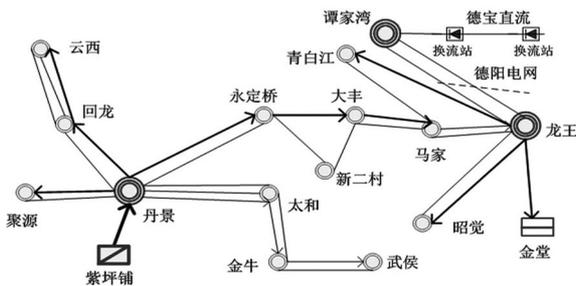


图1 子网1恢复路径

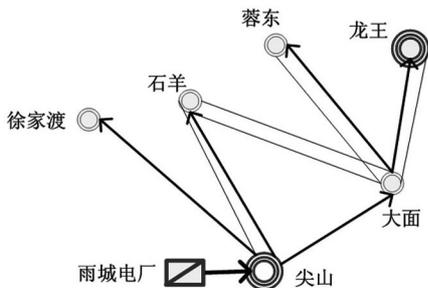


图2 子网2恢复路径

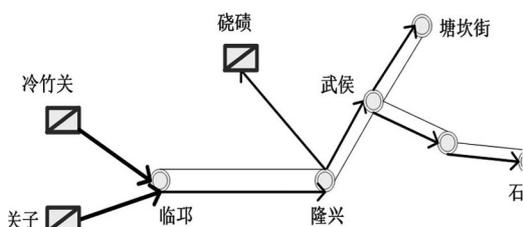


图3 子网3恢复路径

## 1.2 电源恢复策略

成都电网周边丰富的水电资源为系统黑启动带来了极大的便利,但同时应注意不能完全依赖大型水电恢复系统。除严格遵循依靠黑启动电源尽快启动周边无自启动能力机组的原则之外,考虑到网内由高电压等级恢复至低电压等级耗时较长并延误部分重要负荷恢复的现实情况,可选择外部电源担任系统黑启动电源并依靠小容量电源恢复低电压等级网络,以完善电源恢复策略。

外部电源包括省网内部与成都电网相邻的正常运行子系统和外电入川通道。相邻子系统向成都电网提供启动电能,能有效解决自启动电源与待启动电源间电气距离较远(如子网1)和电源发电容量有限(如子网2)的问题,将加快相关子系统的恢复速度。外电入川通道传输功率较大,如德宝直流,通过谭家湾站经由两条500 kV线路即可恢复龙王站,无不同电压等级间的变换,进而可向金堂电厂提供启动电能,恢复其1200 MW的发电能力,由此缩短电网的恢复时间。然而,如图1所示,若以紫坪铺水电站向金堂火电厂提供启动电能需恢复5座变电站,在220 kV和500 kV电压等级间变换两次。经综合比较,借助外部电源能够获得最佳的恢复效果。

同时,为获得最佳的恢复效果,黑启动电源启动各子系统的同时也应充分挖掘网内并入低电压等级电网小电源的发电能力。具备自启动能力的小电源启动后立即向周边重要负荷供电;不具备自启动能力的小电源应配备柴油发电机,或在恢复高电压等级节点和线路时,侧重为启动网内小电源创造条件。

成都西北部电网内的110 kV变电站有数量可观的小型水力发电厂并网,单机容量小、启动时间短,带低负荷运行时稳定性较好,配备小容量柴油发电机即可作为机组启动电源。为此,在相关220 kV变电站得到恢复后,进一步向下延伸启动并网小电源,可加快局部110 kV供电网络的恢复速度,对恢复该局部的重要负荷比较有利。

# 2 电网黑启动路径

## 2.1 最优路径搜索

目前,调度员主要依据电网运行经验建立恢复路径,尚缺乏足够的理论支撑辅助其作出科学决策。黑启动最优路径搜索应重视两个大方面的结合:将

调度运行经验、理论方法和电网分析计算相结合;将路径搜索算法中的单步最优与全局最优相结合。

调度运行经验在最优路径搜索中的作用举足轻重。然而,完全依靠其建立的恢复路径虽然可行,但并不一定最优。为此,需要引入符合电力系统运行实际的理论方法。基于安全校核和保护动作值整定等电网分析计算结果,修正运用理论方法得到的恢复路径。例如,对于投入高抗或控制合闸前节点运行电压均无法将操作过电压倍数降低到规定范围内的路径,应将其从候选路径中予以排除。

为获得单步和全局恢复的最优性,便对黑启动最优路径搜索模型提出了更高的要求。单步最优保证每一次恢复控制可获得相对最好的效果,其包括两项关键环节:为发电厂、变电站和输电线路等电网元件赋予权重值,准确表征各元件在恢复过程中的重要性;以某已恢复节点作为起始点,运用恰当的路径辨识方法在候选的未恢复节点中选择下一步应恢复的节点。全局最优要求在满足各项约束条件的前提下达到预先设定的恢复目标。首先,将电网黑启动过程划分为若干恢复阶段。然后,为各阶段设定相应的目标函数和约束条件集,以满足不同阶段的恢复需求。最后,求解最优路径搜索模型。

### 2.2 试送失败和无法试送

在实际恢复过程中,可能因电力设备故障或其他意外导致试送失败。水电厂水位不符合要求和变电站直流电源耗尽将导致设备不具备投运条件。由设备故障或不具备投运条件导致预定恢复控制无法实施的问题,应从恢复路径实时选择的角度加以解决。较理想的方式是根据系统实时工况和运行参数计算得出恢复路径,即要求黑启动方案的制定和生成需从离线决策转变至在线实时决策。采用在线实时决策方式后,可待本次恢复控制成功及相关运行参数明确后,再给出下一步恢复路径,从而保证恢复控制的实效性。

### 2.3 负荷接入方案

除电源和电网的恢复之外,地调应重视制定一套具有较高可执行性的负荷接入方案,以满足不同恢复阶段和系统不同运行状态对负荷接入的刚性要求。为此,应详细列出拟恢复重要负荷的优先顺序及相应数量。

预先确定各类重要负荷的恢复优先顺序,有助于理清其相对重要性。针对预先设定的黑启动路

径,确定拟恢复的 110 kV 变电站,编制详细的负荷接入方案,具体内容如下:各站所带重要负荷、接入重要负荷的线路名称和负荷量。重要负荷安排原则应优先保证各级电力调度机构、通信部门、党政军机关、重点厂矿企业的保安负荷等的供电;应避免恢复电铁、电弧炉等冲击负荷。

明确各重要负荷的数量,以保证恢复重要负荷的同时确保系统安全运行。能够在符合电源恢复和网架结构等系统实际恢复情况的前提下较准确地接入符合约束条件的负荷。在系统黑启动期间,由于电源出力限制和网架结构薄弱等原因,应严格控制负荷接入量。根据电网运行实际并参照已有经验,原则上对单次接入负荷量和接入负荷总量分别占已恢复发电容量的比重进行限制,即可确保负荷接入不会对电网运行产生过大扰动且系统具备足够的发电裕度以满足后续恢复的需要。应充分考虑不同类型负荷的实际特性,通过数字仿真就其投入时对系统产生的影响进行计算和分析评估。

恢复过程中系统接入负荷时主要考虑如下约束条件。

$$\sum_{i=1}^n (P_{Gi}^{\max} - P_{Gi}) \geq \xi P_{sum-load}^{rt} \quad (1)$$

$$P_{load} \leq \eta \sum_{i=1}^n P_{Gi}^{\max} \quad (2)$$

式中  $P_{Gi}$  和  $P_{Gi}^{\max}$  分别为发电机组  $i$  的实时有功出力及其额定功率;  $P_{sum-load}^{rt}$  为系统的实时总负荷;  $P_{load}$  为单次接入的负荷数量;  $\xi$  和  $\eta$  分别为系统旋转备用率和单次接入负荷占系统额定发电出力的比例,视系统恢复情况取值。

## 3 方案的安全校核

目前,黑启动方案的安全校核主要针对电网恢复过程中的频率稳定、电压稳定、操作过电压和机组自励磁等问题,具体包括机组并网、空载线路合闸和负荷接入等恢复控制,尚未涉及不同子系统间的同期并网过程。与上述恢复控制不同,子系统间的并网过程将使潮流在全网内重新分布,可能造成部分节点母线电压越限、输电线路重载甚至过载,其潜在威胁不亚于单个电力设备的投入对系统产生的影响。若相邻的两个子系统在强弱程度上存在差异,并网过程产生的影响对强、弱系统而言,分别等同于小扰动和较大的冲击。在电力系统黑启动过程中,

表 1 子网 2 继电保护整定计算结果表

线路名 / 故障名	突变量启动电流 / A	零序启动电流 / A	两相短路相电流 / A	单相短路零序电流 / A	说明
雨城 - 尖山 / 尖侧 (单机)	250	120	21 521	13 210 8 200	尖山接入 尖山未接入
尖山 - 大面 / 大侧	240	120	20 701	7 448 5 213	大面接入 大面未接入
尖山 - 石羊 II 线 / 石侧	240	120	21 736	10 000 6 600	石羊接入 石羊未接入
尖山 - 徐家渡 / 徐侧	250	120	15 200	4 482 2 689	徐家渡接入 徐家渡未接入
大面 - 龙王东线 / 龙侧	240	120	24 984	11 106 7 128	龙王接入 龙王未接入
大面 - 蓉东北线 / 蓉侧	240	120	15 982	4 744 3 225	蓉东接入 蓉东未接入

由于电源结构不完善,网架结构薄弱,存在部分较弱的子系统,且安全自动装置的退运进一步降低了此类子系统抵御干扰的能力。因此,在已有安全校核工作的基础上,有必要运用数字仿真手段就子网间的同期并网过程对系统产生的影响进行计算和分析评估。为使数字仿真符合电力系统运行实际,需在仿真环境中应用自定义模块设计同期并网断路器的控制逻辑。

在仿真过程中,主要校核并网前后已恢复节点母线电压的提升或跌落程度是否在电压波动允许范围内,以及关键线路是否出现重载或过载的情况。校核结果将为采取诸如合理选择并网点、调整负荷接入方案以及控制并网前节点的运行电压等应对措施提供决策依据。

#### 4 继电保护配合计算分析

对黑启动方案进行正确完善的继电保护整定计算,将切实保证恢复过程中的系统安全。依照以下原则进行计算:针对各子系统分别进行整定计算;为简化计算,只考虑启动过程中新投运线路末端发生故障的情况,故障类型主要考虑发生概率最大的单相短路和短路电流水平最小的两相短路;计算时考虑线路末端变电站接入和未接入两种情况。

黑启动过程中继电保护装置的运行应满足下列要求:根据整定值,短路电流均可满足保护装置启动电流的要求;相间故障时,依靠距离保护保证灵敏度;接地故障时依靠接地距离保护、零序 II 段保证灵敏度,经较大过渡电阻的接地故障时,则依靠零序

保护末段动作切除故障;线路两端所有保护(包括纵联保护)正常投入。

以子网 2 为例,相应的继电保护整定计算结果如表 1 所示。

计算说明“突变量启动电流”和“零序启动电流”为线路保护装置启动所需最小突变量电流和零序电流;短路电流已归算至实际电压等级。

#### 5 方案评价

对黑启动方案进行评价的目的是在若干可行方案中选出最优实施方案,并找到影响方案评价值的敏感因素,为调度员修正方案内容和改进方案的制定方法提供理论依据。黑启动方案评价是在确定的评价指标体系下运用数学方法对方案有效性进行分析的过程。影响评价结果的两项关键因素为评价指标体系和数学分析方法。

建立评价指标体系时,首先要建立明确的评价准则;其后,要针对每一项评价准则分析指标中应包含的因素,确定相应的实用指标,准则和指标间可以是多对多的关系;最后,若指标间存在重叠,则考虑将重叠的指标进行合并或删除其一。此外,在设计具体的指标时,还应遵循各项指标均可获取的原则,不选用无法通过预先计算求取的评价指标,以免造成方案评价结果的可信性降低。

在运用数学分析方法进行计算时,应注重将主观分析方法和客观分析方法相结合,充分利用两者的优势,并有效融合依据不同准则所设计的指标,以获得最佳的评价效果。同时,应明确方案评价属于

综合评价技术的范畴,最终目标是建立如式(3)所示的综合评价函数,以求得方案的综合价值。通过灵敏度分析得到对各套方案评价具有最大影响的关键指标。

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i \quad (3)$$

式中  $x_i$  和  $\lambda_i$  分别为第  $i$  项指标计算值及其权重值。

## 6 黑启动辅助决策系统

目前,《电网黑启动实施方案》由调度员在《电网黑启动方案大纲》的基础上,根据电网年度运行方式修编制定,工作量较大。在方案编制过程中,往往依经验确定恢复路径,缺乏理论依据。同时,尚未对所制定方案进行有效性评价。最大的问题是,针对预设系统运行方式而编制的《黑启动方案大纲》在运行方式变化后针对性和有效性均不足,因而缺乏实际的指导意义。然而,从电网调度运行的角度出发,能够辅助调度员对电网故障后的恢复控制提供决策支持的手段非常重要。因此,有必要开发一套适应电网大停电事故后恢复控制需求的黑启动辅助决策系统(以下简称“决策系统”),使《黑启动方案大纲》随系统结构和运行方式变化而作出相应更新,由此提高电网调度运行部门应对大面积停电灾难的能力,保证大停电发生后制定的恢复控制措施切合实际。

决策系统应兼顾离线分析和在线决策的需要。

①离线分析:用于对黑启动方案进行研究,也可作为培训调度员制定黑启动方案的平台。主要功能包括:可人工设定大面积停电后的系统状态;自行设定电源开机情况,建立恢复路径,形成恢复方案;能完成安全校核、继电保护配合整定计算和方案评价。  
②在线决策:用于电力系统崩溃实际发生后黑启动方案的在线制定与生成;基于 SCADA 实时采集到的数据,分析电网拓扑和实际运行工况,判定停电区域,计算并生成相应的恢复控制方案,显示单步恢复过程,当相应恢复控制完成后,给出下一步应执行的操作。为实现离线分析和在线决策并作为各功能模块的支撑,后台数据库应分为非实时库和实时库。总体上,数据库负责存储实现各模块内部算法所需的电网元件基本参数和系统运行参数。实时库应与 SCADA 数据库通信,并具备较高的可维护性。为保证各功能模块的运算速度并提高决策系统的运行效率,需设计合理的数据库结构。

为制定出完善可行的黑启动方案,决策系统应包括以下基本功能:电网拓扑分析、电源恢复方案、恢复路径搜索、负荷接入方案、潮流计算、恢复控制安全校核、方案有效性评价、继电保护配合整定计算和最优方案显示等。决策系统的功能流程如图 4 所示。

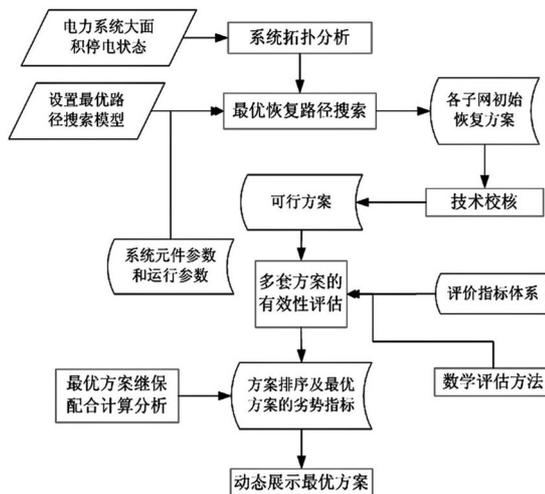


图 4 黑启动辅助决策系统功能流程图

①根据电力系统实时运行状态,通过拓扑分析确定电网大停电区域,保证恢复方案的针对性。②根据大停电后的电源开停情况,分析各停运机组的启动特性,通过算法排定其恢复次序,形成电源恢复方案。③基于电源恢复方案,通过路径寻优算法建立恢复路径。④根据机组、变电站节点和网络的恢复情况,跟踪机组有功出力 and 系统实时总负荷,在约束条件下计算允许的负荷接入量。⑤基于网架结构、电源恢复和负荷接入等情况,对已恢复电网做潮流计算,为安全校核提供基础参数。⑥运用工程实用判据进行自励磁校核,按电源点单机启动考虑;针对黑启动电源恢复至首个被启动电源间的路径,分别考虑断路器有、无合闸电阻两种情况,计算合空线沿线最高统计过电压,求出操作过电压倍数,给出末端节点投入高抗和首端运行电压的建议值;对并网过程中敏感节点的母线电压和关键线路的传输功率进行校核;若参数超限,则发出告警信息并显示超限元件及程度。⑦对通过安全校核的可行方案进行有效性评价,得出方案综合价值;分析影响方案评价的关键指标。⑧针对最优方案,完成继电保护整定计算。⑨在电网接线图中直观展示最优方案的执行过程。

## 7 结 语

电网黑启动工作涵盖系统运行的方方面面。黑

启动方案的编制是一项复杂的系统性工作。需统筹考虑多方面问题才能切实保证黑启动方案的有效性。为辅助电网调度运行部门正确处置大面积停电事故、确保恢复控制的实效性,方案的制定方式应由离线决策逐步转变至在线实时决策。开发黑启动辅助决策系统是适应上述需求的途径之一。通过探讨当前黑启动方案编制中的一些关键问题,以期为进一步做好电网黑启动工作提供一种新思路。

### 参考文献

[1] 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. [http://www.gov.cn/yjgl/2006-01/24/content\\_168998.htm](http://www.gov.cn/yjgl/2006-01/24/content_168998.htm).

[2] 赵炜炜, 张建华, 尚敬福, 等. 电网大面积停电应急评价指标体系及其应用. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 27-30.

[3] 周云海, 唐立春, 胡翔勇. 黑启动的定性推理模型[J]. 中国电力, 2008, 41(11): 10-13.

[4] 袁川, 刘俊勇, 张国松, 等. 东西关电厂作为南充遂宁

电网黑启动电源点的可行性分析[J]. 四川电力技术, 2012, 35(1): 48-53.

[5] 林振智, 文福拴. 基于加权复杂网络模型的恢复路径优化方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 11-15.

[6] 杨可, 刘俊勇, 贺星棋, 等. 黑启动中考虑动态过程的负荷最优恢复[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 88-92.

[7] 刘连志, 赵灿, 韩振明. 黑启动过程中操作过电压分析[J]. 四川电力技术, 2009, 32(3): 28-31.

[8] 刘映尚, 张碧华, 周云海, 等. 黑启动过程中继电保护和自动装置的特性和运行[J]. 中国电力, 2005, 38(5): 25-28.

[9] 刘艳, 顾雪平. 评估黑启动方案的层次化数据包络分析方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 33-38.

### 作者简介:

张莉(1962), 女, 工程师, 从事电网运行管理和负荷预测工作;

王晋(1978), 女, 工程师, 从事电力系统继电保护工作;

卢政尧(1957), 男, 高级工程师, 从事电网调度运行管理工作。  
(收稿日期: 2012-05-22)

(上接第9页)

[6] 吴俊玲, 周双喜, 孙建锋, 等. 并网风力发电场的最大注入功率分析[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 28-32.

[7] Chai Chompoo-inwai, Wei-Jen Lee, Fuangfoo P, et al. System Impact Study for the Interconnection of Wind Generation and Utility System [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(1): 163-168.

[8] HA L T, SAHA T K. Investigation of power loss and voltage stability limits for large wind farm connections to a subtransmission network [C]. Power Engineering Society General Meeting, IEEE, Vol 2, Jun 6-10, 2004, Denver, USA, 2004: 2251-2256.

[9] SMITH J, BROOKS D. Voltage impacts of distributed wind generation on rural distribution feeders [C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES, Vol 1, Oct 28-Nov 2, 2001, Atlanta, USA, 2001(1): 492-497.

[10] Le Thu Ha, Tapan Kumar Saha. Investigation of power loss and voltage stability limits for large wind farm connections to a subtransmission network [J]. IEEE, 2007.

[11] Magnip P. Large-scale wind power integration and voltage stability limits in regional networks [C]. IEEE power engineering society summer meeting 2002.

[12] 于德龙, 赵海翔, 曹娜. 风电场接入地区电网的电压

问题分析[J]. 中国电力, 2006, 39(6): 10-14.

[13] 张红光, 张粒子. 风电场接入电网的安全稳定分析[J]. 中国电力, 2007, 40(5): 105-109.

[14] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 陈默子, 戴慧珠. 风电接入对电力系统影响的研究[J]. 电网技术, 2006, 48(5): 38-44.

[15] 杨国良, 李惠光. 垂直轴永磁同步风力发电系统建模及瞬时功率控制策略[J]. 电力自动化设备, 29(5), 39-42.

[16] 林莉, 孙才新, 王永平, 等. 大容量风电场接入后电网电压稳定性的计算分析与控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 41-46.

### 作者简介:

赵海岭(1984), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为风力发电及并网技术、微机继电保护;

王维庆(1959), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事风力发电技术、大规模风电并网及微机继电保护等方面的研究工作;

姚秀萍(1959), 女, 高级工程师, 硕士生导师, 国家电网公司专家, 研究方向为电力系统稳定与控制、新能源并网技术;

常喜强(1977), 男, 高级工程师, 国家电网公司专家, 主要研究方向电力系统稳定与控制、风电等新能源技术。  
(收稿日期: 2012-04-16)

# 浅议美国智能配电网建设及其关键技术

武云霞<sup>1</sup>, 余熙<sup>1</sup>, 田伟<sup>2</sup>

(1. 西南电力设计院系统规划中心, 四川 成都 610021;

2. 伊利诺斯理工大学阿默工程院, 美国 芝加哥 60616)

**摘要:** 目前美国智能配电网建设已进入试点阶段。介绍了美国衡量配电网智能化的技术准则,并结合能源部在伊利诺斯理工大学(Illinois Institute of Technology)进行的智能配电网研究与建设试点,阐明完美电力的技术要点,论述智能配电网研发中需要解决的若干关键技术。

**关键词:** 智能电网; 完美电力; 自愈电网; 需求响应; 分散电源; 分布存储; 微网

**Abstract:** At present, the construction of smart distribution network in U. S. has come to the pilot stage. The technical criteria to determine the smart distribution network in U. S is put forward. Combining with the smart distribution network project being done by Department of Energy (DOE) at Illinois Institute of Technology (IIT) in Chicago, the technology framework of perfect power is clarified, and some key skills that should be solved during the research and development of smart distribution network are discussed.

**Key words:** smart grid; perfect power; self-healing grid; demand respond; distributed generator; distributed storage; micro-grid

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0031-04

## 0 引言

数字经济迅猛发展对电力供应高质量的要求和近年来全世界爆发的多次停电事故所暴露出来的电网运行安全薄弱、用户期望的电价下降和电力市场条件下某些峰荷时段的实时电价水平升高甚至出现价格尖峰(price spike)的现象、人类对于环境友好的期待和燃煤电厂排放对大气造成的严重污染,这些矛盾都表明,传统电力系统已经难以支撑起如此众多的可持续发展要求。另一方面,大量能源新技术的涌现和累积,如分散再生电源及分布存贮设备、先进的配电网自动化设备及通讯技术、终端智能仪表及其信息关口、需求响应(demand respond, DR)、智能电器与楼宇等,使得智能配电网的建设成为可能。但智能配电网不是这些技术的简单展示,而是借用它们实现对传统电网的革命性改造,达到满足可持续发展要求下高度经济、可靠、安全、环保的根本目的,并由此催生了绿领(green collar)产业、智能城市、完美电力(perfect power)等概念,美国现任总统奥巴马也把发展包括配电网在内的智能电网产业

作为国家提高能源利用效率和走出金融危机泥潭的重要手段之一<sup>[1-2]</sup>。

智能配电网是电力系统参与者、电力产品制造商、能源政策制定者、环境与数字技术专家等方方面面工作的成果,在美国,推动其发展的主要法案有 E-PACT05、EISA07等;从政策法规建设、模型设立、系统集成、关键技术研发等不同角度研究智能配电网的联邦、州及私人组织更是不计其数,目前,它们已经提出了若干拥有自主产权与品牌的智能配电网解决方案,如 GridWise、Intelligrid、GridPoint等,其建设也已步入试点阶段,如:使用智能电网技术的地区供电公司有 Bonneville Power Administration、CenterPoint Energy、Pacific Gas and Electric(PG & E)、Southern California Edison、Xcel等;属于 PJM 管辖范围的 EnergyConnect 公司、加州大学商学院、耶鲁大学森林与环境研究大楼、NJ 的 Ferreira 建筑公司总部等采用了智能楼宇技术;New Mexico 州的 Mesa Del Sol 市、Missouri 州的 Kansas 市、Colorado 州的 Boulder 市等正在建设智能城市,这些努力在消减电网高峰负荷和降低用户电价方面取得了明显的成效。

在介绍美国智能配电网建设技术准则的基础

上,结合能源部在伊利诺斯理工大学进行的智能配电网研究与建设试点,阐明完美电力和智能配电网关键技术,为中国智能配电网建设提供参考。

## 1 衡量智能配电网的技术准则

智能配电网的基本特征是自愈、安全、绿色和经济。美国能源部提出从以下几个方面衡量配电网是否达到智能化水平。

(1) 自愈和灾变防御能力。即使在极容易引起电网崩溃的级联故障发生时,配电网监控系统也应自动而快速地完成故障监视、诊断、开关切换、潮流控制、恢复等各项功能<sup>[3]</sup>。其自愈能力可从能够进行实时监控的用户及网络节点数量,重要用户供电可靠性,安装有先进控制、通讯系统的网络覆盖范围,能进行安全极限及裕度分析的网络范围等进行判定。其次,由于在紧急状态下电网可能需要分布式能源提供辅助服务,因此也可用能实施DR、具有分散发电及分布式储能设备的负荷数量作为考察准则。此外,从最终效果上,电力系统遭受故障时的影响范围,如系统平均停电时间、恢复时间及其成本等,都能用于衡量电网的自愈能力。

除上述针对物理系统的准则外,还应考虑电力公司是否具有防灾预案、防黑客系统等在内的柔性运营规则及操作规范,用于预防、感知、应对人为失误、电力市场竞争、信息和通信系统故障、自然灾害、蓄意破坏等来自自然、社会等多种因素的攻击,以实现灾变防御。

(2) 分散电源与分布存储设备的应用水平。用户以“即插即用(plug and play)”方式使用分散的风、太阳能、燃料电池等各种再生电源和清洁能源(如天然气),不仅可以减少污染排放,而且能够采用热电联供(combined heat and power, CHP)技术,使发电废热就近在楼宇中循环使用,有效提高能源效率<sup>[4-6]</sup>。此外,某些再生电源,如太阳能,产生的直流电可以供给大量的家用电器直接使用,相对传统交-直流转换方式,其供电成本将大幅下降。大量的分散电源相互连接并协调控制,形成能源网(energy web),可以把传统集中供电的配电网变成众多的本地化的供电单元。

风、太阳能等分散式再生能源具有间断性和非100%可预测性的特点,需要装设存储设备作为补

充,起到稳定潮流和吸收电力冲击的作用。这些设备通常包括大容量电容器、铅酸电池、锂电池、飞轮、工业用熔硫电池(utility-scale liquid molten sulfur batteries)、可逆流电池(reversible flow batteries)、超导磁能存储单元(superconducting magnetic energy storage units)、压缩空气能量系统(compressed air energy system)等<sup>[7]</sup>。

分散电源与分布存储设备的应用水平可从允许它们自由接入的网络节点数量,能进行实时控制的电源与存储设备数量,由分散电源直接供电的用户数量,存储设备安装容量及利用率等进行判定。其次,从最终效果上,由于它们一般用于在峰时消减负荷,因此可通过考察负荷率指标的提高程度加以衡量。

(3) DR实施程度。用户能够根据电力市场中负荷高峰时段的高实时电价信号和自身电力需求,通过双向式终端智能仪表及其通讯设备,主动消减负荷,或转移它至分散电源,从而降低电网的负荷峰值,这一过程被称为DR<sup>[8-12]</sup>。DR可以降低电力市场中的实时电价水平,给用户带来经济实惠,另一方面,由于设备容量通常是按最大负荷水平设计,因此实施DR可减少电力系统建设成本。

DR是智能配电网的标志性特征之一,通常需要在电力市场零售竞争模式下才能开展。因此,可从配电网发育程度,能通过智能仪表获取市场实时信息的用户数量、有意愿及实际参与DR的用户比例等进行判定。其次,值得注意的是,DR技术除用户主动参与的方式外,还包括智能电器和智能楼宇的使用,前者通过控制系统使自身运行到最佳性能,同时能在高电价时段自动减少用电量,后者通过传感器监视大楼的实时状态,进而控制通风、加热、制冷、照明等系统到最佳效率,也能在高电价时段自动切除楼内负荷。因此,也可用智能电器及楼宇系统的安装数量及其在高峰时段的动作频度作为考察准则。此外,从最终效果上,统计系统能耗下降率,也能用于衡量电网的DR实施程度。

(4) 电力系统运行的优化程度。对于配电网,可从装备自动开关等高级设备的数量及使用量、实施实时状态监控的设备数量、开展电压无功控制的潮流量、分散电源及分布存储设备的容量等进行判定。对于用户,可从智能仪表安装数量、DR实施程度等进行判定。从最终效果上,统计系统发电闲置

量、供电效率及负荷率等总体指标,也能用来衡量电网运行的优化程度。

(5) 电能质量高低。电力公司应当建立适应智能电网需要的新型电能质量指标及其评级制度。在此基础上,可从为提高电能质量而布置的设备数量及其容量,网络中电能质量测量点的数量等进行判定。其次,从最终效果上,统计电网出现电能质量下降事故的数量及其影响范围与程度,也能用来衡量电网电能质量的高低。

(6) 电力新产品和新技术准入的开放程度。智能电网技术方兴未艾,新产品不断涌现,现有电网允许它们自由进入市场的程度,也应是衡量它是否柔性、即具备智能化功能的重要体现。可从电力公司政策环境对准入的支持力度、本地区生产电力智能化产品的规模以上公司数量、智能化产品中获得电网准入许可的数量、用于开发新产品与技术的资金总量等进行判定。

## 2 完美电力的技术要点

目前,美国智能电网的研发工作主要集中在配电侧,其目标是向用户提供可参与、高品质、低成本、低排放的电力产品,这一产品被称为完美电力<sup>[13-15]</sup>。

美国能源部(DOE)现正在芝加哥市伊利诺斯理工大学(IIT)就完美电力的研发和工程建设进行试点,涉及的单位包括本地供电公司 ComEd、产品供应商 S & C Electric 和 Endurant Energy 以及研发机构 Galvin Electricity Initiative。整个工作分为4期5年完成,总耗资上千万美元,目的是建成一个智能化微网,即智能控制系统通过通讯层,协调本地分散电源和分布存储设备,以及 ComEd 电网,共同满足由智能楼宇及 DR 技术进行优化处理的本地电力和热负荷需求(CHP 技术),实现为用户提供完美电力产品的承诺。其技术要点主要有以下几点。

(1) ComEd 下辖的输电网和变电站为 IIT 校园提供冗余的外部电力供应,并确保供电质量。

(2) IIT 校园内的配电网实现自愈。

①网络结构智能化。为此,一是在采用高质量电缆和变压器的基础上实现馈线冗余,二是配电自动化,装备负荷和设备状态实时监控以及自动开关和事故恢复系统,应采用电力电子控制和统一平台的实时

通讯技术,以支持分散而高可靠性的电力系统。

②布置分散电源、分布存储设备及 UPS。在高电价时段,并入本地分散电源来供应负荷,可以少交电费并帮助电网减少运行风险,甚至可以根据实际情况把分散电源的多余电力反送入电网,相当于为所在的 PJM ISO 提供辅助服务,以获取收益。

③建设智能控制系统。系统中的数据流包括每个开关表计所记录的电压、电流、有功、无功、电量、频率、谐波等,天气及楼宇照明状况,发电控制信号,分散电源与分布存储设备容量及输出量,分散电源燃料供应状况等。从这些数据中值得提取的信息包括有功频率曲线、电压无功曲线、电能质量指标、判断电网是处于开合开关时的正常振荡还是事故下的扰动(如是扰动,进一步判断是否按孤岛方式运行,此时由分散电源单独供电)等。系统完成的功能包括数据测量及趋势分析、实时电价分析、DR 控制、监测故障并隔离、将无功及有功尽量调至期望值、紧急备用投入或孤岛运行等。系统基于代理(agent)的方式运行,动作对象包括分散电源、分布存储设备、DR 元件、开关、继电器和电能质量设备等。

(3) IIT 校园内的楼宇实现智能化。智能楼宇不仅包括电力,还含有照明、供水、通风、制热、制冷、防盗、电视/电脑/电话/音像等数字网络系统,对它们的监控将集中在一个统一的信息平台上,既便于使它们都运行在最佳效率区,节约能源,又可实现“即插即用”,有效完成 DR 功能。此外,智能楼宇间还应实现电力互换。

## 3 智能配电网的关键技术

(1) 配电网结构及运行研究。第一,结构方面,首先在分析制约配电网智能化的政策及技术因素基础上,规划配电网走向智能的策略与步骤,其中,需要结合经济、环境、技术等约束,分析系统长期供需状况,目的是确保资金投入和新产品、技术有序进入,并考虑如何构建基于互联网的电子商务式的未来电网;其次,进行分散电源规划研究,包括准入条件(地点、费用)分析,采用含成本、可靠性等多种因素的多目标规划技术进行投资规划及其影响因子分析,含有分散电源的配电网新型潮流、GIS 及可靠性分析,分散电源运行管理、风险及 DR 对运行影响分析等。第二,运行方面,为实现完美电力目标,支持系统应包含自

动仪表测量、用户用电管理、配电网运营优化、设备故障预测、停电管理及恢复、峰荷管理等功能模块。

#### (2) 分散电源、分布存储及 DR 研究。

①DR 市场建设。首先,提出包括智能仪表、智能电器、智能楼宇、分散电源、分布存储、热电联产、市场交易平台、用户管理、用户分析及决策、数据管理、结算及账单管理、争议处理、通讯等各种要素在内的 DR 技术标准;其次,针对不同用户,分别确定参与 DR 的运作模式、容量以及评价体系;最后,应适时建设示范小区。

②分布存储设备设计。首先,需确定它与电网间的接口,包括安装地点、数据流及其控制、管理系统;其次,进行技术与经济性分析,并实施现场测试;最后,需研究存储设备提供辅助服务的能力及其实时性能。值得一提的是,电动汽车近年来得到广泛应用,它一般选择在负荷低谷时段进行快速充电,这类负荷十分分散,且随机性强,如果大量存在,将对电网的控制及电能质量带来新的挑战,同时,它也是一个移动电源,用户可以选择在负荷高峰、实时电价高的时段向电网注入多余电能以获取利润,这对未来市场的运行也必将产生巨大的影响,以上两方面的问题都需要做深入研究。

③智能仪表选择。DR 离不开间断式测量且提供双向信息服务的自动智能仪表及其开放式管理系统,需要定义其通讯网关、系统原型、数据格式与功能模块。此外,众多智能仪表的产品供应商多来自 IT 领域,其更新换代速度快,会带来相互间不兼容、系统更换频繁的问题,需要采取统一模型和标准以及模块化设计生产等措施。

④运行分析。一是能根据电价及天气情况实时预测分散电源的电量输出;二是在市场环境下,进行包括随机潮流及短路电流等在内的稳态分析;三是考虑分散电源运行间断性的经济调度和机组组合;四是包括分散电源、DR 用户、分布存储设备、电力电子元件及其控制系统的暂态时域及频域分析,以确保系统运行的安全可靠;最后,由于分散电源通常由电力电子元件接入电网,因此,需要研究电力电子设备及其通讯系统的可用性及其可能的运行模式。

⑤开发基于分散电源、DR 用户、分布存储设备等元素在内的新型能量管理系统。这需要有崭新的理念、工具和技术保证手段,重点是研究如何利用这些元素建立自愈网络、如何利用远方控制协调这些

分散元素以及如何确保电网电能质量等。

(3) 配电设备优化管理。首先,研究设备实时状态监视及诊断的高级模型、算法与工具;其次,从可靠性、电能质量、网络支撑等方面进行设备管理风险及社会、经济效益分析;再次,大力研究如何应用新型导体及绝缘材料提高线路热极限,如何更好地实现网间互联,如何进一步发挥超导等在控制潮流和预防阻塞方面的作用,如何充分应用可视化系统、安全限制下的最优潮流等分析工具,使配电设备更具使用效率。

(4) 不同类型能源间的相互作用研究。除电力外,还包括天然气、供热、水等其他形式的能源系统,它们相互作用,需要建立互联模型,并进行规划及运行层面上的全局优化,以减少彼此冗余度,进而提高整体效率,达到技术、经济、环境上的最佳状态。

## 4 结 语

智能配电网是智能电网建设的重点领域和难点之一,它所涉及的能源技术极其广泛,目前中国正积极开展智能配电网相关研究和试点建设。通过研究可以得到以下结论。

(1) 配电侧是美国智能电网研究的重点,它的建设需要电力系统参与者:政府、电力企业、用户的共同推进;

(2) 在智能配电网建设技术准则基础上,分散电源、分布式储能和针对新型配电网管理运行优化的能量管理系统是未来智能配电网有待研究的关键技术。

### 参考文献

- [1] Ryan Hledik. How Green is the Smart Grid [J]. Electricity Journal, 2009, 22(3): 29-41.
- [2] Tucker William. Lo, a Smart Grid [J]. National Review, 2009, 61(4): 18-19.
- [3] Khosrow Moslehi, Ranjit Kumar. First Aid for Power Grids [J]. Power Engineer, 2007, 21(5): 24-29.
- [4] Sanya Carley. Distributed Generation: An Empirical Analysis of Primary Motivators [J]. Energy Policy, 2009, 37(5): 1648-1659.
- [5] Yingjun Ruan, Qingrong Liu, Weiguo Zhou, et al. Optimal Option of Distributed Generation Technologies for Various Commercial Buildings [J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1641-1653.

