

★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



9 771003 695128



10>

瀑布沟水电站

四川省电机工程学会 四川电力科学研究院

Vol.35

2012

No.5

《四川电力技术》 编辑委员会名单

主任委员 王 平

副主任委员 张 伟

刘俊勇

委 员

(按姓氏笔画为序)

方文弟 王 卓 白家棣

刘 勇 朱白桦 朱国俊

朱 康 邓亚军 邹小端

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5期(总221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:cdsclj@163.com

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册6.00元

[期刊基本参数] CN51-1315/TM* 1978*

b* A4* 94* zh* P* ¥6.00* 4300* 23*

2012-10

目 次

• 电网技术 •

基于 CIM/E 交互的省地 EMS 异构系统状态估计设计与实现

..... 伍凌云 王民昆 李 强 等(1)

风电智能有功控制系统研究与实现 姚秀萍 常喜强 张慧玲 等(4)

基于风电场系统联络线故障时单相重合闸对系统影响的研究

..... 王银萍 王维庆 常喜强(8)

微电网孤岛模式下多种下垂控制策略的研究

..... 罗锐鑫 刘承志 游先亮 等(11)

基于内模控制的静止同步补偿器研究 张花芝 张花云 高 俊 等(15)

地区电网日负荷特性分析及预测方法研究 张 莉 蒲晓瑛 卢政尧(21)

电力市场下风电-抽水蓄能混合系统的运行优化

..... 罗承军 李安军 王 曦 等(28)

备自投在 DTS 逻辑式仿真中的配置 陈 曦 任 铃 韦 涛(33)

对一起主变压器零序过流保护动作逻辑缺陷的分析 岑冬梅 欧昌岑(37)

基于 110 kV 内桥接线的母线保护思考 曾 明(38)

风电接入对电能计量影响的初探 晏荣贵 黄 程(41)

基于智能开关的广州 10 kV 架空馈线自动化新模式 宋友文 廖伟炎(46)

电力光纤通信的技术原理及其应用前景分析 肖 丽(51)

失压后多功能电表差错电量的计算 李 琦(55)

• 高压技术 •

一种新型故障限流器在电力系统中的应用研究

..... 姚守学 程健雄 蔡盛舟 等(61)

四川省电力公司输变电设备状态检修体系建设与应用

..... 吴晓晖 甘德刚 王红梅 等(64)

电力设备全寿命周期管理分析模型的建立及应用研究 马 薇(68)

变压器状态评估技术现状研究 郑朝晖 徐 伟 吕鸿宾等(73)

ZF11-252(L)型断路器控制回路安全隐患分析 李宗宇(77)

高速铁路电力电缆不对称接地故障对二次电缆的影响 周思宇 冷 怡(81)

输电线路杆塔冲击接地阻抗测量 何云峰 赵若涵 张 榆 等(85)

一起断路器弹簧储能故障分析与处理 刘滨涛 肖建华 黄 倩(89)

• 汽轮机技术 •

汽轮机轴瓦垫铁改造方案研究与实现 韩兴全(92)

本期责任编辑 刘斌蓉 编辑

吴小冬 程文婷 刘坤才

CONTENTS

Design and Realization for State Estimation of Heterogeneous System between Provincial and Regional EMS Based on CIM/E Interchange Standards	Wu Lingyun Wang Minkun Li Qiang et al(1)
Research and Implementation of Intelligence Active Power Control System in Wind Power	Yaoxiuping Changxiqiang Zhanghuiling et al(4)
Research on the Impact of Single - phase Reclosing on System When the Fault in Link Line of Wind Farm	Wang Yinping Wang Weiqing Chang Xiqiang(8)
Research on Droop Control Strategies for Microgrid in Island Mode	Luo Ruixin Liu Chengzhi You Xianliang et al(11)
Research on Static Synchronous Compensator Based on Internal Model Control	Zhang Huazhi Zhang Huayun Gao Jun et al(15)
Analysis on Daily Load Characteristics of Chengdu Power Grid and Research on Forecasting Method	Zhang Li Pu Xiaoying Lu Zhengyao(21)
Operation Optimization of Wind - pumped Storage Hybrid Power System in Electricity Market	Luo Chengjun Li Anjun Wang Xi et al(28)
Configuration for Automatic Throw - in Device of Standby Power Supply in Logistic DTS	Chen Xi Ren Ling Wei Tao(33)
Analysis on Logic Flaw of Zero Sequence Overcurrent Protection Action in Main Transformer	Cen Dongmei Ou Changcen(37)
Thinking of Bus - bar Protection Based on 110 kV Internal Bridge Connection	Zeng Ming(38)
Superficial Discussion on Impact of Wind Power Integration on Electric Energy Metering	Yan Ronggui Huang Cheng(41)
Discussion on Automatic New Model for Guangzhou 10kV Over Head Feeder Line Based on Intelligent Switch	Song Youwen Liao Weiyan(46)
Analysis on Technology Principle and Application Prospect for Power Optical Fiber Communication	Xiao Li(51)
Calculation of Error Electric Quantity in Multi - functional Watthour Meter after Loss of Voltage	Li Qi(55)
Application and Research of New Fault Current Limiter in Power System	Yao Shouxue Cheng Jianxiong Cai Shengzhou et al(61)
Architecture Construction of Condition - based Maintenance and Its Application to Transmission and Distribution Equipment in Sichuan Electric Power Corporation	Wu Xiaohui Gan Degang Wang Hongmei et al(64)
Establishment of Analysis Model for Life Cycle Management of Power Equipment and Its Application Research	Ma Wei(68)
Research on Present Situation of Condition Assessment Technology for Transformer	Zheng Zhaohui Xu Wei Lü Hongbin et al(73)
Analysis on Potential Safety Hazard in Control Circuit of ZF11 - 252(L) Type Circuit Breaker	Li Zongyu(77)
Influence of Asymmetrical Ground Fault in Power Cable of High - speed Railway on Secondary Cable	Zhou Siyu Leng Yi(81)
Measurement of Impulse Earthing Impedance for Poles and Towers in Transmission Line	He Yunfeng Zhao Ruohan Zhang Yu et al(85)
Analysis and Processing of Spring Energy - storage Fault in Circuit breaker	Liu Bintao Xiao Jianhua Huang Qian(89)
Research and Realization of Transformation Scheme in Pad Block of Turbine Bearing Bush	Han Xingquan(92)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2012 Vol. 35 No. 5

(Ser. No. 221)

Bimonthly, Started in 1978

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

Postcode: 610072

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Electric Power Research Institute

Editor in chief: Hu Can

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

基于 CIM/E 交互的省地 EMS 异构系统 状态估计设计与实现

伍凌云¹,王民昆¹,李 强²,徐 杰²

(1. 四川省电力公司调度中心,四川 成都 610041;2. 中国电力科学研究院,北京 100192)

摘 要: 为推进“大运行”调度技术支持体系建设,探索建立适应大运行调度一体化及调控一体化的系统运行指标考核体系,实现精益化运行管理与考核成为保障调度技术支持系统安全可靠运行的重要工作内容。通过基于 IEC 61970 标准的 CIM/E 电网模型数据交互,在异构系统上实现省调对地调能量管理系统(EMS) 状态估计计算,对于加强地调调度技术支持系统的运行管理和省地系统间的纵向互联计算都是有益尝试。

关键词: CIM/E; 状态估计; 调度技术支持系统

Abstract: In order to advance the construction of dispatching technical supporting system for "Large - scale Operation", establishing the operation index assessment system which is suitable for dispatching integration and dispatching & control integration of large - scale operation, and realizing the refinement operation management and assessment are the important contents to guarantee the safe and reliable operation of dispatching technical supporting system. Through CIM/E data interchange of grid model based on IEC 61970, the realization of state estimation calculated by provincial dispatching center for energy management system (EMS) of regional dispatching center in heterogeneous system will be a good try for the reinforcement in operation management of regional dispatching technical supporting system and the interaction between provincial and regional dispatching centers.

Key words: CIM/E interchange standard; state estimation; operation supporting system

中图分类号: TM734 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2012) 05 - 0001 - 03

0 引 言

为贯彻落实国网公司“三集五大”工作部署,按照“大运行”体系建设的总体要求,目前四川省电力公司调度中心正在全面推进各地调调度技术支持系统应用软件功能的建设和实用化工作。在保证实现调控一体化和地县一体化功能的基础上,建设和完善调度技术支持系统各项应用软件功能,持续提升应用功能实用化水平,逐步推动调控运行向智能分析型转变。大运行对自动化系统运行管理提出很高要求,系统运行维护安全责任大大增加,“调控一体化、地县一体化”的调度技术支持系统投运后,地区电网调度生产、设备监视和远方控制严重依赖于自动化系统的安全稳定运行,对系统功能稳定性和数据准确性提出了更加苛刻的要求,自动化系统运行维护的安全责任和压力空前巨大。探索建立适应大运行调度一体化及调控一体化的系统运行指标考核

体系,实现精益化运行管理与考核成为保障调度技术支持系统安全可靠运行的重要工作内容。

在保障自动化系统安全可靠运行的前提下,保障电网运行基础数据的正确可靠是调控一体化及调度一体化业务技术支撑平台实现的基础条件。而状态估计计算(state estimator, SE) 结果是调度一体化业务应用的基础数据来源,提高状态估计合格率指标是保障调度一体化功能可靠运行的基础。这里采用自动化最新技术标准,通过基础 IEC 61970 标准的 CIM/E 电网模型数据交互,以松耦合的方式在异构系统上实现省调对地调 EMS 系统状态估计计算。

1 CIM/E 封装状态估计计算数据实现原理

1.1 状态估计数学描述^[1]

状态估计是能量管理系统(energy management system, EMS) 高级应用的基本功能,其量的测量主要来自于 SCADA 的实时数据,量测不足之处使用

预报和计划型的伪量测,另外还有一部分根据基尔霍夫定律得到的伪量测是必须使用的。

量测方程为

$$z = h(x) + v \quad (1)$$

状态估计的目标函数为

$$J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (2)$$

即在给定量测向量 z 之后,状态估计向量 x 是使目标函数 $J(x)$ 达到最小的 x 的值。式中 R^{-1} 表示量测权重(采用量测方差的倒数),式(2)的含意是量测量加权残差平方和为最小。

维数较少的系统状态估计可直接采用基本加权最小二乘法求解,但实际系统状态量多,需用内存量大计算时间长,这里采用快速分解模型,将量测量分解为有功和无功两类,即

$$z = \begin{bmatrix} z_a \\ z_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

将状态量 x 也分解为电压相角 θ 和幅值 v 两类,即

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ v \end{bmatrix} \quad (4)$$