(下转第 67 页)

经过一段时间本体油色谱跟踪,未发现变压器异常,证明处理位置正确,应视为缺陷已消除。

### 1.6 故障现象原因分析

从检查后情况可知,由于雷击放电发生在尾部,且由于引线靠壳过近,几乎碰在大盖上,造成中性点避雷器还未动作时,变压器尾部已发生放电,由于该点运行电压低,放电后绝缘油恢复绝缘强度,无法出现持续放电,造成变压器主绝缘恢复,又因为对引线损坏很小,所以直阻测试无法发现缺陷。

由于发生放电部位在中性点升高座内,其位置高于变压器大盖油箱,放电时在变压器内产生的气体上升至升高座高点,升高座内的油向变压器本体挤压,使变压器内部压力增大,压力经油传到瓦斯继电器,引起动作,从而发生跳闸。又因为放电能量未产生超过升高座容积的气量,所以产生的气体未能到达瓦斯继电器,而是停留在升高座内,这解释了瓦斯继电器无气体的原因。如果在最初分析时能从瓦斯继电器中无气体情况来分析,其判断缺陷位置的准确性将会更高些。

## 2 结 语

从本次故障的判断可以总结一些经验,以便提

供借鉴。

(1) 不论数据合格与否,应结合发现的所有信息从多个方面去分析,若停留在一个单一方面,将很难给出准确判断。

(2) 充分考虑出现的多种信息,就能较准确地判断缺陷位置,提出有针对性的方案,节约检修成本、检修时间,提高检修效率,保障供电。

因此,电力设备缺陷分析,应重视各种信息收集,从多方面联合考虑,这样才能为后期检修工作提供有针对性 and 有效性的方案,从而降低检修成本。

### 参考文献

- [1] GB/T 7252 - 2001, 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].
- [2] 武汉水利电力学院. 过电压及保护[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1977.
- [3] DL/T 911 - 2004 电力变压器绕组变形的频率响应分析法[S].

(收稿日期: 2012 - 06 - 14)

(上接第34页)

- [6] Gozel T, Hocaoglu M. H. An Analytical Method for the Sizing and Siting of Distributed Generators in Radial Systems [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79 (6): 912 - 918.
- [7] Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou. Overview of Current and Future Energy Storage Technologies for Electric Power Applications [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2009, 13 (6): 1513 - 1522.
- [8] Peter Weigand. Smart Grid's Impact on Customer Adoption and Market Participants [J]. Utility Automation & Engineering T&D, 2009, 14(4): 12 - 14.
- [9] Joo Jhi - Young, Ahn Sang - Ho, Yoon Yong Tae. Enhancing Price - responsiveness of End - use Customers' Loads: Dynamically Administered Critical Peak Pricing [J]. European Transactions on Electrical Power, 2009, 19(1): 113 - 126.
- [10] Andrew L. Ott. Wholesale Markets Meet Demand Response [J]. Transmission & Distribution World, 2009, 61(2): 42 - 45.
- [11] Bompard E., Napoli R., Wan Bo. The Effect of the

Programs for Demand Response Incentives in Competitive Electricity Markets [J]. European Transactions on Electrical Power, 2009, 19(1): 127 - 139.

- [12] Peter Maltbaek. One Alternative to New Power Generation infrastructure: Demand Response [J]. Utility Automation & Engineering T&D, 2009, 14(4): 60.
- [13] Kurt Yeager. Striving for Power Perfection [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(6): 28 - 35.
- [14] Robert Galvin, Kurt Yeager, Jay Stuller. Perfect Power: How the Micro - grid Revolution Will Unleash Cleaner, Abundant Energy [M]. McGraw - Hill Companies, Sep. 2008.
- [15] Alexander Flueck and Zuyi Li. Destination: Perfection [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(6): 36 - 47.

作者简介:

武云霞(1981),女,工程师,从事调度自动化工作;  
余 熙(1963),男,教授级高工,西南电力设计院副总工、系统规划中心主任,主要从事电力系统规划工作;  
田 伟(1978),男,博士,目前正在美国伊利诺斯理工大学从事电网调度的博士后工作。

(收稿日期: 2012 - 04 - 18)

# 接有小电源上网的 110 kV 系统故障分析和保护调整方案

周建<sup>1</sup> 彭燕<sup>1</sup> 曾俊<sup>2</sup>

(1. 德阳电业局, 四川 德阳 618000; 2. 华电四川公司宜宾分公司, 四川 宜宾 644600)

**摘要:** 对接有并网小电源的供电系统在主供电源消失后, 电网中各运行设备的继电保护动作逻辑进行详细分析, 提出利用现有保护装置, 改变上网线路保护装置中的低周减载功能, 将其转变为低周解列功能使用, 保证并网小电源迅速可靠地解列, 选择可行的重合闸投入方式, 使终端变电站恢复正常运行的补充保护方案。

**关键词:** 故障动作; 故障分析; 保护方案

**Abstract:** The operation logic of relay protection for the running devices in power grid is analyzed after losing main power supply of distribution system interconnected with small power supply. The supplementary protection program is proposed to change the low-cycle load shedding function of the connected line protection device into the low-cycle disconnection function using the existing protection devices, which could ensure the rapid and reliable disconnection of integrated small power supply. It is also suggested that the feasible reclosing mode can be chosen to make the terminal substation function normally.

**Key words:** fault action; fault analysis; protection scheme

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0035-03

## 0 前言

德阳 110 kV 电网为放射性网络, 其主供电源由本地区的 220 kV 主变压器向本地区的 110 kV 变电站供电。安排 220 kV 变电站一台主变压器 220 kV 侧与 110 kV 侧中性点同时接地, 本地区其余 220 kV 主变压器和 110 kV 主变压器中性点经间隙接地的接地方式运行。

**线路保护配置:** 线路长度在 10 km 以上的 110 kV 线路开关配置三段式相间距离、三段式接地距离、四段式零序电流保护和重合闸; 线路长度在 10 km 以下的 110 kV 线路开关配置光纤纵差保护、三段式相间距离、三段式接地距离、四段式零序电流保护和重合闸。

110 kV 主变压器零序保护设置情况: 正常方式下主变压器中性点直接接地零序电流保护和间隙接地零序保护同时投入运行, 全局 110 kV 主变压器中性点零序保护改造后: 110 kV 主变压器中性点零序电流保护(整定值:  $3I_0 = 200$  A, 2 s 跳主变压器三侧开关)、110 kV 主变压器中性点间隙零序过流、零序过压保护(整定值:  $3I_0 = 80 - 100$  A, I 段 0.2 s 跳小电源上网线路开关; II 段 0.5 s 跳主变压器三侧开关)。

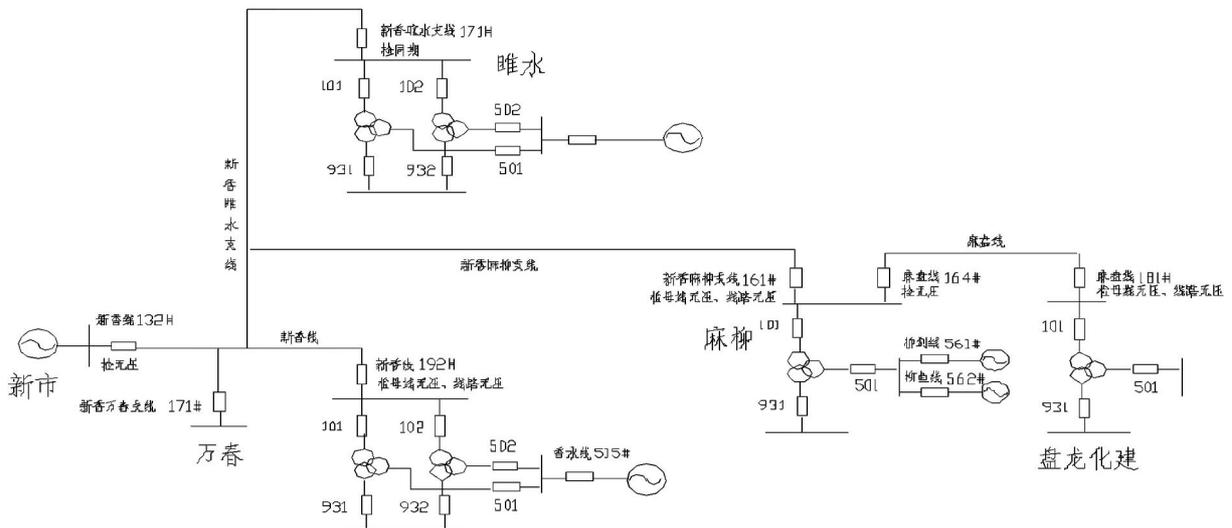
## 1 事故经过

2011 年 9 月 21 日 9:34 新市变电站 110 kV 新香线 132 号开关接地距离 II 段、零序 II 段动作, 110 kV 新香线 132 号开关跳闸, 重合闸动作, 110 kV 新香线 132 号开关重合成功。故障录波装置显示: 线路 B 相接地故障发展为 BC 相接地故障, 测距 32.1 km。

香山变电站 1 号和 2 号主变压器中性点间隙零序过流 I 段动作  $t = 0.2$  s 跳小电源上网线路 35 kV 香水线 515 号开关、主变压器中性点间隙零序过流 II 段动作  $t = 0.5$  s 跳 1 号和 2 号主变压器三侧开关。

盘龙化建变电站 1 号主变压器中性点间隙零序过流动作  $t = 0.5$  s 跳 1 号主变压器两侧开关; 110 kV 麻盘线接地距离 II 段动作  $t = 0.5$  s 延时后 110 kV 麻盘线 152 号开关跳闸, 重合闸动作, 110 kV 麻盘线 152 号开关重合成功。

绵阳局 110 kV 新香睢水支线线路 171 号线路保护不对称相继速动动作, 110 kV 新香睢水支线 171 号开关跳闸; 睢水变电站站内配置的故障解列装置动作  $t = 0.2$  s 跳小电源上网线路开关; 110 kV 新香睢水支线 171 号开关重合闸未动作(重合闸投入检同期方式)。



事故时电网运行方式: 新香线(供)香山变电站, 新香线万春支线路对线路充电(万春站内 171 号开关热备用), 新香麻柳支线(供)麻柳变电站(经麻盘线转供)盘龙化建; 新香睢水支线(供)睢水变电站。

图 1 事故时电网接线图

麻柳变电站 35 kV 柳剑线 561 号、柳鱼线 564 号开关过流保护动作, 线路开关跳闸。

## 2 故障跳闸分析

经检查事故原因: 110 kV 新香睢水支线 25 号塔瓷瓶因雷击损坏。

110 kV 新香睢水支线线路首先发生 B 相瞬时接地故障, 转化发展为 BC 相瞬时接地故障, 新市站 110 kV 新香线 132 号开关接地距离 II 段、零序 II 段动作, 110 kV 新香线 132 号开关跳闸。

在新市变电站 110 kV 新香线 132 号开关即主供电源开关跳闸后, 因接有小电源上网机组, 绵阳局 110 kV 新香睢水支线线路距离保护不对称相继速动动作, 瞬时跳开 110 kV 新香睢水支线 171 号开关; 解网后的睢水地区, 因有功功率严重缺额, 系统频率迅速下降, 睢水变电站站内配置的故障解列装置动作, 跳小电源上网线路开关。

在新市变电站 110 kV 新香线 132 号开关和绵阳局 110 kV 新香睢水支线 171 号开关跳闸后, 因地方小电源并未全部解列, 此时 110 kV 新香线故障点还存在, 接地点电弧并未熄灭, 整个香山、麻柳、盘龙地区形成局部 110 kV 小接地系统, 在这局部小接地系统中, 香山变电站、麻柳变电站、盘龙化建变电站 110 kV 侧会出现很大的零序过电压, 理论上应感受到的  $3U_0$  为 300 V, 但电压互感器在系统电压升高时铁心会饱和, 故实际可传变出的电压为 220 ~ 230

V, 此过电压将香山变电站 1 号和 2 号主变压器和盘龙化建变电站 1 号主变压器中性点间隙击穿, 香山变电站 1 号和 2 号主变压器和盘龙化建变电站 1 号主变压器中性点间隙零序过流保护动作, 香山变电站 1 号和 2 号主变压器中性点间隙零序过流保护 I 段动作 0.2 s 跳小电源上网线路 35 kV 香水线 515 号开关, 1 号和 2 号主变压器中性点间隙零序过流 II 段动作 0.5 s 跳 1 号和 2 号主变压器三侧开关。

盘龙化建变电站 1 号主变压器中性点间隙零序过流动作, 跳 1 号主变压器两侧开关; 110 kV 麻盘线接地距离 II 段动作, 110 kV 麻盘线 152 号开关跳闸。经现场检查香山变电站 1 号和 2 号主变压器、盘龙化建变电站 1 号主变压器中性点间隙均有放电痕迹。

麻柳变电站 1 号主变压器因香山变电站 1 号和 2 号主变压器和盘龙化建变电站 1 号主变压器中性点间隙击穿, 香山、麻柳、盘龙地区 110 kV 系统过电压消失, 麻柳变电站主变压器中性点间隙因未击穿, 麻柳变电站主变压器中性点零序过流、零序过压保护不会动作; 在香山变电站、盘龙化建变电站与系统解列后, 麻柳变电站上网的小电源机组继续向故障点输送短路电流, 小电源上网线路过流保护动作(整定时间: 1.0 s) 跳开小电源上网线路开关。

此时新香线上所接电源全部解列, 故障点电弧熄灭, 新市变电站 110 kV 新香线 132 号开关检线路无压, 重合闸动作, 110 kV 新香线 132 号开关重合成功, 110 kV 麻盘线 152 号开关投检母线无压, 线

路无压重合闸方式,重合成功,因睢水变电站110 kV新香水支线171号开关投检同期方式,重合闸不动作,这样恢复了麻柳变电站1号主变压器、香山变电站110 kV母线、盘龙化建变电站110 kV母线供电,但此时,供电区域内仅有麻柳变电站未失压,香山变电站、盘龙化建变电站和睢水变电站仅恢复了110 kV母线空母线,香山、盘龙化建变电站、睢水变电站地区失压。

### 3 存在问题

110 kV新香线线路发生瞬时接地故障,主电源侧110 kV新香线132号线路保护动作,开关跳闸,绵阳局110 kV新香线睢水支线171号开关跳闸,110 kV系统因有地方小电源存在,故障点电弧未熄灭,香山变电站、麻柳变电站、盘龙化建变电站110 kV侧会出现很大的零序过电压,这零序过电压将香山变电站、盘龙化建变电站主变压器中性点间隙击穿,这时香山变电站、麻柳变电站、盘龙化建变电站110 kV侧的过电压消失,因香山变电站、盘龙化建变电站主变压器中性点间隙击穿,这时在失去主电源的110 kV新香线和110 kV麻盘线上有零序电流流过,麻柳变电站(1号主变压器中性点未击穿)110 kV侧没有零序电流流过,麻柳变电站主变压器中性点间隙零序过流、过压保护均不动作,而麻柳变电站所接小电机组容量过小,麻柳变电站主变压器保护和110 kV新香线麻柳支线保护不会动作,只能靠小电源上网机组所配低周解列装置动作解列,或小电源上网线路过流保护动作,切除小电机组。导致香山变电站、盘龙化建变电站和睢水变电站主变压器跳闸,主电源110 kV新香线132号开关重合成功后,仅恢复了麻柳变电站负荷。

在110 kV新香线线路发生瞬时接地故障时,由于麻柳变电站小电源上网线路开关不能以0.2 s延时切除,实际切除时间1.0 s,是导致香山、盘龙化建变电站、睢水变电站地区失压的根本原因。

综上所述,存在以下问题。

(1) 小电源上网机组所配的低周解列装置因运行维护差,动作可靠性低,不能使小电机组解列。

(2) 靠小电源上网线路开关过流保护动作跳闸,时限太长,其过流时限不能与110 kV主变压器中性点零序保护时限配合,导致香山变电站、盘龙化

建变电站和睢水变电站主变压器跳闸。

(3) 睢水变电站重合闸投检同期方式也是造成睢水变电站地区失压的原因之一。

### 4 保护改造方案

对接有并网小电源的110 kV输电线路发生瞬时接地故障时,在主电源侧110 kV线路保护动作,开关跳闸后,如所接系统中的小电源上网线路开关均能以小于0.2 s延时可靠跳闸,故障点电弧熄灭,故障消失后,主电源侧线路开关重合成功,局部地区恢复供电,由调度指挥迅速恢复小电源机组供电是并网系统恢复供电的最佳方案。保护改造方案如下。

(1) 利用现有主变压器高后备保护装置,主变压器中性点零序过压或间隙零序电流保护动作后,以0.2 s延时先跳小电源上网线路开关,再以0.5 s延时跳主变压器各侧开关。

(2) 但对于串供有多座110 kV变电站的线路,在电路上发生瞬时接地故障时,因只有部分主变压器中性点击穿,局部地区过电压消失,导致主变压器中性点未击穿的变电站上网线路开关不能迅速解列,为此提出,利用上网线路开关配置的线路保护中的低周减载功能,将低周减载中的滑差闭锁功能退出,将保护装置的低周减载功能转变为低周解列功能使用,定值设置为48 Hz,0.2 s出口跳闸。

(3) 对接有并网小电源的110 kV输电线路负荷侧线路开关重合闸均投检母线无压、线路有压方式,保证在主电源侧线路开关重合闸成功和小电源上网线路开关跳闸后,保证负荷侧线路开关重合闸动作成功。

### 5 结 语

对接有并网小电源的供电系统在主电源消失后,电网中各运行设备的继电保护动作逻辑进行详细分析,提出利用现有主变压器高后备保护装置,以较短时间首先跳上网小电源线路开关,再以一较长时间跳主变压器各侧开关;将所有上网小电源线路开关保护装置中的低周减载功能转变为低周解列功能使用,保证并网小电源迅速可靠地解列;负荷侧线

(下转第72页)

实际电量应为  $(-3-1) \times (-200) = 800 \text{ kWh}$ 。

(5) 本抄表周期的实际收费电量 =  $6\ 000 - 4\ 500 + 800 = 2\ 300 \text{ kWh}$ 。

### 3.2 相对误差法

#### 3.2.1 电能表误差的基本知识

由于电能表自身结构上以及其二次接线的原因和外界条件的影响,使得它所测得的电量与负载实际消耗的电量是有差别的,这种差别称为电能表的误差。

电能表的误差用相对误差表示,所谓相对误差即被测电量的绝对误差与实际值的百分比。按误差产生的原因,电能表的误差又可分为基本误差与附加误差。在规定的条件下(例如:电压为额定值、频率为 50 Hz、环境温度为 20 °C、无外磁场影响等)测得的相对误差称为基本误差,电能表的准确等级就是根据基本误差确定的,例如 2.0 级的电能表,其基本误差应不超过  $\pm 2.0\%$ 。由于外界条件变化引起的误差称为附加误差,产生附加误差的主要原因有:电压、频率、环境温度的变化,相序的改变等。

#### 3.2.2 用相对误差求更正电量

当测量出了电能表的实际误差后,即可根据下列公式求出其更正电量。

$$\Delta W = \frac{r}{1+r} \cdot W' \quad (4)$$

式中,  $r$  为电能表在实际运行环境下的相对误差,%;  $W'$  为上次校验或换装后投入之日起至误差更正之日止的抄见电量。

式(4)中的  $r$  不仅包括由于电能表本身结构或调整不当等原因产生的误差,而且还包括由于接线

错误而产生的计量误差。

#### 3.2.3 相对误差法应用举例

2011年6月30日,电力公司例行对供区内某铸钢厂计量表计进行现场校验时,现场发现客户计量装置封印完好,但其电能表误差为  $-5.0\%$ ,另已知该表于2010年12月30日由电力公司安装,运行期间累计抄见电量为 30 000 kWh,求追补的电量。

解:因为该表计超差并非由客户原因引起,根据《供电营业规则》第80条第1款之规定,应补收该客户电量为

$$\Delta W = \frac{r}{1+r} \cdot W' \cdot \frac{1}{2} = -789 \text{ kWh}$$

即:应补收该客户电量为 789 kWh。

## 4 结 语

伴随着电力事业的发展以及电力技术的日新月异,电能计量装置也在不断变化,但无论怎样电能计量装置始终会有出现故障的时候,所以不仅要跟上技术发展的脚步,还应掌握最基础的原理及分析方法,一旦计量发生错误,这些方法将有助于及时解决。

### 参考文献

- [1] 国家电网公司人力资源部. 电能计量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 孙方汉, 王新, 杜启刚. 电能计量及其管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

(收稿日期: 2012-04-12)

(上接第37页)

路开关重合闸均投检母线无压、线路有压方式,使接有并网小电源的 110 kV 输电线路在发生瞬时接地故障时终端变电站恢复正常运行的保护方案。此方案简单可靠,易于实现,提高了电网供电可靠性。

### 参考文献

- [1] DL/T 584-95 3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S].
- [2] 崔家佩, 孟庆炎, 陈永芳, 等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

2000.

- [3] GB/T 14285-2006 继电保护和安全自动装置技术规程[S].

作者简介:

周建(1968),男,工程师,主要从事与电力系统相关的工作;

彭燕(1968)女,工程师,主要从事与电力系统相关的工作;

曾俊(1974),男,工程师,主要从事热工技术。

(收稿日期: 2012-05-28)

# 备用调度可视化系统的数据同步解决方案初探

李成鑫<sup>1,2</sup>, 刘俊勇<sup>1,2</sup>

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

**摘要:** 在灾难事故频发的今天, 备调系统建设成为必要, 可视化系统提高了调度效率, 也成了备调重要组成部分。如何保证在启用备调时, 电网模型、数据和图形能反映电网当前实际情况, 保证备调真正启用时可视化调度可用, 同时减少维护工作量, 设计了一套主备调可视化系统数据同步方案, 并进行了工程实施, 经现场检验效果良好。

**关键词:** 备调; 可视化调度; 数据同步; 设计; 实现

**Abstract:** As the frequent occurrence of disasters, it is necessary to build a standby dispatching system. Because visual dispatching system improves the efficiency of scheduling, it becomes an important part of standby dispatching system. A data synchronization solution between primary and standby visual dispatching system is proposed, which can guarantee the grid model, data and graphics to reflect the actual situation of the current grid when standby dispatching system is enabled, and can reduce the maintenance workload. The implementation in a project is carried out and the good results are obtained.

**Key words:** standby dispatching system; visual dispatching; data synchronization; design; implementation

中图分类号: TM734 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0038-03

## 0 引言

电力调度机构是电力系统调度运行的控制指挥中心, 承担着组织、指挥、指导和协调电力系统运行的重要任务, 是电网安全稳定运行的关键环节。如果因灾难事故(火灾、电源中断、通信系统大面积中断、调度自动化系统全停等重大事故)、自然灾害(台风、地震、洪水等自然灾害; 传染性疾病威胁)、突发事件(恐怖袭击、社会动乱或骚乱; 计算机网络病毒及黑客攻击、集团式攻击等事件)、战争等情况下导致电网主调度指挥系统(简称主调)瘫痪, 调度员也将随之成为“瞎子”、“聋子”, 电网处于不可监视与控制状态, 这样的后果将严重威胁电网的安全稳定运行<sup>[1-5]</sup>。为保障电力生产、电网运行等调度指挥的不间断, 提高电网防御各种灾难的能力和增强应对突发事件的水平, 建设电网备用调度指挥系统(简称备调)已成必然。在5·12大地震之后, 四川电网率先进行了异地备调的建设, 目前国内很多网省调也已实施了备调的建设。

研究表明, 人眼对图形的敏感度大大高于对数据的敏感度, 将该理论实践用于电网运行监控, 调度员很容易从可视化后的图形中及时发现电网存在的问题和变化趋势, 提高决策效率。可视化技术随着

电力系统的发展需要不断进步, 从最初的电网单线图的数据原始表示及列表表示, 逐步向二维/三维图形化、动画发展, 并吸收了信息学、美学、心理学等学科技术, 形成了一系列与电力系统运行相适应的可视化表达方式。基于图形化的可视化系统有效提高了实时信息的可阅性、提示性和概括性, 为调度运行提供了良好的监视平台, 提供了调度员精选后的监视信息, 建立起了电网运行预警机制, 为事故预想、调度状态重演评估提供了快速、准确的分析工具。系统在调度运行指挥过程中的优势作用日益鲜明<sup>[6-7]</sup>。备调系统使用概率小, 但一旦使用, 必然是紧急情况, 这时情况纷繁复杂, 电网调度任务紧急, 调度技术支持系统必须能快速有效地向调度员提供所关心的电网运行情况, 特别是有关全网运行态势的数据。因此, 备调建设中可视化调度系统的建设是很必要的。

对于备用系统, 因为它使用的概率非常小, 如果要像维护主系统那样维护备用系统是不现实和不经济的。从系统运行的实际情况来看, 主系统的维护工作量比较大, 不可能因为有一套备用系统后, 维护人员成倍增加<sup>[1]</sup>, 因此, 要求备用系统建成后的日常维护工作量应尽可能少, 当然也包括备调可视化系统。

# 1 备用调度系统建设的关键

备用调度中心,作为主用调度中心的后备,在正常情况下处于备用状态,不参与电网的调度指挥,因此备用系统应该有别于主调系统,建设一个必要的缩减版的精要的调度系统,而不是大而全的主调系统的拷贝。这就涉及到应该在备用中心部署哪些系统。

电网备用调度系统的建设必须减少与主调系统的关联性,使之在主调系统瘫痪后还能很好地生存,所以宜采用备用完全独立于主调的建设模式。包括数据信道、数据采集、调度运行展示等。为了保证主备用系统从模型、参数到实时数据的统一,需采用统一的设备命名方式。

冷备用方式下,系统恢复的速度慢、启用是否成功缺乏可靠的保障。温备用方式下,备用切换时,备用系统将通过人工切换的方式启动网络信道采集,通过自己的前置系统实现数据采集和处理,备用系统恢复的速度也相对较慢,但平时至少能反映实际电力系统的运行状态。宜采用热备用方式,主备用系统同时对网络信道的数据进行采集和处理,可以确保备用系统在灾难发生时的快速、无缝切换和不受主调系统的影响。

但当主调瘫痪后,备用要能快速恢复对全网的电网调度,备用要具备与主调相同的调度手段和工作环境,特别是能正确反映电网运行工况并能对电网进行闭环控制,要具有高效的调度技术支持系统。因此,备用系统的建设既与主调密切相关,又有较大差别。因此,备用技术支持系统应实现以下功能:在主调正常运行时,其电网模型、参数、电网实时数据与主调一致;在主调瘫痪后,可自动地采集电网及厂站的数据,以便备用系统可以立即承担起电网指挥调度的功能。

备用智能型调度面临的难题如下。

(1) 多数据源的融合与挖掘,众多的孤立系统如何整合形成统一的调度指挥权;

(2) 调度员如何介入以计算机为主的调度技术支持系统,发挥其主观或直觉的作用;

(3) 主备用切换方式和时机问题,在什么情况下备用启用?是否有技术指标?备用启用是手工方式还是自动方式?

(4) 如何保证在启用备用时,电网模型、数据和图形能反映电网当前实际情况。

这里就第四个问题进行探讨。

# 2 备用可视化系统建设方案

## 2.1 备用可视化系统硬件结构

备用可视化系统部署在安全 II 区,采用和主调完全独立的方式,以防止主调系统停掉之后备用可视化没有数据来源,备用可视化系统网络通过防火墙和备用 SCADA/EMS 等系统相连,获取模型、量测等电网数据。备用可视化系统服务器采用双网口,一个网口和内部交换机相连,另一个网口通过防火墙独立和主调可视化服务器相连,以和主调可视化系统进行数据同步。其硬件结构图如图 1 所示。

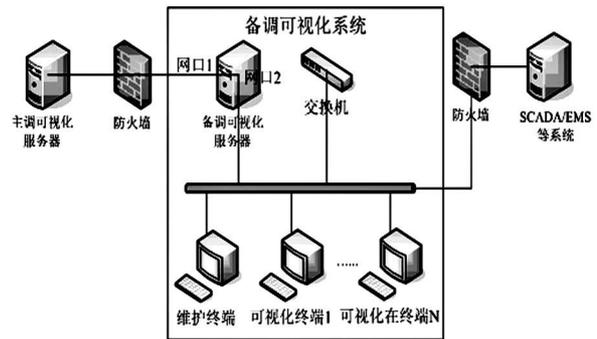


图 1 备用可视化硬件结构

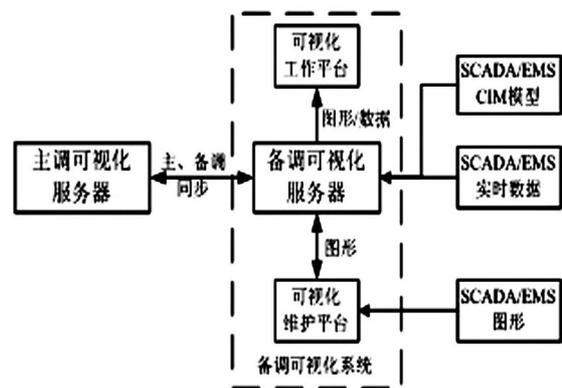


图 2 备用可视化软件结构

## 2.2 备用可视化系统软件结构

系统软件结构图如图 2 所示。备用可视化所需模型以 CIM 模型文件的方式从备用 SCADA/EMS 系统获取,实时数据以 E 文件形式从 SCADA/EMS 系统获取,图形文件以 SVG 形式从 SCADA/EMS 系统获取,这些数据都是单向传输,从安全 I 区传到 II 区。图形文件中维护平台上经 SVG 解析成可视化

专用图形格式后发布到可视化整个系统,模型和实时数据由服务器入库后分发到系统内各工作平台。备调可视化系统通过服务器和主调可视化系统服务器进行数据同步。

### 3 主备调可视化系统数据同步方案

为了保证启用备用时,电网模型、数据和图形能正确反映电网当前实际情况,但尽量减少备调系统的日常维护量;同时,在主调恢复功能,备调准备转为正常备用模式时,需将应急模式期间的模型和图形变化情况同步到主调,需要对主、备调系统之间的同步进行研究。

#### 3.1 图形同步

主、备调系统之间,如果是同构系统,则图形可以通过覆盖方式进行同步。

主、备调系统之间如果是异构系统,为了实现图形的同步,主、备调需遵循 IEC 61970 标准,按照可缩放向量图形(scalable vector graphics,SVG)标准导出图形文件,传到对端,然后在对端解析 SVG 图形并更新同名图形文件,从而实现图形的同步。

在主、备调可视化之间同步图形属于同构系统,直接覆盖就能同步。

#### 3.2 模型同步

主、备调系统实现模型同步的方式主要有实时同步、定期同步、延时同步和手工同步 4 种<sup>[1-2]</sup>。

1) 实时同步的方式要求主系统将其数据维护信息立即传输到备调系统中,备调系统及时更新以反映最新的模型。这种方式实现复杂,但可以保证备调系统模型的及时性与有效性。

2) 定期同步的方式是由主系统将模型定期传输到备调系统中,备调系统更新后反映最新的模型。

3) 延时同步方式时,当主调进行模型更新时,备调延时同步;当主调进行计划值修改时,备调实时同步。延时时间和需要实时同步的消息可灵活在配置文件中定义。

4) 手工同步方式,系统提供手工同步工具,由自动化维护人员定期同步主、备调系统模型数据,备调系统更新后反映最新的电网运行模型。

在实际运行过程中,发现实时同步模式虽然减轻了维护工作量,提高了工作效率,但也带来一定的安全风险。如果主系统模型或数据库出现异常,会

直接影响到备调系统运行,可能出现主、备调系统同时故障的风险,严重威胁电网的安全稳定运行。定期同步模式的优点是实现简单,缺点是在两次更新之间的一段时间里备调系统的模型存在滞后性。

经过对主、备调系统模型同步机制的分析研究,在保证主调系统安全稳定运行的前提下,提出延时同步方式和手工同步方式相结合的模式。正常模式下,主调系统模型以延时方式自动向备调同步;当主调恢复正常后,备调采用手工方式将应急期间模型、参数的变化同步到主调,确保主调模型、参数最新。

#### 3.3 数据同步

正常模式下,主、备调系统独立运行、独立保存历史数据,不需要数据同步。

应急模式下,当主调恢复正常后,视情况决定是否需备调向主调同步历史数据。如果主调端是因传染病等因素失去控制职能,应急模式期间主调端数据采集正常,则不需要同步历史数据。如果主调端是因自然灾害等其他因素失去控制职能,应急模式期间主调端数据采集不正常或中断,则需要从备调向主调同步历史数据。

综合上述 3 方面的同步要求,可将系统数据同步分成两大类。

##### (1) 主调向备调延时自动同步

在正常工作模式下,系统图形、模型实行从主调延时自动同步备调的方式。实时数据不同步,备调的实时数据由备调端独立采集。

##### (2) 备调向主调手动同步

在应急模式下,如果主调端数据采集不正常或中断,当系统恢复后,系统图形、模型和实时数据需要手动方式由备调向主调同步。

### 4 数据同步方案的软件实现

由于主、备调同步的两端都是可视化系统,处理图形、模型和数据的机制都是一样的,所以同步相对简单。

#### 4.1 主调向备调延时自动同步

软件实现延时自动同步的步骤如下。

步骤 1: 备调服务器上开一个 FTP 服务。

步骤 2: 当主调可视化模型变动时,将已入库模型数据打包成一个文件 FTP 到备调服务器上;当主

(下转第 90 页)

的工作,作好平常的积累对分析保护设备可靠性问题大有裨益,希望在以后的工作中,针对保护出现的各种可靠性问题,运用科学的方法(如概率统计法、马尔科夫模型法和故障树法等)加以分析和定量计算,找出最大的故障类型和故障原因,以整体提高保护的可靠性。

### 参考文献

[1] 王维俭. 发电机变压器组继电保护应用(第三版)

[M]. 北京:中国电力出版社,2003.  
[2] GB/T 14285-2006 继电保护和安全自动装置技术规程[S].  
[3] GB/T 50062-2008 电力装置的继电保护和自动装置设计规范[S].  
[4] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

(收稿日期:2012-04-06)

(上接第 40 页)

调可视化新增图形或图形修改时,将这些图形文件 FTP 到备调服务器上。

步骤 3: 备调可视化服务器上运行一个程序,定时扫描 FTP 服务目录 A 下是否有新送来的图形文件和模型文件。如果检测到有新的,立即拷贝到本机另一目录 B,延时一段时间(延时时长可预先人工设定)过了延时时间如果没有同名新文件过来,则说明主调的修改有效,可以进行同步。如果目录 B 下有图形文件,程序逐个将目录 B 下的图形文件覆盖可视化系统的同名图形文件,由于主、备调系统 ID 号不一致,为了使主调的图形中备调能直接用,还需根据图形中设备名升级设备 ID,然后发布到备调各机。如果目录 B 下有模型文件,则将打包的模型文件解开,然后逐条和本机内存库的模型比较,有新的就添加入库。由于模型的 ID 可由可视化系统自动编号,所以模型入库只需按本机模型入库规则编号就行。

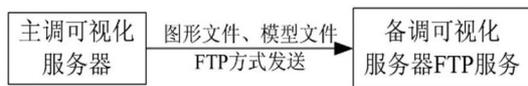


图 3 主备调同步示意图

#### 4.2 备调向主调手动同步

将应急模式工作期间新的模型、图形和实时数据同步到主调系统。这和 4.1 中介绍的主调向备调同步数据差不多,有差别的在于以下两方面。

(1) 在主调端将已经送到本机的文件同步本机可视化系统时,不需要从 FTP 服务目录拷走,也不需要延时,直接进行同步即可。

(2) 手工同步时,需要同步历史数据。历史数据的同步和模型文件同步过程类似,只是历史数据断面多,只能循环方式同步,每次同步一个断面数据。首先,将历史库中一个断面数据取出打包成一个文件,

通过 FTP 传送到主调 FTP 服务目录下;然后主调端解开文件后逐条添加进主调可视化历史库。

### 5 结 语

在启用备调的紧急情况下,情况纷繁复杂,调度人员希望快速掌握全网运行工况及系统可控能力,系统基于调度员思维,以“看我想看的”思想组织各种系统数据形成可视化调度,便于调度员快速对全网情况了然于胸。

但备调可视化系统增加了维护人员工作量,为了减少维护工作,使备调系统能真正发挥“备用”作用,则根据备调可视化建设经验和现场需求,提出了一套主、备调可视化系统数据同步方案,除了人工启动一下程序外,基本做到零维护,从实际使用过程中的维护角度保证了备调可视化系统的可用性。

### 参考文献

[1] 麦绍辉,梁寿愚. 备用调度 EMS 系统的数据同步解决方案[J]. 电力系统通信,2010,31(213):46-49.  
[2] 张继芬. 电网备用调度系统的数据同步与采集解决方案[J]. 电力系统通信,2009,30(202):47-50.  
[3] 陈枫. 省级电网 SCADA/EMS 备用方式的探讨[J]. 浙江电力,2006(4):18-21.  
[4] 徐展强,邓大为,姜彩玉,等. 异构主用、备用自动化调度系统一致性研究[J]. 广东电力,2009,22(4):9-12.  
[5] 丁锋,朱红,冷俊,等. 地区电网调度 SCADA 灾准备用系统的建设[J]. 电力系统自动化,2005,29(6):105-107.  
[6] 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.  
[7] 刘俊勇,沈晓东,田立峰,等. 智能电网下可视化技术的展望[J]. 电力自动化设备,2010,30(1):7-13.

(收稿日期:2012-02-13)

# 500 kV 输电线路光纤保护联调探讨

李凡红, 庄秋月

(四川省电力公司超(特)高压运行检修公司 四川 成都 610041)

**摘要:** 光纤保护作为线路首选主保护已在 220 kV 及以上电压等级中得到了广泛的应用。与此同时,由于距离远,线路两侧联调时所出现的问题也越来越多,尤其在验收或首检中因准备不足或调试思路繁冗而无法得到迅速解决,影响联调进度。通过四川电网的某 500 kV 线路光纤保护及通道调试为例详细介绍了光纤保护通道联调的方案、步骤和方法,对调试中可能出现的问题进行细致地探讨并提出了相应的解决措施,具有一定的通用性,以便为今后此类调试工作提供实用的参考。

**关键词:** 光纤保护; 线路联调; 过压远跳; 光纤自环

**Abstract:** Optical fiber protection, as the preferred main protection of transmission line, has been widely applied in 220 kV voltage level and above. At the same time, due to the long distance, there are more and more problems occurring during the joint commissioning in both sides of line. In particular, due to the lack of preparation or the tedious commissioning schemes, these problems can not be resolved quickly in the acceptance check or the first check, which often affects the commissioning progress. Taking the optical fiber protection and channel commissioning of a 500 kV line in Sichuan power grid for example, the program, procedures and methods for joint commissioning of optical fiber protection channel are described in detail, the problems which may occur in the commissioning are discussed and the corresponding measures are put forward, which has some generality to provide such a useful reference for the future commissioning.

**Key words:** optical fiber protection; joint commissioning of transmission line; overvoltage transferred tripping; optical fiber self-loop

中图分类号: TM771 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)04-0041-05

## 0 前言

随着“远距离、大功率”的复杂电力网络的形成,其安全稳定运行越来越重要。要使电力系统中的故障和不正常运行情况在最短的时间内得到控制,需要可靠的传输通道将两侧的继电保护信号准确迅速地传送。

光纤作为继电保护的通道介质具有雷电电磁干扰小、对电场绝缘好、频带宽和衰耗低等优点,在继电保护领域中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。由于它的用途在于传输并交换两侧的信息以供保护装置判断线路是否发生故障,其通道的好坏将直接决定保护装置能否正确判断并动作,因此在此类光纤保护装置投产或首检预试前继电保护人员需要进行通道联调试验,以确保信号传输准确无误。

## 1 光纤保护原理

光纤保护的基本原理是输电线的纵联保护借助光纤通道将线路两端的保护装置纵向连接起来,将各端的电气量(电流、功率方向等)或指令(允许、闭锁)传送给对侧,以供判断故障发生范围,从而决定是否跳闸。现在其主流分为光纤差动保护和光纤距离保护两大类。

光纤差动保护的原理是利用光纤通道将本侧电流的波形或代表电流相位的数字信号以光纤为介质传送到对侧。两侧的保护装置根据对本侧和对侧的电流幅值及相位的信息进行处理和比对,将其比较的结果通过程序计算线路三相电流的变化来判断三相电流的向量和是否为零,并以此为依据来区分是区内还是区外故障,从而确定保护装置是否动作<sup>[2]</sup>。

光纤距离保护是在高频纵联距离保护的基础上演化而来,利用距离保护的启动元件和距离方向元件控制发出高频信号来决定两侧保护是否动作,以稳定可靠的光纤通道代替高频通道,从而提高保护动作的可靠性。其主要分为允许式和闭锁式,由于其不受负荷电流的影响,不受线路分布电容电流的影响,不受两端TA特性是否一致的影响等优点,因此在超高压电网中逐步代替高频保护并得到了广泛应用。目前四川电网使用最多的是允许式光纤距离保护,在发生故障时利用距离元件和零序方向、电流元件动作,向对侧发允许跳闸信号,保证两侧快速跳闸。

上述的光纤保护均能使保护无延时地切除被保护线路任一点的故障,将故障点进行有效隔离。

目前,四川超(特)高压电网的线路主保护为光纤保护,现场调试中发现:对于光纤保护而言,由于其通道连接“厂-站”或“站-站”的两侧,其联调的试验直接决定着保护的正確动作与否,因此有必要对其采取行之有效的试验策略以保证通道的完好性及保护动作逻辑的正确性。

## 2 实例的配置

鉴于上述的情况,以四川超(特)高压电网中的500 kV线路联调为例来详细介绍保护装置的常见配置,并提出一种通用的联调策略。

根据文献[3]规定:220 kV及以上电压等级线路保护应双重化配置,因此四川电网的500 kV线路保护采用双重独立配置,其常见的详细配置如表1所示。

其中,WXH-803A、RCS-931E和CSC-103B是采用光纤电流差动保护全线速动主保护,而CSC-101B采用光纤纵联距离保护为主保护。

以上只是列举了4种较为常见的配置,针对不同的变电站的设计要求和考虑,其配置的保护装置可能会不尽相同,但其一定遵守“保护双重化配置”的原则,并且分析思路殊途同归,故以配置1为例来介绍。

## 3 联调方案

联调是在对保护装置自身调试校验完的基础上

表1 500 kV线路实例配置细表

配置	保护	线路保护装置	过电压保护装置	备注(主保护)
许继+四方	第一套	WXH-803A	WGQ-871A	光纤差动
	第二套	CSC-101B	CSC-125A	光纤距离
许继+四方	第一套	WXH-803A	WGQ-871A	光纤差动
	第二套	CSC-103B	CSC-125A	光纤差动
南瑞继保	第一套	RCS-931E	RCS-925G	光纤差动
	第二套	RCS-931E	RCS-925G	光纤差动
许继+南瑞继保	第一套	RCS-931E	RCS-925G	光纤差动
	第二套	WXH-803A	WGQ-871A	光纤差动

进行的,为突出重点,这里只是针对联调方案进行阐释。其步骤可分为如下4部分。

(1) 设置好两侧的通道以确保两侧的信息可以正常交换。其设置内容主要有以下2点。

- ①正确接入“光收”和“光发”的光纤;
- ②设置好本侧、对侧的纵联码以保证彼此匹配;

(2) 进行本侧、对侧的交流采样。其注意事项如下。

①检查两侧的采样是否满足规程要求:交流电流和交流电压的幅值误差均应小于±5%;

②若两侧的TV变比不一样时,要以某侧为基准换算成统一的标准来比较:可根据整定的TA变比调整系数,使两侧的二次电流一致;

③对于有些保护装置,其差流显示需要投其“光纤差动保护”保护硬压板才能实现,否则采不到相应的值。

(3) 模拟相应的故障类型来验证其动作逻辑的正确性。其具体细则见表2所示。

表2是针对本侧的试验内容,对侧的调试反之亦然。对于表中的说明1进行如下的解释:对于南瑞线路保护(RCS-931E)而言,对侧的全电压将闭锁两侧的差动;对于许继线路保护(WXH-803A/G)而言,对侧的全电压将不会闭锁两侧的差动;对于四方线路保护(CSC-101B)而言,对侧的全电压将会闭锁对侧的差动而不闭锁本侧的差动,主要作

表2 模拟故障类型细则表

试验内容	试验条件	本侧(保护动作情况)	对侧(保护动作情况)
单瞬故障	对侧: TWJA( B、C) =0 TV 断线 本侧: 模拟故障	单跳	单跳
	对侧: TWJA( B、C) =0 正常电压 本侧: 模拟故障	见说明 1	见说明 1
	对侧: TWJA( B、C) =1 本侧: 模拟故障	单跳	不动作
过电压启动远跳		动作	动作
边开关失灵启动远跳		保护动作但未出口跳闸	动作
中开关失灵启动远跳	对侧: TWJA( B、C) =0 本侧: 模拟故障	保护动作但未出口跳闸	动作
高抗电量启动远跳		保护动作但未出口跳闸	动作
高抗非电量启动远跳		保护动作但未出口跳闸	动作
通道故障	对侧: TWJA( B、C) =0 TV 断线 本侧: 模拟故障	不动作	不动作
主保护压板退出	对侧: TWJA( B、C) =0 TV 断线 本侧: 模拟故障	不动作	不动作

用是反映单相高阻接地故障。

从上面的解释可以看出: 对于不同的线路保护装置, 其全电压对差动的影响将有所不同, 因此要针对不同的保护调试来具体分析以确保调试的正确性和快速性。

(4) 整组传动试验: 由于第 3 步骤调试只是针对保护装置的逻辑进行了校验, 不能确保保护出口能否正确跳闸, 鉴于此需带两侧各自的开关进行传动试验以确保整组的动作正确性和回路的完好性。

其整组传动试验的内容与上述实验步骤相同, 为减少对开关在同一时间的多次冲击, 可适当减少试验内容, 只选取单瞬故障和启动远跳各一种进行即可。

## 4 所遇到问题及相应解决措施

### 4.1 启动远跳回路的方式

对于 500 kV 线路而言, 其启动远跳回路的方式主要为以下 3 类。

①其传输距离较远, 为防止线路的“容升效应”出现过电压, 一般会在线路的一侧安装并联电抗器的措施来抑制。因此, 高压电抗器的电量保护或非电量保护动作后均可启动远跳回路;

②其为 3/2 主接线方式, 因此边开关和中开关的失灵保护动作可启动远跳回路;

③线路存在一端(对侧)出现线路过电压、电抗器内部短路和断路器失灵等故障, 因此设置过电压启动远跳, 由另一端(本端)远跳保护根据收信逻辑和相应的就地判据出口跳开本端断路器<sup>[4]</sup>。

三者以“或”的逻辑来决定是否发送“远传”指令。其动作逻辑如图 1 所示。

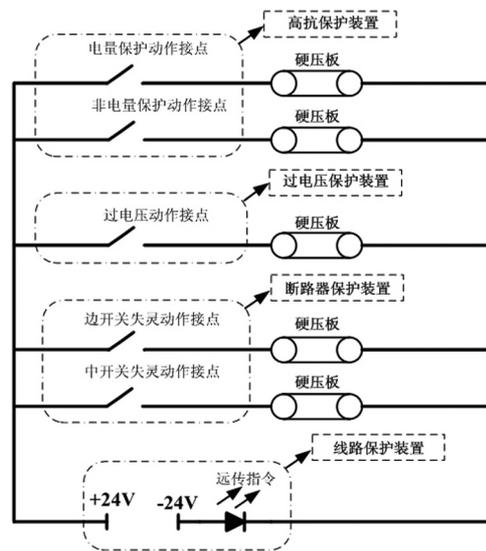


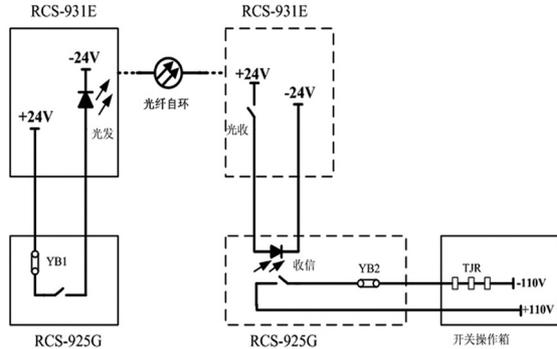
图1 启动远跳回路简图

保护装置发出的“远传”指令通过“专用光纤”方式或“复用通道”方式传输给对侧, 对侧收到“远传”指令后, 结合“就地判据”(前提是该功能投入)综合考虑来决定是否动作来跳开该侧的开关。

### 4.2 “光纤自环”模式

在实际调试中, 两侧的调试进度不同会造成调

试内容不同,无法实时真实模拟“本-对侧”的远方跳闸动作逻辑;加之在调试各侧保护装置动作逻辑时没有必要与对侧联调。为了互不影响两侧的调试以及试验中的联调可能导致对侧的开关跳闸伤及检修人员,因此选择“光纤自环”模式来模拟。其动作机理如图 2 所示。



虚线表示利用本侧虚拟对侧保护装置(主要为闸释动作机理);而实线表示本侧的实际装置。YB1 为过电压启动远跳;YB2 为远方跳闸。

图 2 光纤自环模式简图

在实际调试过电压启动远跳试验的过程中,会经常出现如下的问题。

- ① RCS-931E 装置的“远传”信号未开入;
- ② 利用本侧自环进行整组传动时,开关未动作。

解决措施如下。

① 检查光耦是否完好,利用短接“远传”接点的方法观察装置内部开入是否变位;若变位则说明其完好,否则其损坏;

② 检查过电压保护装置是否正常动作,通过测试仪加量、万用表来测试相应的输出接点的对地电位,观察电位的变化;若电位为正则表明其动作接点完好,否则其损坏;

③ 检查其硬压板 YB1、YB2 和相应控制字是否投入,通过查看装置的开入量和定值单的控制字;

④ 检查过电压保护装置“远跳经跳位闭锁”控制字投入情况;若投入则远跳令需要在满足本侧开关跳开且三相无电流的条件下才启动远方跳闸装置,反之则直接启动。

⑤ 若上述方式都不能解决,则采用测通断的方法来检查其二次回路,需要注意的是所测试的二次回路不带电。

### 4.3 两侧通道异常

文献[3]规定:线路纵联保护通道(含光纤、微波、载波等通道及加工设备和供电电源等)、远方跳

闸及就地判别装置应遵循相互独立的原则按双重化进行配置。四川 500 kV 电网的线路保护都遵从此原则,所以调试过程中应对其独立性进行检查验证。

在整组调试的过程中,出现两侧的误码率高、失步次数大等通道异常现象。现场经验判定其原因主要为连接两侧的光纤接口处存在接触不良或污染、光纤部分损坏。

解决方法:采用分段自环法来查找故障,即以相应的接口自环,并在装置内部设置成相同的纵联码(即“自环”模式)来进行。

① 将本侧保护装置后的尾纤接入处自环,通过装置观察其通道异常是否消失;若是则为装置内部故障;

② 将本侧通信小室的配线架上的尾纤接入处自环,通过装置观察其通道异常是否消失;若是则为保护小室至通信小室的光纤存在损坏;

③ 将对侧通信小室的配线架上的尾纤接入处自环,通过装置观察其通道异常是否消失;若是则为两侧通信小室之间的光纤存在损坏;

④ 同样的道理可以测试对侧的光纤通道是否正常。

## 5 结 论

对于 220 kV 及以上电压等级的线路投运前以及首检预试及年检预试中,为保证保护能正确动作,联调工作一定要做到准确无误,其好坏直接决定线路发生故障时能否快速切除,因此联调不容忽视。为此,通过对四川超(特)高压电网的 500 kV 线路为例,系统介绍了常用的线路保护装置配置以及一种现场易于操作的联调方法以供保护同行参考,并对联调过程中出现的问题提出了相应的解决措施,总结并提出了相应的现场操作经验和技能以便于今后的检修工作。

### 参考文献

- [1] 布文哲,董海山,姜华薇.输电线路光纤保护技术的应用及问题分析[J].河北电力技术,2007,26(3):35-38.
- [2] 朱声石.高压电网继电保护原理与技术[M].北京:中国电力出版社,1995.
- [3] 国家电力调度通信中心.《国家电网公司十八项电网

重大反事故措施》(试行) 继电保护专业重点实施要求 [S]. 2005.

[4] 许继电气股份有限公司. WGQ-871A 微机故障启动装置技术说明书 [R]. 2008.

作者简介:

李凡红(1984) 男, 助理工程师, 研究方向为电力系统



(上接第 14 页)

风速不变时, 分别对风电场全模型和风电场等值模型进行仿真, 有功功率、无功功率和电压的波形如图 10 所示。

由仿真曲线可知: 机群出口 PCC 处发生三相短路扰动时, 风电场 PCC 处有功出力、无功变化和电压幅值在等值前后基本吻合, 只是在扰动发生前后有较为明显的局部误差, 各种动态过程都具有较好的精度。等效风电机组参数对系统扰动具有良好的适应性。说明暂态运行时等值模型也能够很好的反应出风电场特性。

## 5 总 结

以上建立了变速恒频双馈风电机组的模型, 对阵风风和渐变风下端口的稳态、暂态特性进行了仿真, 仿真结果表明: 双馈风电机组可以实现有功的最大功率跟踪, 有功和无功解耦控制, 输出功率因数为 1, 端口电压稳定, 从而验证了模型的正确性。其次, 在考虑尾流效应的情况下, 对基于不同容量双馈风电机组的风电场进行等值, 在稳态、暂态运行情况下进行仿真分析, 结果表明, 等值前后风电场的有功功率、无功功率及电压基本吻合, 误差较小, 等值模型能够很好反应出风电场特性, 对各类动态过程仿真具有较好的适用性, 这为大规模含变速恒频双馈型机组风电场的等值提供方法参考。

### 参考文献

[1] 陈雷, 邢作霞. 大型风力发电机组技术发展趋势 [J]. 可再生能源, 2003(1): 27-30.

[2] 冯双磊, 赵海翔, 任普春. 基于 PSCAD/EMTDC 的双馈式变速恒频风电机组动态模型仿真 [J]. 电网技术, 2007, 31(17): 30-35.

[3] 李光允, 陈小虎, 唐国庆. 大型风力发电场等值建模研究综述 [J]. 华北电力大学学报, 2006, 31(1): 42-46.

智能运行及控制理论研究, 从事继电保护及控制方面的工作;

庄秋月(1986) 女, 助理工程师, 研究方向为电力系统运行及暂态分析。

(收稿日期: 2012-01-11)

[4] Yu Zou, Malik Elbuluk, Yilmaz Sozer. A Complete Modeling and Simulation of Induction Generator Wind Power Systems [C]. Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), IEEE, 2010: 1-6.

[5] 张照彦, 马永光. 双馈异步风力发电机建模与仿真研究 [J]. 电力科学与工程, 2010, 26(1): 5-9.

[6] 万航羽, 黄梅. 双馈风力发电机建模及谐波分析 [J]. 电气应用, 2008, 27(6): 53-57.

[7] 徐园. 基于 PSCAD/EMTDC 变速恒频双馈风力发电机组运行及特性分析 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2008: 17-20.

[8] 高一丹, 张步涵. 并网双馈风力发电机组的建模与仿真 [J]. 湖北工业大学学报, 2010, 25(1): 75-80.

[9] 苏常胜, 李凤婷, 晁勤, 等. 异步风力发电机等值及其短路特性研究 [J]. 电网技术, 2011, 35(3): 177-182.

[10] 李环平, 杨金明. 基于 PSCAD/EMTDC 的大型并网风电场建模与仿真 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 62-66.

[11] L. M. Fernandez, C. A. Gareia, J. R. Saenz. Equivalent Models of Wind Farms by Using Aggregated Wind Turbines and Equivalent Winds [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 12(4): 691-704.

[12] 孙蕾. 变速恒频风力发电机组建模与控制策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009: 47-52.

[13] Daniel J T, Andrew G, Jawad M K and Eric M. Petritz. Fixed-speed Wind-generator and Wind-park Modeling for Transient Stability Studies [J], IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1911-1917.

[14] 张慧群. 基于遗传算法的风电场异步发电机动态等值研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007: 23-31.

作者简介:

李智才(1986) 男, 硕士研究生, 研究方向为洁净能源发电与风电并网技术;

李凤婷(1965) 女, 教授, 工学博士, 硕士生导师, 研究方向为风电并网技术与电力系统继电保护。

(收稿日期: 2012-05-11)

# 四川电网二次设备在线监视与分析系统实用化浅析

陈 愚

(四川省电力公司,四川成都 610041)

**摘 要:** 四川电网二次设备在线监视与分析系统以智能调度技术支持平台为基础,为电网调度专业人员分析处理电网故障和继电保护信息提供实时和便捷的技术手段。介绍了该系统建设及运行的总体概况和采用的技术路线,并对该系统主站结构及其功能模块、子站结构及其软硬件配置、主子站通信规范等内容进行了论述。

**关键词:** 二次设备在线监视与分析系统; 继电保护; 主站; 子站

**Abstract:** The online monitoring and analysis system of secondary equipment in Sichuan power grid is based on the platform of intelligent dispatching technology, and it provides the real-time and convenient technical means for grid dispatchers to analyze and deal with the grid fault or relay protection information. The general situation and the adopted technical approaches for the system construction and operation are briefly introduced. The structure of master station and its functional modules, the structure of sub-station and its hardware and software configuration, and the communication specifications of these two stations are discussed.

**Key words:** online monitoring and analysis system of secondary equipment; relay protection; master station; sub-station

中图分类号: TM762 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0046-03

## 0 引 言

四川电网智能调度技术支持系统(D5000平台)的功能模块之一——二次设备在线监视与分析系统从2011年4月正式启动建设。系统主站(简称主站)在省调端设置,在地调端设置分站,在厂站端设置子站(简称子站)。目前,省调主站、15个子站已投入运行。该系统实时收集变电站运行和故障信息,通过对变电站故障信息的综合分析,为电网调度部门快速了解电网故障情况,分析和处理事故提供科学依据,确保电网的稳定运行。

## 1 技术路线

在D5000总体设计及应用功能规范的基础上,按照“一体化、及时性、实用性”的技术路线进行二次设备在线监视与分析系统的开发和实施。

### 1.1 一体化

充分共享D5000平台提供的一次设备公用模型、数据及维护工具,建立一次、二次设备的关联关系,充分发挥平台高效、稳定、功能强大的特点。

### 1.2 及时性

主站直接与子站通信,及时获得二次设备信息,当二次判断出现电网故障时,即把故障概要先在实时告警显示并及时发送到I区综合智能告警模块,然后随着时间推移,把子站上送或召唤获得的更多故障细节信息如录波文件等不断充实到故障报告中。

### 1.3 实用性

构建实用、高效的二次设备监视管理和分析工具,二次设备配置数据直接从子站召唤获得,自动建立二次设备模型;二次模型遵循IEC 61850规范<sup>[1]</sup>,同时充分兼容大量实际运行中的非IEC 61850建模的保护设备;对保护检修时大量上送而又没有带检修标识的保护动作信息加以识别和特殊处理;提供波形分析等丰富的故障分析手段。

## 2 主站系统功能及结构分析

主站系统总体分为前置通信、数据处理和控制服务、综合操作界面、在线故障处理、历史存储和查询、二次告警服务和二次应用告警客户端、与综合智能告警应用通信、波形分析工具、配置工具等主要功

能模块<sup>[2]</sup> ,如图 1 所示。

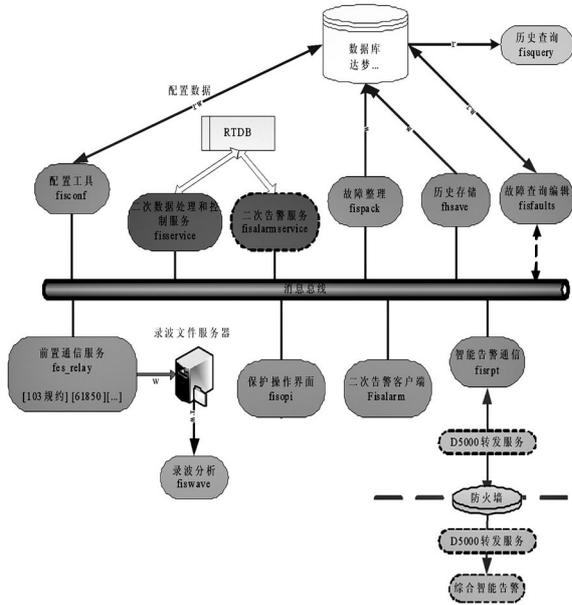


图 1 二次设备在线监视与分析系统模块图

前置通信、数据处理和控制服务、在线故障处理、二次告警服务、历史存储均部署在基础平台 D5000 服务器端,长期不间断运行,其他模块可在服务器端运行,也可在 workstation 运行,由用户按需要启动或关闭。主站所有模块均部署在安全 II 区。

### 3 子站系统技术分析

#### 3.1 系统结构

子站系统将变电站内各微机保护装置组网,保护子站包含通讯服务器、数据服务器、就地显示管理工作站。微机保护由保护子站统一管理,保护信息经保护子站处理后,发往省调主站或地调分站;保护通讯接口单元用于给站内监控系统发送保护信息。子站保护组网应满足双网结构,通过 IEC 61850 标准接入保护子站系统。保护子站要求使用服务器,满足双网配置。整个子站系统网络结构清晰,并预留监控系统获得数据的网络接口<sup>[3]</sup>。

#### 3.2 子站系统硬件配置

子站主机存储和数据处理能力应满足本变电所的远景要求,就地历史数据存储能力 $\geq 7$ 天。设备与子站通信,同小室内采用以太网直接连接,跨小室设备的以太网口集中后经光缆连接。嵌入式子站宜配置后台计算机用于存储历史数据和就地显示。子站应具备与数据网设备的接口。子站具有接收 GPS 对时接口,能接收站内 GPS 系统的 IRIG - B 或分、

秒脉冲对时信号。子站应根据保护的接口形式,配置相应的通信接口,并预留远景设备接入接口。

#### 3.3 子站功能分析

##### 3.3.1 信息采集

子站对信息定义和描述必须满足完整性和唯一性的要求,即每条信息所描述的事件必须能完全对应于装置在实际电网中与一次、二次设备的关联性。信息子站应能采集以下几种信息:保护动作信息、装置自检及告警信息、子站系统本身的异常、保护装置与子站系统之间的通信异常信息、保护运行信息,包括模拟量和开关量状态、保护的当前定值区定值、保护的开关量变位信息、保护装置录波信息。

##### 3.3.2 信息存储

子站本地管理工作站应选用运行稳定的数据库管理系统,存储能力至少应满足 1 年的运行数据要求。所存储的信息应包含微机保护装置的实时上送信息、设备当前的设定值与状态信息、子站系统自检和子站系统管理信息。所存储的信息应分类,能适应主站根据事件、时间、设备名等进行的调用。

##### 3.3.3 信息分级上送及过滤

子站上送信息应分为 3 级。第 1 级:保护动作事件信息和保护故障录波简报实时上送主站;第 2 级:对装置自检和告警信息,也要求实时上送,但上送优先级低于第 1 级;第 3 级:对保护录波文件、保护定值等根据主站需要随时向子站召唤,子站随之响应并上送所需的信息。此外,子站系统应具备对数据分析后再决定是否向主站传送的能力,即将现场运行中大量存在的启动信息过滤掉,能够对保护检修状态和运行状态下的信息进行识别,分类上送。

### 4 主站与子站通信技术分析

#### 4.1 链路层

网络方式下,链路层传输由底层网络 TCP/IP 协议实现。主站与子站之间使用 TCP 协议交换信息,通信链路采用 103/104 标准。主站作为连接的客户端,子站作为连接的服务器端,即端口监听者;使用 TCP 连接的端口号应是可配置的,一个子站仅使用一个端口号。

#### 4.2 应用层

应用层是系统中主站与子站之间数据通信的核心,应用层结构采用 APDU 格式,如图 2 所示。图中

APCI 的定义与 104 标准相同,启动字符 68 H 定义了数据流的起始点,ASDU 中各部分含义与 103 标准相应章节对照一致,具体说明请参见 103 标准。

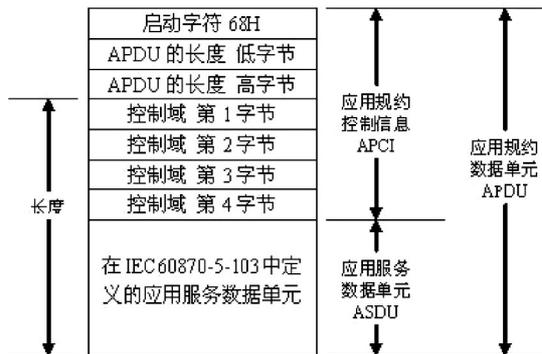


图 2 APDU 结构示意图

### 4.3 主站与子站信息规范

为了正确地传递和解释信息,主站、子站对于装置信息量的含义、格式等必须理解一致。由于 103 标准提供通用服务,信息可以自描述,因此可以通过通用服务传递信息配置表,只要子站作好配置后,主站直接调配置,以确保信息定义的一致性。系统主-子站通信信息可以分为状态量、模拟量、数据文件和其他信息 4 大类<sup>[4]</sup>。由于采用 103 标准,通信双方协商和适应的东西较多,主站与子站信息的传送方式和格式需要明确、唯一的规定。

#### 4.3.1 状态量信息

状态量主要有装置动作信息、装置开入量信息以及装置(包括子站)内部产生的异常告警信息等。状态量信息可能是突发的、暂态性的,如动作信号;也可能是持续性的,如开入量所对应的触点位置。从主站端来说,对暂态性的状态量一般只要求其在从 OFF→ON 变化时上送,而对于持续性状态量,不但要求信号的两种变化(从 OFF→ON 和 ON→OFF)都要送,而且定时通过召唤来获得其当前状态,因此,103 标准要求子站对状态量要加以区分。

#### 4.3.2 模拟量信息

模拟量主要是装置量测的电压、电流、功率、频率、故障点距离等信息。由于各种装置所量测的信息不统一,因此模拟量信息全部应采用通用服务上送。所有模拟量上送均以 IEEE 标准 754 短实数 R32.23 编码的工程值,模拟量的量程、格式转换等工作应由子站完成。

### 4.3.3 故障录波数据及文件传输

故障录波数据由子站从保护装置收集,格式化为符合 COMTRADE 99 版标准的数据文件并保存到子站历史数据库。当电网发生故障时,主站通过召唤命令直接获取所需的录波文件。此外,主站也可以先通过召唤获得故障录波文件列表,再选择召唤所需要的录波文件。

### 4.3.4 其他信息

其他信息主要有定值、带参数的保护动作报告、操作过程及结果记录、行波测距结果以及其他带有状态量、测量值、字符串等的信息。由于这些信息内容复杂、格式不一、很难规范,采用通用服务来传输。

## 5 结 语

二次设备在线监视与分析系统遵循智能电网调度技术支持系统的总体设计和功能规范,发挥技术支持平台的优势,通过采用前置服务与子站通信、召唤子站配置及自动建模、故障分析工具等技术手段,实现了基于智能调度技术支持系统的二次设备在线监视和分析功能。该系统实际运行情况表明,主站系统的操作简单方便,主-子站通信及服务器工作状态稳定,该系统实用化程度得到大幅提高。

### 参考文献

- [1] IEC 61850, Communication Networks and Systems in Substations [S].
- [2] 章坚民,朱炳铨,赵舫,等.基于 IEC 61850 的变电站子站系统建模与实现[J].电力系统自动化,2004,28(21):43-47.
- [3] 黄树帮,叶留金,袁宇波,等.电网继电保护及故障信息处理主站系统的设计和实现[J].电力系统自动化,2004,12(16):12-15.
- [4] 高翔,张沛超,章坚民.电网故障信息系统应用技术[M].北京:中国电力出版社,2006.

作者简介:

陈 愚(1980),工程师,从事电网继电保护运行管理工作。

(收稿日期:2012-06-11)

# 基于混合遗传神经网络的电动汽车 充电站最优选址的研究

李海峰<sup>1</sup> 康中敏<sup>2</sup>

(1. 四川电力送变电建设公司送电工程第二分公司 四川 成都 610065; 2. 成都电业局 四川 成都 610021)

**摘要:** 为了选择电动汽车的最优充电站址,提出了一种基于混合遗传神经网络的评价方法。首先利用 Delphi 法建立起充电站候选站址综合评价指标体系,然后用专家评价法对其打分,并且将获得的数据进行标准化,再应用自适应遗传算法优化神经网络的连接权值,利用三层神经网络对该指标进行评价,最后利用暂态误差方法,确定最优结果。用某实际算例证明了该方法的良好实用性。

**关键词:** 电动汽车站址; 最优选择; 标准化; 遗传算法; 神经网络

**Abstract:** In order to select the optimal location of electric vehicle, a kind of evaluation method based on hybrid genetic artificial neural network is proposed. First of all, Delphi method is used to establish the comprehensive evaluation index system of candidate charging stations, then the index system is marked by expert evaluation method and the obtained data are standardized. And then, the self-adaptive genetic algorithm is applied to optimize the link weight of neural network, and three-layer neural network is utilized to evaluate the index. At last, the transient error process is used to confirm the optimal result. An actual example has proved the favorable practicability of this proposed method.

**Key words:** station of electric vehicle; optimal selection; standardization; genetic algorithm; artificial neural network

中图分类号: TM715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0049-04

## 0 引言

全球环境的日益恶化以及石油资源的日趋紧张,电动汽车作为新型能源交通工具越来越受到关注,对大规模电动汽车应用的探索和研究已成为一大热点。2010年初,国家电网提出了将在国家电网范围内 27 个省市(区)全面推进电动汽车充电站建设的要求。而到目前为止,国内外在充电站选址方面的研究还处于初级阶段,尚未形成完整、系统的充电站选址模型和方法。现有的充电站选址模型一方面比较粗糙,另一方面在确定候选站址时考虑的因素也不够全面<sup>[1-3]</sup>。因此分析和探讨如何进行电动汽车充电站的最优选址对电动汽车产业的推广具有重要的理论指导意义。

从定量建模的角度出发,根据电动汽车充电站的具体情况,选取影响站址最优选择的相关因素,建立了充电站候选站址综合评价指标体系,并且应用混合遗传神经网络(HyGANN),采用改进的遗传算法优化神经网络权系数方法,使之成为候选站址的

最优选择器,得到电动汽车充电站址选择的最优结果,并通过了相应的算例来说明该指标和算法的有效性。

## 1 充电站选址的评价指标体系

### 1.1 评价指标的建立

根据电动汽车充电站的具体情况,选取影响站址最优选择的相关因素,建立初始评价指标体系,采用 Delphi 法<sup>[4]</sup>,利用专家的知识、经验和个人观点对初始评价指标体系进行匿名评选,提出修改意见。各个专家按预先制定好的评价指标重要程度等级及量值,对初始评价指标体系中的各个指标进行重要程度评价,采用专家意见集中度和离散度两个值作为确定评价指标的标准。

假设初始评价指标体系中某层有  $U$  个指标,由  $V$  个专家对其进行评选,指标重要程度等级级数为  $N$  (一般取值为 5)。

专家意见集中度采用加权平均的方法计算,即

$$E_i = \frac{1}{V} \sum_{j=1}^N n_{ij} E_j \quad (1)$$

(i = 1, 2, …, U; j = 1, 2, …, N)

专家意见离散度用标准差的方法计算为

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{V} \sum_{j=1}^N n_{ij} (E_i - E_j)^2} \quad (2)$$

(i = 1, 2, …, U; j = 1, 2, …, N)

式(1)、(2)中  $E_j$  为指标第  $j$  级重要程度的量值;  $n_{ij}$  为将第  $i$  个指标评价为第  $j$  级重要程度的专家人数。

根据充电站的实际情况,选取  $C_1 - C_{10}$  为候选站址的评价指标。 $C_1 - C_3$  指标主要从交通便利性出发,考虑了在城市主要进出道路和车流量特别大的道路沿线,充电站设置间距应相对较密,来保证电动汽车的连续行驶;  $C_4 - C_6$  考虑充电站的运行成本和维护成本;  $C_7 - C_8$  指标充分考虑本区域的输配电网现状,充电站需要高功率的电力供应,需要城市电网为充电站运营提供可靠的电力供应,保证充电站电能供应的稳定性和安全性;  $C_9 - C_{10}$  从考虑了电动汽车在大电流集中充电过程中,站台、线路、变电站附近的高压电磁辐射对周边环境和人体健康造成影响、工作时产生的谐波电流造成电能质量的降低和短时负荷变化太快的原因,所产生的冲击电压也可能对电网造成影响。依据专家意见集中度和专家意见离散度,最终建立起充电站候选站址综合评价指标体系,如图 1 所示。

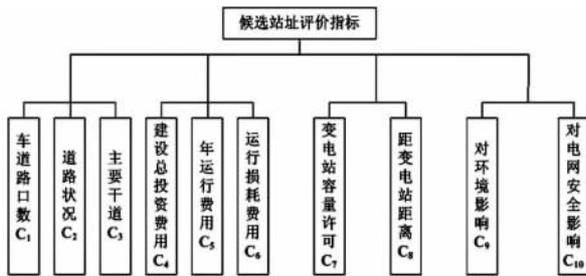


图 1 候选站址评价指标体系

### 1.2 评价指标中数据的标准化处理

根据电动汽车候选站址的评价体系,在对站址进行综合评价时,设有  $m$  个被评站址,每个站址有  $n$  个评价指标,则评价指标矩阵为

$$X = (x_{ij})_{m \times n} \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。式中  $x_{ij}$  表示第  $i$  个被评价站址的第  $j$  项指标的实际值。由于各指标具有不同的量纲且类型不同,既有定性指标又有定量指标,指标间的不可公度性,故在综合评价前

需将其按照一定的函数关系式归一化到某一无量纲区间<sup>[5]</sup>。

设  $\max x_{ij} = a_j$ ,  $a_j$  为  $j$  项指标的最大值;  $\min x_{ij} = b_j$ ,  $b_j$  为第  $j$  项指标的最小值。

对于成本型指标,即指标值越小越好,令

$$y_{ij} = \frac{a_j - x_{ij}}{a_j - b_j} \quad (4)$$

对于适度型指标,即指标值以稳定在某一固定值为最佳的指标,令

$$y_{ij} = \frac{1}{1 + q - x_{ij}} \quad (5)$$

$q$  为该指标的最合适值。

## 2 改进遗传算法训练神经网络权系数

遗传算法(genetic algorithm, GA)<sup>[6]</sup>是模拟达尔文进化的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程的计算模型。通过遗传算子模拟遗传过程中所出现的复制、交叉、变异等现象,对种群个体逐代择优,从而最终获得较优个体。算法实质上是一种在解空间中搜索与环境最匹配解的自适应方法。由于它对噪声和变化具有较强的鲁棒性和良好的自适应能力,具有并行处理以及不受问题性质(如连续性、可微性)限制等显著特点。

### 2.1 初始群体确定

确定初始群体是 GA 的一个重要方面,若各个染色体之间的差异很小,会使种群失去多样性,导致算法早熟,从而使 GA 的全局优化功能失效,这里改进选种方法,利用范数来度量群体中各染色体之间的差异,范数<sup>[7]</sup>定义如下。

$$H = \|x_i - x_j\| = \left[ \sum_{l=1}^m (x_{il} - x_{jl})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

其中  $m$  为染色体的基因位数;  $x_i, x_j$  为群体中的两个不同的染色体,  $H$  越大,两点之间的相似性越差,反之相似性越好。该选种策略即确定一个染色体作为基准,求得群体中其他染色体与基准染色体的距离  $H$ ,使之大于事先设定值,使各染色体之间有较大的差异,从而保证初始群体的多样性,进而保证 GA 能搜索到全局最优解。

### 2.2 编码方案

对于神经网络来说,GA 所处理的个体是单一网络,所设计的参数即网络节点之间的连接权值均为实数。标准 GA 所处理的参数是采用二进制编码的整数,但是却引入了量化误差,使参数变化为步

进,同时该编码方式占用较大的存储空间,且再解码上耗时过多,使计算性能下降。因此这里采用遗传操作简单,编程容易实现的实数编码。具体表达式如下。设  $x_i$  为一染色体,令

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}) \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (7)$$

其中  $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}$  是随机产生的在  $[x_{\min}, x_{\max}]$  的  $m$  个实数,称为染色体基因。每个基因  $x_{iL}$  代表一个连接权,该染色体代表一个网络。 $P$  是 GA 的群体规模。

### 2.3 自适应选择

选择算子是遗传算法的关键,它来源于自然界适者生存的思想。经典遗传算法中当种群接近收敛时,个体之间适配值相差较小,直接根据适配值决定选择概率会导致更优良的串在竞争中体现不了优势,从而导致遗传算法求解精度低。由此提出如下选择策略。

挑选出种群中的最小适配值,将种群中所有个体的适配值都减去该最小适配值,然后根据新的适配值采用轮盘赌法进行选择。该策略在计算过程中动态改变了每个串的适配值,符合个体生存环境改变,评判标准也随之发生变化的自然规则。

### 2.4 杂交算子

选择算子在提高了群体的平均适应度的同时又以损失群体的多样性为代价的,为解决这个问题,遗传算法又引入了杂交算子和变异算子。杂交算子体现了自然界中信息交换的思想,它每次作用在随机选择的两个个体上,使这两个个体的某一段基因互换,产生两个新的个体,提高了群体的多样性,从而增大了搜索空间,有效地避免了局部最优。这里采用的杂交策略是一种适合于实数编码的杂交方法:产生一个  $(0, 1)$  之间的随机数  $\theta$ ,在新产生的群体中随机选择两个染色体  $x_1, x_2$  进行杂交,得到两个新染色体为

$$\begin{cases} x^1 = \theta x_1 + (1 - \theta) x_2 \\ x^2 = \theta x_2 + (1 - \theta) x_1 \end{cases} \quad (8)$$