同样将量测方程 $h(x)$ 分解为两类,即

$$h(x) = \begin{bmatrix} h_a(\theta, v) \\ h_r(\theta, v) \end{bmatrix} \quad (5)$$

在基本加权最小二乘法状态估计的修正方程(3)和(4)的雅可比矩阵 H 中引入以下两项假设。

$$\frac{\partial h_a}{\partial v} \approx 0 \text{ 和 } \frac{\partial h_r}{\partial \theta} \approx 0 \quad (6)$$

$$\sin \theta_{ij} \approx 0, \cos \theta_{ij} \approx 1 \text{ 和 } V_i \approx V_j \approx V_b \quad (7)$$

可以得到快速分解法状态估计的修正方程为

$$A \Delta A \theta(l) = a(l) \quad (8)$$

$$B \Delta V(l) = b(l) \quad (9)$$

式中, A 为 $(n_a \times n_a)$ 有功常数对称矩阵; B 为 $(n_r \times n_r)$ 无功常数对称矩阵; a 为 n_a 维有功自由向量; b 为 n_r 维无功自由向量。

$$A = V_0^4 [(-B_a)^T R_a^{-1} (-B_a)] \quad (10)$$

$$B = V_0^2 [(-B_r)^T R_r^{-1} (-B_r)] \quad (11)$$

$$a^{(l)} = V_0^2 [(-B_a)^T R_a^{-1} (Z_a - h_a) V^{(l)}, \theta^{(l)}] \quad (12)$$

$$b^{(l)} = V_0^2 [(-B_r)^T R_r^{-1} (Z_r - h_r) V^{(l)}, \theta^{(l)}] \quad (13)$$

1.2 基于 CIM/E 的 SE 计算数据交互

由状态估计最小二乘法的模型得知,要想得到完整的状态估计运行结果,有一些数据是必须事先得到的,例如系统的节点信息、支路信息等电网模型

数据,采集的实时数据信息,包括有功注入、无功注入等^[8-10]。一般情况下状态估计与 SCADA 在同一 EMS 系统中实现,计算需要完成以下功能:首先,定义电网模型及实时数据的输入输出接口,实现输入输出功能。电网模型包含了系统中所有的设备对象、量测对象等和状态估计计算相关的电网信息。其次,按导入的电网模型中定义的网络元件互连关系和当前的开关刀闸状态判别电网实时接线方式,进行网络拓扑。最后,根据已知的系统量测信息,导入电网模型信息以及网络拓扑后的系统状态,进行状态估计计算并输出结果。目前省调 EMS 系统中没有对地调管辖电网设备进行建模,也未实时采集地区电网运行数据,要在省调 EMS 系统中实现对地调的状态估计计算,必须实现省地 EMS 系统模型和电网运行数据交互。但省调与各地调现未采用基于同一平台的 EMS 系统,系统应用的互联受到限制。

在近年来中国智能电网调度技术支持系统建设过程中,各级调度中心基础数据和模型参数的“源端维护、全网共享”是系统建设需要解决的重要关键技术之一,也是智能电网调度技术支持系统建设运行的重要基础工作。为此,国调中心制定基于 CIM/E 语言的模型交互方案。此方案的基础是 IEC 61970/IEC 61968 标准^[3,4]。通用信息模型(common information model, CIM) 是 IEC 61970 的核心部分,定义了电力企业应用集成中涉及到的公用类、属性、关系等。其中,公用类(class) 是抽象的,可以扩展到许多应用,可定义信息交换模型^[5-7]。

CIM/E 文件主要包含电网模型描述、模型导出时刻的电网数据断面、设备命名规范、模型与通信索引表、与模型匹配的单线图等信息,文件格式简洁易于程序解析,因此这里将其作为省、地两级调度之间的模型和数据交换文件。在地调 EMS 中提供本地模型到 CIM 模型的映射,根据程序内部数据库的结构和内容,按照 CIM 数据模型的结构,转化为 CIM 对象,生成 CIM/E 文本文件并输出,通过调度数据网准实时传输至省调,省调读入 CIM/E 文件解析并将其转换为内部程序所需格式,经过网络拓扑分析和运行数据预处理后就可以得到电网结点模型和实时数据进行状态估计计算。

2 技术实施方案

省、地调之间用 CIME 进行模型和运行数据的

交换。省调侧依据各地调模型和数据分别进行状态估计计算,计算结果和统计信息分别写入实时数据库和商用数据库,并提供界面展示和查询。

2.1 电网模型和运行数据交换

在省调侧部署专用数据接口服务器,存放模型文件和运行数据文件。地调侧使用状态估计应用下的电网模型生成 CIM/E 格式的模型文件,模型文件中包含 scada 数据断面,上传至省调指定路径。省调侧状态估计应用周期读取解析 CIM/E 文件进行状态估计计算。考虑到多个地调模型/数据文件同时上传,同时启动状态估计计算,计算程序设计采用并行计算技术。

基于 CIM/E 模型数据交换和并行技术的状态估计软件设计框图如图 1 所示。

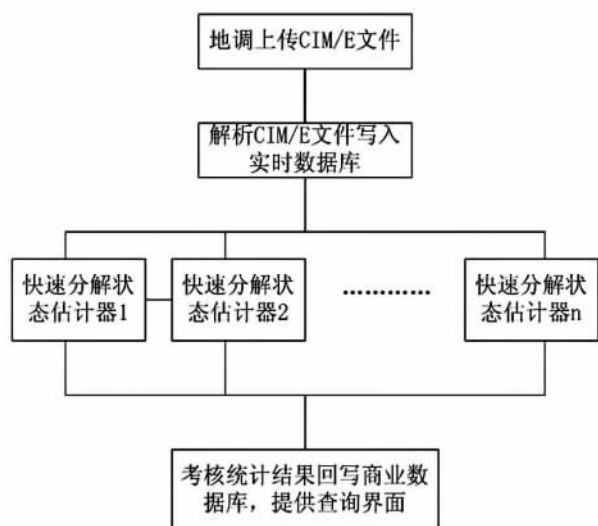


图 1 状态估计软件设计框图

2.2 模型数据要求及校验

地调电网模型和准实时数据均使用 CIM/E 文件。地调建模应保证系统完整性(电源、网络、负荷)。对外网和未采集厂站模型做等值处理,如将外网厂站等值成发电机组或负荷(如受电线路建议增加等值发电机,送电线路建议增加等值负荷),无实时量测数据的用户变等值成负荷模型。CIM/E 文件中应包含模型和 scada 断面数据,模型与断面数据应相互匹配。

省调对地调模型和准实时数据进行量测预校验,主要包含模型正确性校验和准实时数据预检测。模型正确性校验包含(模型校验及错误信息总览、设备空挂/单端悬空及设备信息属性错误信息);准实时数据预检测包含可观性校验、厂站平衡校验、

母线平衡校验、线路两端量测冲突等,校验信息提供界面展示。模型/数据交换方式及相关接口。

地调侧电网模型发生变更时,应及时主动请求省调侧对新模型进行校验。模型校验结果通过界面展示,校验包含连接点错误、参数不完整、设备空挂等信息。模型校验程序同时将模型更新时间写入历史库,提供界面查询。

2.3 状态估计计算

省调侧状态估计应用通过常驻进程周期启动计算,计算周期应不小于地调模型和数据上传周期。状态估计先 CIM/E 文件内容的写入省调 EMS 实时数据库,同时读入到内存库中进行状态估计计算。状态估计主要包含网络拓扑分析、量测系统分析、量测预校验功能、状态估计计算、不良数据检测与辨识。状态估计计算程序框图如图 2 所示。

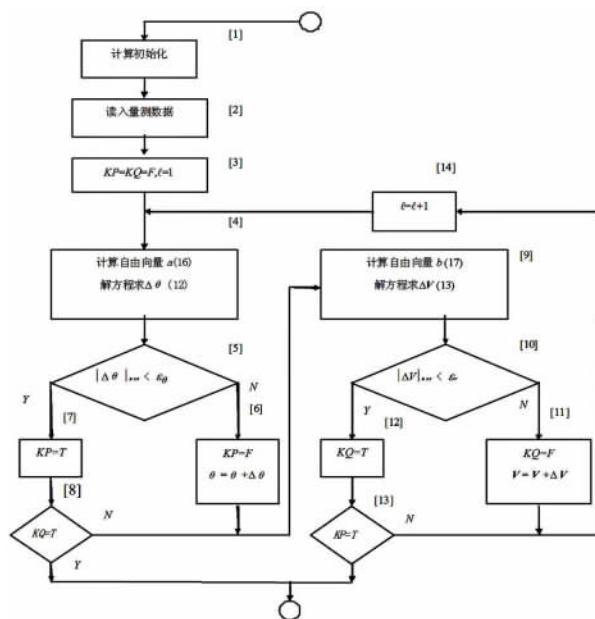


图 2 状态估计框图

3 系统配置方案

硬件根据计算量(21 个地调 15 分钟频率 SE 计算)需求配置 3 台专用 SE 计算服务器,以满足于 21 个地调准实时数据并列计算。服务器配置在安全 I 区,计算结果统计信息传输至 III 区通过 OMS 系统发布。

状态估计是基于智能电网调度技术支持系统中的网络分析应用,应接受平台统一管理。省调侧对 21 个地调模型和数据同时进行状态估计计算,因此

(下转第 94 页)

研磨,磨完后的球面过渡圆滑。

(7) 内六方螺栓不得上得太紧,防止耐油橡胶垫圈(件6)被压得没有弹性,耐油橡胶垫圈(件6)在每次大修时需更换。

通过以上改造,可倾垫铁第一次研刮合格,以后大修就无需研刮垫铁,只调整内部垫片,从100~1 000 MW 汽轮机中心调整仅2天即可完成,机组提前发电,能够创造可观利润。

(上接第3页)

需要对每台服务器上的应用进行合理分布。人机界面只展示应用主节点上的数据,因此需给21个地调状态估计分配21个不同的应用。采用小应用的模式,每个状态估计小应用相当于状态估计大应用的一个映射,拥有同样的数据库结构,不同的小应用可布置在不同服务器上,因此可以满足21个状态估计计算的需求。各个小应用集成一套人机界面,通过切换应用来查看不同地调的SE计算结果数据。

4 结 语

推进调度技术支持系统的精细化运行管理工作,以系统状态估计遥测合格率运行指标为着手点监督考核系统运行情况,对有效提升调度一体化功能应用水平提供了基础保障。充分利用了CIM/E电网通用模型交互规范,在省地EMS系统异构条件下,在省调侧实现各地调系统电网数据的状态估计准实时计算,是对加强地调调度技术支持系统的运行管理的有益尝试,同时也为探索建立适应大运行调度一体化及调控一体化的系统运行指标考核体系,实现精益化运行管理与考核提供了可行方案。

参考文献

- [1] 于尔铿,相年德,王世纛,等. 电力系统状态估计[M]. 北京:水利电力出版社,1985.
- [2] 于尔铿,刘广一,周京阳. 能量管理系统(EMS) [M]. 北京:科学出版社,1998.
- [3] IEC 61970-301 Energy Management System Application Program Interface (EMS-API): Part 301 Common Information Model(CIM) Base [S]. 2004.