### 2.5 自适应交叉和变异

交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$  的确定是遗传算法行为和性能的关键,直接影响算法的收敛性。这里用适应度来衡量算法的收敛状况,对于适应度高的解,取较小的  $P_c$  和  $P_m$ ,使该解进入下一代的机会增大;而对于适应度低的解,则取较高的  $P_c$  和  $P_m$ ,使该解被淘汰掉;当成熟前收敛发生时,加大  $P_c$  和  $P_m$ ,加快新个体的产生。由于进化初期种群中的较

优个体几乎处于一种不发生变化的状态,而此时的优良个体不一定是优化的全局最优解,这容易使进化趋于局部最优解的可能性增加。为此,做进一步的改进,使群体中最大适应度值的个体的交叉率和变异率不为零,分别提高到  $P_{c2}$  和  $P_{m2}$ ,以便相应提高群体中表现优良的个体的交叉率和变异率,防止它们处于一种近似停滞不前的状态。为了保证每一代的优良个体不被破坏,可以运用精英选择策略,是它们直接复制到下一代中。

经过上述改进后  $P_c$  和  $P_m$  的计算公式可由式 (9) 确定。

$$\begin{cases} P_c = \begin{cases} P_{c1} - (P_{c1} - P_{c2}) (f_c - \bar{f}) / (f_{\max} - \bar{f}) & f_c \geq \bar{f} \\ P_{c1} & f_c < \bar{f} \end{cases} \\ P_m = \begin{cases} P_{m1} - (P_{m1} - P_{m2}) (f_{\max} - f_m) / (f_{\max} - \bar{f}) & f_m \geq \bar{f} \\ P_{m1} & f_m < \bar{f} \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $f_c$  是要交叉的两个个体中适应度大的一个;  $f_m$  是变异个体的适应度;  $\bar{f}$  是群体的平均适应度;  $f_{\max} - \bar{f}$  体现了群体的收敛程度;在进化初期使  $P_{c1}$  有较大的交叉概率,进化后期使  $P_{c2}$  不为零,以便提高群体中表现优良的个体,同理  $P_{m1}, P_{m2}$  的取值依据也类似。因此根据相关文献<sup>[8-9]</sup> 和经验,取  $P_{c1}, P_{c2}, P_{m1}, P_{m2}$  的值 0.6、0.3、0.35 和 0.005。

此处用权值变异算子,具体变异操作为:产生一个  $[1, m]$  上的整数  $r$  及  $[x_{\min}, x_{\max}]$  上的随机数  $x$ ,将该数加到染色体  $x_i$  的第  $r$  位基因  $x_{ir}$  上,从而产生一个新的染色体。

## 3 混合遗传神经网络的设计

理论上三层前向神经网络可以任意精度逼近任何复杂函数。将候选站址指标中经过标准化的数据作为输入,通过神经网络对站址做出评价。该网络是三层结构,隐层和输出层均采用 S 形函数,网络输出为  $y(k)$ 。根据文献 [10],并结合实验确定隐神经元数目,网络结构含 10 个输入节点。隐节点输入-输出关系式由下式确定。

$$O_i(k) = f\left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(k) x_j(k)\right) \quad (10)$$

其中  $f(s) = \frac{1}{1 + e^{-s}}$ ,  $k$  是连续时间步幅,  $a_{ij}$  是从第  $j$  个

表 1 实例数据

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$
候选站址一	0.744	0.676	0.717	0.685	0.711	0.806	0.697	0.747	0.833	0.812
候选站址二	0.713	0.703	0.718	0.651	0.699	0.666	0.721	0.689	0.677	0.749
候选站址三	0.723	0.671	0.625	0.724	0.689	0.654	0.683	0.685	0.644	0.635

输入节点到第  $i$  个隐层节点权值。网络输出表达为

$$y(k) = f\left(\sum_{i=1}^h b_i(k) O_i(k)\right) \quad (11)$$

其中  $y$  是各个候选站址的综合评价价值;  $b_i$  是第  $i$  个隐层节点到输出节点的权值。

### 4 实例验证

对某欲规划建设电动汽车充电站的具体情况进行分析,本实例中有 3 个候选站址,将从实例中 3 个候选站址所获得的与图 1 中的 10 个指标有关的数据,利用文献 [11] 中建立的相关充电站模型的目标函数和约束条件,计算得出实际值,然后采用 Delphi 法,根据欲规划建设的充电站的实际情况,由专家对体系中相邻上下层各要素间的重要程度进行评估、打分。如对评价指标  $C_{10}$  (充电站建设对电网安全运行影响的可接受程度): 候选站址 1 邻近一个变电容量较大的变电站,能满足充电站的电能需求并且对电网安全运行影响较小; 候选站址 2 能可靠接入一变容量较大的变电站,但距离稍远,线路损耗稍大; 候选站址 3 通过接入邻近的两个容量较小的变电站来获取电能,供电可靠性较高,线路损耗小,但充电站的高峰负荷可能对这两个变电站造成一定的负载压力。各专家依据自身的知识、经验和个人观点,在 1~20 分的范围内,依次对各候选站址针对评价指标进行打分,然后将其标准化得到各评价指标的评价指标值矩阵数据,如表 1。

将其作为神经网络的输入,采用暂态误差方法确定了最优目标值,误差精度达到了 0.01%,得到了候选站址 1 的合理性综合评价价值最大,故候选站址 1 为该欲规划建设充电站的最优站址。

### 5 结论

电动汽车充电站最优选址问题本质是一个非线性寻优问题。利用自适应 GA 方法确定神经网络连接权值,然后将其与暂态误差预测技术融合的复合

遗传神经网络方法来研究站址的最优选择,弥补了传统方法在面对非量化信息多以及评价人员主观因素影响等问题时的不足,适用于单目标和多目标的大范围搜索空间的最优决策问题,具有很强的可操作性。实例证明该方法为电动汽车充电站站址最优决策提供了新的实用性方法。

### 参考文献

- [1] 徐凡,俞国勤,顾临峰,等. 电动汽车充电站布局规划浅析[J]. 华东电力, 2009, 37(10): 1678-1682.
- [2] 吴春阳,黎灿兵,杜力,等. 电动汽车充电设施规划方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(24): 36-39.
- [3] Zhen Huajiang, Roger A. Design and Testing of a Fuel-cell Powered Battery Charging Station [J]. Journal of Power Sources, 2003, 115(2): 279-287.
- [4] 王连芬,许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.
- [5] 杨保安,张科静. 多目标决策分析理论、方法与应用研究[M]. 上海: 东华大学出版社, 2008.
- [6] 王耀南. 智能信息处理技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [7] Takahashi O, Kita H, Kobayashi S. A Distance Alternation Model on Real-coding Genetic Algorithm [C]. IEEE SMC (System, Man, and Cybernetics) Conference Proceedings, 1999(1): 619-624.
- [8] 卢长娜,王如云,陈耀登. 自适应遗传算法[J]. 计算机仿真, 2006, 23(1): 172-175.
- [9] 赵丽娜,刘培玉,朱振方. 自适应遗传算法在特征选择中的改进及应用[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(7): 39-41.
- [10] Noboru Murata, Shuji, Yo shizawa et al. Network Information Criterion - determining the Number of Hidden Units for an Artificial Neural Network Model [J]. IEEE Transaction on Neural Network, 1994, 5(6): 865-872.
- [11] 刘志鹏,文福栓,薛禹胜,等. 电动汽车充电站的最优选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 54-59.

作者简介:

李海峰(1971)男,四川电力送变电建设公司送电工程第二分公司,长期从事电力工程建设。

(收稿日期:2012-04-01)

# 电力系统外网一种控制个人移动设备的网络准入实现

母继元

(广元电业局,四川 广元 628000)

**摘要:**通过分析新形势下电力系统外网个人移动设备接入的特点,对传统的两类准入控制方式进行了探讨,并结合四川广元电力ASM准入平台的实例提出了一种更适合移动设备接入管理的网络准入实现方式。

**关键词:**网络准入控制;策略路由;802.1x;web重定向;DAI

**Abstract:** The characteristics of BYOD (bring your own device) are analyzed when accessing to the external network of power system and two traditional network admission control (NAC) techniques are discussed. Based on the actual example of ASM NAC platform in Guangyuan power system, a more effective NAC implementation for mobile devices accessing in management is put forward.

**Key words:** network admission control (NAC); policy-based route (PBR); 802.1x; web redirection; dynamic ARP inspection (DAI)

中图分类号: TM732 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)04-0053-03

随着电力系统信息化建设的不断发展,其网络规模也在不断扩大,随之而来的各种安全问题也日渐突出,尤其是网络内部的接入计算机或接入设备往往成为威胁的源头。目前电力系统外网管理中较为普遍的安全问题包括:①无法发现是否有非法用户进入外网占用网络资源;②无法对入网人员进行身份验证,进而无法统计入网的员工数量和每日的来宾数量;③无法控制来宾用户的访问权限;④无法要求所有终端遵守电力系统外网管理的基本安全规范,如安装杀毒软件、必须运行某些程序,必须更新windows操作系统补丁等。

为了解决上述问题,在部分电力系统中目前采用了较为流行的网络准入控制(network access control, NAC)来防止非法用户入网。网络准入控制方案可以只允许合法的、值得信任的端点设备(例如PC、笔记本)接入网络,而不允许其它不符合要求(未通过认证、安全性不符合要求等)的设备接入。但随着消费化电子浪潮的影响,在电力系统内购买和拥有最新型的个人移动设备的趋势(bring your own device, BYOD)日益增长,包括iphone、ipad、android等各种系统都已经频繁出现在电力系统外网的日常接入中,在这样的新形势下,传统的网络准入技术由于响应速度慢或者需要安装客户端等问题已经无法满足日益发展的安全需要。通过传统准入方式与四川广元电力所采用的一种新型准入平台的比

较,希望能够为电力系统外网个人移动设备的管理提供一种更具通用性、更有效的网络准入实现方法。

## 1 电力系统外网传统准入控制方式的弊端

目前电力系统外网中比较常见的防止非法接入的网络准入方式有如下两种。

传统技术1: DHCP结合IP-mac绑定的控制方案

由于在电力系统外网中大量采用了DHCP的IP地址分配方式,因此较多单位在初期考虑实现准入控制的时候也是以DHCP为出发点的。当网络中假设好了DHCP服务器后,可以依据入网的mac地址来自动分配IP,而为了防止私自更改IP及网络中出现非法的mac地址接入,则需要借助交换设备已有的一些安全属性如DHCP snooping和DAI(dynamic arp inspection)来实现IP-mac绑定。而采用DHCP结合IP-mac绑定的控制方式,其本质是基于mac地址也即是设备硬件地址的,对于目前电力系统外网的安全接入规范要求以及个人移动设备接入的管理而言,具有较多的安全管理弊端。

1) 没有对使用设备的人员进行身份认证的步骤;

2) 命令配置量过多,对技术运行维护人员的要求较高,网络中很多早期的交换设备并不支持DAI

技术,在实际使用中的适应性和可推广性较差;

3) 对于外来需要入网的移动设备,比如来宾设备或员工自带的移动设备(BYOD),无法预先做到 mac 绑定,因此很难快速响应入网请求,这就极大地影响了工作业务的开展,很多电力单位因为这个原因停用了 DHCP 结合 IP - mac 绑定的准入;

4) 由于全部管理都是采用交换机静态命令行的方式进行配置的,在大量个人设备经常性移动办公或入网的情况下,无法预先灵活地设置例外设备,或依据权限或用户的变化自动调整安全策略, telnet 到交换设备进行变更时响应的效率非常低。

5) 整个技术本身并没有提供进行设备安全性检查的实现方法,这一点就容易导致很严重的潜在安全漏洞,对于电力系统外网用户而言,由于大部分的设备都是与公网直接相联的,尤其是在大量个人移动设备入网的情况下,安全性一旦无法得到有效评估,对于整个系统的安全管理将可能产生严重的后果。

#### 传统技术 2: 标准 IEEE 802.1x 方案

802.1x 称为基于端口的访问控制协议(port-based network access control protocol),IEEE 802.1x 技术由于是国际标准协议,因此大部分的主流厂商接入层交换机都能够予以支持,并且在目前的电力系统外网中也得到了部分应用,但随着安全趋势的不断发展,802.1x 体系也逐渐显示出了无法满足个人移动设备逐渐增多的安全管理问题。

1) 安装客户端软件来实现准入控制的方式在应对个人移动设备接入时可用性差,基本上没有可操作性;

2) 电力系统外网在很多单位都存在 hub 接入的问题,但是由于交换机设备对 802.1x 支持的固有特性,大部分单位无法做到 802.1x 与 hub 接入共存;

3) 命令配置量过多,每台交换机上的配置量比前一种传统准入技术还要多,对技术运行维护人员的要求较高;

4) 无法预先灵活地设置例外设备,或临时调整安全策略。在个人移动设备经常性移动办公或入网的情况下,无法依据需要对特殊设备临时放开 802.1x 端口,任何人、任何设备都必须安装客户端、必须认证的管理策略在众多个人移动设备入网的环境下很难真正应用起来。

5) 与第一种传统准入技术相似的是,整个 802.1x

技术本身并没有提供具体的进行设备安全性检查的实现方法,同样容易导致很严重的潜在安全漏洞。

综上所述,在当前多样复杂的电力系统外网接入环境中,有必要采用更新型的网络准入实现来解决大量个人移动设备接入的问题。

## 2 一种新型准入控制方式在电力系统外网的应用

依据目前在四川广元电力公司外网中采用的部署实例(如图 1 所示),可以提供一种更有效的新型准入控制实现,并更好地满足当下电力系统外网接入的特点。

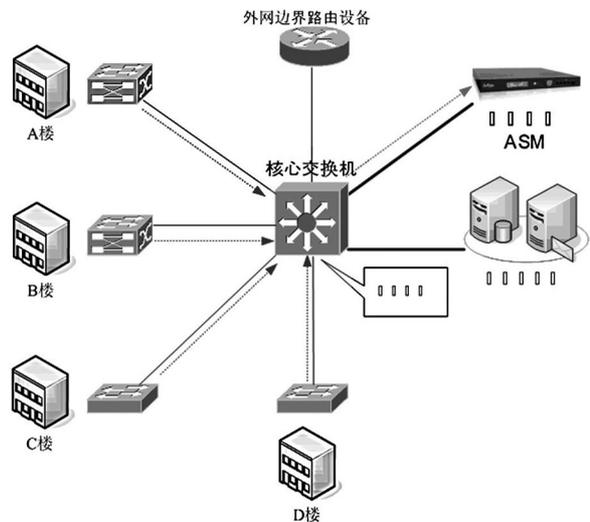


图 1 四川广元电力外网准入部署示意图

在该准入部署方式中,采用了杭州盈高科技公司的准入平台 ASM(入网规范管理系统),准入设备 ASM 采用旁路方式接入到电力外网核心交换机上,并且在核心交换机上利用通用的策略路由(PBR)来实现 3 层引流。

#### (1) 广元电力外网准入方案的实现方法

策略路由 PBR 由于位于 IP 层,在做 IP 转发前,如果报文命中某个策略路由对应的规则,则要进行相应的策略路由的动作。在广元电力中采用的基于策略路由 PBR 的准入方案是在核心交换机上利用 ACL 捕获所有访问核心业务服务器以及外网的无差别数据流量,并通过已经配置好的 route-map 将捕获的流量引入网络中的 ASM 准入设备,最终由 ASM 准入设备来控制所有需要访问核心交换机后资源的数据流量,采用 web 重定向的方式推送认证和安全检查页面到用户的接入设备上。这种对于无差别流量的控制,其设计思路就在于各种个人移动

设备,不管是 iphone、ipad 还是 android 等非 windows 系统都自带了 web 浏览器,能够支持 http 协议,因此实现了既不需要安装客户端,又能够保证身份认证和安全检查的双重保护目的。

#### (2) 广元电力外网准入方案的管理流程

①各种个人移动设备及内部台式机在接入外网时,启动在 web 页面上获得入网的提示,并且必须通过管理员的审核;

②各种个人移动设备及内部台式机在 web 页面上进行身份认证,可以设置来宾设备或特殊设备不需要进行身份认证,但只授予有限访问区;

③可以在接入设备入网前检查其是否安装杀毒软件、是否运行了必须的程序,以及是否更新了系统补丁( windows 设备);

④入网后能够依据用户的认证角色派发其访问权限,例如只能访问特定服务器,非管理员允许不能访问其他网络资源。

#### (3) 广元电力外网准入方案的应用效果

广元电力中利用 ASM 平台实现的准入控制方案,能够很好地区分外网中来自不同部门的终端设备及来宾设备,并能够针对 iphone、ipad、android 等非 windows 系统实现全面的身份认证和访问权限控制,禁止所有非法外来设备接入内部网络,使电力系统外网的安全管理制度得到了有效落实。同时,外网的管理员能够及时了解新设备的入网情况,并控制各个部门以及来宾用户的访问权限,有效落实了电力系统外网的安全管理规范,对网络中的许多安全风险都进行了预防和告警,对网络的正常运行提供了十分有效的安全支撑。

#### (4) 新技术在电力系统外网接入中的应用优势

依据对广元电力外网准入方案的分析,可以看到该新型准入控制方案对其他电力系统外网移动设备接入管理的建设具有很高的参考价值,有如下优势。

①完全不需要安装客户端软件。由于该方案中的认证是通过 web 重定向实现的,因此全部的认证过程都只需要接入设备有支持 http 协议的浏览器即可,在这种情况下,目前电力系统外网中接入的 iphone、ipad、android 等非 windows 系统都可以有效地利用自带的各种浏览器来自动实现认证,入网快速,完全不需要管理员额外的干预,能够节约外网管理员的大量时间和人力成本,更符合新形势下电力

系统外网个人移动设备接入管理的需要;

②由于策略路由技术是基于三层交换的,因此不会与接入层的 hub 连接产生冲突,电力系统外网中已有的 hub 设备可以与准入平台共存,更有利于准入管理的推广,整个技术实现也更贴近实际情况,在目前的网络环境下更为实用;

③命令配置量极少,只需要在核心交换机上配置策略路由即可。对于目前电力系统分布较为广泛的外部网络而言,可以节省大量的配置和实施工作量。

④在该方案中,可以非常灵活的通过 ACL 来控制哪些终端需要受管理,哪些终端是可以例外的,外网管理员可以实现非常灵活的管理效果,比如对内部员工机器进行较为严格的限制,而对部分特殊机器放开网络;

⑤可以灵活地在 web 页面就实现对设备的安全状况检查,这一点完全弥补了电力系统中已有的传统准入技术重认证轻安检的缺陷,能够迅速收集外网中全部个人移动设备的安全信息,并依据管理员预先制定的安全策略自动下发到个人移动设备上,实现权限的有效分配,并自动将高危设备置于外网预先设定的有限访问区内,从而实现了入网安全和主动防御的措施。

### 3 总 结

总体来看,目前电力系统外网新形势下个人移动设备接入管理的需要决定了必须改变传统思路,采用更新型更有效的准入管理方式,针对个人移动设备轻便、灵活、快速的特点提供响应速度更快、策略更灵活和更高效的准入控制功能,这样才能够为电力系统的信息安全管理提供更具可操作性的解决方案。

#### 参考文献

- [1] Tanenbaum A. S. 计算机网络[M]. 北京:机械工业出版社 2011.
- [2] Yusuf Bhajji. 网络安全技术与解决方案(修订版)[J]. 北京:人民邮电出版社 2010.
- [3] 何俊. NAC 准入控制指南[R]. 盈高科技 2012.

(收稿日期:2012-05-29)

# 电流互感器油中氢气产生机理研究

蒋福佑, 袁 鹰

(四川省电力公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** 电流互感器油中单纯氢气含量超过注意值近年来频繁发生, 弄清其氢气来源正确诊断其缺陷属性, 对设备安全运行具有积极意义。了解其氢气产生机理是正确诊断缺陷属性的前提。通过对电流互感器油中氢气产生机理的研究, 发现电流互感器单纯氢气含量超过注意值主要是因为设备材质和制造工艺所致, 并非因设备故障而产生, 并对此类设备的技术监督提出建议。

**关键词:** 电流互感器; 变压器油; 氢气; 注意值

**Abstract:** In recent years, it occurs frequently that pure hydrogen contained in current transformer oil goes over its alert value. It is of positive significance to the safe operation of equipment to find out the source of hydrogen and then diagnose the property of defects. To clarify the generating mechanism of hydrogen is the precondition of correct diagnosis of defect properties. It has been discovered, by study of the generating mechanism of hydrogen in current transformer oil, that the accident of pure hydrogen contained in current transformer over its alert value is mainly caused by the materials and manufacturing process of the equipment, not by the equipment failure. The proposals are put forward for the technical supervision of such kind of equipment.

**Key words:** current transformer; transformer oil; hydrogen; alert value

中图分类号: TM853 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0056-04

近年来, 电流互感器油中单纯氢气含量超过注意值时有发生(所引用的标准皆以国家标准《变压器油中溶解气体分析和判断导则》GB/T 7252-2001)为准, 对成都电网电流互感器单纯氢气超过注意值的设备进行统计发现一度达到40%。据悉同类问题在诸多电业局都普遍存在, 此情况对化学监督工作者提出了考验。

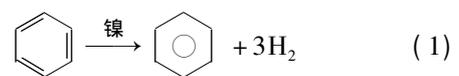
电流互感器油中单纯氢气含量超过注意值主要特征表现在3个方面: 一是烃类和其他组分未见异常, 仅氢气含量超过注意值; 二是设备运行正常, 未发现有过热或放电等故障; 三是油质检测各项指标均正常, 也不存在受潮。电流互感器油中氢气含量超过注意值的原因亟待弄清, 通过研究电流互感器油中氢气产生与运行机理将有助于深入理解原因, 并选择合适的技术监督方案对其进行监督, 以确保设备的安全运行。

## 1 电流互感器油中氢气来源理论探讨

油浸电流互感器一般采用变压器油作为其液体绝缘材料, 变压器油中氢气的来源较为复杂, 存在多

种可能性, 这里着重从变压器油中氢气产生机理来做分析, 以求找到问题的根源。

(1) 环烷烃催化脱氢反应。大多文献都认为电流互感器单纯氢气含量超过注意值是由于加了金属膨胀器(主要材料为奥氏体不锈钢, 含铬、镍等金属元素) 变压器油中环己烷等成分在金属镍催化下发生脱氢反应而生成化学性质更稳定的苯类化合物, 并产生大量的氢气, 故导致变压器油中氢气含量快速增长。反应化学方程式见化学反应式(1)。



(2) 设备受潮水解。也有文献认为主要是由于设备受潮, 导致变压器油中水分的电解是导致氢气含量增长的主要原因。

(3) 设备材质和制造工艺的原因。设备在制造过程中或焊接时吸附氢在运行过程中又慢慢释放出来, 其主要来源是采用奥氏体不锈钢作为材料的金属膨胀器; 其次, 变压器油中有溶解氧时, 设备中某些油漆(如醇酸树脂)在某些金属元素的催化下可能产生氢气, 甚至释放量很大。

(4) 金属置换反应。绝缘油的油质在运行过程

表1 8个变压器油样品的红外吸收光谱测定数据

样品编号	吸收峰 /cm <sup>-1</sup>	振动类型	基团	吸收峰强度
1	2 920.86 2 853.23 ,	C-H 伸缩振动	-CH <sub>2</sub>	s
	1 463.39 1 376.93	C-H 弯曲振动	-CH <sub>3</sub>	m
2	2 920.72 2 853.30 ,	C-H 伸缩振动	-CH <sub>2</sub>	s
	1 463.33 1 376.93	C-H 弯曲振动	-CH <sub>3</sub>	m
3	2 954.22 2 921.33 2 853.31 ,	C-H 伸缩振动	-CH <sub>2</sub> , -CH <sub>3</sub>	s
	1 463.29 1 376.93	C-H 弯曲振动	-CH <sub>3</sub>	m
4	2 924.10 2 853.82 ,	C-H 伸缩振动	-CH <sub>2</sub>	s
	1 458.66 1 376.76	C-H 弯曲振动	-CH <sub>3</sub>	m
5	2 924.16 2 853.85 ,	C-H 伸缩振动	-CH <sub>2</sub>	s
	1 458.69 1 376.88	C-H 弯曲振动	-CH <sub>3</sub>	m
6	2 923.28 2 853.82 ,	C-H 伸缩振动	-CH <sub>2</sub>	s
	1 458.63 1 376.76	C-H 弯曲振动	-CH <sub>3</sub>	m
7	2 923.42 2 853.83 ,	C-H 伸缩振动	-CH <sub>2</sub>	s
	1 458.63 1 376.77	C-H 弯曲振动	-CH <sub>3</sub>	m
8	2 954.10 2 924.57 2 854.46 ,	C-H 伸缩振动	-CH <sub>2</sub> , -CH <sub>3</sub> ,	s
	1 459.03 1 376.74	C-H 弯曲振动	-CH <sub>3</sub>	m

中在不断劣化,不断有酸性物质生成,而这些酸性物质在与金属铁或其他化学性质更活泼的金属相互作用下可以发生化学反应,置换出氢。比如醇羟基官能团(-CH<sub>2</sub>OH)在O<sub>2</sub>存在的条件下可以被氧化生成羧基官能团(-COOH),而后者是一酸性官能团。pH值为5.0的变压器油经金属充分置换后产生的氢气可致油中氢气浓度达112 μL/L。

如上所述,导致油中氢气含量超过注意值的原因应该是多种因素共同作用的结果。对成都电网此类设备单氢高原因分析如下:(1)在对单纯氢气含量超过注意值的近300相电流互感器进行油中水分含量检测未发现一台设备受潮,故基本可以排除设备受潮水解引起油中氢气含量增长;(2)发生单纯氢气含量超过注意值的互感器大部分为刚投入运行时间不长且油质非常好的新设备,油的pH值基本都在6.0以上,酸性非常弱,基本可以排除因变压器油中酸性物质与金属发生置换反应而导致氢气含量增长。鉴于曾发现同厂家同批次投入运行的设备与放置库房备用的设备在出厂一年后同时发现其氢气含量超过注意值的现象,通过分析,认为设备材质与制造工艺是造成电流互感器单纯氢气含量超过注意值的主要原因,环烷烃发生催化脱氢反应的原因亦不能排除。

## 2 油中氢气来源的检测与分析

对电流互感器油中氢气的来源经过第一部分的分析后,认为设备材质与制造工艺和环烷烃发生催

化脱氢反应是主要原因之一。基于此分析,则采取色谱、红外光谱、色谱-质谱法对充装在电流互感器中的变压器油进行了检测分析,检测情况如下。

### 2.1 变压器油在电磁场或金属催化作用下分解产物的检测与分析

电流互感器所用的变压器油通常为芳香基油和石蜡基油两类。石蜡基油中烷烃比例较大,其化学性质比较稳定,抗氧化性能好,但是耐热性能较差,尤其在电场作用下可能会发生烷烃脱氢反应,从油中释放出氢气。此外石蜡基变压器油在受到电磁场的作用下,部分烃分子可能会发生裂解而产生气体,这部分气体以微小的气泡形式从油中释放出来。如果小气泡量增多,它们会相互连接而形成大气泡。由于气体与变压器油之间的电导率有很大的差异,在高电场的作用下,变压器油中会产生气隙放电现象,而油中悬浮微粒及微小气泡可引发局部悬浮电位放电,导致油中氢气含量增高。而芳香基油化学性质稳定,且析气性好,不易产生游离气体,故引发气泡放电的概率更少。

由于电流互感器中使用了一部分不锈钢材料(如金属膨胀器),不锈钢材料中的镍分子可能会促进变压器油发生催化脱氢反应。在各种频率的外加电场作用下,无论是极性分子还是非极性分子,都会被极化而产生诱导偶极矩。由于分子所呈现的极性在反应进程中有利于极性吸附,降低了化学吸附的活化能,比较容易与镍起吸附反应,从而提高了镍的催化活性,有利于提高本来在常温下很慢的反应速度,也有利于其他分子与其反应,因而加快了反应速

度而导致氢气产生速率的增加。

考虑到无论是电磁场或金属促进变压器油的分解,除产生氢气外,还会产生一系列脱氢和裂解产物,如直链烷烃的脱氢裂解产物甲烷、乙烷、乙烯、乙炔、低分子量的烯烃等,以及环己烷脱氢产物环己烯、环己二烯、苯等。为了验证,可通过检测氢气含量超过注意值的使用过的变压器油中是否含有以上脱氢或裂解产物来实现。为此,采用气相色谱仪和红外光谱仪进行检测。

### (1) 气相色谱仪的检测与分析

采用顶空进样法来检查环己烷的脱氢产物环己烯、苯等产物,共分析了 3 个样品(3 个样品都是单纯氢气含量超过注意值且氢气含量超过 500  $\mu\text{L/L}$ )。结果均未检测到环己烯、环己二烯、苯的存在。

### (2) 红外光谱仪的检测与分析

红外光谱仪仪器型号: NICOLET MX-1E FT-IR。采用红外光谱仪检测样品是否有芳香烃、芳酸等的存在。共测试 8 个样品,测定结果见表 1。

光谱解析如下: ①  $2954\text{ cm}^{-1}$ : 甲基 C-H 伸缩振动,  $\sim 2960\text{ cm}^{-1}$ 、 $\sim 2870\text{ cm}^{-1}$  处有吸收,证明结构中有甲基(-CH<sub>3</sub>); ②  $2924\text{ cm}^{-1}$ 、 $2853\text{ cm}^{-1}$ : 亚甲基 C-H 伸缩振动,  $\sim 2925\text{ cm}^{-1}$ 、 $\sim 2850\text{ cm}^{-1}$  处同时有吸收,证明结构中有亚甲基(-CH<sub>2</sub>); ③  $1458\text{ cm}^{-1}$ 、 $1376\text{ cm}^{-1}$ : 甲基的弯曲振动,甲基在  $\sim 1380$ 、 $\sim 1460\text{ cm}^{-1}$  处同时有吸收,亚甲基仅在  $\sim 1470\text{ cm}^{-1}$  处有吸收。证明结构中有甲基(-CH<sub>3</sub>)。

从红外光谱图得知,结构中主要含有甲基,亚甲基,且亚甲基和含量远高于甲基。未检测到有烯键、

芳环、羧基等吸收峰。

气相色谱及红外光谱检测结果提示,变压器油中氢气不应是来自变压器油在电磁场或金属促进作用下的分解所产生。

### (3) 气相色谱-质谱联用仪的检测与分析

在前面气相色谱检测中,样品在保留时间 6.2 min 出现一组分,为进一步验证这一组分为哪些物质,是否为变压器油脱氢或裂解产物,如甲烷、乙烷、乙烯、乙炔、低分子量的烯烃、环己烯等,对样品进行了气相色谱-质谱联用仪的检查(仪器来自中国地质科学院成都矿产综合利用研究所分析测试中心)。

仪器型号: Thermo trail GC ULTRA2000 + DSQ。

色谱柱: Thermo TR-SMS 30 m  $\times$  0.25 mm  $\times$  0.25  $\mu\text{m}$ 。

色谱条件: 柱温  $50\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 10\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 200\text{ }^\circ\text{C}$  (10 min); Inlet Temp  $250\text{ }^\circ\text{C}$ , 不分流进样; Flow 载气 He 流速  $0.6\text{ mL/min}$  constant flow; 顶空瓶 Temp =  $90\text{ }^\circ\text{C}$ ; 进样针 Temp  $100\text{ }^\circ\text{C}$ ; 进样量 1 mL; 质谱仪离子源 EI Temp  $250\text{ }^\circ\text{C}$ 。检测结果见表 2。

经检查,当气化温度小于  $120\text{ }^\circ\text{C}$  时,使用过的变压器油中检测到碳十三烷、碳十四烷、碳十五烷、碳十六烷、碳十七烷、碳十八烷等直链烷烃,还检测到甲基丙烯酸酯、甲基二叔丁基苯酚。甲基丙烯酸酯作为树脂聚合的单体,二甲基二叔丁基苯酚常用作塑料的增塑剂,分析这些物质来源,可能来源于电流互感器绝缘材料及器身内的绝缘涂料。

气相色谱-质谱联用仪的检查结果进一步证实了前面的推测,即变压器油中氢气的来源主要不是

表 2 气相色谱-质谱联用仪的检查结果

峰编号	检出物质化学名称	保留时间 /min	峰面积	百分数 /%
1	2-甲基-2-丙烯酸丁酯	7.78	51 995 253	20.46
2	正十三烷	8.62	17 577 956	6.92
3	正十四烷	10.05	24 119 682	9.49
4	正十五烷	11.39	33 860 216	13.32
5	正十六烷	12.65	28 100 829	11.06
6	正十七烷	13.83	13 580 130	5.34
7	正十八烷	14.97	5 887 782	2.32
8	4-甲基-2,5-二叔丁基苯酚	16.22	17 070 056	6.72
9	N-乙基甲酰胺	16.57	6 908 677	2.72
10	1,6-己二醇甲基丙烯酸酯	20.67	4 856 822	1.91

表3 铁粉对变压器油中氢气含量的影响

编号	pH	氢气浓度(加铁粉) / ( $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ )	氢气浓度(不加铁粉) / ( $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ )	备注
1	6.4	16.5	2.6	反应温度 48 ~ 52 °C
2	6.2	15.6	2.3	反应温度 48 ~ 52 °C
3#	5.6	20.3	1.5	反应温度 48 ~ 52 °C
4	5.4	28.9	5.0	反应温度 48 ~ 52 °C
5	4.8	69.8	12.1	反应温度 48 ~ 52 °C

表4 奥氏体不锈钢对变压器油中氢气含量的影响

编号	pH	氢气浓度(加不锈钢) / ( $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ )	氢气浓度(未加不锈钢) / ( $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ )	备注
1	6.4	62.6	1.9	反应温度 48 ~ 52 °C
2	6.2	56.8	2.3	反应温度 48 ~ 52 °C
3	5.6	44.2	2.9	反应温度 48 ~ 52 °C
4	5.4	72.1	3.7	反应温度 48 ~ 52 °C
5	4.8	76.5	21.4	反应温度 48 ~ 52 °C

来自变压器油在电磁场或金属促进作用下的分解。而甲基丙烯酸酯、甲基二叔丁基苯酚的检出,提示氢气的来源与浸入变压器油的组件有关,如绝缘材料、金属组件等吸附的氢气释放,或金属组件与变压器油中的酸性物质发生反应释放出氢气。

### 2.2 绝缘材料和浸入变压器油的组件产生氢气

从相关文献材料及设备厂家处都了解到,电流互感器在生产过程中使用了醇酸树脂漆,如在固化定型过程中未对其进行充分的脱氢处理,在设备运行初期可与变压器油反应分解释放出氢气,在变压器油的气相色谱-质谱联用仪的检查结果中,就检查出了甲基丙烯酸酯、甲基二叔丁基苯酚这些作为醇酸树脂漆的原料。

在电流互感器线圈干燥、浸渍、高电压试验等热和电的作用下,绝缘材料分解产生氢气、烃类气体,这些气体可吸附于多孔性而且较厚的固体绝缘纤维材料中,由于氢气的释放速度较慢,完全释放到变压器油中一般要数年之久。

此外,一些金属材料(如金属膨胀器中的碳素钢和奥氏体不锈钢等)也可能吸附一定量的氢气,这些氢气通过与变压器油接触而缓慢的交互溶解到油中,也会引起油中氢气含量的增高。

为此,设计了以下试验:在5个变压器油样品中(氢气含量近似为0)加入适量铁粉和奥氏体不锈钢(块状),于50 °C环境下放置168 h后,检测其氢气的含量。检测结果见表3和表4。

从表3可知,在同等条件下,5个加铁粉的样品氢气的含量均超过不加铁粉的样品,且随着pH的减小,氢气的含量呈增加的趋势,当pH小于5时,氢气的含量增长幅度较大。从表4可知,在同等条件下,5个加不锈钢的样品氢气的含量均远超过不加不锈钢的样品,pH对其产生氢气的量影响不大。比较表3和表4可知,不锈钢对变压器油中氢气含量增长的影响高于铁粉,铁粉仅在pH较低即酸性较强的样品中可产生较多氢气。鉴于大部分电流互感器都是在投入运行初期产生及发现单纯氢气含量超过注意值,此时的变压器油质较好,pH一般都在6.0以上,故可以判断氢气的主要来源是不锈钢中隐藏氢气释放所致。

## 3 对电流互感器单纯氢气含量超过注意值的几点建议

如前所述,电流互感器油中单纯氢气含量超过注意值主要是由于设备材质和制造工艺所致,并非由于设备故障所引起,一般情况这类气体的存在并不影响设备的正常运行。鉴于此,故国标《变压器油中溶解气体分析和判断导则》(GB/T 7252-2001)指出:在某些情况下,有些气体可能不是设备故障造成的,例如油中含有水,可以与铁作用生成氢气。新的不锈钢部件中也可能在钢加工过程中或焊接时吸附氢而又慢慢释放到油中。特别是在温度较

(下转第83页)

还不能直接带入锅炉热效率计算中,还需要根据不确定度传递原理转换到收到基状态,然后再进行锅炉热效率不确定度计算。

### 2.6 灰渣分析结果的不确定度分析

与石油焦成分不确定度分析方法类似。

## 3 应用实例

苏丹 Garri - 4 期纯烧石油焦锅炉为例,分析锅炉热效率计算结果的不确定度。根据能量平衡法以及上述计算公式,锅炉热效率测算<sup>[1-2]</sup>结果如表1和不确定度计算<sup>[1]</sup>结果如表2。

## 4 结论

介绍了不确定度分析的相关内容及其计算的理论基础,并以苏丹吉里电厂纯烧石油焦锅炉效率计

(上接第59页)

高,油中溶解有氢时,设备中某些油漆(醇酸树脂),在某些不锈钢的催化下,甚至可能生成大量的氢。这些气体的存在一般不影响设备的正常运行。为做好单纯氢气含量超过注意值的电流互感器的技术监督工作,提出以下几点建议。

(1) 对于明确判断为因设备材质和制造工艺原因引起的单纯氢气含量超过注意值的设备,可以判断为正常,从经济角度来看,无须进行处理。对氢气含量特别高( $\geq 500 \mu\text{L/L}$ )的设备应引起注意,在条件允许的情况下应对其进行脱气处理,主要从两个方面的原因来考虑:①氢气含量过高容易掩盖某些早期的潜伏性故障,而造成错过发现故障的最佳时期;②由于氢气在变压器油中的奥氏瓦尔特系数比较小(50℃时仅为0.06),油中氢气含量过高容易造成氢气游离出油中,以微小气泡的形式从油中析出,在狭长的缝隙中逐渐积聚并附着在绝缘表面上,形成气泡性电晕放电。若放电发生在导线绝缘和垫块之间或导线绝缘与撑条的缝隙处,则造成的危害就更大。在长期工作电压作用下,气泡内的烃类气体分子形成的带电粒子会导致电流瞬间增大,造成绝缘击穿,引发恶性安全事故。

(2) 正常情况,此类设备油中的氢气含量一般在投入运行3~5年后,油中的氢气含量达到稳定,或有缓慢的下降趋势。对氢气含量已趋于稳定后,

算为样本,建立了不确定度分析的数学模型和评定实例,结果表明影响不确定度的主要因素是石油焦的取样和分析、氧量测试以及空气预热器进风温度和排烟温度的测试。测试过程中,降低这些参数的测试不确定度即能减少了测试结果的不确定度。

### 参考文献

[1] ASME PTC4 - 1998, Fired Steam Generator Performance Test Code [S].

[2] IAPWS IF97, Properties of Water and Steam [S].

作者简介:

韩伟(1979)男,工程师,在四川电力工业调整试验所工作,长期从事电站锅炉性能试验及电站锅炉煤粉燃烧技术研究;

刘慧超(1974)女,工程师,从事电站设计及新技术研发等工作。

(收稿日期:2012-04-25)

发现氢气含量再次增长,尤其是甲烷等烃类气体也有明显增长趋势,总烃未超过注意值亦应引起高度重视。

(3) 严格把好设备入网验收关,电流互感器投入运行前严格执行国家相关标准(油中氢气含量应低于 $50 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ )。设备投入运行后,发现氢气含量超过注意值,在未弄清原因之前应缩短跟踪检测周期,待查明原因后,根据具体情况制定相应的检测周期,切不可任意认定为非故障气体。

## 4 结论

通过对成都电网电流互感器油中氢气来源的研究,发现如下结论:①电流互感器油中单纯氢气含量超过注意值大多是由于设备材质和制造工艺所致,为非故障气体,一般情况下不影响设备的正常运行。②电流互感器油中氢气主要来自不锈钢组件在钢加工过程中吸附氢气的释放和树脂类油漆催化脱氢,而非普遍认为的环烷烃催化脱氢、设备受潮水解等原因。

### 参考文献

[1] GB/T 7252 - 2001, 变压器油中溶解气体的分析和判断导则 [S].

(收稿日期:2012-02-15)

# BP神经网络在油浸式变压器过热性故障诊断中的应用

曾成碧<sup>1</sup>, 蒲维<sup>2</sup>, 曾先锋<sup>3</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072;  
3. 西昌电业局, 四川 西昌 615000)

**摘要:** 针对充油变压器绝缘故障诊断的三比值法的局限性, 建立以变压器油中溶解气体含量为样本数据, 对不同的隐含层数目进行仿真分析, 通过比较确定了适用于变压器绝缘故障诊断的BP神经网络模型。研究表明, 这种方法提高了神经网络的收敛速度, 符合电力变压器故障诊断系统的实际情况, 准确率高。

**关键词:** 油浸式变压器; 过热性故障; 油中溶解气体分析; 神经网络

**Abstract:** BP neural network model for transformer insulation fault diagnosis is established, according to the limitations of three-ratio method used for the insulation fault diagnosis of oil-immersed transformer. The model is based on the sample data of the content of dissolved gas in transformer oil, and the analysis is based on the number of hidden layers. The results shows that the proposed method can improve the convergence rate of neural network with higher accuracy, which accords with the actual situation of the fault diagnosis system of power transformer.

**Key words:** oil-immersed transformer; overheating fault; dissolved gas analysis; neural network

中图分类号: TM406 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)04-0060-04

中国电力变压器绝缘故障诊断仍采用传统的故障诊断方法<sup>[1]</sup>, 其中三比值法应用效果较好<sup>[2-3]</sup>, 解决了不少实际问题, 但是电力变压器故障现象本身是复杂的非线性的关系, 因变压器的电压等级、运行环境、绝缘结构以及所处的系统不一样等众多因素, 使得三比值法判断出故障类型的准确性受到很大影响, 其准确率在80%以下。近年来许多智能方法用于电力变压器绝缘诊断中, 取得较好的效果<sup>[4-6]</sup>。但仍然存在一些缺点, 比如训练时间长、收敛速度慢等。根据BP神经网络的特点<sup>[7]</sup>, 建立以变压器油中溶解气体组分含量为样本数据, 对不同的隐含层数目进行了仿真分析, 通过比较确定了适用于变压器绝缘故障诊断的BP神经网络模型。通过研究表明, 这种方法提高了神经网络的收敛速度, 符合电力变压器故障诊断系统的实际情况, 准确率高。

## 1 基于BP神经网络的变压器故障诊断模型

### 1.1 建立模型

电力变压器故障诊断技术是实现从故障征兆到故障空间的映射, 从而实现从故障的识别和诊断。利用变压器油中溶解气体分析法的检测数据对油浸

变压器进行故障诊断, 实际上是完成气体组分到故障类型的一个复杂的非线性映射。BP神经网络诊断变压器故障就是根据变压器油中气体的成分含量来进行的, 变压器的过热和放电故障将引起油中气体含量的变化, 通过分析特征气体的成分, 实现对变压器故障性质的判断。

在故障诊断中, 将已知的故障现象及其结论确定为训练学习的样本空间, 输入可由  $I = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  表示, 表示各种故障现象; 输出可由  $O = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  表示,  $c_i \in [0, 1]$  表示属于不同故障的隶属度(概率)。选择样本经过训练学习, 确定网络结构, 然后就可以根据训练样本以外的故障现象诊断出故障状况, 这就是人工神经网络诊断变压器故障原理。

必须指出的是, 传统BP算法的误差减小时, 极易陷入局部最小点。一旦训练样本数目过多, 输入输出关系复杂, 网络的收敛速度变得缓慢, 表现为对网络的初始值要求很高, 不恰当的网络初始值会造成BP算法的收敛振荡, 甚至不收敛。由于每次训练网络初始值的给定是随机的, 因此可以通过不断的重新训练来达到要求。

### 1.2 设计BP网络模型的几个要点

#### 1.2.1 网络学习样本的选择

表1 故障类型的学习样本数据

故障类型	输入样本原始数据 / ( $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ )			百分比数据 / %		网络期望输出
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	O <sub>1</sub> O <sub>2</sub> O <sub>3</sub> O <sub>4</sub> O <sub>5</sub> O <sub>6</sub> O <sub>7</sub> O <sub>8</sub>
0	45	12	5.3	3.2	0	0 0 0 0 0 0 0
正常	68.702	18.321	8.092	4.885	0	0 0 0 0 0 0 0
1	181	262	41	28	0	1 0 0 0 0 0 0
低温过热	33.352	70.703	8.008	5.469	0	0 1 0 0 0 0 0
2	41	240.5	107	297	0	0 1 0 0 0 0 0
中温过热	5.981	35.084	15.609	43.326	0	0 0 1 0 0 0 0
3	164	244	103	497	8.3	0 0 1 0 0 0 0
高温过热	16.137	2.009	10.135	48.903	0.816	0 0 1 0 0 0 0
4	980	73	58	12	0	0 0 0 1 0 0 0
局部放电	87.266	6.5	5.165	1.069	0	0 0 0 1 0 0 0
5	115.9	75	14.7	25.5	6.8	0 0 0 0 1 0 0
低能放电	48.718	31.526	6.179	10.719	2.858	0 0 0 0 1 0 0
6	188	236	18.1	237	31.8	0 0 0 0 1 0 0
低能放电兼过热	26.445	33.197	2.55	33.338	4.473	0 0 0 0 1 0 0
7	162	35	5.6	30	44	0 0 0 0 0 1 0
电弧放电	58.568	12.654	2.025	10.846	15.907	0 0 0 0 0 1 0
8	98	103	32	131.3	19.7	0 0 0 0 0 0 1
电弧放电兼过热	25.521	26.823	8.333	34.193	5.130	0 0 0 0 0 0 1

学习样本的好坏很大程度上决定着 BP 网络的训练效果。收集学习样本集时着重从以下几点考虑:集中各种故障样本的百分比应当同实际变压器故障发生的机率大致相当,如变压器高温过热故障较多,样本中就多包含一些高温过热故障的样本;考虑到变压器运行中各种因素的影响,收集了具有代表性的变压器油中溶解气体分析样本 95 例,分别来自不同电压等级的变压器,具有较好的广泛性。经过反复调试和比较,最终从中挑选的学习样本举例见表 1 所示。

### 1.2.2 输入量和输出量的确定

对反映变压器内部故障最优价值的油中溶解特征气体主要有 CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、H<sub>2</sub>、CO 和 CO<sub>2</sub>。CO 和 CO<sub>2</sub> 虽然对分析固体绝缘很有价值,但对故障类别判断的影响不大,当输入向维数过多时,会导致神经网络过于复杂,会出现对学习样本要求苛刻、网络训练次数增加、分类能力显著下降的问题;另外,为了避免神经网络的饱和,输入量不宜过大,不宜直接采用气体含量作为输入,可采用百分比或各种归一化处理。因此,这里采用 5 种气体组比值作为输入,即 H<sub>2</sub>/Σ、CH<sub>4</sub>/Σ、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/Σ、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/Σ、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/Σ 作为输入矢量(其中 Σ 为 CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、H<sub>2</sub> 5 种气体含量的总和),进行神经网络诊断研究。

DL/T 722-2000《变压器油中溶解气体分析和判断导则》将变压器故障类型分为 9 种,即低温过

热(低于 150℃)、低温过热(150~300℃)、中温过热(300~700℃)、高温过热(高于 700℃)、局部放电、低能放电、低能放电兼过热、电弧放电、电弧放电兼过热,这里将故障类型定为 8 类,即输出层采用 8 个输出神经元,分别对应 O<sub>1</sub>、O<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、O<sub>4</sub>、O<sub>5</sub>、O<sub>6</sub>、O<sub>7</sub>、O<sub>8</sub>。输出值最大为 1,表示属于此类故障,数值越大表明属于该类型故障的可能性越大;数值越小表明属于该类型故障的可能性越小,输出值最小为 0,表示完全不属于此类故障。

### 1.2.3 不同隐含层神经元数目对 BP 网络收敛性能的影响

当网络确定为选择隐含层时,隐含层神经元数目便成为决定网络结构的主要因素,选择最佳网络结构不仅能改善网络收敛性能,也有利于增强网络的泛化推广能力。只要选择合适的隐含层神经元数目,构建三层 BP 神经网络就可以进行故障诊断。

针对隐含层神经元数目尚无可靠的确定规则,需要根据实际情况和经验反复比较来确定。下面采用 L-M 算法,期望误差设为 0.01 时,使用不同隐含层神经元数目对 60 组学习样本进行训练,训练结果如图 1~图 3 所示。

从图中可以看出,当隐含层神经元数目较少时,网络不能很好地学习,训练次数明显增加,当神经元

表2 测试样本的BP网络诊断结果(μL/L)

测试样本	H <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	改良三比值法 编码/诊断结果	实际故障	BP网络 诊断结果
1	50 90 260 18 5.9	120/8 ×	3	3
2	200 700 250 740 1	021/2 ×	3	4 ×
3	650 53 34 20 0	010/4	4	4
4	106 24 4 28 37	102/7	7	7
5	181 262 210 528 0	021/2	2	2
6	160 130 33 96 0	001/1	1	1
7	220 340 42 480 14	022/3	3	3
8	335 67 18 143 170	102/7	7	7
9	115.9 75 14.7 25.5 6.8	101/7 ×	6	1 ×
10	206 198.9 74 612.7 15.1	002/3	3	3
11	27 90 42 63 0.2	021/2	2	2
12	220 340 42 480 14	022/3	3	3
13	14 29 18 174 0	022/3	3	3
14	170 320 53 520 3.2	022/3	3	3
15	200 48 14 117 131	102/7	7	7
16	31 23 10.6 7.1 0.4	000/无编码	0	0
17	78 56 18 21 0	001/1	1	1
18	345 112.2 27.5 51.5 58.8	101/7	7	7
19	86 110 18 92 7.4	022/8	8	8
20	176 205.9 47.7 75.7 68.7	121/8 ×	5	0 ×
21	56 61 75 32 31	120/8 ×	7	7
22	12 23 9 98 0	022/3	3	3
23	180 175 75 50 4	000/0 ×	1	1
24	582 53 34 47 0	011/无法判断 ×	4	4
25	217.5 40 4.9 51.8 67.5	102/7	7	7
26	188 236 18.1 237 31.8	122/8	8	8
27	20.6 19.9 7.4 61.3 1.5	002/3	3	3
28	70.4 68.5 28.9 241 10.4	002/3	3	3
29	97.9 103 31.6 131.3 19.7	122/8	8	8
30	18 3 1 3.4 4.3	102/7	7	7
31	30 7.4 8.5 1.8 19	210/5	5	5
32	54 29 9 51 1.5	002/3 ×	7	3
33	97.8 15.8 2.7 7.9 24.3	202/5	5	5
34	120 120 33 84 0.55	021/1	1	1
35	49.2 33.2 15 49.9 1.4	002/3 ×	2	2

注:表中×号表示判断错误

故障类型代号表示:0为无故障,1为低温过热(包括低于150℃的低温过热和介于150℃与300℃之间的低温过热两种类型)2为中温过热,3为高温过热,4为局部放电,5为低能放电,6为低能放电兼过热,7为电弧放电,8为电弧放电兼过热

数目进一步减少时,网络训练误差将不能收敛,以适应,陷入局部最小的可能性较大。隐层神经元如图3所示,可见,太少的隐层神经元数会使网络难太多,使学习能力增强,能够确保网络收敛,但同时

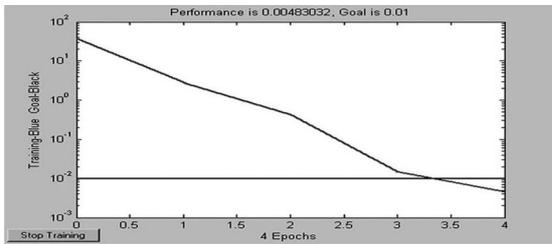


图 1 隐含层 30 个神经元的计算结果

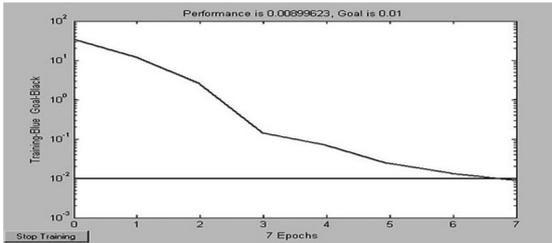


图 2 隐含层 20 个神经元的计算结果

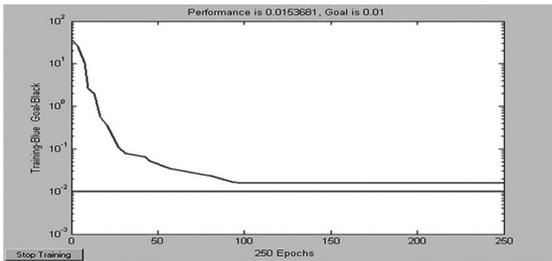


图 3 隐含层 5 个神经元的计算结果

也使得网络过于复杂,导致训练时间显著增加。图 1 示出了隐节点数为 30 个时的训练误差曲线,虽然网络显示了很高的学习能力,只用了 4 轮循环迭代就使网络误差减小至期望误差之下,但其花费的训练时间比 20 个隐节点的 3 倍还要多。理论分析表明,太多的隐节点数能够加速网络学习能力,但其泛化能力明显减弱。针对网络模型这里选择 10~18 个隐含层神经元数都是可行的,为了适当加快训练过程中误差的下降速度,最终将隐含层神经元数目确定为 16 个。

## 2 BP 神经网络故障诊断计算过程及诊断结果

将 BP 神经网络学习算法转化为实际的学习过程,其原理如下。令输入层故障诊断向量为  $I = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ,  $O = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  为输出故障诊断向量,隐含层神经元数为  $H = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ ,  $V = V_{n \times p}$  与  $W = W_{p \times q}$  为各层之间连接权值,  $m$  为给定的样本数。先给出输入层与隐含层单元之间、隐含层与输出层单元之间的连接权以及隐含层单元阈值  $\theta_i$ , 输出层单元阈值  $\gamma_i$ , 赋以  $[-1, 1]$  之间的随机值。根据 BP 算法的推导过程,则每个模式对  $(A^k, T^k)$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) 经过学

习后, BP 神经网络输入故障征兆向量  $I$  后,其实际输出  $O$  与期望输出  $T^k$  在允许误差下是近似相等的。因此, BP 神经网络的输出  $O$  就是实际故障模式的近似,从而获得故障问题的近似诊断解。

用 65 组样本数据对 BP 网络进行训练,然后用训练好的网络模型对 30 组测试样本进行检验,测试样本进行变压器故障诊断的结果如表 2 所示。

从诊断结果看出, BP 神经网络诊断模型能够较为准确地判断出变压器故障类型,其准确率达到了 88.57%,比传统的三比值法高出 14 个百分点,可见,所提出的基于 L-M 改进算法建立的 BP 网络故障诊断模型具有快速的收敛速度和较好的诊断能力,在变压器故障诊断中应用效果好于三比值法。

## 3 结 语

依据变压器故障气体和故障类型的特点,设计了基于油中溶解气体特征量的 BP 神经网络模型,针对 BP 网络隐含层最佳结构难以确定的问题,设计了针对不同隐含层神经元数目的仿真。仿真表明,对变压器绝缘故障来说,隐含层神经元数目的多少也有一定的规律可循,解决前面诊断算例的隐含层神经元数目在 10~18 之间都是可行的。训练和诊断结果表明,所建立的 BP 神经网络诊断模型具有较高的诊断准确度,效果优于改良三比值法。

### 参考文献

- [1] 操敦奎. 变压器油中气体分析诊断与故障检查[M]. 北京:中国电力出版社, 2005.
- [2] 杨振勇. 《变压器油中溶解气体分析与判断导则》判断变压器故障的探讨[J]. 变压器, 2008, 45(10): 24-26.
- [3] 徐桂敏, 杨正祥. 概率神经网络在油浸式变压器故障诊断中的应用[J]. 科技咨询, 2011(9): 143.
- [4] 周天春, 杨丽君, 廖瑞金, 等. 基于局部放电因子向量和 BP 神经网络的油纸绝缘老化状况诊断[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 18-23.
- [5] E. A. Mohamed, A. YAbdelaziz. A Neural Network-based Scheme for Fault Diagnosis of Power Transformer[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 75(2): 29-39.
- [6] 汪晓明, 何萍, 吴花, 等. CP 组合神经网络在基于 DGA 的变压器绝缘故障诊断中的应用[J]. 高压电器, 2008, 44(6): 543-547.
- [7] 魏海坤. 神经网络结构设计的理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2005. (收稿日期:2012-03-27)

# 一起因雷击导致变压器停运的分析

李源,冯藩

(四川省电力公司绵阳电力设备检修试验所,四川 绵阳 621000)

**摘要:**介绍一起变压器遭受雷击后的常规试验,通过对变压器故障部位查找过程、指导检修工作方向的实例,给出以借鉴,以便提高检修的效率与质量。

**关键词:**变压器;绝缘缺陷;试验分析;故障位置;缺陷处理

**Abstract:** The routine tests are introduced after the transformer suffering the lightning stroke. Through the living examples for inspecting the fault position of transformer and providing guidance for the repair work, there will be a reference for improving the efficiency and quality of maintenance.

**Key words:** transformer; insulation defect; test analysis; fault position; defect treatment

中图分类号: TM864 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)04-0064-04

## 0 引言

随着国网公司状态检修工作的开展,对设备的缺陷情况正确把握,有针对性的指导检修工作,这对试验数据的分析有着越来越高的要求,特别是对各类试验数据的综合分析,确定设备具体缺陷部位,以提高检修工作效率,减少停电时间,减小检修工作量有重大意义。本案例在变压器遭受雷击后,通过对数据对比分析确定故障部位,制定有针对性的检修方案,指导检修工作开展,最终圆满完成检修任务,希望通过此案例分析,能给以借鉴的经验。

## 1 故障实例

### 1.1 设备情况简介

某局某站1号主变压器,型号为SFZ7-40000/110,结线组别为YNd11,1993年投入运行,该变压

器投运以来运行状况良好,历年停电测试数据正常,直到2010年8月一次雷击造成对侧变电站线路保护距离I段经20ms动作跳闸,该变压器重瓦斯在线路故障后167ms动作,发生主变压器跳闸,当日该变压器处于中性点不接地运行状态,雷击后线路C相避雷器动作,中性点避雷器未动作,本体瓦斯继电器内无气体。

### 1.2 现场试验

2010年8月在1号主变压器发生跳闸后对变压器进行了较全面的试验:变压器本体介损、本体绝缘电阻、铁心绝缘电阻、变压器高、低压侧绕组直流电阻、变压器变比、低压空载损耗、绕组变形试验、油色谱分析,同时对主变压器中性点避雷器也进行了测试。电气试验从数据上比较,未发现与历年数据有大的差别,均在规程规定范围内,油色谱分析发现该变压器在雷击后乙炔增长,说明其存在放电,具体缺陷在何部位,一时不清,相关测试数据见表1至表8。

表1 变压器介损、绝缘电阻两年测试数据对比

测试项目 及时间	本体介损				绝缘电阻及吸收比(M)	
	电容量 /pF		tgδ /%			
	2009-07-05	2010-08-05	2009-07-05	2010-08-05	2009-07-05	2010-08-05
高对低地	10 200	10 210	0.27	0.28	6 200/4 200	5 950/4 280
低对高地	15 470	15 460	0.24	0.29	5 800/3 400	4 980/4 280
铁心	/				3 800	7 600

(注:该值在跳闸后夜间测试,湿度较大,绝缘电阻只做参考)

表2 变压器高压侧两年测试数据换算到20℃对比

	相别						相位 / %	
	A <sub>H</sub> O		B <sub>H</sub> O		C <sub>H</sub> O			
	2009-07-05	2010-08-06	2009-07-05	2010-08-06	2009-07-05	2010-08-06	2009-07-05	2010-08-06
5	527.9	530.0	525.7	528.1	528.9	530.9	0.59	0.53
档位 6	520.9	523.0	519.0	521.1	521.9	523.7	0.55	0.50
7	513.7	516.1	511.5	513.7	514.6	517.1	0.61	0.66

表3 变压器低压侧两年测试数据换算到20℃对比

相别	ab		bc		ca		%	
	2009-07-05	2010-08-06	2009-07-05	2010-08-06	2009-07-05	2010-08-06	2009-07-05	2010-08-06
	7.196	7.220	7.187	7.207	7.231	7.253	0.61%	0.64%

表4 变压器变比测试

档位	变比	电压比实测偏差值 / %		
		A <sub>H</sub> B <sub>H</sub> /AB	B <sub>H</sub> C <sub>H</sub> /BC	C <sub>H</sub> A <sub>H</sub> /CA
5	11.911	-0.18	-0.17	-0.17
6	11.774	-0.15	-0.13	-0.14
7	11.637	-0.12	-0.10	-0.11

表5 变压器低压空损测试

测试部位	电压 / V	功率 / W	仪表损耗 / W	折算功率 / kW	电流 / A
ab(短bc)	400	66	0.00	29.74	0.25
bc(短ca)	400	67.5	0.00	30.41	0.27
ca(短ab)	400	103.5	0.00	46.64	0.43
n =	1.87	折算额定功率 (kW)		53.39	

表6 1号主变压器相关系数分析结果

相关系数	低频段(1~100 kHz)	中频段(100~600 kHz)	高频段(600~1000 kHz)
高压绕组 R21	1.304	1.262	1.020
高压绕组 R31	1.421	1.225	0.973
高压绕组 R32	1.150	1.895	1.647
低压绕组 R21	1.662	2.023	1.184
低压绕组 R31	1.720	1.812	1.709
低压绕组 R32	2.971	1.440	1.260

表7 1号主变压器中性点避雷器测试数据

名称	测试数据	
	2009-07-05	2010-08-06
U <sub>1mA</sub> / kV	68.1	68.9
I <sub>75%U<sub>1mA</sub></sub> / A	23	15
本体绝缘电阻	10 <sup>4+</sup> M	14 500 M
底座绝缘电阻	2 500 M	3 000 M

注: 主变压器 2001 年 2 月出厂

表8 变压器历次色谱数据

试验日期	摘要	油中溶解气体组分及含量 / (μL · L <sup>-1</sup> )							总 烃
		H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	
2009-07-06	预试	26	412	4 080	4.81	6.04	1.8	2.34	14.99
2010-07-07	二次预试	35	692	5 402	6.49	9.41	1.96	1.74	19.6
2010-08-05	雷击跳闸后	113	800	6 049	16.43	21.9	2.68	41.72	82.73

### 1.3 数据判断

在表1至表6数据中可看到,历史数据与本次数据比较,变压器本体介损、本体绝缘电阻、铁心绝缘电阻、变压器高、低压侧绕组直流电阻无明显变化,变压器变比、低压空载损耗数据符合要求,绕组变形试验表明三相绕组间波形一致性较好,相关系数低频段大于1,表明无匝间、饼间异常,中、高频段无扭曲、鼓包、位移等变形特征。结合本体介损试验,应认为绕组无明显变形,说明变压器主绝缘、主绕组匝间、层间、铁芯片间等均正常。表7说明变压器中性点避雷器测试数据与历史无较大变化,该避雷器合格。从表8变压器本体油色谱分析来看,变压器内部应当出现过故障,由于之前色谱数据处于稳定状态,可以确认乙炔明显增长与该次跳闸有关,同时甲烷、乙烯、氢增长显著,乙烷、一氧化碳、二氧化碳略有增加,通过三比值计算,编码为102,如表9。

表9 变压器跳闸后本体色谱分析三比值编码

$C_2H_2/C_2H_4$	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$
1	0	2

根据编码查找《变压器油中溶解气体分析和判断导则》说明内部有低能量放电,导则指出可能存在如下情况。

- ①引线对电位未固定的部件之间连续火花放电;
- ②分接抽头引线和油隙闪络;
- ③不同电位之间的油中火花放电或悬浮电位之间的火花放电。

色谱导则只能说明变压器内部出现过放电情况,还需要通过对故障分析来查找放电部位。

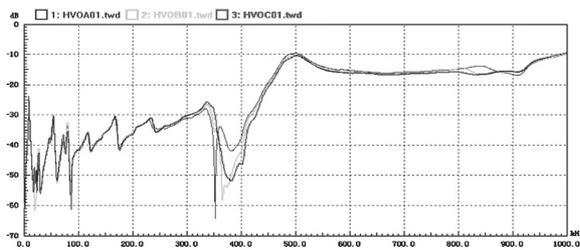


图1 1号主变压器高压绕组频率响应特征曲线

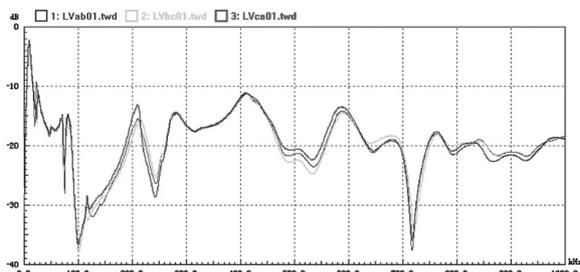


图2 1号主变压器低压绕组频率响应特征曲线

### 1.4 故障分析

由于2008年对变压器进行过吊罩检查,其内部结构良好,悬浮部件或间隙不足可能性较小,但也无法排除以上三疑点。

根据雷电波入侵变压器作用特点来看,变压器对于雷电波可以看成一组电容串并联回路,由于该变压器雷击时运行方式中性点不接地,当雷电波经线路避雷器消波,再从变压器110 kV C相进入后,此时中性点相当于开路,造成中性点部位电位升高,其值可达 $2U_0$ 以上,中性点避雷器当时未动作,而测试数据表明避雷器处于正常状态,若无其他因素影响,应当动作。因此应考虑变压器尾部承受较高雷电压时,由于内部结构原因,如有尖端部位、间隙小的地方会造成放电。

由于电气试验没有发现绝缘方面的缺陷,可以确定在雷击放电后,变压器绝缘破坏点出现自行恢复,其放电点与地之间有一定绝缘距离,且在工作中电压较低时,无足够能量实现持续放电,这从电气试验数据来看,造成变压器击穿后对主绝缘、绕组及引线无损坏的现象。

从上次检修资料看,变压器中性点引出线与铁轭距离较近,存在放电可能性,另外中性点引出线与大盖间可能存在距离较近的点,也存在放电可能性。

基于以上分析,该变压器在中性点尾部存在击穿可能性很大,该击穿点不能承受雷击时的过电压,因此检修工作重点应检查中性点引出线与铁轭部位以及中性点引出线与大盖之间部位。该变压器大盖在中性点有载开关部位有一人孔口,对以上提到的两检查部位从人孔进入后可以进行排查,于是制定对该变压器放油,从人孔口进入检查重点部位的方案,而将吊罩检查作为后选方案。

### 1.5 进入检查

当从人孔口进入变压器后,首先检查了中性点引出线与铁轭部位,未发现放电痕迹,当对更高位置的中性点引出线与大盖检查时发现引线弯曲处略微有点发黑,该位置位于中性点升高座内,中性点引线在此有较大的弯曲,使引线基本接触升高座内壁,于是立即从中性点套管处打开,顺利发现放电位置,并看到了放电情况,雷击造成中性点引线升高座内壁放电,升高座内壁形成焊点状的放电痕迹,导线上也形成一个焊点,于是对被损坏处进行处理,重新包扎引线绝缘后,对该变压器进行油处理,经电气、色谱分析试验合格后,于2010年8月顺利投入运行,

经过一段时间本体油色谱跟踪,未发现变压器异常,证明处理位置正确,应视为缺陷已消除。

### 1.6 故障现象原因分析

从检查后情况可知,由于雷击放电发生在尾部,且由于引线靠壳过近,几乎碰在大盖上,造成中性点避雷器还未动作时,变压器尾部已发生放电,由于该点运行电压低,放电后绝缘油恢复绝缘强度,无法出现持续放电,造成变压器主绝缘恢复,又因为对引线损坏很小,所以直阻测试无法发现缺陷。

由于发生放电部位在中性点升高座内,其位置高于变压器大盖油箱,放电时在变压器内产生的气体上升至升高座高点,升高座内的油向变压器本体挤压,使变压器内部压力增大,压力经油传到瓦斯继电器,引起动作,从而发生跳闸。又因为放电能量未产生超过升高座容积的气量,所以产生的气体未能到达瓦斯继电器,而是停留在升高座内,这解释了瓦斯继电器无气体的原因。如果在最初分析时能从瓦斯继电器中无气体情况来分析,其判断缺陷位置的准确性将会更高些。

## 2 结 语

从本次故障的判断可以总结一些经验,以便提

供借鉴。

(1) 不论数据合格与否,应结合发现的所有信息从多个方面去分析,若停留在一个单一方面,将很难给出准确判断。

(2) 充分考虑出现的多种信息,就能较准确地判断缺陷位置,提出有针对性的方案,节约检修成本、检修时间,提高检修效率,保障供电。

因此,电力设备缺陷分析,应重视各种信息收集,从多方面联合考虑,这样才能为后期检修工作提供有针对性 and 有效性的方案,从而降低检修成本。

### 参考文献

- [1] GB/T 7252 - 2001, 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].
- [2] 武汉水利电力学院. 过电压及保护[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1977.
- [3] DL/T 911 - 2004 电力变压器绕组变形的频率响应分析法[S].

(收稿日期: 2012 - 06 - 14)

(上接第34页)

- [6] Gozel T, Hocaoglu M. H. An Analytical Method for the Sizing and Siting of Distributed Generators in Radial Systems [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79 (6): 912 - 918.
- [7] Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poullikkas, Venizelos Efthimiou. Overview of Current and Future Energy Storage Technologies for Electric Power Applications [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2009, 13 (6): 1513 - 1522.
- [8] Peter Weigand. Smart Grid's Impact on Customer Adoption and Market Participants [J]. Utility Automation & Engineering T&D, 2009, 14(4): 12 - 14.
- [9] Joo Jhi - Young, Ahn Sang - Ho, Yoon Yong Tae. Enhancing Price - responsiveness of End - use Customers' Loads: Dynamically Administered Critical Peak Pricing [J]. European Transactions on Electrical Power, 2009, 19(1): 113 - 126.
- [10] Andrew L. Ott. Wholesale Markets Meet Demand Response [J]. Transmission & Distribution World, 2009, 61(2): 42 - 45.
- [11] Bompard E., Napoli R., Wan Bo. The Effect of the

Programs for Demand Response Incentives in Competitive Electricity Markets [J]. European Transactions on Electrical Power, 2009, 19(1): 127 - 139.

- [12] Peter Maltbaek. One Alternative to New Power Generation infrastructure: Demand Response [J]. Utility Automation & Engineering T&D, 2009, 14(4): 60.
- [13] Kurt Yeager. Striving for Power Perfection [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(6): 28 - 35.
- [14] Robert Galvin, Kurt Yeager, Jay Stuller. Perfect Power: How the Micro - grid Revolution Will Unleash Cleaner, Abundant Energy [M]. McGraw - Hill Companies, Sep. 2008.
- [15] Alexander Flueck and Zuyi Li. Destination: Perfection [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(6): 36 - 47.

### 作者简介:

武云霞(1981)女,工程师,从事调度自动化工作;  
余 熙(1963)男,教授级高工,西南电力设计院副总工、系统规划中心主任,主要从事电力系统规划工作;  
田 伟(1978)男,博士,目前正在美国伊利诺斯理工大学从事电网调度的博士后工作。

(收稿日期: 2012 - 04 - 18)

# 电能计量装置错误接线查找及追补电量计算方法

熊晓岚, 李琦

(自贡电业局, 四川 自贡 643000)

**摘要:** 对电能计量装置常见错误接线检查方法和计算追补电量进行了探讨和分析, 在实际工作中得到较为广泛的运用。

**关键词:** 电能计量; 接线原理; 错误分析; 追补电量

**Abstract:** The inspection methods of common error wiring in electric energy metering devices and the calculation of recover from electricity quantity are discussed and analyzed, which has been widely applied in practical work.