参考文献

- [1] 郭延秋. 汽轮机分册/大型火电机组检修实用技术丛书[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [2] 马艳,卜丽,孙长江. 汽轮机设备检修[M]. 北京:中国电力出版社,1997.
- [3] 常威武,霍如恒. 汽轮机本体检修实用技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [4] IEC 61970-452 Energy Management System Application Program Interface (EMS-API): Part 452 CIM Network Applications Model Exchange Specification, DR3 [S]. 2006.
- [5] 谢善益,梁成辉,高新华. CIM/CIS互操作细则在多级电网调度中的应用[J]. 电力系统自动化,2009,33(1):103-107.
- [6] 潘毅,周京阳,李强,等. 基于公共信息模型的电力系统模型的拆分与合并[J]. 电力系统自动化,2003,27(15):45-48.
- [7] 孙宏斌,吴文传,张伯明,等. IEC 61970标准的扩展在调度控制中心集成化中的应用[J]. 电网技术,2005,29(16):21-25.
- [8] 许凯宁,程新功,刘新锋,等. 基于CIM设计的电力系统状态估计模型[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(24):124-127.
- [9] 兰华,李积捷. 电力系统状态估计算法的研究现状和展望[J]. 继电器,2007,35(10):78-82.
- [10] 李盟,秦立军,郭庆,等. 基于CIM模型的电网拓扑分析[J]. 电力科学与工程,2011,27(9):18-22.

作者简介:

伍凌云(1976),男,博士,研究方向为电力系统分析,现就职于四川省电力公司调度中心;

王民昆(1973),男,高级工程师,研究方向为电力调度自动化技术,现就职于四川省电力公司调度中心;

李 强(1966),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统分析,现就职于中国电力科学院电力自动化所;

徐 杰(1986),男,硕士研究生,工程师,研究方向为电力系统网络分析,现就职于中国电力科学院电力自动化所。

(收稿日期:2012-05-22)

风电智能有功控制系统研究与实现

姚秀萍¹, 常喜强¹, 张慧玲², 孙立成¹, 李静坤¹

(1. 新疆电力调度通信中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 宁夏电力调度通信中心, 宁夏 银川 750001)

摘要: 风电场大量、快速和成规模接入电网, 给电网有功调度与控制带来新的挑战。针对新疆电网风电发展现状, 开展了风电有功控制系统的研究和讨论, 通过对国内类似控制系统分析, 结合新疆电网的实际情况, 提出了适应新疆电网的风电控制系统的建设方案思路, 同时通过实践也在风电场有功功率快速、精确控制方面验证了此技术方案。为在保证电网安全稳定运行的基础上最大限度地接纳风电资源提供了技术支持, 也为类似系统建设提供了借鉴思路和参考。

关键词: 自动发电控制(AGC); 风电; 有功功率控制; 最大发电能力

Abstract: The access of a lot of fast and large-scale wind farms to power grid has brought new challenges to the active power dispatching and control of the grid. According to the current situation of the wind power development in Xinjiang Power Grid, the research and discussion of active power control system for wind power are carried out. Through the analysis of similar control system in China and combining with the actual situation of Xinjiang Power Grid, the construction program ideas for wind power control system of Xinjiang grid are put forward, and this technical scheme is verified in the fast and accurate control of active power through the practices in wind farms at the same time. It provides the technical support to ensure the grid security and stability on the basis of the maximum acceptance of wind power resources, and gives the reference for the construction of similar systems.

Key words: automatic generation control (AGC); wind power; active power control; maximum generating capacity

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0004-04

0 引言

随着风电大规模的开发和应用, 大规模风电的调度问题成为了电网需要重点考虑的问题之一, 各种调度决策、运行方式安排将不得不考虑风电的随机性和波动性。面对大规模风电并网运行带来的严峻挑战, 需深入研究电网大规模风电调度关键技术, 这对于电网安全经济运行意义重大。新疆风能资源丰富, 风电开发潜力较大。目前, 风电已进入快速发展阶段。至 2015 年风电总装机规模将达到 5 800 MW, 风电占 11.51%; 远景装机容量更多。大规模风电的最优调度问题成为了新疆电网重点关注的问题之一。对打造绿色能源“疆电外送”意义重大。

通过基于风机及风机集群的电网风电智能控制系统的研究, 使风电适应电网与电源结构的不断变化, 将极大提升电网调度机构应对风电的调度运行水平。

1 风电功率控制的 5 种情况

在发生以下 5 种约束情况时, 对风电场功率进行控制。

1) 调峰约束 1(如图 1): 正常运行方式下, 风电场上报当天或者次日风功率预测出现偏差达到一定值时, 造成电网系统调峰、调频、调压困难、电网稳定无法满足系统 AGC 及电网安全约束时, 风电场应按照电网调度机构给定功率进行控制。

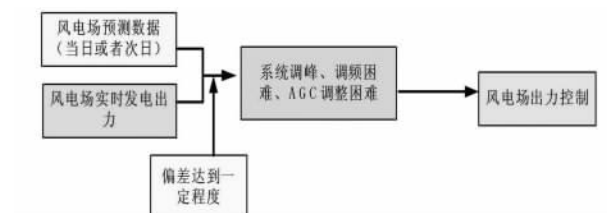


图 1 调峰约束控制 1

2) 调峰约束 2(如图 2): 正常方式下, 由于电网因天气、冲击负荷等外界原因, 在系统采取各种技术

手段后,电网仍无法满足系统调峰、调频、调压要求、电网稳定无法满足时,风电场应按照电网调度机构给定功率进行控制。

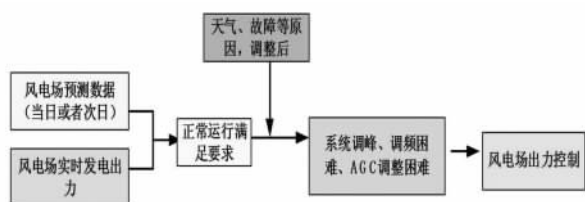


图2 调峰约束控制2

3) 稳定约束1(如图3):电网发生紧急情况下,如突然甩负荷等,造成系统无法满足调峰、调频、调压需求、电网稳定无法满足时,风电场应按照电网调度机构给定功率进行控制。

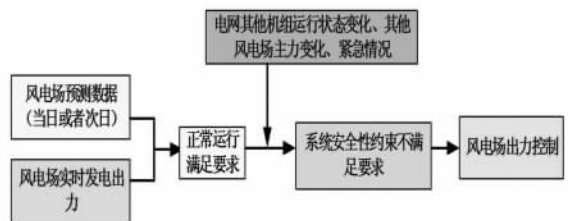


图3 稳定约束控制1

4) 稳定约束2(如图4):电网结构发生变化或出现其他影响风电场上网送出能力时,综合考虑系统安全性、电压约束等因素以及风电场自身的特性和运行约束,通过计算分析确定允许风电场上网的新的最大有功功率,风电场应按照电网调度机构给定功率进行控制。

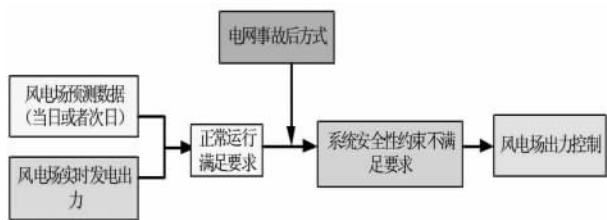


图4 稳定约束控制2

5) 稳定约束3(如图5):正常方式下,联络线处于满载边缘,由于负荷的随机波动与风电出力的逆叠加,造成联络线过载,综合考虑系统安全性、电压约束等因素以及风电场自身的特性和运行约束,通过计算分析确定允许风电场上网的新的最大有功功率,风电场应按照电网调度机构给定功率进行控制。

2 风电场控制方式

2.1 风电群控制方式

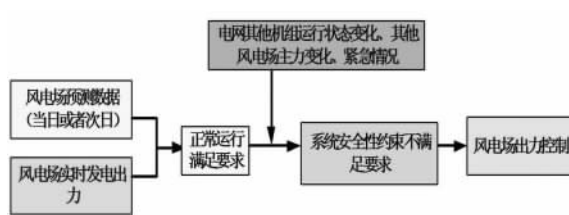


图5 稳定约束控制3

对于多个风电场进行功率控制时,按照各个风电场相关性强弱进行控制,统一综合考虑电网整体稳定性、各风电场通道情况、稳定特性、断面极限情况、系统电压等因素后,各风电场控制功率按相关风电场装机容量、关联度进行综合考虑分配。图6为风电场群控制模式。

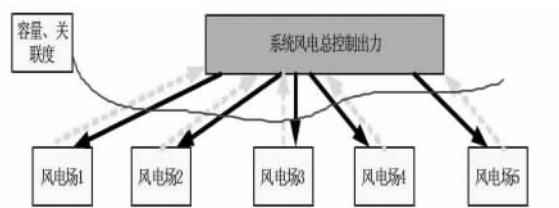


图6 风电场群控制模式

2.2 风电场内部控制方式

对于每个风电场进行功率控制时,可选择有条件的风机减出力、机组停机等进行功率控制,实施调度下发指令的风电功率控制。并满足调度要求的功率变化率的要求。图7为风电场内部控制模式。

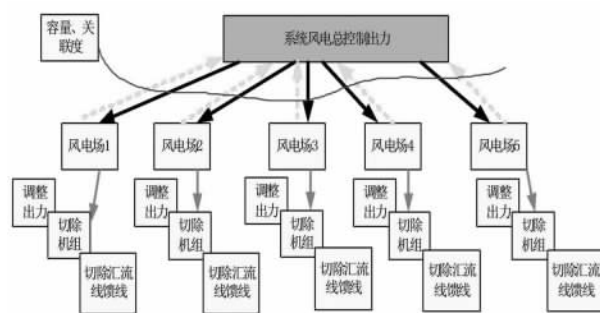


图7 风电场机组控制模式

3 目前对风电场有功功率控制的思路

目前,国内在风电场有功功率控制方面主要有以下模式。

1) 最大出力控制模式。根据电网风电接纳能力计算各风电场最大出力上限值。风电场出力低于上限值时处于自由发电状态,超出本风电场最大出力上限值时根据情况限制出力。采取稳定控制装置控制。