**Key words:** electric energy metering; wiring principle; error analysis; recover from electricity quantity

中图分类号: TM933 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0068-05

## 0 前言

电能计量是现代电力营销管理系统中的一个重要环节, 是电力商品交易的依据, 电能计量的准确与否直接关系到供用电双方的经济效益, 影响客户所用电量的准确计算和电力企业电费的及时回收, 因而受到越来越高的重视, 为了公平、公正的计量电能, 现场安装的电能表还应按照行业有关标准进行定期校验。电能计量装置由电能表、互感器及所属计量二次回路构成, 电能表接线错误将导致计量不准甚至烧毁计量装置, 给供电企业造成许多不必要的损失。如何避免发生错误接线, 正确判断错误接线并采取有效的防范措施, 是值得探讨的。根据多年实践经验, 对目前常见的电能表错误接线的检查方法以及退补电量的计算等内容进行有关探讨, 以供参考。

## 1 电能计量装置的组成及接线原理

一般把电能表与其配合使用的电流、电压互感器、二次回路及计量箱所组成的整体称为电能计量装置, 而在日常工作中往往要根据计量方式的不同而选择不同的计量器具和接线方式, 电能计量装置的接线包含两个部分的接线。

### 1.1 互感器的接线方式

#### 1.1.1 电压互感器 V/V 接线

如图1所示, V/V 接法广泛用于 10 kV 中性点不接点三相系统, 此种接法节省了一台电压互感器, 但不能测量电压和进行绝缘状况监视。

#### 1.1.2 电流互感器的接线方式

电流互感器接线方式如图2所示, 图中(a)称为二相分相接法, 该接法广泛地用于中性点不接地或接消弧线圈接地系统, 也就是现在所说的三相三线制电路; 图中(b)称为三相分相接法, 常用于中性点直接接地系统, 也就是现在所说的三相四线制电路, 分相接地使得计量接线复杂程度大大降低, 方便在错误接线情况下退补电量的计算。

### 1.2 电能表的接线方式

#### 1.2.1 单相表接线方式

单相低压供电, 负荷电流为 50 A 及以下时, 宜采用电能表直接接入式; 负荷电流为 50 A 以上时, 宜采用电能表经互感器的接线方式, 如图3、图4、图5所示。

#### 1.2.2 三相四线电能表接线方式

接入非中性点绝缘系统电能计量装置, 宜采用 Y0/Y0 方式接线, 其一次侧接地方式和系统接地方式一致, 如图6、图7、图8所示。

#### 1.2.3 三相三线表接线方式

接线方式如图9、图10所示。

## 2 电能计量过程中常见的错误接线分析

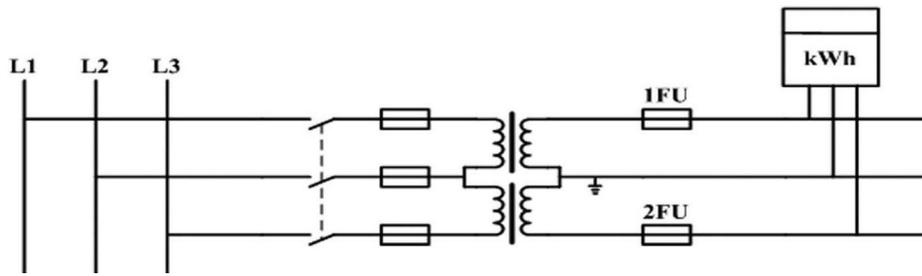


图 1 电压互感器 V/V 接线

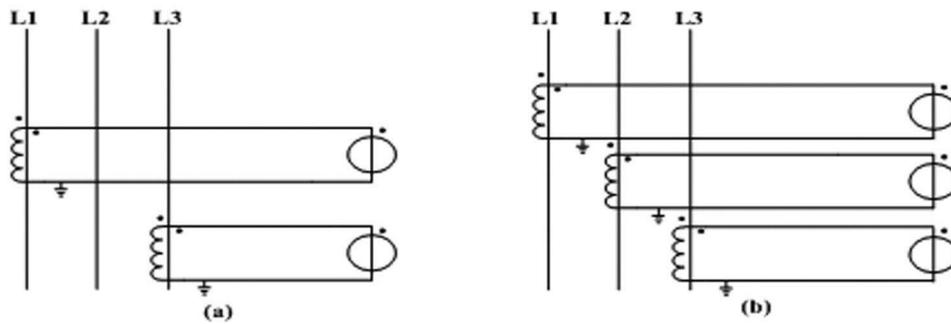


图 2 电流互感器接线方式

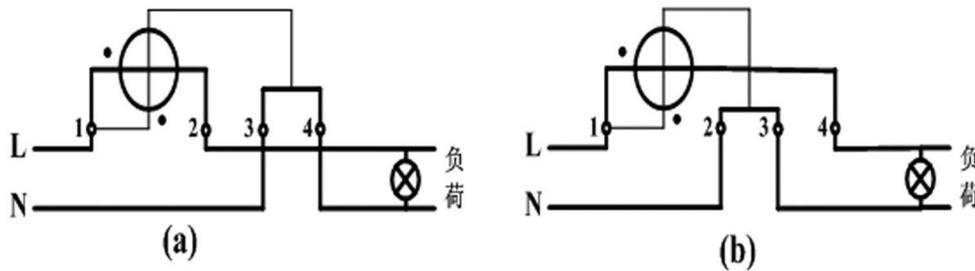


图 3 单相电能表直接接入式接线

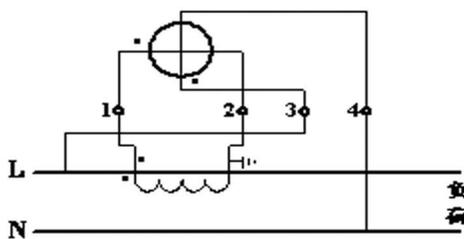


图 4 经电流互感器接入的单相电能表接线

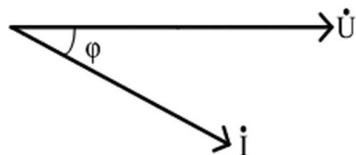


图 5 单相电能表接线向量图

日常的表计安装过程中,由于种种原因往往会造成接线错误,引起计量的不准或不计电量的情况,概况起来有以下几种。

### 2.1 缺相

所谓缺相是指接入电表的电压线未有效接入电能表造成计量少计或不计。

以三相四线表举例(忽略功率因率的影响)。  
正常情况下:  $P = U_a I_a \cos\varphi_a + U_b I_b \cos\varphi_b + U_c I_c \cos\varphi_c = 3U_I \cos\varphi$

缺 A 相情况下:  $P = U_b I_b \cos\varphi_b + U_c I_c \cos\varphi_c = 2UI \cos\varphi$

缺 A、B 相情况下:  $P = U_c I_c \cos\varphi_c = UI \cos\varphi$

缺 A、B、C 相情况下:  $P = 0$

以三相三线电表举例(忽略功率因率的影响)。  
正常情况下:  $P = U_{ab} I_a \cos(30^\circ + \varphi) + U_{cb} I_c \cos(30^\circ - \varphi) = \sqrt{3} UI \cos\varphi$

假设一次侧 A 相断线时,则  $U_{ab} = 0, U_{cb} = 100$   
 $P = U_{cb} I_c \cos(30^\circ - \varphi)$

假设一次侧 C 相断线时,则  $U_{ab} = 100, U_{cb} = 0$   
 $P = U_{ab} I_a \cos(30^\circ + \varphi)$

假设一次侧 B 相断线时,则  $U_{ab} = 50, U_{cb} = 50$   
 $P = 1/2 \sqrt{3} UI \cos\varphi$

### 2.2 电压相序接反

电压相序接反是指接入电表的电压线未按正确

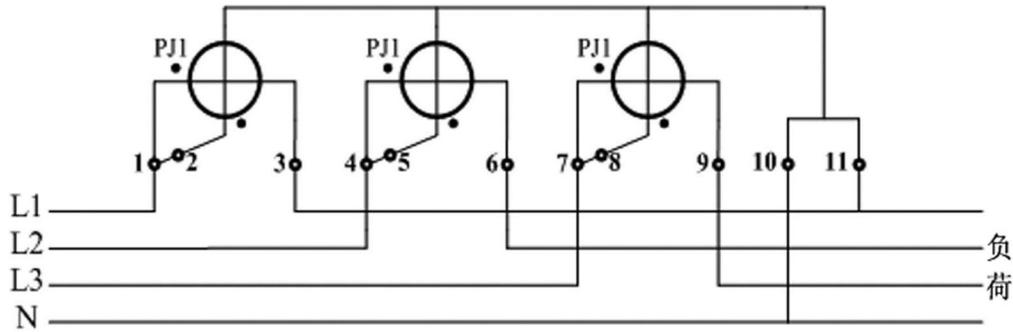


图6 三相四线有功表直接接入式接线

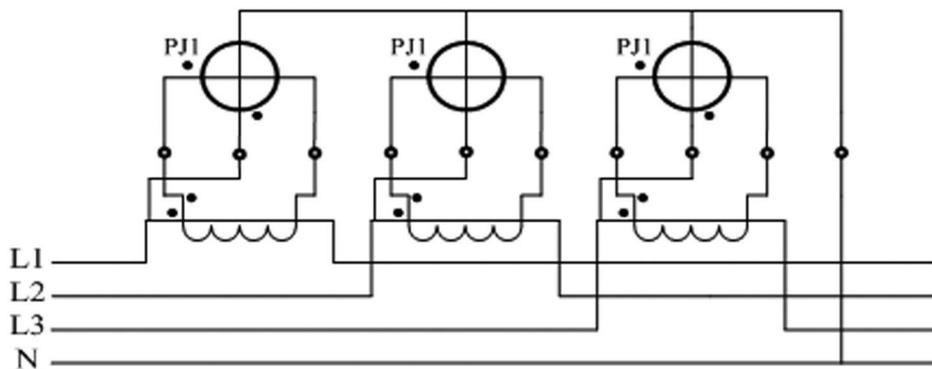


图7 经电流互感器接入式三相四线有功表接线

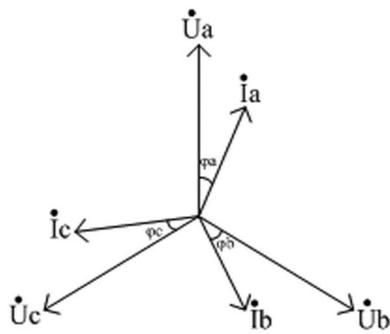


图8 三相四线有功表接线向量图

顺序接入。

电压相序接反举例说明: 假设一只三相三线有功电能表, 其电压接线顺序为 bac, 那么其功率表达式为  $P = U_{ba}I_a \cos(150^\circ - \varphi) + U_{ca}I_c \cos(30^\circ + \varphi)$ 。

### 2.3 电流极性接反

电流极性接反则是指电流互感器的一次或二次接线极性接线的正负。

电流极性接反举例说明: 某自来水厂6月份电流互感器轮换时误将其电能表接线接错, 致使其电表计度器指示数由3 600变为3 180, 检查发现其两台电流互感器极性接反, 第一元件实际接入的是  $U_{ab}$ 、 $-I_a$ , 第二元件接入  $U_{cb}$ 、 $-I_c$ , 改正接线后到抄表日, 示值为3 380, 求更换互感器到抄表期间实际

消耗的电量为多少。

分析: 第一元件实际功率  $P_a = U_{ba}I_a \cos(150^\circ - \varphi)$ , 第二元件实际功率  $P_b = U_{ca}I_c \cos(150^\circ + \varphi)$ 。

错误接线的类型种类繁多, 接线错误除了影响所分析的有功电量外, 对无功电量的影响也很大, 无功电量虽然和电费不直接发生关系, 但在涉及会考核力调电费的客户时, 也会产生较大影响, 这对供电企业和客户双方都可能造成经济损失。

## 3 核算追补电量常用方法

在供电企业的电能计量管理中, 错误接线情况时有发生, 那么在电费核算工作中, 追补电量的核算并不少见, 相对而言, 追补电量的核算比正常电量的核算要复杂些, 对电量核算员的专业性要求也要严一些, 当计量装置出现故障或失常时, 均有可能要对其电量进行更正并退补, 下面就错误接线中退补电量的一般核算方法进行阐述。

### 3.1 更正系数法

#### 3.1.1 更正系数的基本概念

所谓更正系数, 即正确电量与错误电量之比, 因为电量与功率成正比, 故也可将更正系数理解为正

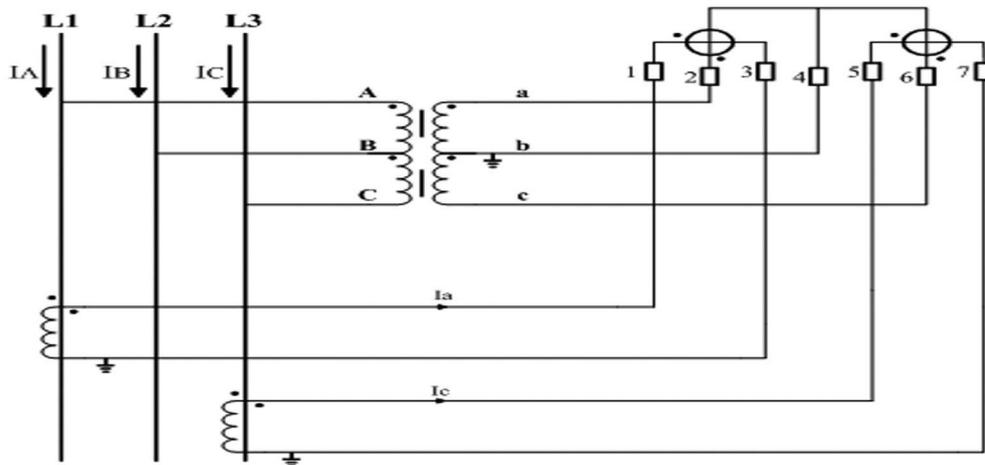


图 9 三相三线两元件有功电能表的接线

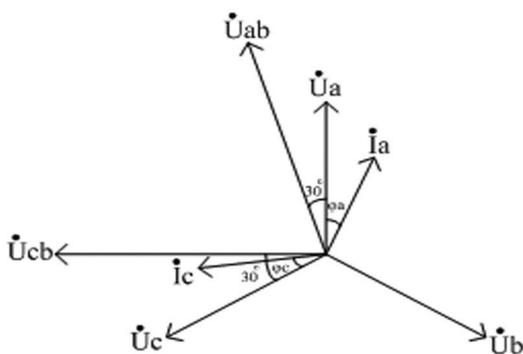


图 10 三相三线有功表接线向量图

正确功率与错误功率之比。

$$K = \frac{W}{W'} = \frac{P}{P'} \quad (1)$$

式中  $K$  为更正系数;  $W$  为正确电量;  $W'$  为计量装置错误期间的抄见电量;  $P$  为正确功率;  $P'$  为错误期间的计量功率。

### 3.1.2 利用更正系数求退补电量

将公式(1) 推导如下。

$$W = KW' \quad (2)$$

$$\text{退补电量 } \Delta W = W - W' = (K - 1) W' \quad (3)$$

当  $\Delta W$  为负值时, 则应退还电量给用户, 当  $\Delta W$  为正值时, 则应向用户追补电量。

由式(3) 可知, 欲求出追补电量, 则必须先求出更正系数  $K$ , 而更正系数  $K$  可通过实际测量求得, 也可从对错误接线的分析中求得, 根据式(1), 只要能找到计量装置在故障情况下反映的功率, 便可求出  $K$  值了。

### 3.1.3 更正系数法应用举例

某高压供电客户计量方式为高供高计, 计量 TV

变比为 10 000/100, TA 变比为 50/5, 上月有功表抄表示数为 4 500, 抄表后若干天进行了设备检修, 检修后再次送电时电能表的示数为 5 000, 但因检修造成电表反转, 经用电检查人员现场检查发现, 其现场接入电能表电压相序为 abc, 电流相序为 a、c, 但其中 c 相 TV 极性接反, 检查当天电能表示数为 4 800, 现场测试该客户负荷对称, 功率因数  $\cos\varphi$  按 0.866 (滞后) 计算, 改为正确接线后运行到月底抄表时电表示数为 6 000, 试求该客户错误接线期间的实际用电量和本抄表周期内的实际收费电量。

(1) 根据其二次回路错误情况, 画出实际计量向量图, 如图 11 所示。

(2) 写错误计量的有功功率表达式。

$$P' = U_{ab} I_a \cos(30^\circ + \varphi) + U_{cb} I_c \cos(150^\circ + \varphi)$$

因为现场负荷对称, 所以可得  $P' = -UI \sin\varphi$

(3) 所以  $K = \frac{P}{P'} = -\sqrt{3} \tan\varphi$ , 因功率因数  $\cos\varphi =$

0.866, 可得  $\tan\varphi = 1/\sqrt{3}$ , 所以  $K = -3$ 。

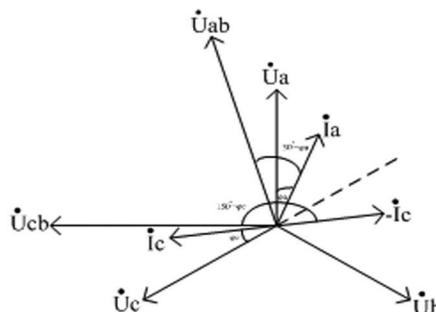


图 11 实际计量接线向量图

(4) 因错误接线期间的抄见电量为 4 800 - 5 000 = -200 kWh, 根据式(3) 可得错误接线期间

实际电量应为  $(-3-1) \times (-200) = 800 \text{ kWh}$ 。

(5) 本抄表周期的实际收费电量 =  $6\ 000 - 4\ 500 + 800 = 2\ 300 \text{ kWh}$ 。

### 3.2 相对误差法

#### 3.2.1 电能表误差的基本知识

由于电能表自身结构上以及其二次接线的原因和外界条件的影响,使得它所测得的电量与负载实际消耗的电量是有差别的,这种差别称为电能表的误差。

电能表的误差用相对误差表示,所谓相对误差即被测电量的绝对误差与实际值的百分比。按误差产生的原因,电能表的误差又可分为基本误差与附加误差。在规定的条件下(例如:电压为额定值、频率为 50 Hz、环境温度为 20 °C、无外磁场影响等)测得的相对误差称为基本误差,电能表的准确等级就是根据基本误差确定的,例如 2.0 级的电能表,其基本误差应不超过  $\pm 2.0\%$ 。由于外界条件变化引起的误差称为附加误差,产生附加误差的主要原因有:电压、频率、环境温度的变化,相序的改变等。

#### 3.2.2 用相对误差求更正电量

当测量出了电能表的实际误差后,即可根据下列公式求出其更正电量。

$$\Delta W = \frac{r}{1+r} \cdot W' \quad (4)$$

式中,  $r$  为电能表在实际运行环境下的相对误差,%;  $W'$  为上次校验或换装后投入之日起至误差更正之日止的抄见电量。

式(4)中的  $r$  不仅包括由于电能表本身结构或调整不当等原因产生的误差,而且还包括由于接线

错误而产生的计量误差。

#### 3.2.3 相对误差法应用举例

2011年6月30日,电力公司例行对供区内某铸钢厂计量表计进行现场校验时,现场发现客户计量装置封印完好,但其电能表误差为  $-5.0\%$ ,另已知该表于2010年12月30日由电力公司安装,运行期间累计抄见电量为 30 000 kWh,求追补的电量。

解:因为该表计超差并非由客户原因引起,根据《供电营业规则》第 80 条第 1 款之规定,应补收该客户电量为

$$\Delta W = \frac{r}{1+r} \cdot W' \cdot \frac{1}{2} = -789 \text{ kWh}$$

即:应补收该客户电量为 789 kWh。

## 4 结 语

伴随着电力事业的发展以及电力技术的日新月异,电能计量装置也在不断变化,但无论怎样电能计量装置始终会有出现故障的时候,所以不仅要跟上技术发展的脚步,还应掌握最基础的原理及分析方法,一旦计量发生错误,这些方法将有助于及时解决问题。

### 参考文献

- [1] 国家电网公司人力资源部. 电能计量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 孙方汉, 王新, 杜启刚. 电能计量及其管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

(收稿日期: 2012-04-12)

(上接第 37 页)

路开关重合闸均投检母线无压、线路有压方式,使接有并网小电源的 110 kV 输电线路在发生瞬时接地故障时终端变电站恢复正常运行的保护方案。此方案简单可靠,易于实现,提高了电网供电可靠性。

### 参考文献

- [1] DL/T 584-95 3~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S].
- [2] 崔家佩, 孟庆炎, 陈永芳, 等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

2000.

- [3] GB/T 14285-2006 继电保护和安全自动装置技术规程[S].

作者简介:

周 建(1968),男,工程师,主要从事与电力系统相关的工作;

彭 燕(1968)女,工程师,主要从事与电力系统相关的工作;

曾 俊(1974),男,工程师,主要从事热工技术。

(收稿日期: 2012-05-28)

# CPU卡在智能电表中的应用

肖 丽

(四川省电力公司眉山公司,四川眉山 620010)

**摘要:** 主要对智能电表用 CPU 卡的物理结构、数据交换、指令系统等基础知识进行了整理,结合大量的实践应用,对卡口防攻击电路进行了分析描述,对软件部分关键的认证流程和表内购电流程进行了深入的论述。侧重于理论与实践应用相结合,从硬件及软件两方面论述 CPU 卡在智能电表中的应用。

**关键词:** CPU 卡; ESAM 芯片; 智能电表; 认证流程; 购电流程

**Abstract:** The basic knowledge of CPU card for smart meter such as physical structure, data exchange, instruction system, etc are sorted out. Based on a large number of practical applications, the anti-attack circuit for card slot is described and analyzed. Some key parts of certification process and the electricity procurement process in this software are discussed. The focus is on the combination of theory and practical application, and the application of CPU card to smart meter is discussed from two aspects of hardware and software.

**Key words:** CPU card; ESAM chip; smart meter; certification process; electricity procurement process

中图分类号: TM930.9 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)04-0073-03

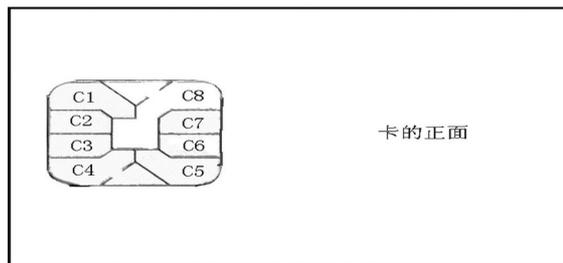
## 0 前言

CPU卡又称智能卡,指具有微处理器(CPU)和操作系统(COS)的IC卡,目前常用的加密算法有3DES及SM1。由于具有更高的数据安全性,CPU卡智能电表已经开始大量使用。CPU卡分为接触式IC卡、非接触式IC卡、两种接口方式合一的双界面IC卡。接触式IC卡主要遵循的国际标准为ISO 7816系列标准,非接触卡主要遵循的国际标准为ISO 14443系列标准。智能电表为了保证数据安全交换及可靠认证,表内置ESAM芯片(也属于CPU卡),用于存贮剩余电费、费率参数等关键数据,此类数据只有通过卡或主站加密机的双向认证才能修改,从而保证了数据的安全性。由于CPU卡和ESAM的认证过程中引入了分散因子及随机数,使用CPU卡的智能电表可实现一卡一密、一次一密,极大提高了智能电表的数据交换及电费、电价数据安全性,目前已经在国家电网大量使用。

## 1 CPU卡的硬件

### 1.1 CPU卡的物理结构

CPU卡的物理结构如图1所示,芯片有8个信号接口。



注: C1 为  $V_{cc}$  (数字电源); C2 为 RST(复位); C3 为 CLK(时钟); C4 为 NC(空); C5 为 NC(空); C6 为 I/O(输入/输出); C7 为 NC(空); C8 为 GND(地)

图1 CPU卡的物理结构

### 1.2 ESAM芯片的物理结构

ESAM芯片的物理结构如图2所示,芯片有8个信号接口。



注: 1 为 GND(地); 2 为 NC(空); 3 为 I/O(输入/输出); 4 为 NC(空); 5 为 NC(空); 6 为 CLK(时钟); 7 为 RST(复位); 8 为  $V_{cc}$ (数字电源)

图2 ESAM芯片的物理结构

## 2 CPU 卡的数据交换

### 2.1 通信时间单位 ETU

CPU 卡是通过异步通信的方式进行数据交换, I/O 口线上所用的数位宽度被确定为基本时间单位 ETU, 计算公式为  $ETU = 372/f$ , 其中  $f$  为时钟频率, 一般在 1~5 MHz 范围之间选择, 一般当时钟频率为 3.579 MHz 时, 数据传输的速率为 9 600 b/s。

### 2.2 数据发送时序

CPU 卡的数据传送是以字节为单位的, 字节传送的时序如图 3 所示。

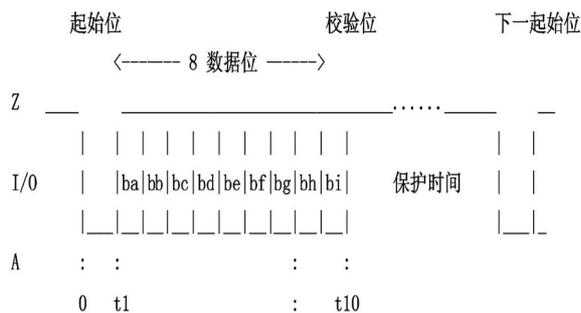


图 3 CPU 卡字节传送的时序

字符传送前, I/O 端应被置为 1, 如图 3 所示, 一个字符包括 10 个连续的 ETU。第一个时刻  $t_1$  被置于状态 0, 这个时刻称为起始时刻;  $t_2 \sim t_9$  传送 1 个字节; 最后一个时刻  $t_{10}$  传送奇偶校验位, 当奇偶校验出错时, 接收方在  $10.5 \pm 0.2$  etu 时间发送一个状态为 0, 最少为 1 etu, 最大为 2 etu 的出错信号, 然后将等待对有争议的字节重发。

### 2.3 CPU 卡指令

CPU 卡的指令格式如图 4。

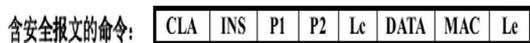


图 4 CPU 卡指令格式

1) CLA 为命令类别, 不含安全报文(命令中没有 MAC 校验)时, 为 00、 $0 \times 80$ , 含安全报文命令时为 04、 $0 \times 84$ ;

2) INS 为指令, 用于规定数据交换作用, 如  $0 \times 82$  外部认证、 $0 \times 84$  取随机数、 $0 \times 88$  内部认证、 $0 \times 30$  扣款、 $0 \times 32$  存款、 $0 \times b0$  读二进制文件、 $0 \times d6$  写二进制文件等;

3) P1、P2 为命令参数;

4) Lc 为发出的命令数据长度, Le 为响应数据的长度;

5) DATA 为传输的数据。

6) MAC 为含安全报文时的 4 字节校验数据。

## 3 CPU 卡电能表卡口防攻击设计

接触式 CPU 卡智能电表由于数据传输速度快、可靠性高而被广泛应用。但接触式卡口由于内部直接与数字电路相连接, 容易受到攻击而导致智能电表数字部分损坏失效。为此, 智能电表的防攻击卡口设计对智能电表的可靠性提升很关键。通过实验及大量应用, CPU 卡电能表防攻击卡口电路可参考图 5。

ON\_OFF\_CARD 信号用于控制卡口电源, 平时置低电平, CPU 卡插卡前不供电, MCU 检测插卡信号 KEY\_CARD 电平由高到低后, ON\_OFF\_CARD 置高电平, 给 CPU 卡供电。同时给 CPU 卡提供时钟信号, 时钟信号可使用 MCU 的时钟输出功能, 如 NEC、TI 等单片机都有主晶振 2、4 分频后输出口。300  $\Omega$  电阻 R8、R9、R10、R11 串在卡口与 MCU 通信的数据线上, 用于卡口防静电, 当对卡口静电攻击时, 对 MCU 及表内数字电路起到保护作用。RT1 是封装了热敏电阻及 TVS 管的专用卡口防攻击模块, 可有效防止表外的高压、静电、短路等攻击。

## 4 软件设计

### 4.1 CPU 卡与表内 ESAM 模块的认证过程

CPU 卡智能电表的数据安全性主要是通过 CPU 卡与 ESAM 芯片的双向认证来实现的, 表内 MCU 起数据搬运及流程控制作用。以用户卡为例, 当 MCU 判到插卡后, 先做内部认证, 通过后认为用户卡与 ESAM 芯片是同一个系统, 可进行读操作; 然后 CPU 卡对 ESAM 进行外部认证, 认证通过后 CPU 卡开放写权限, 可以把 ESAM 芯片里的数据写入 CPU 卡内; 最后 ESAM 芯片对 CPU 卡进行外部认证, 认证通过后 ESAM 芯片开放写权限, 可以把 CPU 卡的数据写入 ESAM 芯片卡内。具体的认证流程如下。

#### 4.1.1 内部认证流程

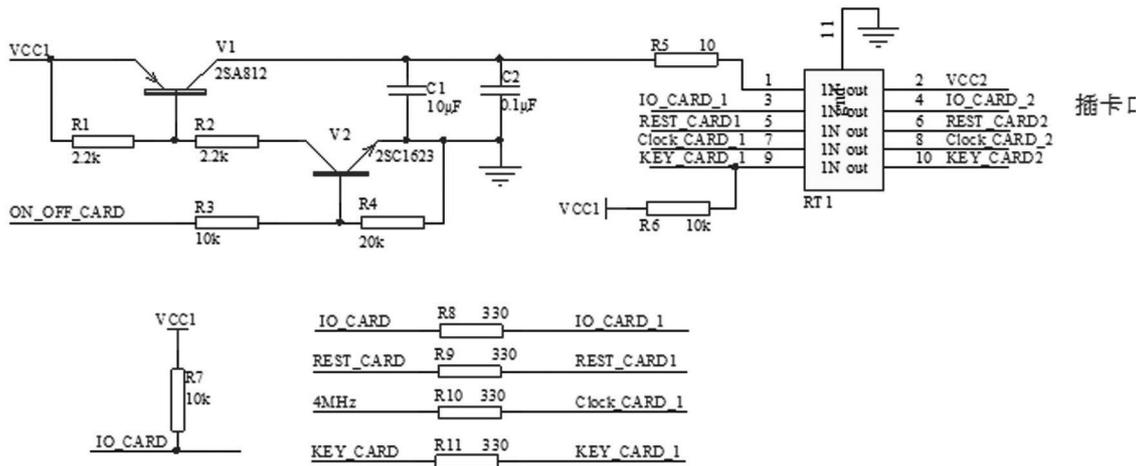


图 5 防攻击卡口电路

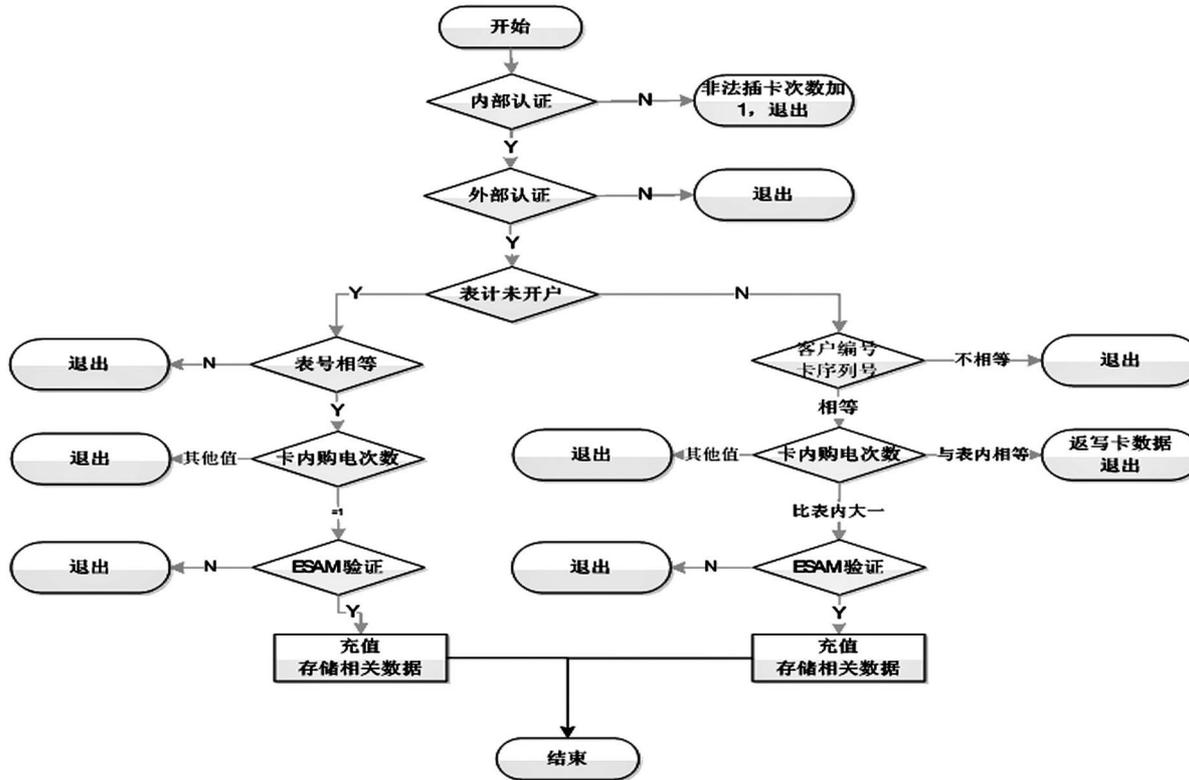


图 6 用户卡购电流程

适用于各种卡片与 ESAM 之间的认证。

- 1) ESAM 或电能表产生随机数;
- 2) 卡片对随机数加密获得密文;
- 3) ESAM 根据卡片卡号产生过程密钥;
- 4) ESAM 利用过程密钥加密随机数获得密文;
- 5) 电能表对比卡片和 ESAM 对随机数加密的结果,一致则合法,否则非法。

#### 4.1.2 外部认证流程

情况 1: 用户卡认证 ESAM

- 1) 用户卡取随机数;

- 2) ESAM 根据用户卡卡号产生过程密钥;
- 3) ESAM 利用过程密钥加密随机数获得密文;
- 4) 用户卡利用以上密文完成外部认证过程,获得相应的写权限。

情况 2: ESAM 认证用户卡

- 1) ESAM 取随机数;
- 2) 用户卡加密随机数获得密文;
- 3) ESAM 利用以上密文完成外部认证过程,获得相应的写权限。

(下转第 86 页)

可承受压强  $kPa$  ,因为发电机基坑可承受压力较大 ,  
取值为  $4.8 KPa$ ;  $X$  为泄压孔面积  $mm^2$ 。

$$X = 239 \times 672 / 4.8^{0.5} = 73\ 307.19\ mm^2$$

#### 4) 主喷放管路以及延时喷放管路管径选择

$$Q = M/T$$

$$D = (1.41 \sim 3.78) \sqrt{Q}$$

式中  $D$  为管路直径  $mm$ ;  $Q$  为平均主管管路中的流量  $kg/min$ ;  $T$  为喷放时间  $s$ 。

由上式 ,可计算出主喷放管路与延时喷放管路主管管径均可选用  $DN50$ 。

#### 5) 管路材质及壁厚选择

管路材质一般根据主、合同要求。合同没有要求的 ,可以使用不锈钢管、焊接钢管 ,若使用焊接钢管要内外镀锌 ,个别项目业主要求不能内镀锌 ,但可以涂防锈油漆 根据合同要求执行。管路安装完毕后需要进行打压试验 ,一般钢管均可承受 若合同已经规定的管路腐蚀厚度 ,应根据管路壁厚计算公式计算 ,然后选择钢管厚度。公式如下。

$$S = \frac{pd}{2\sigma} + c + \nabla S$$

式中  $S$  为管路壁厚  $mm$ ;  $P$  为管路设计压力  $MPa$ ;  $d$  为管路公称直径  $mm$ ;  $\sigma$  为设计工作温度下材料许用应力  $MPa$ ;  $c$  为腐蚀厚度  $mm$ ;  $\nabla S$  为制造偏差 ,取  $15\%$  管路壁厚  $mm$ 。

#### 6) 灭火后气体抽离系统

发电机灭火后 ,需要从发电机机坑内将  $CO_2$  抽离 ,并且排出室外。



(上接第75页)

### 4.2 购电流程

用户卡购电流程复杂 ,也是 CPU 卡操作流程中最关键的部分 ,需要多次认证及判断 ,最后才能把购电卡里的电费充值到表内 ESAM 钱包文件里。图 6 是结合国内主流售电系统流程的用户卡表内购电流程图。

## 5 结束语

CPU 卡是继存贮器卡、逻辑加密卡后的第三代 IC 卡 ,CPU 卡及 ESAM 芯片在智能电表上的应用为智能电表本地安全数据交换、远程加密数据通信提

## 3 结 语

从水电站设立值班人员数量看 ,中国值班人员较多 ,国外水电站多按照无人值班设计 ,尤其是欧洲电站。在中国水电站 ,发电机水喷雾灭火发生误报警误动作时 ,若灭火采用自动方式 ,则水喷雾会使线圈损坏 ,导致水电站损失较大 ,所以中国发电机水喷雾灭火一般采用手动方式。当有报警发生后 ,值班人员去现场确认 ,确认发生火灾后 ,手动启动灭火装置 给发电机灭火。这时 ,发电机灭火快慢取决于值班人员的动作快慢。无人值班水电站一般采用发电机  $CO_2$  灭火 ,发生火灾后灭火系统动作迅速 ,即使误动作 ,抽离  $CO_2$  后 ,不影响机组继续使用。随着社会和科技的发展 ,中国水电站会逐步实现无人值班 ,发电机灭火也会由水喷雾灭火为主 ,逐步改变为  $CO_2$  灭火。

### 参考文献

[1] NFPA 12 - 28 ,Standard on Carbon Dioxide Extinguishing System [S].

作者简介:

王 伟(1983) ,男 ,学士 ,主要从事火电调试工作;

曹 静(1986) ,女 ,硕士 ,主要从事水电站机电设计工作。

(收稿日期:2012 - 04 - 06)

供了重要技术支撑 ,为未来智能电表的双向信息互动提供了很好的技术平台。CPU 卡智能电表会因其快捷的充值操作、安全的数据传递而受到供电局及用户的青睐。

### 参考文献

[1] ISO/IEC 7816 ,卡片基本规范及数据交换命令 [S].  
[2] Q/GDW\_365 - 2009 智能电能表信息交换安全认证技术规范 [S].  
[3] 北京握奇有限公司 ,TimeCOS/PBOC 通用技术参考手册.  
[4] 北京融通高科有限公司 ,ARTCOS ESAM 通用手册.

(收稿日期:2012 - 05 - 29)

# 无线窃电系统研制及应用

万忠兵<sup>1</sup> 赵智辉<sup>2</sup>

(1. 广安电业局 四川 广安 638000; 2. 四川电力科学研究院 四川 成都 610072)

**摘要:**通过分析目前窃电工作所面临的困难,引出无线窃电系统。进一步介绍了无线窃电系统的组成和关键技术并详细介绍了无线窃电系统主要功能的实现原理。通过现场运行,介绍了无线窃电系统在电网挂网运行的应用实例。

**关键词:**无线; 窃电; 在线监控; 自动报警

**Abstract:** Through the analysis of the difficulties in electricity - stealing prevention, the wireless electricity - stealing prevention system is introduced. Furthermore, the composition and the key technologies of the wireless electricity - stealing prevention system are introduced as well as the realization principle of its main function in detail. Through the field operation, the application examples of the wireless electricity - stealing prevention system running in the power grid are also introduced.