2) 计划值控制模式。以风电功率预测为依据,经安全校核后下发各风电场发电计划。各风电场实

时跟踪发电计划进行有功功率的调整。

3) 风电功率预测控制模式。以超短期风电功率预测为依据,通过 AGC 方式将目标值下发至各风电场,各风电场实时跟踪预测控制目标值进行有功功率的调整。考虑预测准确率无法达到或接近 100%,从风电的保障性收购而言,暂不能将预测结果直接作为风电 AGC 的控制指令目标,该模式目前仍在理论阶段。

4) 馈线控制模式。通过投切风电场馈线(汇集线)控制风电上网功率。

以上模式都基于一个共同的认识,即风电有功功率控制周期长、延时大、精度差,实现控制环节难度大。

4 风电智能有功控制系统建设思路

4.1 风电智能有功控制的实现模式

由于风电出力控制总体存在正常方式下控制、事故方式下控制两种情况,而根据其分类不同拟采用以下两种实现模式相结合。

(1) 正常方式下:若系统调峰能力不足,冲击性负荷与风电机组的反调峰叠加,造成系统频率升高或者联络线过载,需进行控制和调整,此种方式下,分为正调整和负调整,正调整是将风电出力向上调整,开放风电出力,负调整时将风电出力向下调整,减少风电出力,正调整与负调整的调控命令由省调风电控制系统下发到风电场或者风机执行。

(2) 事故情况下:由于故障造成的稳定问题,需控制风电调整风电出力,进行负调整,调控命令由省调风电控制系统下发到风电场或者风机执行。

4.2 控制数据准备

为充分利用系统资源,减少数据维护,对与数据的来源可从 EMS 系统、风功率预测系统、在线预警系统 3 个系统选取。

EMS: 获取与风电接入系统有关断面的系统数据、风电发电出力实时数据、系统各发电场出力安排数据、AGC 控制数据、系统预测负荷数据。

风功率预测系统: 获取风电场预测功率数据。

在线预警系统: 获取在线预警中断面约束数据。

风电区域稳定控制系统的策略命令数据。

4.3 控制数据计算

正常方式下的控制数据计算: 对数据进行整理,整合,结合风功率预测系统数据及 EMS 系统数据,通过 AGC 数据计算调峰缺额和允许数据,通过在线预警计算相关风电场断面允许数据,两者结合计算

出系统所能接受的风电出力(预测)综合,结合相关约束条件,然后进行分配数据的计算。

此控制过程的实现可选在 EMS 系统或者风功率预测系统嵌入 AGC 高层应用程序实现。

事故情况下的控制数据计算: 通过区域稳控系统策略计算核算的事故情况下控制数据。

5 风电场功率控制的实施

在建立风功率预测系统的基础上,建立风电场功率控制系统,包括电网调度端风电能量管理系统、风电场端能量管理系统,建立数据传输通道,实现电网调度端与风电场端的通信,风电场信息上送,实现风电调度控制指令的下发和实施,满足相关的技术标准。

1) 风电场端

风电场除建立满足自身需要的生产管理系统外,应根据调度需求,建立满足电网安全稳定运行要求的能量管理系统(包含监控系统、控制系统),系统涵盖满足调度要求的各种风机数据的采集、显示、上送。

表 1 现有风机自身控制情况表

机型	控制注意事项
MW 机组	有功控制
	1) 注意提高风机的使用寿命; 2) 减少风机故障的原则下,风机的有功控制采用冬季及夏季两种控制策略; 3) 考虑控制速率和控制间隔次数; 4) 考虑如果变桨仍达不到控制目标,采取停止部分风机的策略,停机采用轮停的方式。
750 kW 机组	无功控制
	1) 设定风机无功控制模式(高压母线电压、低压母线电压、功率因数); 2) 注意无功控制范围; 3) 注意响应时间、调节速率。
	有功控制
	1) 为失速型风机,无法实现单台机组出力的控制; 2) 采用轮流停机的方式控制。
	无功控制
	控制 SVC 的投切控制机组的无功输出

注: 此系统可嵌入调度 EMS 系统或者风功率预测系统中。

监控系统风机数据包括: 风机状态(风电总装机、风电接入方式及布局、各台风机类型、运行状态,各台风机运行数据、电网需求的频率、电压、保护控制参数)、风电场集中补偿等等。

监控系统还需具备风电场机组电场限电损失统计功能,控制风机的低电压穿越功能开启关闭功能,风速定值显示、预警功能、风机参与限功率设置功能、风机控制定值显示功能。

控制系统接收电网调度端下发的风电功率控制相关指令,并在电厂内部优化,实施,满足调度数量、速率有关技术要求,并能进行分类记录。可实现风电场汇流线路的切除或者风机机组的切除、风电场调整风机风向控制出力功能。

2) 电网调度端

电网调度端建立相应的风电能量管理系统(包含监视系统、控制系统),能接收风电场端上送的各种数据并能友好显示,具备下发风电功率控制指令。并能进行分类记录。

3) 联络通道要求

建立安全、可靠的网络传输系统通道,满足电网安全防护的有关技术要求。

6 新疆电网风电控制系统实施情况

通过研究,按照上述的思路,开发了一套不同与以上模式的独立控制模式,选定通过 EMS 系统的 AGC 软件实现,风电场在接收到控制目标后,将其分解为各台风机的控制指令加以执行。

正常 AGC 控制模式分为调峰控制及联络线过

载控制多种控制。为了缩短在通信上的延时并减少环节和提高可靠性,在技术实现方案上,在风场单独配置路由器和交换机,沟通风机监控系统至省调 EMS 系统的直联网络通道,采用 104 网络规约通信。同时,在升压站监控系统至省调 EMS 系统已有的四线通道外,再建一路网络通道。另外,沟通了升压站至风机监控系统的通信通道。主站侧将整厂目标功率通过通信规约的设点控制命令直接下发至风机监控系统,由该系统将总目标分解为各受控风机的控制目标并下发至风机能量管理平台,通过能量管理平台控制各风机的控制单元,启停风机或通过变桨实现有功功率的调整。

在最大程度保证风电场发电量的前提下尽可能地减少了对风机功率控制的次数。

风电场控制策略:实现了对风电场有功功率的控制。通过多次反复调试,消除了过调现象、延时较长等技术问题,合理优化了控制精度与延时时间的问题。具体实施结果图如图 8。

此外,针对故障情况下,风电场控制出力问题,加装了区域稳定控制装置,实现主变压器过载,联络线过载后优化切除风机的功能。



图 8 系统中风电场跟踪 AGC 控制指令效果图

7 结 语

新疆省调的风电功率控制系统实现了有功功率的智能控制策略,初步解决了风电快速发展阶段的电网安全问题。通过系统的实施,证明风电不但是可控、能控的,而且是能够快速、精确控制的,为今后风电的大规模发展提供了坚实的理论基础和稳定的运行控制平台。后期还将继续实现建设方案中的其他控制,如与风功率结合等等。

参考文献

- [1] 国家电网公司. Q/GDW 392 - 2009 风电场接入电网技术规定 [S]. 2009.
- [2] 乔颖,鲁宗相. 考虑电网约束的风电场自动有功控制 [J]. 电力系统自动化,2009,33(22) : 88 - 93.
- [3] 李雪明,行舟,陈振寰,等. 大型集群风电有功智能控制系统设计 [J]. 电力系统自动化,2010,24(17) : 59 - 63.

作者简介:

姚秀萍(1961),女,高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制及风力发电技术;

常喜强(1976),男,高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制及风力发电技术;

张慧玲(1974),女,高级工程师,主要研究含风电的电力系统稳定运行分析。

(收稿日期:2012 - 05 - 07)

基于风电场系统联络线 故障时单相重合闸对系统影响的研究

王银萍¹, 王维庆¹, 常喜强²

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008; 2. 新疆电力调度通信中心, 新疆 乌鲁木齐 830001)

摘 要: 随着风电场的接入, 为减少故障对风电场和系统的影响, 目前在联络线发生故障时直接切除线路。而系统发生单相故障时, 如果发生的是瞬时性故障, 采用重合闸是有效提高风电场的安全稳定性和风能的利用率。通过对不同类型的风机组成的风电场、不同容量的风电场与系统的联络线发生单相瞬时接地故障时, 对采用单相重合闸后的系统特性进行了分析, 找出了其中的规律, 并通过电力系统分析综合程序 PSASP 进行了仿真验证, 为不同类型风电机组组成的不同容量的风电场联络线采用重合闸提供了技术参考, 也为风电场故障时的事故分析提供了借鉴。

关键词: 单相故障; 联络线; 单相重合闸; PSASP 仿真

Abstract: With the access of wind farms, in order to reduce the impact of fault on the wind farm and system, at present, the line will be directly removed when there is fault in the link line. When the system has a single-phase fault, if it is an instantaneous fault, the reclosing will be adopted to effectively improve the security and stability of wind farms and the utilization of wind energy. Through the single-phase instantaneous earth fault occurring between wind farms of the different types and different capacities and the link line of system, the system characteristics after adopting the single-phase reclosing are analyzed, the regular pattern is found out, which has been verified by the simulation of power system analysis software package (PSASP). It provides a technical reference for the link line of wind farms with different capacities and different wind turbines to adopt the reclosing, and also provides a reference for the accident analysis during the fault of wind farms.