**Key words:** wireless; electricity - stealing prevention; on - line monitoring; automatic alarm

中图分类号: TM502 文献标志码: B 文章编号: 1003 - 6954(2012)04 - 0076 - 04

窃电严重地侵害了供电企业和守法用户的权益,导致线损居高不下,不仅给国有资产造成巨大损失,而且严重扰乱了供用电秩序。据有关方面估算,全国每年因窃电造成的经济损失逾 200 亿元。窃电行为正向着多发、主体多元、手段隐蔽、技术含量高方向发展,窃电电案值直线攀升,防不胜防。

## 1 反窃电工作面临的困难

### 1.1 查窃电的难点

电力用户点多面广,查窃电需要投入大量的人力物力。查窃电过程中,也存在诸多困难,如:进入用户检查时,用户可以采用各种方式,如门卫采取繁琐请示汇报程序,延缓查窃电人员进入现场,窃电者有足够的时间采取对策;面对损坏的用电计量装置铅封,拒不承认是窃电。

### 1.2 认定窃电量的难点

电力是无形的特殊商品,看不见摸不着,窃电与“销赃”(使用窃取的电力)是同时完成的。没有了赃物,仅有作案现场(如现场抓获现场窃电行为),认定窃电量难取得直接证据,窃电时间难确定。现场取证只证明有窃电行为,很难直接证明窃电时间

和窃电量,采用推算的办法难免出现争议。

为了切实有效打击各类窃电行为,防止国有资产流失,维护正常供用电秩序,则提出了无线窃电系统的研究,通过实时在线数据采集比对,及时发现窃电行为,为有效查处窃电行为提供技术保障。

## 2 无线窃电系统简介

无线窃电系统由无线电流变送器、无线数据集中器、多功能电能表和监控中心的主站组成,如图 1 所示。无线电流变送器安装在用户变压器的高压侧,采集一次电流并用无线方式发送至无线数据采集器;无线数据采集器安装在用户端,通过无线接收高压侧的电流信息,并且通过 485 通讯读取多功能电能表上的电能量信息,进行比较、运算、登记、存储等处理,并通过 GPRS 上传监控中心主站。多功能电能表安装在用户前端,完成对电压、电流、电能等的计量,带有 485 接口便于集中器的数据读取。监控中心的主站全面汇总各无线数据集中器的数据,按照具体的要求,进行数据的比较、显示、存储等综合处理。根据用户设定对异常情况进行自动报警。

### 2.1 无线电流变送器

无线电流变送器主要用于在线同步采集计量装置一次电流,采用无线方式与无线数据采集器进行

此项目为四川电力科学研究院 2010 年科技研究项目:四川电网反窃电装置研制及运用

实时通讯。无线电流变送器安装在计量装置高压侧和高压线路同电位,工作电源也仅由一次电流感应供给,无需外加电源,无二次引出线,设备整体绝缘性能较高。无线数据集中器可以实时进行数据比对,定时将监控中心主站需求的信息上传,出现异常时,上传报警信息。

### 2.2 无线数据集中器

无线数据集中器主要功能为数据采集、数据分析、数据存储和数据上传等。无线数据集中器通过采集无线电流变送器和电能表数据,进行比较、运算、登记、存储等处理,并通过 GPRS 上传监控中心主站。

### 2.3 监控中心主站

作为系统的远程监控中心,对现场终端监测数据和电能表读取数据进行汇总分析,也可作为主站 Web 发布数据服务器,为数据的 Web 网络共享提供数据源。

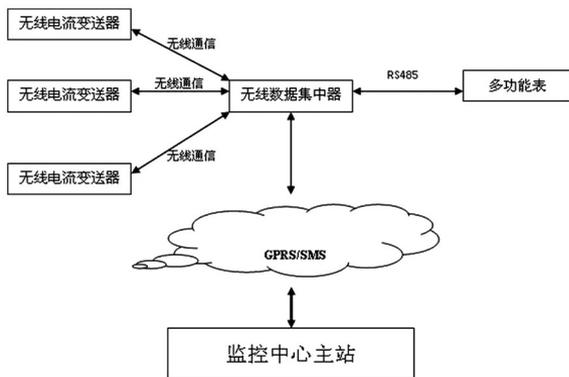


图 1 无线窃电系统示意图

## 3 无线窃电系统设计

### 3.1 关键技术

#### 3.1.1 无线电流变送器设计

无线变送器电路包括系统管理、数据采集、无线发送三大部分。系统处理器采用 MSP430 低功耗处理芯片,利用自带模数转换功能实现电流数据的数字处理。当收到无线数据终端发送数据请求时,MSP430 会将数据传给无线收发管理芯片 Nrf905,从而将电流数据传送给无线数据终端。

电流采集调理电路将互感器二次电流信号转换为电压信号,并实现电压信号的偏置和幅值的匹配。

电源电路是整机的能量来源。由于无线变送器挂在一次高压侧,高压环境使得无线电流变送器馈电很困难,本设备采用从一次馈电的方法,解决了高压

用电安全的问题,同时由于无线变送器没有“二次引线”初次级等电位,从而解决了传统互感器初次级耐压绝缘的问题。

在供能方法上确保有尽可能宽的工作电流变化范围,为此将研究重点放在铁心材料的改进上,应用坡莫合金、微晶合金等饱和磁感应强度低的导磁率高的磁性材料从一次母线上获取能量。设计了相应的控制方案,确保在母线电流变化比较大,尤其是出现大电流的情况下,能够有稳定可靠的电源输出。在过电压防护、能量泄放电路、电磁兼容设计等方面进行了深入研究,保证了电流变送器在极限情况下的可靠性。

#### 3.1.2 无线数据采集终端设计

无线数据采集终端(EDAT)是在电力行业嵌入式系统开发多年的技术积累的基础上,为实现电能量实时数据自动采集、数据远程传输而精心设计的专用产品。该终端具有采集精度高、可靠性好、功能强大、扩展方便、性价比高等特点。无线数据采集终端采用交直流自动切换工业级开关电源,单相供电,配有一路直流输入。无线数据采集终端采用符合 IEC 国际标准的电能量数据传输规约,支持 IEC 870-5-102,也可支持用户提供的其他规约。通讯通道选择为 RS485 Modem 和 GPRS Ethernet,配有一路数字开关量输入/输出,两路输入,整机功耗小于 2 W,数据保存可达 20 年。

#### 3.1.3 无线窃电系统主台软件设计

无线窃电系统主台软件采用 Java 语言进行开发,利用 Java 语言的跨平台特性,屏蔽了硬件和操作系统的差异,使系统具备硬件和操作系统无关性。无线窃电系统主台软件支持多数据库,包括 SQL Server、Oracle、Sybase、DB2 等,支持多操作系统,Windows 2000、Unix、Linux。系统的数据库服务器采用双机热备和集群,并采用多前置机的并发采集方式,保证系统全年 365 d,每天 24 h 都能提供连续服务。安全访问机制确保了安全用户只能访问授予它权限的安全对象,主站可设置不同角色的操作权限,保证系统的安全性,防止非法设置参数,修改原始数据和统计模型。对重要信息,如换表、修改数据的操作,系统能将操作内容、时间、结果及操作人员姓名登录,保存档案,供查阅或打印。无线窃电系统采用 JavaRMI 分布式技术,将企业的业务数据和程序分布在网络的不同计算机上,而这些计算机的分布不局限于在机房,可以是网络到达的任何地方。

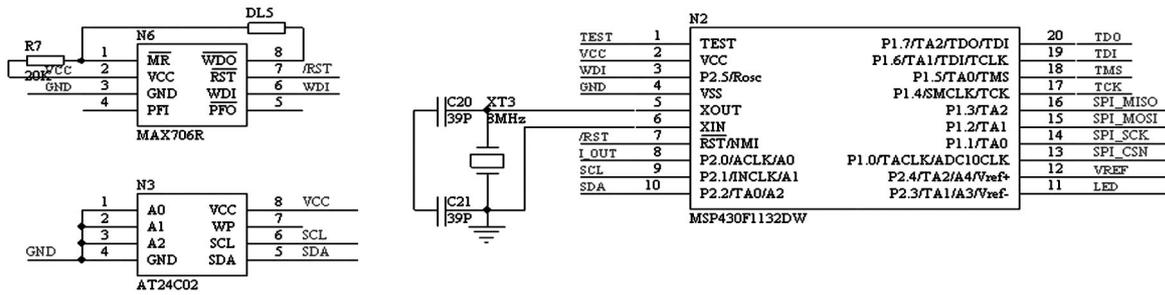


图 2 系统部分电路图

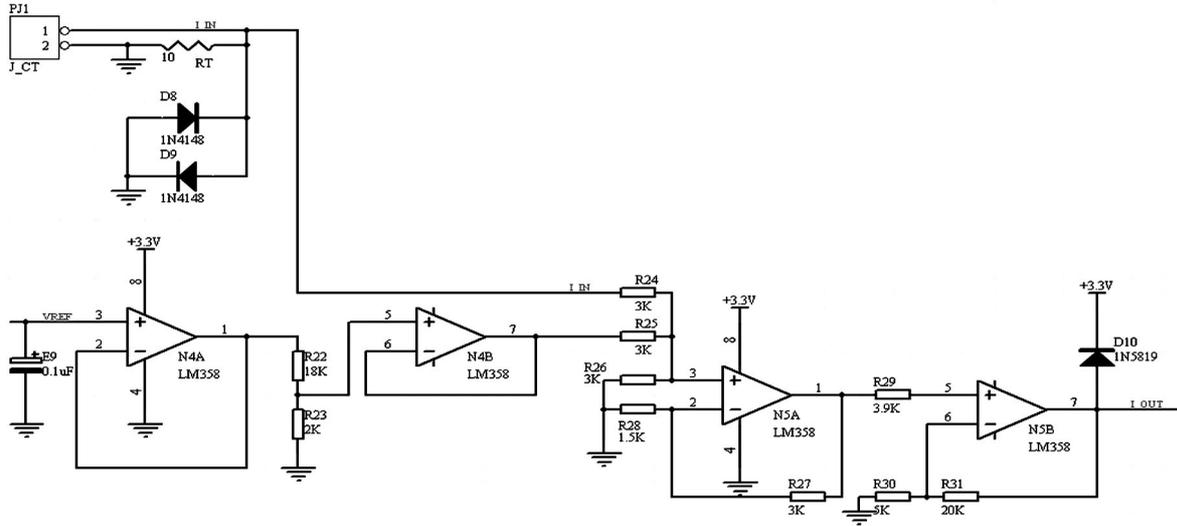


图 3 电流采集调理电路图

### 3.2 防窃电功能设计

目前常见的窃电方式主要有通过改变电流窃电、改变电压窃电、改变电能表使其计量失准等方式进行窃电。无线防窃电系统针对以上几种常见的窃电方式进行针对性的分析研究,制定详细的分析方法和查处报警措施。无线防窃电系统通过采集计量装置高压侧一次电流值与电能表计量用二次电流值进行比对,根据系统设定的门限值判定电能表计量二次电流是否存在分流、失流情况,一经发现超限情况即刻进行报警,有效防止通过改变电流方式的窃电行为。无线防窃电系统通过采集电能表计量回路电压值,根据系统设定的门限值判定电能表电压回路是否存在欠压和失压的情况,一经发现超限情况即刻进行报警,有效防止通过改变电压方式的窃电行为。无线防窃电系统通过采集一次电流值与电能表电压值同步计算实负荷功率值与电能表计量功率值比对,根据系统设定的门限值判定电能表计量功能是否正确,有效防止通过使电能表失准方式的窃电行为。

## 4 应用情况

### 4.1 无线防窃电装置装用前试验

为了保证设备的安全可靠运行,对无线电流变送器进行了装用前试验,试验项目包括绝缘性能试验、无线通讯抗干扰性试验、测量结果校准试验等,对无线数据采集终端按规程要求进行了全面检定。无线电流变送器由于采集全密封整体式浇注,选用浇注前设备进行了绝缘性能试验,无线电流变送器一次设备对外壳绝缘电阻测试值大于  $5\text{ M}\Omega$ ,满足规程技术要求。对无线电流变送器增加无线通讯干扰,测量结果均能正常传递。无线电流变送器测量数据与标准测试数据进行了校准比对,测量结果均在  $\pm 0.5\%$  误差范围内。无线数据采集终端按规程项目要求均合格。

### 4.2 无线防窃电装置安装与调试

无线防窃电装置现场设备主要有无线电流变送器和无线数据采集终端。无线电流变送器采用穿心式电流互感器设计,直接安装于计量装置进线侧,使

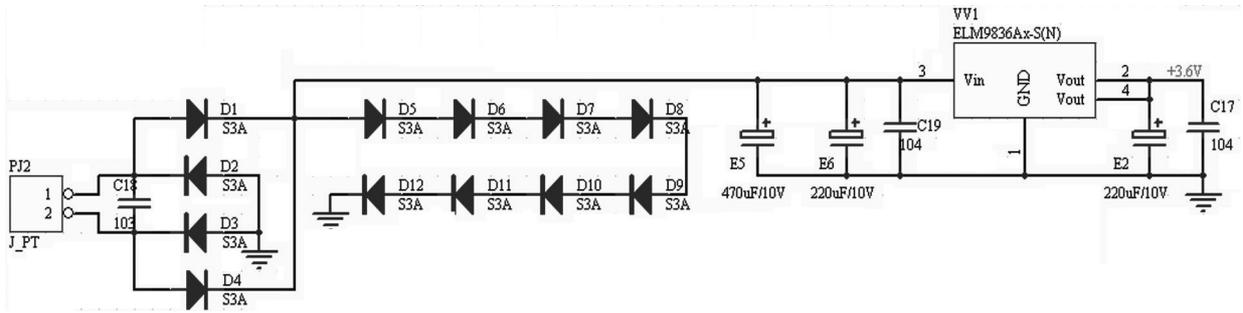


图 4 无线电流变送器电源电路图

表 1 无线窃电装置采集数据

名称	采集时间	A 相电流 /A	C 相电流 /A	有功功率 /kW	无功功率 /kVar
无线窃电装置	2012-04-18 7:00	32.3	31.9	526.91	237.4
电能表实测值	2012-04-18 7:00	2.14	2.13	0.349	0.157
电能表计量折算值		32.1	31.95	523.5	235.5
无线窃电装置	2012-04-18 23:00	63.6	63.9	1016.29	519.89
电能表实测值	2012-04-18 23:00	4.23	4.25	0.676	0.346
电能表计量折算值		63.45	63.75	1014	519

用自带内支架进行固定,无二次引出线,现场安装简便,安装后无任何安全隐患。无线数据采集终端安装于表箱内,通过 RS485 通讯线与计量电能表相连接,采用并接计量电压回路对设备进行供能,主要负责采集无线电流变送器、计量电能表数据和数据的远程上传等。

现场调试内容包括无线数据采集终端通讯参数设置、电能表参数设置、无线电流变送器参数设置等内容。现场参数设置完成后,通过对无线电流变送器的数据采集与电能表计量电流进行比对正确后,现场调试工作即可完成。

#### 4.3 无线窃电装置现场运行情况

目前,无线窃电系统已成功应用于四川省电力公司眉山公司和内江电业局,系统各项参数运行正常,监测数据准确可靠,未出现故障与异常情况。表 1 为内江电业局某客户 10 kV 高压计量装置现场采集数据情况。

#### 4.4 存在的问题

根据目前无线窃电系统的运行状况分析,该系统主要存在以下两方面的问题:一是无线电流变送器在负荷电流值小于额定电流值的 10% 后,无线电流变送器无法供能,导致低电流值时无法监控计

量装置运行状态。二是该系统未单独采集电压回路电压,采用电能表电压值进行电能量计算,虽然对终端采集的电压值设定了预警值,但若改变电压回路电压值但未超过采集终端电压预警值进行窃电,将不能进行正常判断。

## 5 结束语

无线窃电系统整合无线通信和网络技术实现了在线实时窃电监控,功能全面的窃电主台软件能够将现场采集的各种预设数据准确地提供供电部门,大大减轻窃电任务的工作负担。作为一种新的系统集成,该项目在技术的先进性与可靠性上目前处于国内行业先进水平。下一步将利用现有平台,拓展功能,增加主台软件事件监测项目,增强无线数据终端在线测量分析,使其成为以防窃电监测为主,多种数据测量为辅的多功能监测平台。

#### 参考文献

[1] 林峰浩,李金喜.基于高压电能表的配电网窃电系统设计[J].水电能源科学,2008,26(6):186-188.

(收稿日期:2012-05-07)

# 不确定度分析在电站锅炉效率计算中的应用

韩 伟<sup>1</sup>, 刘慧超<sup>2</sup>

(1. 四川电力工业调整试验所, 四川 成都 610072; 2. 四川水利职业技术学院, 成都 崇州 611230)

**摘要:**介绍了不确定度分析和评定的基本原理, 建立锅炉效率计算中不确定度的分析数学模型方法, 以及各个参数测量精度不确定度和偏差不确定度的计算方法, 并以苏丹 Garri - 4 纯烧石油焦锅炉为例, 对锅炉热效率不确定度进行分析评定。

**关键词:**不确定度; 锅炉热效率; 精度不确定度; 偏差不确定度

**Abstract:** The basic theory of the uncertainty analysis and evaluation is introduced, the mathematical models for uncertainty in boiler efficiency calculation are established, and the calculation methods for the measurement precision uncertainty and bias uncertainty of parameters are proposed. Taking Sudan Garri - 4 petroleum - coke - fired CFB boiler for example, the uncertainty of boiler thermal efficiency is analyzed and evaluated.

**Key words:** uncertainty; thermal efficiency of boiler; precision uncertainty; bias uncertainty

中图分类号: TK223.7 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2012)04 - 0080 - 04

电站锅炉热效率是反映设备运行经济性的一项非常重要的指标, 特别是一些新投运机组或旧机组大修后, 一般都要进行锅炉热效率试验, 以确定锅炉运行的经济性, 分析锅炉的节能潜力, 查找影响锅炉经济运行的主要因素。试验完成后, 在测试单位出具的报告中, 不但包括锅炉热效率的计算结果和相关测试数据, 还应该包括对测算结果的可信度以及质量的评价。不确定度分析就是定量表达试验结果精度的一种方法, 因此试验前后不确定度分析是性能试验的重要工作<sup>[1]</sup>。

测量不确定度是指测量结果的可靠程度, 并不说明试验结果是否接近真值。一般而言, 测量不确定度越小, 测试结果的质量越高, 测试水平越先进, 使用价值越高。

## 1 不确定度分析原理

### 1.1 数学模型

为了方便进行不确定度分析, 需要建立满足测量不确定度评定的数学模型, 测量中, 测试结果  $R$  有多个独立的被测量  $x_1 \sim x_M$  通过函数关系  $f$  来确定, 即

$$R = f(x_1, x_2, \dots, x_M) \quad (1)$$

### 1.2 不确定度分类

ASME PTC4 - 1998 规程中, 把试验的不确定度分为两类: 精度不确定度和偏差不确定度。将某一参数的不确定度归类为偏差不确定度还是精度不确定度并非易事, 一般而言, 精度不确定度与时间变化有关, 而偏差不确定度被认为不随时间变化。精度不确定度基于的事实是同一试验人员、使用同一测量设备、对同一变量进行多次测量时, 得到不同的值。而偏差不确定度是测量系统的特征体现, 不是随机的, 当采用测试设备和计算方法固定时, 其值理论上是不变的。

### 1.3 两种不确定度的计算方法

#### 1.3.1 精度不确定度

两类测量不确定特征不同, 其计算方法也不尽相同。单点多次测量: 在单一点随时间进程对某一定值参数进行多次测量, 比如环境温度和大气压力等参数, 其精度指标<sup>[1]</sup>为

$$PI = S_x = \sqrt{\frac{S_x^2}{N}} \quad (2)$$

$$S_x^2 = \left(\frac{1}{N-1}\right) \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad (4)$$

自由度为

$$v = N - 1$$

多点多次测量: 在网格中每一点随时间进程进行多次测量, 随时间进程的每一点测量值取平均值, 以确定在该点的参数值, 比如烟气温度和烟气中氧量, 其精度指标<sup>[1]</sup>为

$$PI = \frac{1}{m} [\sum_{i=1}^m (S_{x_i})^2]^{1/2} \quad (5)$$

$$\text{式中 } x_i = \frac{1}{N_j} \sum_{j=1}^N (x_j)_i \quad (6)$$

自由度为

$$v = \frac{PI^4}{\sum_{i=1}^m [\frac{S_{x_i}^4}{m^4 \cdot v_i}]} \quad (7)$$

式中  $S_{x_i}$  为点  $i$  处参数的精度指标, 由公式 (2) 计算获得;  $m$  为测点的网格点数;  $v_i$  为  $S_{x_i}$  的自由度, 即点  $i$  处读数的次数减 1。

某一变量的精度不确定度由该测试结果的精度指标与其对应的  $t$  分布值的乘积,  $t$  分布值基于结果的精度指数的自由度和选定的概率水平 (规程 ASME PTC4 - 1998 规定概率水平为 95% 为计算基准)。

### 1.3.2 偏差不确定度

偏差不确定度的确定一般通过以下几种方法获得: 以前测试的历史数据、基于长期经验的正确判断、试验仪器所提供的技术文件、校准证书或检定证书提供的数据、规定试验方法的国家标准给出的重复性限等。

### 1.3.3 合成不确定度

确定了精度和偏差不确定度后, 需要确定由数据计算结果的不确定度, 称之为不确定度传递, 因为精度和偏差不确定度属于不同类型的量, 因此分别计算各自的不确定度传递, 最后合成计算结果不确定度。得到每个变量的精度不确定度和偏差不确定度后, 其基本传递方程式为

$$e_R = [(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot ex_1)^2 + (\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot ex_2)^2 + \dots + (\frac{\partial f}{\partial x_M} \cdot ex_M)^2]^{1/2} \quad (8)$$

式中  $e$  对精度为精度指标, 对偏差为偏差不确定度;  $M$  为独立被测量参数的个数。

合成不确定度计算为

$$U = (U_p^2 + U_B^2)^{1/2} \quad (9)$$

式中  $U_p$  为精度合成不确定度;  $U_B$  为偏差合成不确定度。

## 2 锅炉热效率不确定度分析模型

锅炉设备型号各不相同, 但其热效率计算原理大致是相同的, 仅计算的表达形式有所区别。根据 ASME PTC4 - 1998 规程规定, 以能量平衡法计算锅炉热效率, 热效率基本计算公式<sup>[1]</sup>如下。

$$EF = 100 - Q_p L + Q_p B \quad (10)$$

式中  $EF$  为燃料效率;  $Q_p L$  为系统热损失之和;  $Q_p B$  为系统热增益之和。

$$Q_p L = Q_p LDFg + Q_p LH2F + Q_p LWF + Q_p LWA + Q_p LUBc + Q_p LRs + Q_p LNOx \quad (11)$$

式 (11) 右端各项依次为干烟气损失、燃料中氢燃烧生成水而造成的损失、因固体燃料中水分造成的损失、因空气中水分引起的损失、由灰渣中未燃尽碳造成损失和形成  $NO_x$  而引起的损失。

$$Q_p B = Q_p BDA + Q_p BWA + Q_p BF \quad (12)$$

式 (12) 右端各项依次为进入系统的干空气所携带的热增益、空气中水分携带的热增益和燃料显热携带的热增益。

在锅炉热效率计算各项热损失和热增益中, 需要测试的参数有: 干湿球温度 (需仪器干湿球温度计)、环境大气压力 (需仪器大气压力表)、烟气温度、空气预热器进口风温 (需仪器 T 型热电偶)、烟气中氧量、烟气中  $NO_x$  含量 (需仪器烟气分析仪)、石油焦取样分析、飞灰和底渣取样分析等。

通过计算以上各参数变量的不确定度, 然后按照不确定传递的计算公式, 最后计算出锅炉热效率结果的不确定度。

### 2.1 烟气中 $O_2$ 和 $NO_x$ 测试不确定度分析

烟气  $O_2$  和  $NO_x$  测量采用网格法, 测点与烟气温度测点位置相同, 其不确定度包括精度不确定度和偏差不确定度。精度不确定度基于重复多次、多点测试带来, 根据公式 (5) ~ (7) 计算。偏差不确定度主要包括: 由于分析仪精度带来的不确定度, 其值可根据烟气分析仪的精度等级和使用的量程确定, 也可根据使用烟气分析仪器的检定证书; 标准气体标定烟气分析仪带来的测量不确定度, 烟气分析仪在使用前必须用标准气体进行标定, 标准气体示值的不确定度会带来测试结果的偏差, 这部分不确定度可根据标准气体的检定证书进行计算; 测量方法带来的不确定度, 主要是指由于烟气成分在空间分

布的不均匀性,而测点布置无法做到完全覆盖整个截面以精确测量,即测点数量的有限性带来的不确定度;被测烟气成分本身的不稳定性带来的不确定度,主要指因锅炉燃烧不稳定而导致烟气成分波动,即烟气成分时间上的不均匀性带来的不确定度。

### 2.2 干、湿球温度测试不确定分析

干、湿球温度测试不确定主要包括重复多次测量带来的精度不确定度和由于测量仪器精度限制带来的偏差不确定度,其偏差不确定度可根据仪器的极限误差或者仪器的校准证书给出的不确定度进行计算。

### 2.3 大气压力测试不确定分析

其方法与干、湿球温度测试不确定度分析方法类似。

表 1 锅炉热效率测算结果

名称	单位	结果
干球温度	℃	33.4
湿球温度	℃	28.5
大气压力	Pa	96730
空预器进风温度	℃	38.4
排烟温度	℃	133.8
烟气中氧量	%	5.15
炉渣温度	℃	901
烟气中 NO <sub>x</sub>	ppm	331
石油焦分析		
碳	%	85.77
氢	%	3.6
氧	%	0.9
氮	%	1.24
硫	%	0.24
灰分	%	1.84
水分	%	6.4
挥发分	%	10.04
固定碳	%	81.72
高位发热量	kJ/kg	33990
灰渣分析		
飞灰未燃碳含量	%	16.7
底渣未燃碳含量	%	8.5
锅炉效率	%	91.78

### 2.4 排烟温度测试不确定度分析

排烟温度测试一般采用网格法测试,一次仪表采用“T”型热电偶,二次仪表采用数据采集系统。其不确定度也有精度不确定度和偏差不确定度两种类型。精度不确定度基于重复多次测量带来,根据公式(5)~(7)计算。其偏差不确定度影响因素较多:由一次仪表即热电偶带来的不确定度,一般根据热电偶的等级,按照均匀分布确定热电偶带来的偏

差不确定度;二次仪表带来的测试不确定度,由于数据采集系统具有很高的测量精度,因此一般忽略由数据采集系统带来的不确定度。测量方法带来的不确定度,主要是指由于排烟温度在空间分布的不均匀性,而测点布置无法做到完全覆盖整个截面以精确测量,即测点数量的有限性带来的不确定度;被测烟气温度本身的不稳定性带来的不确定度,主要指因锅炉燃烧不稳定而导致烟气温度波动,即烟气温度时间上的不均匀性带来的不确定度。

### 2.5 石油焦分析结果的不确定度分析

入炉石油焦成分不确定度也包括精度不确定度和偏差不确定度。

对平行样(一般取 2~3 个样)的分析结果进行统计分析,得到的评定结果为精度不确定度。

表 2 锅炉热效率不确定度计算结果

基本效率	91.78
干球温度	0.027
湿球温度	0.011
大气压力	0.041
空预器进风温度	0.007 5
排烟温度	0.085 3
烟气中氧量	0.014 2
炉渣温度	0.000
烟气中 NO <sub>x</sub>	0.027
碳	0.123 1
氢	0.082 7
氧	0.003 1
氮	0.004 2
硫	0.017 8
灰分	0.210 4
水分	0.000 3
挥发分	0.041 1
高位发热量	0.310 2
飞灰未燃碳含量	0.027
底渣未燃碳含量	0.031
结果的精度指标	0.024 1
整体自由度	27.86
t - 分布	2.048
不确定度的精度分量	0.049 36
结果正偏差 不确定度分量	0.468 2
结果负偏差 不确定度分量	0.468 2
正的整体不确定度	0.470 8
负的整体不确定度	0.470 8

偏差不确定度来源主要有取样过程带来的不确定度,主要指所取石油焦成分不能完全代表热效率试验期间入炉石油焦的成分;制样过程带来的不确定度,主要指所分析的石油焦样不可能和所取石油焦样完全一致;分析仪器带来的不确定度,主要指由于仪器本身精度限制,一般此不确定度服从均匀分布,可从仪器的校准证书直接获得。需要注意的是石油焦分析的结果是空干基状态,其分析不确定度

还不能直接带入锅炉热效率计算中,还需要根据不确定度传递原理转换到收到基状态,然后再进行锅炉热效率不确定度计算。

### 2.6 灰渣分析结果的不确定度分析

与石油焦成分不确定度分析方法类似。

## 3 应用实例

苏丹 Garri - 4 期纯烧石油焦锅炉为例,分析锅炉热效率计算结果的不确定度。根据能量平衡法以及上述计算公式,锅炉热效率测算<sup>[1-2]</sup>结果如表1和不确定度计算<sup>[1]</sup>结果如表2。

## 4 结论

介绍了不确定度分析的相关内容及其计算的理论基础,并以苏丹吉里电厂纯烧石油焦锅炉效率计

(上接第59页)

高,油中溶解有氢时,设备中某些油漆(醇酸树脂),在某些不锈钢的催化下,甚至可能生成大量的氢。这些气体的存在一般不影响设备的正常运行。为做好单纯氢气含量超过注意值的电流互感器的技术监督工作,提出以下几点建议。

(1) 对于明确判断为因设备材质和制造工艺原因引起的单纯氢气含量超过注意值的设备,可以判断为正常,从经济角度来看,无须进行处理。对氢气含量特别高( $\geq 500 \mu\text{L/L}$ )的设备应引起注意,在条件允许的情况下应对其进行脱气处理,主要从两个方面的原因来考虑:①氢气含量过高容易掩盖某些早期的潜伏性故障,而造成错过发现故障的最佳时期;②由于氢气在变压器油中的奥氏瓦尔特系数比较小(50℃时仅为0.06),油中氢气含量过高容易造成氢气游离出油中,以微小气泡的形式从油中析出,在狭长的缝隙中逐渐积聚并附着在绝缘表面上,形成气泡性电晕放电。若放电发生在导线绝缘和垫块之间或导线绝缘与撑条的缝隙处,则造成的危害就更大。在长期工作电压作用下,气泡内的烃类气体分子形成的带电粒子会导致电流瞬间增大,造成绝缘击穿,引发恶性安全事故。

(2) 正常情况,此类设备油中的氢气含量一般在投入运行3~5年后,油中的氢气含量达到稳定,或有缓慢的下降趋势。对氢气含量已趋于稳定后,

算为样本,建立了不确定度分析的数学模型和评定实例,结果表明影响不确定度的主要因素是石油焦的取样和分析、氧量测试以及空气预热器进风温度和排烟温度的测试。测试过程中,降低这些参数的测试不确定度即能减少了测试结果的不确定度。

### 参考文献

- [1] ASME PTC4 - 1998, Fired Steam Generator Performance Test Code [S].
- [2] IAPWS IF97, Properties of Water and Steam [S].

作者简介:

韩伟(1979)男,工程师,在四川电力工业调整试验所工作,长期从事电站锅炉性能试验及电站锅炉煤粉燃烧技术研究;

刘慧超(1974),女,工程师,从事电站设计及新技术研发等工作。

(收稿日期:2012-04-25)

发现氢气含量再次增长,尤其是甲烷等烃类气体也有明显增长趋势,总烃未超过注意值亦应引起高度重视。

(3) 严格把好设备入网验收关,电流互感器投入运行前严格执行国家相关标准(油中氢气含量应低于 $50 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ )。设备投入运行后,发现氢气含量超过注意值,在未弄清原因之前应缩短跟踪检测周期,待查明原因后,根据具体情况制定相应的检测周期,切不可任意认定为非故障气体。

## 4 结论

通过对成都电网电流互感器油中氢气来源的研究,发现如下结论:①电流互感器油中单纯氢气含量超过注意值大多是由于设备材质和制造工艺所致,为非故障气体,一般情况下不影响设备的正常运行。②电流互感器油中氢气主要来自不锈钢组件在钢加工过程中吸附氢气的释放和树脂类油漆催化脱氢,而非普遍认为的环烷烃催化脱氢、设备受潮水解等原因。

### 参考文献

- [1] GB/T 7252 - 2001, 变压器油中溶解气体的分析和判断导则 [S].

(收稿日期:2012-02-15)

# NFPA12 标准下水电站发电机 CO<sub>2</sub> 灭火管路设计探讨

王伟<sup>1</sup>, 曹静<sup>2</sup>

(1. 四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610016;

2. 中水顾问集团成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:** 主要讨论了 NFPA12 标准下水电站发电机 CO<sub>2</sub> 灭火与国标水喷雾灭火方式的优缺点对比, 以及发电机 CO<sub>2</sub> 灭火管路设计计算。随着社会和科技的发展, 中国水电站会逐步实现无人值班, 发电机灭火也会由水喷雾灭火为主, 逐步改变为 CO<sub>2</sub> 灭火为主。

**关键词:** NFPA12; 发电机; CO<sub>2</sub> 灭火; 管路设计

**Abstract:** The advantages and disadvantages between CO<sub>2</sub> fire fighting under NFPA12 standard and water spray fire fighting under national standard for generators in hydropower station are discussed, as well as the design calculation for CO<sub>2</sub> fire fighting pipeline of generators. Along with the development of society and technology in China, the unattended operation will be realized step by step in hydropower station, and the fire prevention of generator will gradually give priority to CO<sub>2</sub> fire fighting instead of using water spray fire fighting in hydropower station.

**Key words:** NFPA12 standard; generator; CO<sub>2</sub> fire fighting; pipeline design

中图分类号: TV742 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0084-03

中国水电建设和设计公司进入国际市场, 会面临很多挑战, 比如, 使用语言不一致, 在交流方面与在中国执行合同过程中显然不一样; 中国设计单位和建设单位要在国际上逐渐树立自己的品牌, 赢得国际社会认可; 投标与合同执行过程中采用新的设计、建设标准, 要重新了解、学习、掌握国际标准与中国标准的不同, 以便在投标、合同谈判以及执行过程中游刃有余。发电机灭火标准就是其中的一项。与中国采用水喷雾灭火不同, 国外一般执行 NFPA12 标准, 采用发电机 CO<sub>2</sub> 灭火。

## 1 水电站发电机水喷雾灭火与 CO<sub>2</sub> 灭火比较

中国水电站发电机灭火设计中采用水喷雾灭火, 但国外水电站尤其是美国、欧洲电站或者在历史上被欧洲殖民过的国家中一般采用发电机 CO<sub>2</sub> 灭火。国外电站一般采用无人值班的方式, 当发电机失火, CO<sub>2</sub> 灭火系统可自动将火灾扑灭。中国水电站虽然按照“无人值班”设计, 但实际上一般采用少人值班, 达不到“无人值班”, 所以, 发电机使用 CO<sub>2</sub> 灭火对电站运行人员有一定的危险性。表 1 列举水

电站发电机水喷雾灭火与 CO<sub>2</sub> 灭火的优缺点。

表 1 水电站发电机水喷雾灭火与 CO<sub>2</sub> 灭火的优缺点

优缺点	发电机灭火方式	
	水喷雾灭火	CO <sub>2</sub> 灭火
优点	1) 无污染, 方便, 灭火快。	1) 无污染, 方便, 灭火快。
	2) 设计、施工、操作简单。	2) 灭火后发电机可维修后再使用, 节约成本。
	3) 可手动、自动实现灭火。	3) 可手动、自动实现灭火。
	4) 即使误动作, 不会影响工作人员人身安全。	4) 即使误动作, 机器无损伤。
缺点	1) 灭火系统误动作, 发电机损毁严重。	1) 误动作时, 有人在检修发电机或者在发电机机坑附近, 有可能窒息。
	2) 灭火后, 发电机损毁严重。	2) 设计较复杂。

## 2 发电机 CO<sub>2</sub> 灭火管路设计

### 2.1 设计要点

首先, 发电机 CO<sub>2</sub> 灭火使用标准要根据业主要求, NFPA12 或国标 GB 50193 标准不同决定了 CO<sub>2</sub> 使用量不同。其次, 发电机 CO<sub>2</sub> 灭火系统组成要根

据业主要求,比如全厂设置发电机 CO<sub>2</sub> 灭火系统数量,以及主喷放灭火浓度、主喷放时间、延时喷放灭火浓度、维持浓度时间。再次,业主对于系统动作以及停止的要求。如感温探头探测温度达到 80 °C, 并有感烟探头警报,CO<sub>2</sub> 灭火系统收到报警后动作。在机组检修时,系统可探测发电机机坑进入门是否打开,如果打开,即使有火灾报警,发电机灭火系统也不动作,保证电站工作人员的人身安全。最后,过压保护系统。一般认为机坑是一个密闭系统。CO<sub>2</sub> 气体进入机坑内灭火后,抽离装置未开启前的基坑压强虽然不足以将风罩混凝土破坏,但是出于保护发电机附属设备以及基坑盖板不变形,要设立过压保护系统。

## 2.2 实例计算

以非洲某项目水电站发电机 CO<sub>2</sub> 灭火管路设计为例。该项目共 10 台机组,单机容量 187 MW,机坑内净空间按照机坑体积减去定、转子体积(定、转子重量除以铜的密度)来估算,经计算机坑内净空间约 683.42 m<sup>3</sup>。主合同要求全厂发电机共设置两套 CO<sub>2</sub> 灭火系统,即每 5 台发电机共用一套 CO<sub>2</sub> 灭火系统。灭火系统分为主喷放和延时喷放两阶段。主喷放阶段 CO<sub>2</sub> 浓度达到 40%,并在 60 s 内喷放完毕。1 min 时启动延时灭火设备,应在 20 min 内保持 CO<sub>2</sub> 密度 25%。CO<sub>2</sub> 使用 70 L、42 kg(每个钢瓶的重量定义为 m)容量钢瓶储存,钢瓶储存间平均温度约为 20 °C,此时钢瓶内压强为 15 MPa。仅考虑一台发电机失火情况。

### 1) 主喷放阶段 CO<sub>2</sub> 钢瓶数量

根据 NFPA12 中表 5.3.3(b) 条规定,在 34% 的条件下,127.36 ~ 1 415 m<sup>3</sup> 空间容积范围内,选 1.3 m<sup>3</sup>/kg,得出需要 CO<sub>2</sub> 灭火剂重量为 683.42/1.3 = 525.7 kg。

根据 NFPA12 第 5.3.4 条规定,超过 34% 的设计浓度对象,按图 5.3.4 增加用量,按主合同要求,初始浓度 40%,查表得系数 1.204,则初始设计用量为

$$M_1 = 525.7 \times 1.204 = 632.95 \text{ kg}$$

$$N_1 = M_1 / m = 632.95 / 42 = 15.07 \text{ 瓶}$$

取 16 瓶。

式中, M<sub>1</sub> 为套发电机 CO<sub>2</sub> 灭火系统主喷放阶段所需 CO<sub>2</sub> 质量; N<sub>1</sub> 为套发电机 CO<sub>2</sub> 灭火系统主喷放阶段所需 CO<sub>2</sub> 钢瓶数量。

### 2) 延时喷放阶段 CO<sub>2</sub> 钢瓶数量

根据 NFPA12 中表 A5.5.3(b) 条规定,查表插值得延时系统灭火喷射应维持 25% 浓度 20 min 的 CO<sub>2</sub> 最低估算量为 M<sub>2</sub> = 620.5 kg。

$$N_2 = M_2 / m = 620.5 / 42 = 14.77 \text{ 瓶}$$

取 15 瓶。

式中, M<sub>2</sub> 为一套发电机 CO<sub>2</sub> 灭火系统延时放阶段所需 CO<sub>2</sub> 质量; N<sub>2</sub> 为一套发电机 CO<sub>2</sub> 灭火系统延时放阶段所需 CO<sub>2</sub> 钢瓶数量。

### 3) 过压保护系统计算

使用公式:理想状态气体公式—— $P_1 \times V_1 / T_1 = P_2 \times V_2 / T_2$

分压定律——在一密闭容器内装有混合气体,容器内的总压强 P 等于所有气体的压强和。

从启动 CO<sub>2</sub> 灭火系统后,可以分为两个阶段,第一阶段是 CO<sub>2</sub> 从主喷放钢瓶及延时喷放钢瓶中释放至机坑内(初始是气液两相,随时间和温度的变化,最终变成气态),并且 CO<sub>2</sub> 温度由 20 °C 上升至 80 °C(根据设定的火灾报警温度)。第二阶段是机坑内空气及 CO<sub>2</sub>(考虑此时全部变成气态)混合后压强增加。暂时不考虑 CO<sub>2</sub> 由气液两相转化为气态的过程中吸热,机坑内温度下降。

第一阶段:钢瓶内 CO<sub>2</sub> 的压强为 P<sub>1</sub> = 15 MPa,主喷放与延时喷放钢瓶内 CO<sub>2</sub> 的体积为 V<sub>1</sub> = 31 × 70 / 1 000 = 2.170 m<sup>3</sup>,钢瓶间温度为 T<sub>1</sub> = 20 + 273 = 293 K; P<sub>2</sub> 为机坑内 CO<sub>2</sub> 气体的压强,机坑内体积为 V<sub>2</sub> = 683.42 m<sup>3</sup>,发生火灾后机坑内的温度为 T<sub>2</sub> = 80 + 273 = 353 K。

$$P_2 = P_1 \times V_1 \times T_2 / T_1 / V_2 = 15 \times 2.17 \times 353 / 293 / 683.42 = 0.0574 \text{ MPa}$$

第二阶段:常压空气由 20 °C 变为 80 °C 时,压强变化不大,与上面计算类似,总压强由分压定律得 P = 0.122 + 0.0574 = 0.1794 MPa。

由于未考虑 CO<sub>2</sub> 由气液两相转化为气态的过程中吸热,机坑内温度下降。机坑内实际压强应该小于 0.1794 MPa,大于标准状态下大气压力,但是根据 NFPA 5.6.2 计算泄压孔的面积,配置泄压孔。泄压孔需由管路连接至室外。

$$X = 239Q / P^{0.5}$$

式中, Q 为 CO<sub>2</sub> 喷放速率,kg/min,因延时喷放在主喷放 1 min 后才开始,所以,CO<sub>2</sub> 喷放速率取两次喷放的较大值,取 42 × 16 = 672 kg/min; P 为建筑物

可承受压强  $kPa$  ,因为发电机基坑可承受压力较大 ,  
取值为  $4.8 KPa$ ;  $X$  为泄压孔面积  $mm^2$ 。

$$X = 239 \times 672 / 4.8^{0.5} = 73\ 307.19\ mm^2$$

#### 4) 主喷放管路以及延时喷放管路管径选择

$$Q = M/T$$

$$D = (1.41 \sim 3.78) \sqrt{Q}$$

式中  $D$  为管路直径  $mm$ ;  $Q$  为平均主管管路中的流量  $kg/min$ ;  $T$  为喷放时间  $s$ 。

由上式 ,可计算出主喷放管路与延时喷放管路主管管径均可选用  $DN50$ 。

#### 5) 管路材质及壁厚选择

管路材质一般根据主、合同要求。合同没有要求的 ,可以使用不锈钢管、焊接钢管 ,若使用焊接钢管要内外镀锌 ,个别项目业主要求不能内镀锌 ,但可以涂防锈油漆 根据合同要求执行。管路安装完毕后需要进行打压试验 ,一般钢管均可承受 若合同已经规定的管路腐蚀厚度 ,应根据管路壁厚计算公式计算 ,然后选择钢管厚度。公式如下。

$$S = \frac{pd}{2\sigma} + c + \nabla S$$

式中  $S$  为管路壁厚  $mm$ ;  $P$  为管路设计压力  $MPa$ ;  $d$  为管路公称直径  $mm$ ;  $\sigma$  为设计工作温度下材料许用应力  $MPa$ ;  $c$  为腐蚀厚度  $mm$ ;  $\nabla S$  为制造偏差 ,取  $15\%$  管路壁厚  $mm$ 。

#### 6) 灭火后气体抽离系统

发电机灭火后 ,需要从发电机机坑内将  $CO_2$  抽离 ,并且排出室外。

(上接第75页)

### 4.2 购电流程

用户卡购电流程复杂 ,也是 CPU 卡操作流程中最关键的部分 ,需要多次认证及判断 ,最后才能把购电卡里的电费充值到表内 ESAM 钱包文件里。图 6 是结合国内主流售电系统流程的用户卡表内购电流程图。

## 5 结束语

CPU 卡是继存贮器卡、逻辑加密卡后的第三代 IC 卡 ,CPU 卡及 ESAM 芯片在智能电表上的应用为智能电表本地安全数据交换、远程加密数据通信提

## 3 结 语

从水电站设立值班人员数量看 ,中国值班人员较多 ,国外水电站多按照无人值班设计 ,尤其是欧洲电站。在中国水电站 ,发电机水喷雾灭火发生误报警误动作时 ,若灭火采用自动方式 ,则水喷雾会使线圈损坏 ,导致水电站损失较大 ,所以中国发电机水喷雾灭火一般采用手动方式。当有报警发生后 ,值班人员去现场确认 ,确认发生火灾后 ,手动启动灭火装置 给发电机灭火。这时 ,发电机灭火快慢取决于值班人员的动作快慢。无人值班水电站一般采用发电机  $CO_2$  灭火 ,发生火灾后灭火系统动作迅速 ,即使误动作 ,抽离  $CO_2$  后 ,不影响机组继续使用。随着社会和科技的发展 ,中国水电站会逐步实现无人值班 ,发电机灭火也会由水喷雾灭火为主 ,逐步改变为  $CO_2$  灭火。

### 参考文献

[1] NFPA 12 - 28 ,Standard on Carbon Dioxide Extinguishing System [S].