Key words: single-phase fault; link line; single-phase reclosing; simulation of PSASP

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0008-03

0 引 言

随着电力系统的发展, 风机容量不断地增加, 使电网可靠、稳定运行的要求更高。为了提高风电场风能的利用率, 特别是在系统发生单相瞬时性故障时, 使风电场不被脱网, 可采用单相综合重合闸, 发生瞬时性故障时, 切除故障相重合故障相, 发生永久性故障时, 切除三相, 这里基于风电场与系统的联络线发生单相瞬时故障时, 采用单相重合闸方式进行了分析, 通过对不同类型风机组成的风电场、不同容量的风电场进行了深入的研究, 找出了其中的问题及规律, 并通过仿真程序验证了相关的结论。找出同容量下何种机型产生的冲击比较小以及同种机型情况下容量和冲击之间的关系。

1 重合闸概述^[1]

1.1 概念及作用

• 8 •

重合闸就是线路非永久性故障时(如雷击、树枝碰线跳闸等等)保护动作断路器切断故障线路后经过一定时限后又再次合闸, 为线路重新供电, 提高供电可靠性及系统稳定性。通常输电线路的故障大都是瞬时性的, 当故障消失后, 进行一次重合闸, 就可能恢复供电。重合闸对电力系统供电可靠性起了很大作用。

1.2 单相重合闸

所谓单相重合闸, 是指线路上发生单相接地故障时, 保护只跳开故障相的断路器, 然后进行单相重合。重合成功, 即可恢复三相供电; 不成功, 则跳三相不重合。若是相间故障, 则跳三相不重合。

单相重合闸的适用范围: ①由于输电线路的故障大都是瞬时性的, 因此输电线路主要采用单相重合闸, 提高系统的稳定性; ②电网发生单相接地故障时, 使用三相重合闸不能保证系统稳定的线路, 常采用单相重合闸; ③330 kV、500 kV 及并联回路数等

于及小于3回的220 kV回路,采用单相重合闸;④在双侧电源的联络线上采用单相重合闸,可以在故障时大大加强两个系统之间的联系,从而提高系统并列运行的可靠性。

2 风电场目前采用的重合闸方式

按照中国《3~110 kV电网继电保护装置运行整定规程》,对于110 kV双端电源线路上网重合闸方式选择,原则上大电源侧选用“检线路无压”方式,小电源侧选用“检同期”方式^[6]。

3 风电场与系统联络线发生单相重合闸的机理分析

当风电场与系统联络线发生单相故障时,保护只跳开故障相的断路器,然后进行单相重合,在重合的瞬间会产生冲击,下面对最大冲击电流进行分析。不考虑负荷的影响,首先根据系统等值线路接线,选择实际可能的运行方式,再根据非同期时两个系统之间的等值电抗,由式(1)算出最大冲击电流 $I_{cj \cdot \max}$ 。^[4]

$$I_{cj \cdot \max} = \frac{E''_{x1} + E''_{x2}}{x_{1\Sigma}} = \frac{2 \times 1.05 U_e}{x_{1\Sigma}} \quad (1)$$

式中, E''_{x1} 、 E''_{x2} 为线路两侧系统的等值电势; U_e 为线路额定线电压; $x_{1\Sigma}$ 为非同期并列的两侧等值系统间的等值串联阻抗。

在计算时,一般采用标么值,此时式(1)式可化为

$$I_{cj \cdot \max} = \frac{2.1}{x_{1\Sigma}} \quad (2)$$

从式(2)式可以明显看出,对于同一个系统图,最大冲击电流 $I_{cj \cdot \max}$ 与 $x_{1\Sigma}$ 成反比。当发生故障的联络线位置固定、发电机的容量和类型改变时, $x_{1\Sigma}$ 会随着发电机电抗值 X_c 的变化而变化。

若统一选定的基准电压和基准功率分别为 V_B 和 S_B ,那么以此为基准的标么电抗值为^[3]

$$X_{(B)*} = X_{(有名值)} \frac{S_B}{V_B^2} = X_{(N)*} \frac{V_N^2}{S_N} \times \frac{S_B}{V_B^2} \quad (3)$$

式中, S_B 为功率基准值; V_B 为电压基准值; S_N 为额定功率; V_N 为额定电压; $X_{(N)*}$ 为额定电压下电抗的标么值。

由式(3)可以看出,基准值的发电机标么电抗

值主要由发电机电抗和发电机容量决定,与发电机电抗成正比、发电机容量成反比。由此可得出,最大冲击电流 $I_{cj \cdot \max}$ 与发电机电抗和发电机容量相关。由于不同风机的电抗值不同,因此需要对不同的风机类型进行讨论。另外,当负荷发生变化时,风机的容量一般也会随之变化,也需要对其不同容量的风机进行讨论。

4 风力发电机常见类型

风力发电机常用的发电机有异步发电机、双馈异步发电机、直驱式永磁同步发电机等类型。

4.1 异步发电机^[2]

异步发电机主要是转子转速高于旋转磁场的同步转速,转差率为负值。此时电磁转矩为制动状态,以此来实现机械能向电能的转化。鼠笼式风力发电机系统结构如图1。

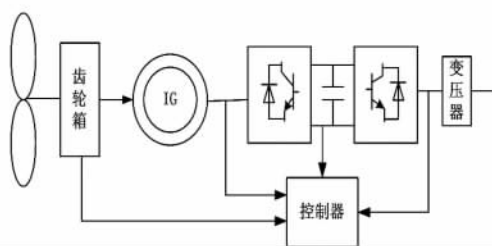


图1 鼠笼式风力发电机系统结构

4.2 双馈异步发电机

双馈异步发电机本质上是一种绕线式异步发电机,应用的是交流励磁变速恒频双馈风力发电技术。定子侧绕组产生的工频交流电直接馈入电网,转子侧的功率通过变换器接入电网,实现双向功率控制。双馈异步发电机系统结构如图2。

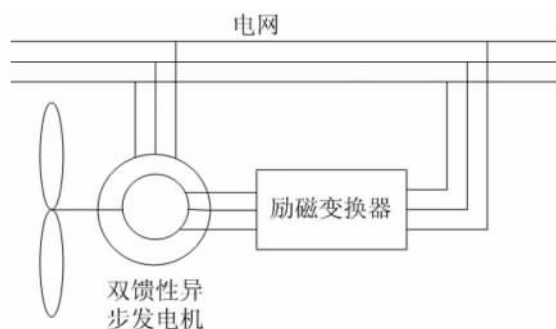


图2 双馈异步发电机系统结构

4.3 直驱式风力发电机

直驱式风力发电机属于变桨宽带调速同步风力发电机组,无齿轮箱。目前国际先进的无齿轮直驱

式风力发电机多沿用低速多级永磁发电机。直驱型永磁同步发电机系统结构如图3。

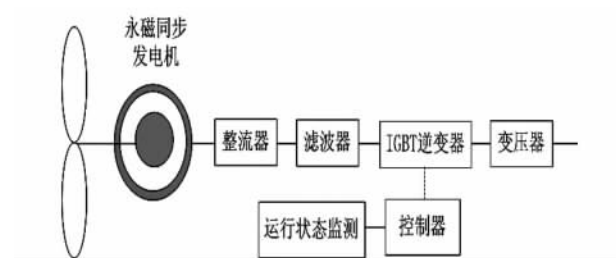


图3 直驱型永磁同步发电机系统结构

5 风机单相重合闸仿真分析

5.1 系统仿真图

基于上述理论,这里选择研究对系统进行A相短路接地,之后再对A相进行重合闸,观察其重合闸冲击电流的大小。系统图如图4所示:双侧电源线路,其中G1为风力发电机组,G2为平衡机,端电压均为10.5 kV;两台变压器T1、T2均为升压变压器,把电压从10.5 kV升到115 kV;4个负荷分别在母线G1、B2、B3、B4上。在线路3上发生A相短路接地,短路点接近母线B1。

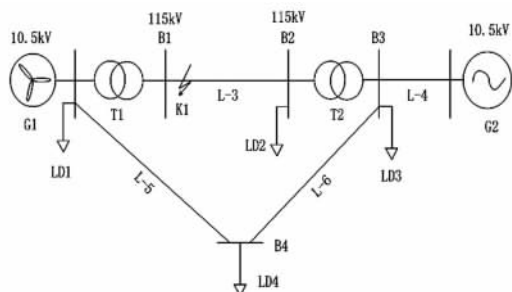


图4 系统仿真图

5.2 不同容量系统的仿真

以鼠笼异步风力发电机为例,在短路线路传输容量为69.7 MW不变的前提下,改变风机的装机容量以及负荷的容量对系统进行A相重合闸仿真。其中A相短路接地时间为1.1~2 s,A相断线时间为1.22~2.22 s。电流仿真图形为图5。由于改变风机的装机容量和负荷的容量,得到的图形大致一样,现只给出一个图形,并用图6给出不同情况下的冲击电流值的比较。其中,1是基准情况;2是增加发电机容量的情况;3是增加负荷的情况;4是发电机容量和负荷同时增加的情况。

分析:从图6中可看出随着风机容量的增加,重合闸冲击电流增加;随着负荷容量的增加,重合闸冲

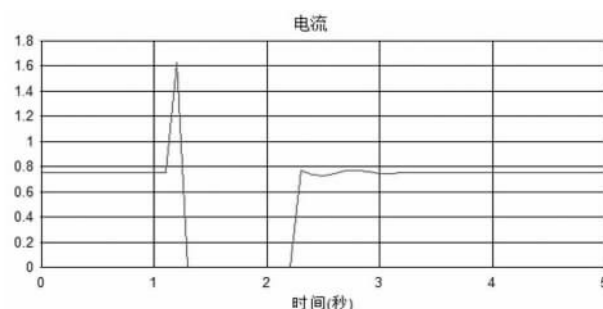


图5 电流仿真图

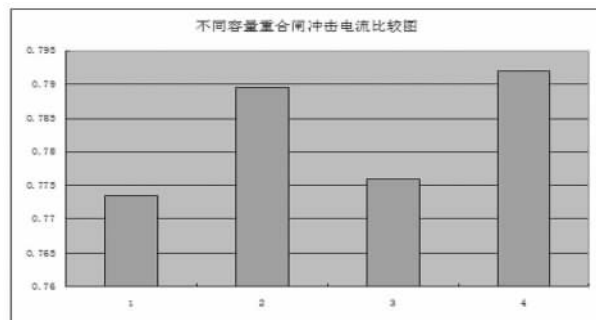


图6 不同情况下的冲击电流值的比较

击电流增加,但增加的很少;当风机容量和负荷容量都增加时,重合闸冲击电流增加。这是因为当风机容量增加时,基准值的发电机标么电抗值减小,等值阻抗减小,使得冲击电流增大;当负荷容量增加时,风力发电机的容量不变,平衡机的发电量增加,同样使得等值电抗减小,冲击电流增大,由于故障点离平衡机比风机远,因此,产生的影响相对小点,所以,第3种情况比第2种情况增加的少。

5.3 不同机型系统的仿真

在短路线路传输容量为69.7 MW不变的前提下,分别用同容量的鼠笼式风力发电机、双馈直驱通用风力发电机对系统进行A相重合闸仿真。其中A相短路接地时间为1.1~2 s,A相断线时间为1.22~2.22 s。鼠笼异步风力发电机的电流仿真图形为图7,双馈直驱通用风力发电机的电流仿真图形为图8,为了可以明显地看出两者冲击电流的大小,对两者进行对比,即图9。

分析:通过对图9可以明显地看出,在重合闸的瞬间用鼠笼式风力发电机系统的重合闸冲击电流比用双馈直驱通用风力发电机系统的重合闸冲击电流大。因为从风机工作原理上来看,鼠笼式风力发电机属于异步发电机,直驱式风力发电机属于同步发电机,而双馈式风力发电机的结构类似异步发电机,但工作原理接近于同步发电机。同步发电机的励磁

(下转第27页)

国电力出版社,2007.

- [8] 彭显刚,胡松峰,吕大勇. 基于 RBF 神经网络的短期负荷预测方法综述[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(17):144-148.
- [9] 陈刚,周杰,张雪君,等. 基于 BP 与 RBF 级联神经网络的日负荷预测[J]. 电网技术,2009,33(12):118-123.
- [10] 周虎,江岳春,陈旭,等. 模糊聚类分析和代数算法结合的短期负荷预测[J]. 电力系统及其自动化学报,

2011,23(3):101-105.

作者简介:

张莉(1962),女,工程师,从事电网运行管理及负荷预测;

蒲晓瑛(1978),女,工程师,从事电网调度运行方式管理;

卢政尧(1957),男,高级工程师,从事电网调度运行管理。

(收稿日期:2012-06-18)

(上接第10页)

系统在电力系统突然短路或负荷突然增、减时,对发电机进行强行励磁或者强行减磁,以此来提高电力

6 结 语

通过仿真得出了重合闸冲击电流在鼠笼式风机下与风机容量以及负荷容量的关系,即随着风机容量以及负荷容量的增加,重合闸冲击电流增加。然后比较了鼠笼式风机类型和双馈直驱通用风机类型对重合闸冲击电流的影响,即鼠笼式风力发电机系统的重合闸冲击电流比双馈直驱通用风力发电机系统的重合闸冲击电流大。仿真的结果与理论分析相一致,为研究继电保护重合闸提供了更为可靠的理论依据。

参考文献

- [1] 张保会,尹项根. 继电保护(第2版)[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [2] 辜承林,陈乔夫. 电机学(第2版)[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2005.
- [3] 何仰赞,温增银. 电力系统分析(第3版)[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [4] 崔家佩,孟庆岩,等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算(第一版)[M]. 北京:中国电力出版社,1993.
- [5] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护实用技术问答(第一版)[M]. 北京:中国电力出版社,1997.
- [6] 宋少群,付超,张兰英,等. 风电场并网线路重合闸的合理配合方式[J]. 电力系统自动化,2010,34(20):77-79.

作者简介:

王银萍(1987),女,硕士研究生,研究方向为风机控制与继电保护;

王维庆(1959),男,博士生导师,研究方向为风机继电保护及并网技术;

常喜强(1976),男,高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制及风力发电技术。

(收稿日期:2012-05-30)

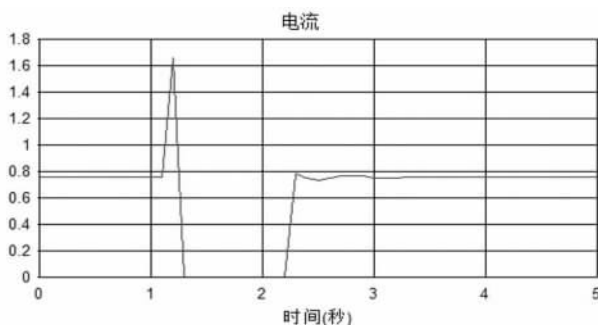


图7 鼠笼式风力发电机的电流仿真图

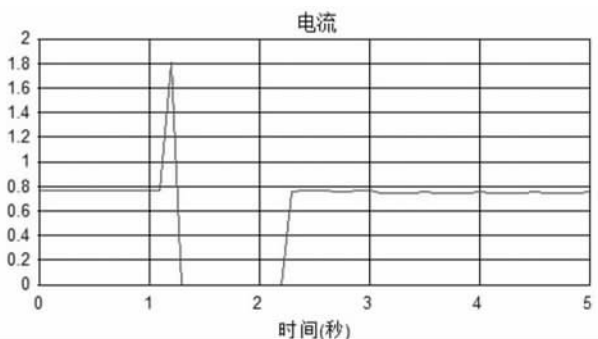


图8 双馈直驱通用风力发电机的电流仿真图

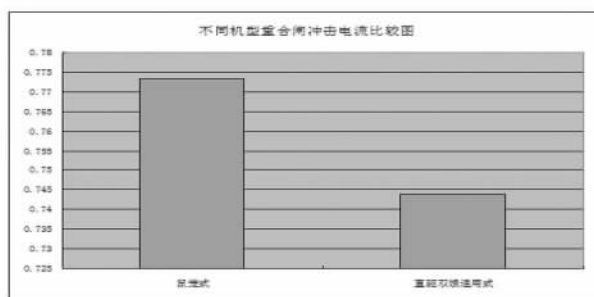


图9 不同机型重合闸冲击电流比较图

系统的稳定性^[5],因此在重合时比异步发电机产生的波动相对小,产生的冲击也相对较小。故鼠笼式风力发电机系统的重合闸冲击电流比双馈直驱通用风力发电机系统的重合闸冲击电流大。

微电网孤岛模式下多种下垂控制策略的研究

罗锐鑫, 刘承志, 游先亮, 刘廷建
(西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘要:在以逆变器为接口的微电网系统中, 逆变电源组网控制技术是实现微电网的关键问题之一。作为自治系统的微电网, 具有脱网孤岛运行的能力, 为了满足负荷变化对系统电压和频率提出的要求, 需要针对微电网中的微电源采取相关的控制策略。分析了微电网孤岛运行时各个微电源逆变接口在不同线路阻抗特性下的功率传输特性, 给出了相应的下垂控制策略。采用坐标旋转的虚拟功率下垂控制策略, 实现了功率的解耦控制, 更接近工程实践。通过线性组合定义了类功率变量, 而提出了类功率下垂控制策略。同时设计了基于虚拟功率和类功率的功率控制器。最后给出了下垂控制策略的不足, 提出了需要深入研究的问题。

关键词: 孤岛模式; 下垂控制; 虚拟功率; 类功率; 控制器

Abstract: As the interface to the microgrid system, the control technology of grid-connected inverter is one of the key problems of the microgrid. As an autonomous system, the microgrid can be operated in islanded mode, in order to meet the requirements for system voltage and frequency during load change, some relevant control strategies for the power source in the microgrid should be studied. The power transmission features of the inverter interface of each power source under different impedance characteristics are analyzed when the microgrid is in island operation, and then the corresponding droop control strategies are given. A virtual power droop control strategy based on coordinate rotational transformation can handle the power decoupling, and it is closer to the engineering practice. The quasi-power variables are defined by the linear combination and a quasi-power droop control strategy is proposed. At the same time, a power controller based on the virtual power method and the quasi-power method is designed. At last, the disadvantages of the droop control strategy are given, and the problems which need further study are put forward.

Key words: island mode; droop control; virtual power; quasi-power; power controller

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0011-04

0 引言

在能源需求日益增加, 而传统能源日趋枯竭的今天, 发展环境友好型能源如太阳能发电、风电和储能系统、先进的电池系统将在未来电网中发挥更加重要的作用。虽然这些新型能源为人类解决能源缺口提供了有效途径, 但是也因为其自身的特性为其推广应用带来了很大的阻力, 如风电的随机性、波动性、不可控性等。基于此, 学者提出了一种新的分布式能源组织方式和结构——微电网。尽管对微电网的定义不尽相同, 但国际上基本认为: 微电网是由各种分布式电源/微电源、储能单元、负荷以及监控、保护装置组成的集合; 具有灵活的运行方式和可调度性能, 即能在并网运行和孤岛运行两种模式间切换^[1]。

在微电网实际运行中需要首先解决的技术问题就是运行控制问题。从微电源的控制方法上来看, 微电源控制分为恒功率控制(PQ control), 下垂控制(droop control)和恒压恒频控制(V/f control)^[2]。当微电网处于孤岛模式时, 微电网的整体控制策略多采用对等控制, 因为在采用对等控制策略的微电网中, 下垂控制因不需要通信连接、降低系统成本、可靠性高、能实现即插即用功能(plug and play)等优点得到了广泛的关注^[3]。

由于微电网具有联网和孤岛两种运行方式, 且微电源位置具有一定的分散性, 额定功率一般不同, 因此如何选择下垂特性解决微电网中微电源的无通信连接是需要解决的问题。下面首先介绍了如何将传统电力系统中的下垂控制策略应用到微电网中, 并根据微电网自身的特点提出了新的下垂控制策略。

1 下垂控制理论和功率调节技术

1.1 基于公共节点电压在不同线路阻抗特性下的下垂控制策略理论分析^[4-6]

将传统发电机的下垂特性引入逆变电源并联的微电网中,这种方法称为电压频率下垂法,具体步骤为:①在输出阻抗近似为感性时,输出有功功率较大的逆变电源,通过频率下垂特性减小其输出频率,从而减少其有功功率输出,形成负反馈,反之亦然;输出无功功率较大的逆变电源,通过幅值下垂特性降低其电压幅值,进而减小其输出无功功率,形成负反馈,反之亦然;②在输出阻抗近似为阻性时,由于有功功率与电压幅值相关,无功功率与频率相关^[6],刚好与步骤①相反,所以有功功率的调节主要依靠幅值下垂特性,无功功率的调节主要依靠频率的下垂特性。图1所示为一个电压型控制并网模式的复频域等效电路图,该图是单相电路,同样适用于三相电路, U_s 表示公共节点电压。

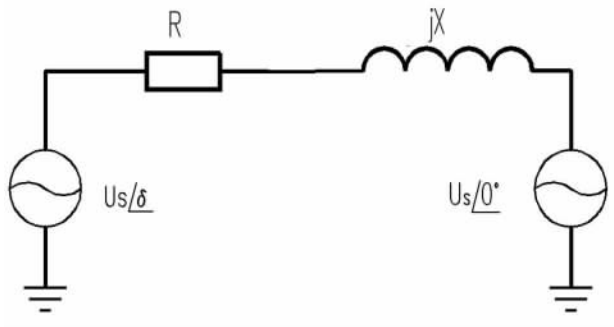


图1 微电源并网等效电路图

根据图1所示电路图,易得传输功率与线路阻抗有如下的关系。

$$\begin{cases} U_s \sin \delta = \frac{XP - R_2 Q}{E} \\ U_s \cos \delta - E = \frac{X_2 P + XQ}{E} \end{cases} \quad (1)$$

当微电网接入不同的电压等级中,输电线路呈现出不同的参数特点,一般高压输电线呈感性,中压输电线呈阻感性,而低压网络则呈现阻性^[5]。在计算潮流时,可认为 $\sin \delta \approx \delta$, $\cos \delta = 1$ 。

当 $X \gg R_2$ 时,和传统电力系统发电机外部运行特性一样,易得出此时微电源的控制策略就是基于经典的频率电压下垂控制策略。经典下垂控制策略为

$$\begin{cases} f - f_0 = -k_p (P - P_0) \\ U_s - U_{s0} = -k_Q (Q - Q_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中, f_0 、 U_{s0} 分别为额定频率和逆变器额定输出电压; P_0 、 Q_0 分别为逆变器额定输出有功功率和无功功率。式(2)说明能实现有功无功功率的解耦控制,具体调节原理如上述步骤①所说。