作者简介:

王 伟(1983) ,男 ,学士 ,主要从事火电调试工作;

曹 静(1986) ,女 ,硕士 ,主要从事水电站机电设计工作。

(收稿日期:2012 - 04 - 06)

供了重要技术支撑 ,为未来智能电表的双向信息互动提供了很好的技术平台。CPU 卡智能电表会因其快捷的充值操作、安全的数据传递而受到供电局及用户的青睐。

### 参考文献

[1] ISO/IEC 7816 ,卡片基本规范及数据交换命令 [S].  
[2] Q/GDW\_365 - 2009 智能电能表信息交换安全认证技术规范 [S].  
[3] 北京握奇有限公司 ,TimeCOS/PBOC 通用技术参考手册.  
[4] 北京融通高科有限公司 ,ARTCOS ESAM 通用手册.

(收稿日期:2012 - 05 - 29)

# 大型火力发电厂主系统继电保护可靠性分析

张 蓉

(国电成都金堂发电有限公司,四川成都 610404)

**摘 要:**大型火力发电厂的继电保护配置复杂,可靠性问题日益突出,针对大型火力发电厂常见的一些问题进行了探讨,提出了一些提高继电保护可靠性的办法。

**关键词:**可靠性;正确动作率;故障率;平均无故障时间;修复率;平均修复时间

**Abstract:** The setting for relay protection of the large-scale power plants is complex, and the reliability problem becomes more and more prominent. So, some common problems occurring in large-scale power plants are discussed, and some methods to improve the reliability of relay protection are proposed.

**Key words:** reliability; proper operation rate; failure rate; mean time between failures; repairing rate; mean repairing time

中图分类号: TM774 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)03-0087-04

## 0 前 言

继电保护在电力系统中发挥着重要作用,长期以来,如何提高继电保护的可靠性成为日益关注和研究的课题。近年来,随着投入商业运行的大型火电厂逐年增多,如何提高配置复杂、原理繁多的大型火电厂主系统继电保护可靠性成为提高电厂运行可靠性、制定合理的检修周期等的重要课题。

## 1 保护装置误动

### 1.1 原理设计缺陷

由于国家动模试验室的建立和继电保护原理研究的不断深入,继电保护装置本身的原理缺陷已经不用用户考虑了,重要的是应针对它所保护的對象进行正确选型,因此在分析继电保护装置原理时,首先应该分析被保护对象的特性,如某大型发电厂主系统(发电机变压器组系统)采用自并励励磁系统、发电机变压器组单元制接线方式,针对这一特点,保护选型首先就要注意选用针对该机组特点的继电保护装置,象发电机差动保护采用电流循环闭锁方式,以防止单相TA断线等引起的误动;发电机三相过流保护应采用带记忆特性或电压控制;低阻抗保护应采用最小精工电流足够小;失磁保护逻辑中的励磁电压辅助判据也应增加延时,以躲开由于系统振

荡或失步对自并励机组造成的影响等等。

要重视被保护的一次设备的特性,以主设备(包括发电机和变压器)为例,继电保护装置制造厂、设计人员、业主技术人员应主动向制造厂家技术人员介绍有关大型发电机组保护对发电机、变压器设计制造的要求,如发电机中性点侧的引出方式、中性点接地方式、电流互感器的配置以及变压器套管电流互感器的配置等,应及时掌握本工程所用主设备的特性,如发电机的铭牌参数、定子结构参数(包括定子铁心内径、定子铁心长度、气隙、极距、定子齿数、每相并联支路数、定子槽形和槽内分布图、定子线圈截面图、定子绕组连接图和定子绕组电阻等)、转子结构参数(转子铁心长度、阻尼条长度直径和材料、阻尼环截面和材料、转子铁心材料导磁率导电率、转子绕组每线圈匝数和并联支路数、励磁绕组电阻、空载特性曲线、转子槽形和槽内分布图、转子绕组图、转子阻尼绕组布置图)、冷却方式等,变压器的铭牌参数、内部结构和系统参数等,针对其特点设计并选择合适的继电保护装置,以防止由于选型不当造成的原理缺陷。

### 1.2 设计错误

设计人员根据收集到的各种资料,吃准所选型号的保护原理,熟悉设计规程和国家颁布的各种技术文件,重视针对所设计大型发电机组自身的特点,在充分分析计算内部故障的基础上,慎重选择主保护方案,同时简化后备保护,防止出现原则性疏漏和

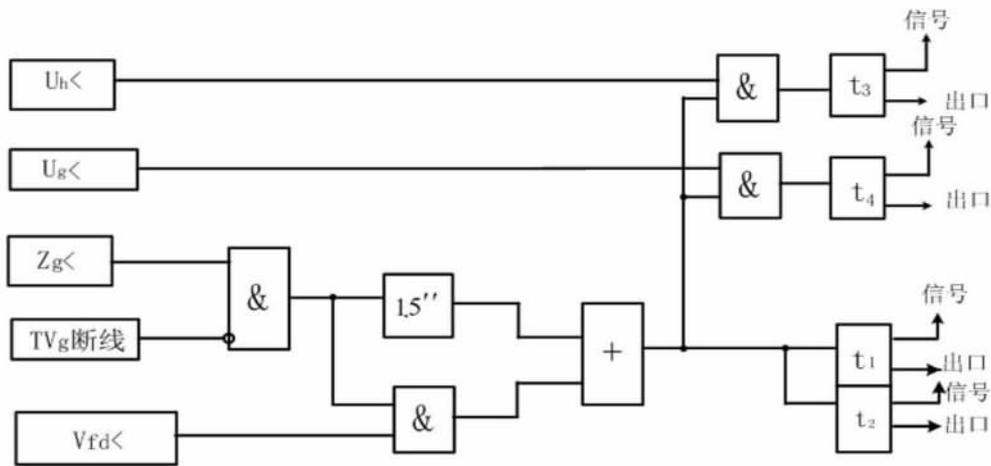


图 1 发电机失磁保护阻抗圆原理逻辑图

错误,除此之外,还应了解励磁系统、厂用快切、ECS 监控等自动装置和设备的特性,并注意和其配合,包括保护配置、出口逻辑矩阵等,防止配合失当。下面举例说明。

某大型发电厂采用自并励励磁系统,发电机变压器组单元制接线方式,高压厂用变压器、脱硫变压器以及励磁变压器接于发电机出口分相封闭母线,由于励磁系统本身具有转子接地保护(采用方波注入式原理,由于设计理念的不同,本转子接地保护只有一点接地保护,设置两段定值分别启动告警和机组全停)和轴电压抑制器,因此设计人员未启用保护装置上的叠加直流式原理的转子接地保护(由于励磁装置上轴电压抑制器的影响,该原理的转子接地保护不能正常投运),取消了转子正、负极和大轴到保护装置的回路,直接造成失磁保护逻辑中的转子低电压  $U_{fd}$  判据失效,本案失磁保护原理及逻辑图如图 1 所示。

正常运行时,若用阻抗复平面表示机端测量阻抗,则阻抗的轨迹在第一象限(滞相运行)或第四象限(进相运行)内。发电机失磁后,机端测量阻抗的轨迹将沿着等有功阻抗圆进入异步边界圆内。失磁还可能进一步导致机端电压下降或系统电压下降。

阻抗型失磁保护,通常由阻抗判据( $Z_g <$ )、转子低电压判据( $V_{fd} <$ )、机端低电压判据( $U_g <$ )、系统低电压判据( $U_n <$ )构成。保护输入量有:机端三相电压、发电机三相电流、主变压器高压侧三相电压(或某一相间电压)、转子直流电压。

由图 1 可以看出,失磁阻抗判据是按静态稳定圆整定的,一旦取消  $U_{fd}$  判据后,在发生系统振荡,特别是不稳定振荡时失磁保护发生误动的概率大大增

加了,保护的可靠性相应降低。同时,一旦励磁系统转子接地保护发生故障(虽然厂家配有三块转子接地保护板,但方波注入和检测回路只有一套,并不是真正意义上的双套后备),也将影响机组的正常运行,因此,作为设计人员,应充分了解所选用设备的性能和原理,合理搭配,防止类似事件的发生。在此提供一套上述案例的补救方案仅供参考:①采取重新设计转子正、负极和大轴到保护装置的回路,保证失磁保护的完整性;②和继电保护厂家联系采用乒乓原理转子接地保护(切换采样原理),采用该原理可避免励磁装置上轴电压抑制器对转子接地保护的影响,可以作为励磁系统转子接地保护发生故障时投入使用。

### 1.3 元件损坏和特性变化

随着微机保护的大量使用,装置内部元件损坏或特性变化引起的可靠性问题日益突出,虽然保护制造厂家在装置的自动检测方面下了很大的功夫,但在实际应用中仍然有待检验。目前常用的自检程序有:①可读存储器 RAM 的自检;②只读存储器的自检;③数据采集系统的自检;④开关量输入通道自检;⑤开关量输出通道自检等。厂家应确保在装置自检过程中和自检发现故障时都不应引起保护误动作。事实上,通过保护自检发现问题只是一方面,因为保护装置不可能将所有的回路纳入自检,所以保护装置的安装调试和定期检修是发现装置内部元件损坏(特别是继电器损坏、内部接线错误等)或特性变化(特别是各种开入量、开出量和交流采样环节等)的主要手段。

### 1.4 抗干扰问题

由于电厂的特殊电磁环境,继电保护装置工作

环境的干扰是严重的,一方面这些干扰的特点是频率、幅值高,可以顺利通过各种分布电容的耦合,另一方面,这些干扰持续时间短,对于微机保护装置来说,由于CPU工作是在时钟节拍的严格控制下以较高的速度同步进行的,不能通过简单的延时回路来躲开干扰,所以对于微机保护来说,提高抗干扰性也是一项系统工程,首先分析一下进入微机保护的干扰。按干扰源的产生分为外部干扰和内部干扰。外部干扰主要是其他物体和设备辐射的电磁波产生的强电场或强磁场以及来自电源的工频干扰、谐波干扰和脉冲干扰等等,内部干扰主要是电容的耦合和回路间的互感引起的不同信号感应、多点接地造成的地电位差干扰等等。就干扰的形式来说,分为差模干扰和共模干扰,差模干扰是指串联于信号源回路之中的干扰,主要是由于各信号线对干扰源的相对位置不对称因而受干扰源电磁感应或静电感应所产生的,比如投切空载母线、投切空载变压器和投切空载长线等高压带电体所产生的干扰。共模干扰产生的原因与差模干扰相似,只是信号线距干扰源较远,因而各相信号线对干扰源的相对位置基本上是对称的,共模干扰可为直流,也可为交流,它是造成微机保护装置损坏或不正常工作的重要原因,消除共模干扰的主要方法有:①浮空隔离技术;②双层屏蔽技术;③二次系统一点接地;④低阻匹配传输、电流传输代替电压传输;⑤采用隔离变压器;⑥采用光电耦合芯片等。由于干扰会造成计算或逻辑错误、程序运行出轨,甚至会造成元件损坏,所以除采用各种隔离、屏蔽、合理布局和配线给电容提供低阻抗入地通道(电容滤波)以及在微机保护电源回路中加滤波器阻止干扰传递等方法外,还应采取以下措施:①对输入采样值的抗干扰纠错;②运算过程的校核纠偏;③保护出口闭锁;④程序出格的自恢复(看门狗)等。按照国家 GB/T 17626.1-1998、GB/T 14598 和 IEC 60255-21 规程的要求,保护装置出厂前应完成电磁兼容试验,在安装调试阶段厂家应提供相关试验材料(包括以下试验内容:①静电放电试验,严酷等级应达到三级;②辐射电磁场抗干扰度试验,严酷等级应达到三级;③电快速瞬变/脉冲群抗干扰度试验,严酷等级应达到三级;④浪涌抗干扰度试验,严酷等级应达到三级;⑤1 MHz 和 100 kHz 脉冲群干扰试验,严酷等级应达到三级)。同时,按照国家设计规程和反措要求核实抗干扰措施是否得

当。

### 1.5 整定计算错误

错误的整定对于保护来说是灾难性的,因此加强保护装置原理的研究,针对所选保护装置的型号和被保护一次设备的特点,按照国家规程要求,采用合适的短路计算模型,参考保护装置厂家说明书进行整定计算才能最大限度地保证计算的准确性。

另外,整定计算还应考虑被保护的一次设备的特性,如反时限过励磁保护的整定计算就应重点考虑发电机和变压器的过励磁倍数曲线,按照谁的过励磁能力差就按谁的过励磁倍数曲线整定,以满足可靠保护大型发电机变压器组的需要。应当指出的是,整定计算在投运以后需要很长时间的考验,针对运行方式的变化和系统参数的变化还应进行调整,出现保护误动或拒动应积极分析查找原因,防止错误整定的保护投入运行。

### 1.6 运行维护不当

在保护装置投入运行以后,良好的运行维护在防止保护误动或拒动方面起着举足轻重的作用。制订优秀的管理制度,培养高素质的检修、运行技术人才是保证继电保护装置可靠性的必要条件,在管理制度上,首先应对各种保护装置按被保护设备归档,建立设备运行管理卡、定值整定卡、检修卡、检修作业指导书、相关设计和厂家图册等,先在制度和技术上最大限度防止误碰、误整定、误投保护压板等误操作引起的保护误动或拒动问题;其次,建立保护动作、维护检修、厂家升级、设计修改和损坏维修等相关情况纪录(最好建立相关数据库,以备查询),分别统计出保护装置的正确动作率、可靠度、故障率、平均无故障时间、修复率、平均修复时间等相关可靠性计算参数,并将这些参数和保护装置使用情况及及时反馈到保护制造厂家,为厂家提供更好的技术服务打下基础;此外,在掌握国家相关规程和继电保护基本原理的基础上吃透保护装置的原理和相关技术要点,针对保护装置及回路在设计、制造等出现的问题,提出适合本厂情况的技术升级及技术改造方案并努力实施,不断提高保护装置可靠性,以保证被保护主设备的长期安全稳定运行。

## 2 结 语

综上所述,提高保护设备的可靠性是一项长期

的工作,作好平常的积累对分析保护设备可靠性问题大有裨益,希望在以后的工作中,针对保护出现的各种可靠性问题,运用科学的方法(如概率统计法、马尔科夫模型法和故障树法等)加以分析和定量计算,找出最大的故障类型和故障原因,以整体提高保护的可靠性。

### 参考文献

[1] 王维俭. 发电机变压器组继电保护应用(第三版)

[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

[2] GB/T 14285 - 2006 继电保护和安全自动装置技术规程[S].

[3] GB/T 50062 - 2008 电力装置的继电保护和自动装置设计规范[S].

[4] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

(收稿日期: 2012 - 04 - 06)

(上接第 40 页)

调可视化新增图形或图形修改时,将这些图形文件 FTP 到备调服务器上。

步骤 3: 备调可视化服务器上运行一个程序,定时扫描 FTP 服务目录 A 下是否有新送来的图形文件和模型文件。如果检测到有新的,立即拷贝到本机另一目录 B,延时一段时间(延时时长可预先人工设定)过了延时时间如果没有同名新文件过来,则说明主调的修改有效,可以进行同步。如果目录 B 下有图形文件,程序逐个将目录 B 下的图形文件覆盖可视化系统的同名图形文件,由于主、备调系统 ID 号不一致,为了使主调的图形中备调能直接用,还需根据图形中设备名升级设备 ID,然后发布到备调各机。如果目录 B 下有模型文件,则将打包的模型文件解开,然后逐条和本机内存库的模型比较,有新的就添加入库。由于模型的 ID 可由可视化系统自动编号,所以模型入库只需按本机模型入库规则编号就行。

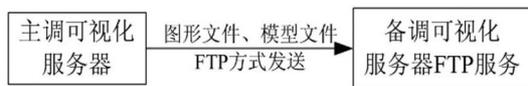


图 3 主备调同步示意图

#### 4.2 备调向主调手动同步

将应急模式工作期间新的模型、图形和实时数据同步到主调系统。这和 4.1 中介绍的主调向备调同步数据差不多,有差别的在于以下两方面。

(1) 在主调端将已经送到本机的文件同步本机可视化系统时,不需要从 FTP 服务目录拷走,也不需要延时,直接进行同步即可。

(2) 手工同步时,需要同步历史数据。历史数据的同步和模型文件同步过程类似,只是历史数据断面多,只能循环方式同步,每次同步一个断面数据。首先,将历史库中一个断面数据取出打包成一个文件,

通过 FTP 传送到主调 FTP 服务目录下;然后主调端解开文件后逐条添加进主调可视化历史库。

### 5 结 语

在启用备调的紧急情况下,情况纷繁复杂,调度人员希望快速掌握全网运行工况及系统可控能力,系统基于调度员思维,以“看我想看的”思想组织各种系统数据形成可视化调度,便于调度员快速对全网情况了然于胸。

但备调可视化系统增加了维护人员工作量,为了减少维护工作,使备调系统能真正发挥“备用”作用,则根据备调可视化建设经验和现场需求,提出了一套主、备调可视化系统数据同步方案,除了人工启动一下程序外,基本做到零维护,从实际使用过程中的维护角度保证了备调可视化系统的可用性。

### 参考文献

[1] 麦绍辉,梁寿愚. 备用调度 EMS 系统的数据同步解决方案[J]. 电力系统通信, 2010, 31(213): 46 - 49.

[2] 张继芬. 电网备用调度系统的数据同步与采集解决方案[J]. 电力系统通信, 2009, 30(202): 47 - 50.

[3] 陈枫. 省级电网 SCADA/EMS 备用方式的探讨[J]. 浙江电力, 2006(4): 18 - 21.

[4] 徐展强,邓大为,姜彩玉,等. 异构主用、备用自动化调度系统一致性研究[J]. 广东电力, 2009, 22(4): 9 - 12.

[5] 丁锋,朱红,冷俊,等. 地区电网调度 SCADA 灾准备用系统的建设[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 105 - 107.

[6] 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.

[7] 刘俊勇,沈晓东,田立峰,等. 智能电网下可视化技术的展望[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 7 - 13.

(收稿日期: 2012 - 02 - 13)

# 锅炉尾部烟道振动原因分析及处理

楼 杰 蒋建伟

(广东粤电靖海发电有限公司, 广东 揭阳 515223)

**摘要:** 广东惠来电厂 2 号 DG1900/25.4-Π2 型超临界锅炉出现了尾部烟道振动问题。经试验、分析、计算,认为主要原因是由卡门涡流脱落频率接近设备的声学驻波频率而使设备产生高频共振所致。通过采取加装防振隔板措施,振动问题得以解决,取得了满意的效果。

**关键词:** 600 MW 超临界锅炉; 尾部烟道振动; 卡门涡流(涡街); 防振隔板

**Abstract:** The phenomenon about the vibration of convection flue gas pass in No. 2 DG1900/25.4-Π2 supercritical boiler of Guangdong Huilai Power Plant are introduced. After the tests, analyses and calculations, the main causes of the vibration are obtained that is caused by high-frequency resonance due to Karman vortex shedding frequency being close to the acoustic standing-wave frequency of the equipment. Some measures such as installing the antivibration baffle are proposed to solve the vibration problem, which meets with satisfactory results.

**Key words:** 600 MW supercritical boiler; vibration of convection flue gas pass; Karman vortex (Karman vortex street); antivibration baffle

中图分类号: TK227 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)03-0091-04

## 0 引言

某电厂 600 MW 机组, 锅炉为东方锅炉厂生产的 DG1900/25.4-Π2 型超临界参数变压直流炉, 一次再热、单炉膛、双尾部烟道、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构 Π 型锅炉。锅炉主要技术参数如表 1 所示。

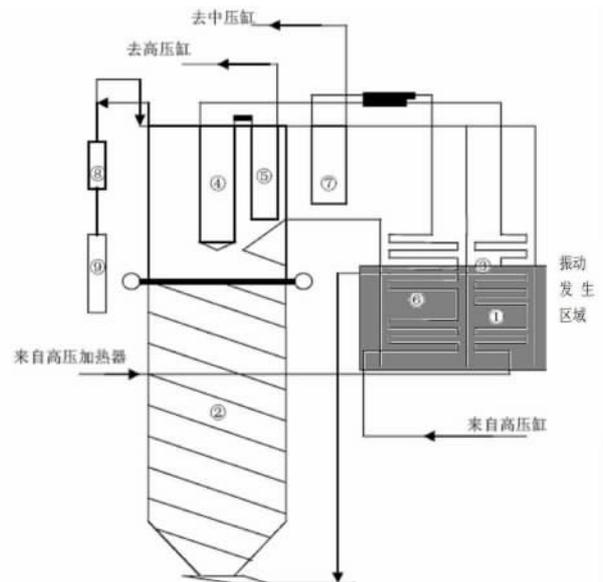
表 1 锅炉主要技术参数

名称	B-MCR	BRL
过热蒸汽流量 / (t · h <sup>-1</sup> )	1 950.2	1 857.3
过热器出口蒸汽压力 / MPa (g)	25.4	25.3
过热器出口蒸汽温度 / °C	571	571
再热蒸汽流量 / (t · h <sup>-1</sup> )	1 590.4	1 510.5
再热器进口蒸汽压力 / MPa (g)	4.82	4.57
再热器出口蒸汽压力 / MPa (g)	4.63	4.40
再热器进口蒸汽温度 / °C	327	322
再热器出口蒸汽温度 / °C	569	569
省煤器进口给水温度 / °C	290	287

## 1 尾部烟道振动情况

2 号锅炉从 2009 年 6 月大修后, 开始发生尾部烟道振动情况。振动主要发生在尾部后烟道省煤器

和低温再热器区域, 标高 44 ~ 58 m (如图 1 灰色区域所示), 发生振动时, 尾部烟道可听到类似拖拉机马达低沉的轰鸣声。经现场试验, 发现振动情况跟负荷有关, 振动主要发生在 600 MW 负荷下, 其余负荷未见明显振动。在 600 MW 负荷下, 振动又与烟



①省煤器; ②炉膛; ③低温过热器; ④屏式过热器; ⑤末级过热器; ⑥低温再热器; ⑦高温再热器; ⑧汽水分离器; ⑨储水罐

图 1 2 号锅炉尾部烟道振动发生区域示意图

气挡板的开度有关,再热器烟气挡板开度 30% ~ 35%,以及 45% ~ 70% 的区间范围内,尾部烟道都会发生振动,其中,当再热器烟气挡板开度在 32% 和 55% 两个位置时,振动最为剧烈。

为了确认振源,保持 600 MW 负荷,手动改变过热器、再热器烟气挡板门的开度,利用动平衡仪的测振功能,对尾部烟道的振动频率进行了测量。经试验和测量,发现振动发生在省煤器区域,而且主要发生在再热器烟气挡板门开度为 30% ~ 35% 以及 45% ~ 70% 两个区间,其中以 32% 和 55% 两个开度振幅最大,分别为 342.5 μm 和 368.8 μm。发生振动的同一个区间内,振动频率一致,分别为 31.25 Hz 和 25.25 Hz。而再热挡板开度在这两个区间之外,不会发生明显的振动。测量结果如表 2。

表 2 尾部烟道振动测量结果

再热器烟气挡板开度 / %	振幅 / μm	频率 / Hz
<30	8.6	-
30	264.7	31.25
32	342.5	31.25
35	220.2	31.25
35 ~ 45	14.2	-
50	268.7	25.25
55	368.8	25.25
60	246.2	25.25
65	136.6	25.25
>70	18.7	-

挡板门开度的改变,主要是引起了烟气流速的改变,由此推断振动与烟气流速有关。

## 2 振动原因分析

经过查阅相关资料和计算,可以确定该锅炉尾部烟道振动的是由声学共振引起。

### 2.1 烟道声学共振机理

(1) 卡门涡流(见图 2): 烟气流经一个圆柱型管子的前缘时,烟气受到阻滞,按伯努力定理,其动能转变为压力能,在前缘附近形成了高压区,促使紧贴圆柱体表面的附面层向后侧延伸。在管子最宽截面处的附近,气流附面层从管子表面的两侧脱开,并形成两个在流动中向尾部拖拽的剪切层。因为自由剪切层的最内层比最外层行移动要慢得多,于是在尾流中就形成了一个规则的旋涡流动。当旋涡交替产生脱落时,其两侧的流体流速和静压是不同的。旋涡形成与长大的一侧流速慢,静压高,而另一侧由于流速快,静压较低,因此在静压较高的一侧产生了

一个垂直于流向的推力。由于旋涡交替从两侧脱落,在管子上就激发起周期性的力,使管子在与烟气流动方向相垂直的方向上产生激振。上面所说的旋涡脱落频率就是卡门涡流频率。

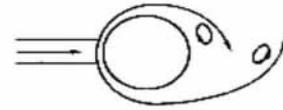


图 2 卡门涡流示意图

(2) 烟道驻波: 周期和振幅相同的波相对进行,互相干涉,形成所谓驻波。当低密度的流体稳定地横向流过管束时,可能产生一个既垂直于管子又垂直于流动方向的声学驻波,尾部烟道满足驻波发生条件。驻波是一种纵波,波的传递速度与驻波所在介质的声速相同。由于烟道内的声波可以与反射回来的声波叠加,因此,烟道的驻波有  $N$  阶,  $N = 1, 2, 3, \dots$ , 也称  $N$  次谐波。

(3) 声学共振的判定: 当卡门涡流频率与烟道某阶谐波频率之比为  $0.8 \leq K \leq 1.2$ , 也就是频率相差不超过 20% 时,就可以引发声学共振。

### 2.2 频率计算和验证

根据卡门涡流频率公式、驻波公式、锅炉热力计算书、锅炉说明书,对上述频率进行了计算。

#### (1) 卡门涡流频率计算

管排横向绕流旋涡的脱落频率(卡门涡流频率)的计算公式为  $f_s = SU/D$

式中,  $S$  为斯特劳哈数,可以顺列管子的纵向横向节距比,从图 3 中查得;  $U$  为气流速度,  $\mu/s$ ;  $D$  为管子外径,  $\mu m$ 。

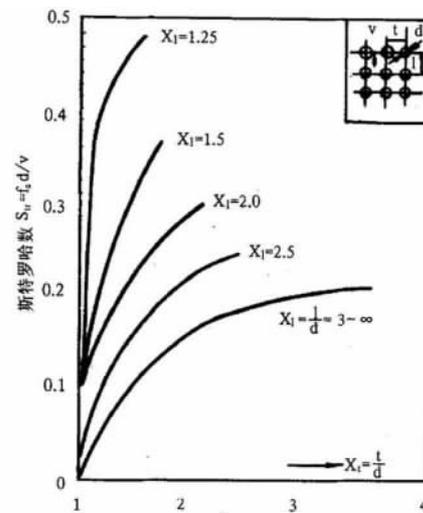


图 3 顺列管排中管子纵向横向节距比与斯特劳哈数的关系曲线

(2) 烟道驻波频率计算

烟道驻波频率通用计算公式中,假如存在驻波,则其波长和烟道净宽  $W$  之间必然有一定的关系,基本波(1阶谐波)波长是烟道净宽的两倍;2阶谐波中,波长等于烟道净宽;3阶谐波的波长为净宽的  $2/3$ ……。

驻波频率计算公式为  $f = nC/2W$

式中,  $C$  为某一温度下烟气介质中的声速;  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $W$  为烟道宽。

声速可由下式求出:  $C = \sqrt{KRT}$ , 式中  $K$  为绝热指数;  $R$  为气体常数;  $T$  为气体绝对温度。计算结果如表3所示。

表3 惠来电厂2号锅炉省煤器烟道驻波计算数据

数据项目	数 值		
机组负荷 /MW	600	480	300
省煤器进口烟温 / $^{\circ}\text{C}$	577	507	467
省煤器出口烟温 / $^{\circ}\text{C}$	357	305	271
省煤器进口烟速 $U_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	9.2	4.9	3.1
省煤器出口烟速 $U_2 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	8	4.02	2.7
卡门涡流计算			
省煤器管子外径 $D / \text{m}$	0.050 8	0.050 8	0.050 8
烟速			
管排的横向节距 $S_1 / \text{m}$	0.114 3	0.114 3	0.114 3
管排的纵向节距 $S_2 / \text{m}$	0.152	0.152	0.152
斯特劳哈数 $S_r$ (顺列管束)	0.176 9	0.176 9	0.176 9
纵排			
省煤器入口旋涡脱流 频率 $f_s / \text{Hz}$	32.04	17	10.8
省煤器出口旋涡脱流 频率 $f_s / \text{Hz}$	27.86	13.9	9.4
烟道宽度 $W / \text{m}$	22.16	22.16	22.16
绝热指数(烟气) $K$	1.33	1.33	1.33
气体常数(烟气) $R / (\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K})$	283	283	283
省煤器进口气体 绝对温度 $T / \text{K}$	850	780	840
省煤器出口气体 绝对温度 $T / \text{K}$	630	578	554
烟道驻波频率计算			
省煤器入口驻波 $f$ (1阶) /Hz	12.92	12.38	12.06
省煤器入口驻波 $f$ (2阶) /Hz	25.85	24.76	24.12
省煤器入口驻波 $f$ (3阶) /Hz	38.77	37.14	36.18
省煤器出口驻波 $f$ (1阶) /Hz	11.13	10.66	10.34
省煤器出口驻波 $f$ (2阶) /Hz	22.25	21.32	20.68
省煤器出口驻波 $f$ (3阶) /Hz	33.38	31.97	31.02

从表3计算结果可以看出:600 MW 负荷时,省煤器入口卡门涡流频率与省煤器出口3阶驻波频率之比为0.96;省煤器出口卡门涡流频率与省煤器进口2阶驻波频率之比为1.08,两个比值均在0.8~1.2范围内,且很接近1,因此从理论上可以判断,振动是由于声学共振引起。而现场实测的烟道振动频率25.25 Hz、31.25 Hz 分别与计算出来的出口3阶和入口2阶驻波频率非常接近,又进一步证明了前面计算结果是正确的,由此断定2号炉尾部烟道的振动是由于声学共振引起。

3 振动处理

解决该类声学振动常用的方法是在烟道内装设消除共振的隔板。根据机械工程手册,烟道内加装隔板的依据如表4。

表4 烟道加装隔板依据

谐波阶数	隔板数
$N < 3$	$N = n$
$N = 3 - 6$	$N = n + 1$
$N > 6$	$N = 2n - 5$

另外,考虑到:①三次谐波的频率为烟道宽度的  $2/3$ ;②根据东方锅炉厂的经验,在宽度小于6.7 m 的烟道中几乎未发生过振动案例。基于以上两点,最后决定采取比机械工程手册多一列隔板,即5列防振隔板的方案,防振隔板由东方锅炉厂设计制造。

由于尾部烟道分为前后两个烟道,每个烟道受热面又分为上、中、下三层。因此采取了加装  $5 \times 3 \times 2$  共30块隔板的方案。图4是防振隔板和安装位置的示意图。隔板的位置避开烟道宽度  $2/3$  节距位置,左右隔板呈不对称布置。

2011年2—3月,利用2号炉B级检修机会,该电厂将防振隔板进行了安装。

4 防振效果检验

该锅炉B级检修后开机运行至今,锅炉尾部烟道未再发生振动现象。为了检验防振效果,再次到现场进行了振动测量。测量结果如表5。

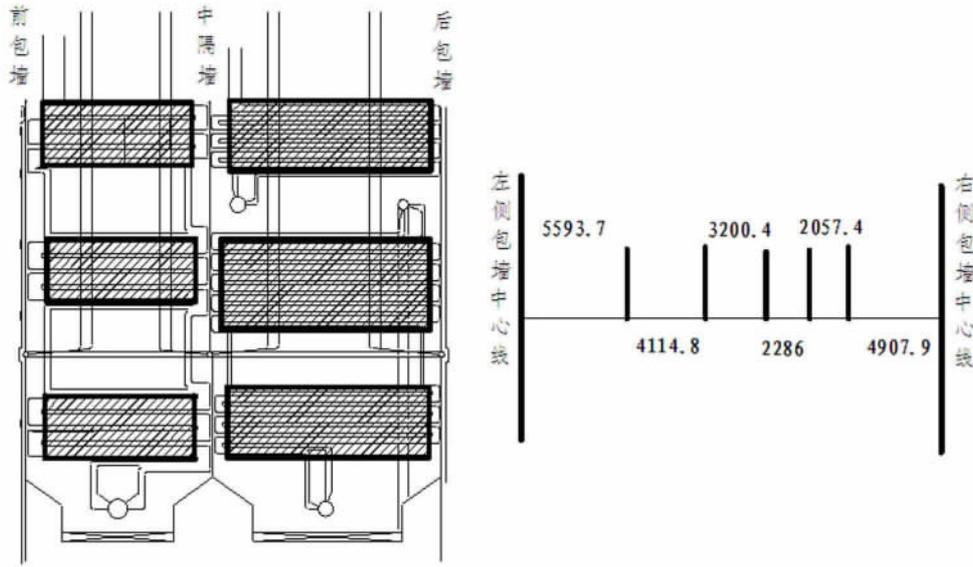


图4 防振隔板安装位置示意图

表5 尾部烟道振动测量结果

再热器烟气挡板开度 /%	振幅 / $\mu\text{m}$	频率 /Hz
30	2.60	22.5
40	1.40	22.5
50	3.20	22.5
55	5.75	22.5
60	3.20	22.5
65	4.30	22.5

结果表明,防振隔板加装后,尾部烟道已不再有振动现象。

## 5 结 论

关于锅炉尾部烟道振动问题,可以得出以下结论。

(1) 该锅炉尾部烟道的振动频率在 22.25 Hz 和 31.25 Hz, 振动的原因为省煤器管排的卡门涡流脱硫频率与尾部烟道的 2 阶、3 阶谐波频率非常接近从而引发了声学共振。

(2) 实践证明,消除振动的有效方法之一是在尾部烟道加装防震隔板。加装隔板后,烟道被分隔为若干个小区域,每个区域越小时,其驻波频率越大,当其最小的驻波频率都比卡门涡流的脱落频率

大得多时,就可以完全避免共振的发生。

(3) 该锅炉安装的防振隔板共 30 块,总重约 10 t, 耗材并不多。在检修期间安装,由于零件较多,检修空间受限,安装相对比较困难。建议类似型号参数的锅炉在出厂时设计好防振隔板,受热面安装时直接装上。

## 参考文献

- [1] 魏新华. 大型电站锅炉尾部烟道的声学振动[J]. 锅炉技术, 1993(1): 1-10.
- [2] 柴锡强, 熊建国, 朱云水. 锅炉尾部烟道振动原因分析及对策[J]. 浙江电力, 2004(6): 6-9.
- [3] 赵建新. 电厂锅炉尾部烟道振动分析[J]. 现代电力, 2009, 26(5): 49-51.
- [4] 董琨. 卡门涡流对电站锅炉安全性的影响及治理措施[J]. 热力发电, 2008, 37(10): 31-34.

作者简介:

楼杰(1982),男,工程师,技师,工程硕士,从事锅炉、脱硫专业检修及技术管理工作;

蒋建伟(1982),男,助理工程师,从事锅炉、脱硫专业检修及技术管理工作。

(收稿日期:2012-03-20)

欢迎订阅《四川电力技术》