当 $X \ll R_2$,和传统电力系统发电机外部运行特性刚好相反。所以此时是通过调节电压幅值来实现有功功率的调节,通过调节频率进而调节功率角 δ 来实现无功功率的调节。控制策略公式如下所示。

$$\begin{cases} f - f_0 = k_p (Q - Q_0) \\ U_s - U_{s0} = -k_Q (P - P_0) \end{cases} \quad (3)$$

此时的下垂控制更多的称之为反调差控制,具体调节原理如上述步骤②所说。

当 X 与 R 相接近,在进行功率控制时两者都不能忽略。考虑到中压输电网络的阻抗特性,引入了正交线性旋转变换矩阵如下。

$$T = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\theta = \arctan(X/R)$ 为输电线路阻抗角。此时修正后的虚拟有功功率和虚拟无功功率定义如下。

$$\begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X}{Z} & -\frac{R}{Z} \\ \frac{R}{Z} & \frac{X}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (5)$$

仿照经典频率电压下垂控制策略的表达式,给出了修正后的适用于接入中压网络的逆变电源控制策略。

$$\begin{cases} f - f_0 = -k_p (P' - P'_0) = -k_p \frac{X}{Z} (P - P_0) + k_p \frac{R}{Z} (Q - Q_0) \\ U_s - U_{s0} = -k_Q (Q' - Q'_0) = -k_Q \frac{R}{Z} (P - P_0) - k_Q \frac{X}{Z} (Q - Q_0) \end{cases} \quad (6)$$

式中, f_0 、 U_{s0} 、 P_0 、 Q_0 的定义和式(2)一样。通过式(6)可以看出虚拟无功功率 Q' 和虚拟有功功率 P' 分别与电压和频率幅值呈现一一对应的关系,从而实现了解耦控制。

1.2 基于端电压和类功率的新型下垂控制策略理论分析^[7-9]

第1.1节所论述的下垂控制理论存在着许多不足,如只分析了一个逆变电源接入微电网从而忽略了多个逆变电源接入微电网产生的环流问题;所有

的下垂控制理论是采用公共节点电压,而微电网中微电源位置具有分散性,而反馈信号传输距离的限制不可能测到真正公共节点上的电压,因此上述的下垂控制理论不可能真正地实现下垂控制算法。基于以上两点的不足,提出了基于端电压和类功率的新型下垂控制策略。通过线性组合定义了类功率变量,通过合理的参数设计使得类有功功率和类无功功率分别只与相位差和幅值差有关,在整个的功率调节技术分析中只采用了逆变电源的端电压,避免了采用公共节点电压分析带来的不准确性。图2为基于三相逆变器的两台微电源并联等效电路,为简化系统仅列出单相。

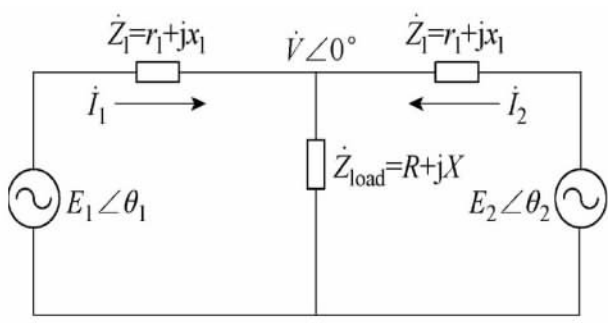


图2 微电网中两台并联逆变微电源等效电路图

由图2可以得出第1台逆变电源输出的有功功率和无功功率如式(7)(详细推导过程见文献[10]),同理,第2台逆变电源输出的有功功率和无功功率表示方法类似。

$$\begin{cases} P_1 = aE_1^2 + bE_1E_2\sin(\theta_1 - \theta_2) + cE_1E_2\cos(\theta_1 - \theta_2) \\ Q_1 = dE_1^2 - bE_1E_2\cos(\theta_1 - \theta_2) + cE_1E_2\sin(\theta_1 - \theta_2) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中的各个系数表达式如下。

$$\begin{cases} a = \frac{(R+r_1)B + (X+x_1)A}{A^2 + B^2} \\ b = \frac{-XB + RA}{A^2 + B^2} \\ c = \frac{-RB - XA}{A^2 + B^2} \\ d = \frac{(R+r_1)A - (X+x_1)B}{A^2 + B^2} \\ A = 2(r_1X + Rx_1 + r_1x_1) \\ B = 2Rr_1 - 2Xx_1 + r_1^2 - x_1^2 \end{cases} \quad (8)$$

通过线性组合定义了类有功功率 P_i 、类无功功率 Q_i ,见式(9),进而可以找到两台逆变器各自发出的类有功功率 P_{1i} 和 P_{2i} ,使得 P_{1i} 和 P_{2i} 的差值只与两台逆变器输出电压的相位差有一一对应的关系,同

样可以寻求两台逆变器各自的类无功功率 Q_{1i} 和 Q_{2i} ,使得 Q_{1i} 和 Q_{2i} 的差值只与电压的幅值差有一一对应的关系。

$$\begin{cases} P_{1i} = K_{11}P_1 + K_{12}Q_1 \\ P_{2i} = K_{11}P_2 + K_{12}Q_2 \\ Q_{1i} = K_{21}P_1 + K_{22}Q_1 \\ Q_{2i} = K_{21}P_2 + K_{22}Q_2 \end{cases} \quad (9)$$

为了达到逆变电源类有功功率的差值只与输出电压的相位差一一对应的关系和类无功功率差值只与电压的幅值差一一对应的关系,可取 $K_{11} = d, K_{12} = -a, K_{21} = -c, K_{22} = b$,从而实现两台逆变电源的均流。从上述的分析过程中可以看出,所有的功率表达式都采用了逆变电源的端电压而非公共节点电压。根据以上的分析,可以设计下垂控制方式为

$$\begin{cases} f_i = f_i^* - m(P_{ui} - P_{ui}^*) \\ E_i = E_i^* - n(Q_{ui} - Q_{ui}^*) \end{cases} \quad (10)$$

P_{ui}^* 表示额定类有功功率; Q_{ui}^* 表示额定类无功功率; f_i^* 为逆变器输出额定类有功功率对应的频率; E_i^* 为逆变器输出额定类无功功率对应的输出电压。

2 基于虚拟功率和类功率的功率控制器的设计

微电网每一个微电源的整体控制示意框图如图3所示。该控制方案既能实现基于虚拟功率的下垂控制策略,也能实现基于类功率的下垂控制策略,只需一个选择开关就能实现控制策略的切换。且该控制方案下的微电源能接入不同电压等级,具有一定的通用性。

测量微电源输出的瞬时电压和电流,通过abc-to-dq0变换计算得到微电源输出的瞬时有功功率和瞬时无功功率。进而通过低通滤波器得到其分别的平均功率,再由坐标旋转得到虚拟功率或者类功率,并与微电源的参考功率进行比较。最后通过不同的下垂控制器,得到微电源滤波器端口输出的参考角频率 ω 和参考电压 E ,作为双环控制器的输入。双环控制采用电感电流内环电容电压外环,使用平均功率进行调节目的是使调节过程更为平稳。

3 基于端电压和类功率的仿真

为了证明控制策略的正确性,通过Matlab/Sim

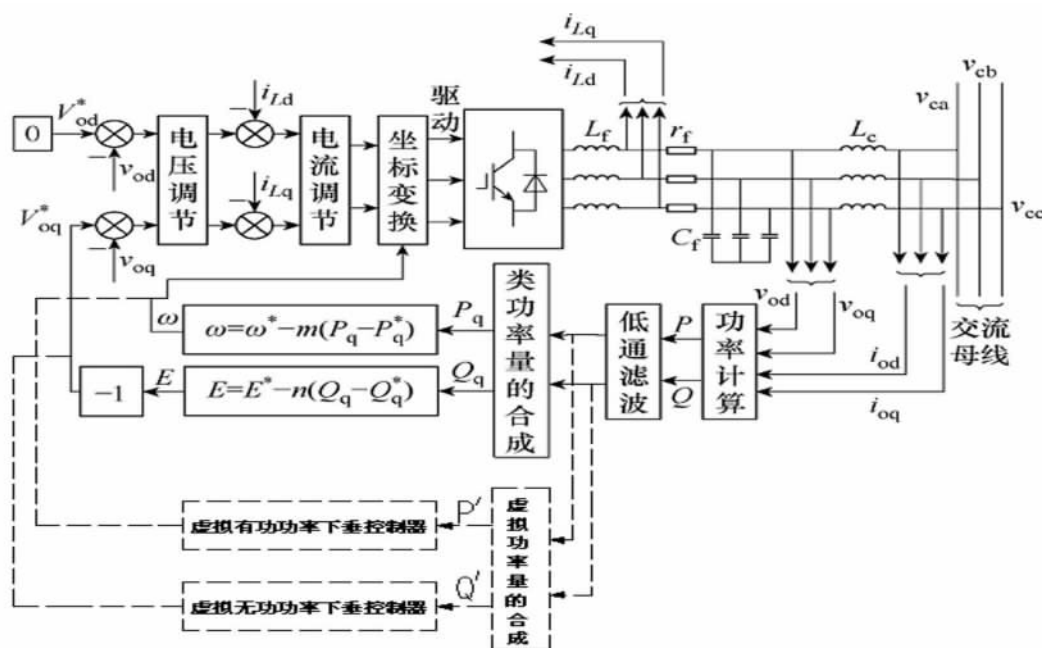


图3 微电网微电源控制示意图

ulink 搭建了基于端电压和类功率的模型,模型参数如下:设置两台逆变器的初始相位差为 1.8° ,每台逆变器输出电阻和电感分别为 0.08Ω 和 0.8 mH , $n_{eq} = 0.001$, $n_{Ep} = 1.5 \times 10^{-7}$, $n_{fq} = 1.59 \times 10^{-7}$, $m_{fp} = 3.185 \times 10^{-5}$ 。

采用1.2节所提出的新型下垂控制方法,得到的有功功率响应曲线和无功功率曲线如图4和图5所示。由图可以看出两台逆变器输出的有功功率和无功功率最终达到相等。

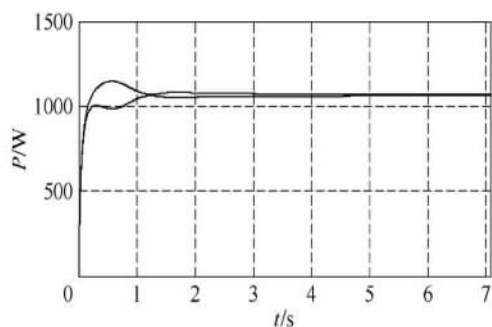


图4 有功功率曲线

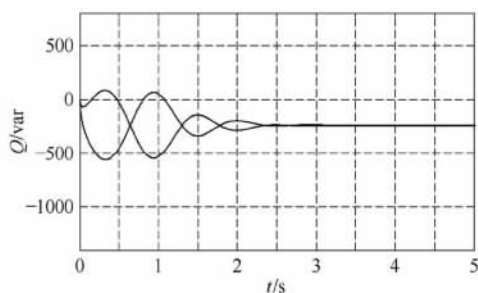


图5 无功功率曲线

4 下垂控制策略的缺点和进一步研究

当然,下垂控制策略在微电网中的应用,还存在一些需要继续深入研究的问题,主要体现在以下几个方面。

(1) 不能正确地调节非线性负载及线路造成的谐波分布^[11]。

(2) 对于三相系统中由于拓扑结构变化引起的控制模式变化,下垂控制不是个很好的选择,尤其是当同时有线性性和非线性负载时^[12-13]。

(3) 上述所有下垂控制策略只考虑了一次调频,而对二次调频的研究有待深入^[14]。

5 结 语

针对工程实际中存在着多种电压等级呈现出不同的阻抗特性,详细分析了微电源在阻性($X \ll R_2$)、感性($X \gg R_2$)、阻感性(X 与 R 相接近)情况下的功率传输特性,有功功率和无功功率的耦合问题,给出了相应的控制策略。提出了一种采用坐标旋转的虚拟功率控制策略,实现了在阻感性(X 与 R 相接近)情况下功率的解耦控制。同时为了更好的均流效果和并联运行,定义了类功率,设计合理的参数使得类有功功率差值只与输出电压的相位差有

(下转第20页)

平衡稳定和电流的跟踪,能够使系统获得良好的补偿效果,而且内模控制器只有一个调节参数(滤波参数),调节简单,具有很好的跟踪效果。

参考文献

- [1] 罗霄华. 一阶线性时滞系统的内模控制设计[J]. 山西电子技术, 2011(6): 1-5.
- [2] 齐菲. 多变量内模控制的仿真研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2008: 7-9.
- [3] 宋立军. 基于电流环内模控制的 IPMSM 矢量控制研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2008: 35-36.
- [4] 郭锐, 刘国海. 静止同步补偿器数学模型及其无功电流控制研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(1): 21-24.
- [5] 刘小园, 章勇高, 朱鹏程, 等. UPFC 并联侧控制器设计及仿真[J]. 华东交通大学学报, 2005, 22(1): 1-4.
- [6] Xiong Jian. Simplified control circuit of three phase PWM rectifier,
- [7] 汤赐, 罗安. 配电网静止同步补偿器的前馈解耦控制策略[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 1-5.

(上接第14页)

关,类无功功率差值只与电压的幅值差有关,从而得出改进的下垂控制策略。针对虚拟功率和类功率的下垂控制策略,给出了一个通用的微电源控制方案示意图,详细分析了它的工作原理,最后对类功率控制策略理论做了仿真,证明了该理论的正确性。

参考文献

- [1] 肖朝霞. 微网控制及运行特性分析[D]. 天津: 天津大学, 2008: 15-20.
- [2] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.
- [3] 杨淑英, 张兴, 张崇巍. 基于下垂特性的逆变器并联技术研究[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(2): 7-10.
- [4] 徐青山. 分布式发电与微电网技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011: 127-131.
- [5] 王立乔, 孙孝峰. 分布式发电系统中的光伏发电技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 110-124.
- [6] 周贤正, 荣飞, 吕志鹏, 等. 低压微电网采用坐标旋转的虚拟功率 V/f 下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 47-51.
- [7] 张纯江, 王晓寰, 薛海芬, 等. 微网中三相逆变器类功率下垂控制和并联系统小信号建模与分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 32-39.

- [8] Pengcheng Zhu, Liming Liu, Xiaoyuan Liu, et al. Analysis and Comparison of two Control Strategies for UPFC. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, 2005, 1-3.
- [9] 程汉湘. 柔性交流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 287-292.
- [10] 郑连清, 王青峰. 馈能型电子负载的并网控制[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-4.
- [11] 王宇. 统一潮流控制器(UPFC)的模型与仿真研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008: 17-19, 37-43.
- [12] 刘永江, 康积涛, 李林, 等. UPFC 并联侧双环控制策略的研究[J]. 输配电技术, 2011(7): 1-5.
- [13] 唐杰, 罗安, 周柯. 静止同步补偿器电压控制器的设计与实现[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 103-106, 116.
- [14] 鞠儒生, 陈宝贤, 邱晓刚. UPFC 控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 60-65.

作者简介:

张花芝(1988),女,硕士研究生,研究方向为电力系统的运行与控制。
(收稿日期:2012-05-22)

- [8] 阚志忠, 张纯江, 薛海芬, 等. 微网中三相逆变器无互连线并联新型下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 68-74.
- [9] 阚加荣, 谢少军, 吴云亚. 无互连线并联逆变器的功率解耦控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 40-45.
- [10] 林新春, 段善旭, 康勇, 等. UPS 无互连线并联中基于解耦控制的下垂特性控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 118-122.
- [11] 雷之力. 微网谐波振及电压暂降的评估与控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2011: 32-56.
- [12] 吕志鹏, 罗安, 荣飞, 等. 电网电压不平衡条件下微网 PQ 控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(6): 71-74.
- [13] 刘杨华, 吴政球, 林舜江. 孤岛运行的微电网三相不平衡潮流计算方法研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(7): 36-40.
- [14] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 164-168.

作者简介:

罗锐鑫(1988),男,硕士研究生,从事微电网控制策略、继电保护方面的研究。

(收稿日期:2012-06-05)

基于内模控制的静止同步补偿器研究

张花芝¹, 张花云², 高 俊², 李亚辉¹

(1. 西南交通大学, 四川 成都 610031; 2. 洛阳理工学院, 河南 洛阳 471000)

摘 要: 静止同步补偿器 (STATCOM) 的控制策略很多, 其中传统的 PI 控制在工程实际中应用最广泛, 但它存在很多缺点, 尤其是参数整定较麻烦, 为此根据内模控制原理, 对 STATCOM 的电流环采用前馈解耦控制策略, 设计了 STATCOM 的双闭环内模解耦控制器, 设计原理简单, 物理概念清晰, 容易实现, 而且能够达到良好的效果, 最后经过实验验证了这种控制方法的良好性。

关键词: 静止同步补偿器; 前馈解耦; 内模控制

Abstract: STATCOM (static synchronous compensator) has many control strategies, and the most widely used in engineering practice is the conventional PI control which has many shortcomings, especially the more difficult parameter tuning. Therefore, double closed-loop decoupling controller based on internal model is designed for STATCOM, whose current loop adopts the feed-forward decoupling control strategy. The principle is simple and the physical concept is clear, what's more, it can achieve good results. In the end, the good performance of this control method is verified by the experiments.

Key words: static synchronous compensator; feed-forward decoupling; internal model control

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0015-06

0 引 言

电力系统是一个庞大的非线性系统, 而且系统参数不固定, 对于这样的系统, 应用传统的 PI 控制很难使系统达到良好的效果, 而且 PI 要整定的参数较多, 参数整定起来较为麻烦。内模控制是一种基于过程数学模型进行控制器设计的新型控制策略, 是一种实用性很强的控制算法, 设计原理简单, 参数整定直观, 由于它不过分依赖被控制对象的数学模型, 能够使系统获得良好的动态性能, 具有较强的鲁棒性, 近几年来已在很多领域得到了广泛的应用^[1]。

将内模控制应用于 STATCOM 的控制当中, 根据控制目标设计了 STATCOM 的双闭环内模解耦控制器, 它能使系统具有很好的抗扰动性, 在实际中具有一定的工程应用价值。

1 内模控制原理

常规反馈控制器 (如图 1) 是将系统输出直接作为反馈信号, 这样就会把外部不可测扰动信号 $d(s)$

对输出的影响包含在反馈信号中, 使系统得不到及时有效的补偿。如果将常规反馈控制器进行如下的变形就得到内模控制器^[2-3] (如图 2), 其中 $P(s)$ 为控制对象, $C(s)$ 为反馈控制器, $M(s)$ 为对象模型, $d(s)$ 为扰动量, $R(s)$ 为参考输入, $Y(s)$ 为系统输出, $N(s)$ 为反馈量, 虚线框图中的 $Q(s)$ 为内模控制器。

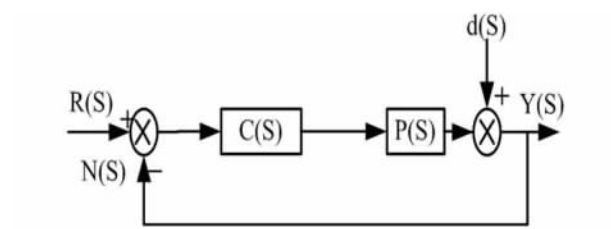


图 1 常规反馈控制器结构框图

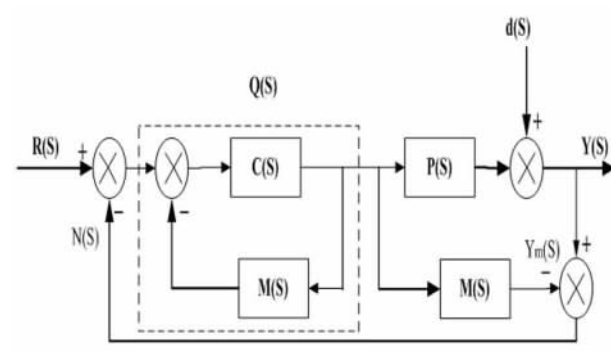


图 2 内模控制器结构框图

由图2可以得出下面的关系式。

$$C(S) = \frac{Q(S)}{1 - M(S)Q(S)} \quad (1)$$

$$Y(S) = \frac{P(S)Q(S)R(S)}{1 + Q(S)[P(S) - M(S)]} + \frac{[1 - Q(S)M(S)]d(S)}{1 + Q(S)[P(S) - M(S)]} = \frac{P(S)C(S)R(S)}{1 + C(S)P(S)} + \frac{d(S)}{1 + C(S)P(S)} \quad (2)$$

由上式(1)、(2)可知:当控制对象与模型匹配(即 $P(S) = M(S)$)时,若选择 $Q(S) = \frac{1}{M(S)}$ 时,则 $Y(S) = R(S)$,即系统的输出等于输入,不受任何干扰信号的影响,具有较强的鲁棒性。当控制对象与模型不匹配时,反馈信息中包含扰动量和模型失配的某些信息,从而有利于控制系统的抗扰动设计。

由于各种原因,在实际工程中很难保证对象模型的准确性,为了解决这种情况而引入了滤波环节(滤波器),其目的是当控制对象与模型失配时使系统保持稳定,若合理选取滤波器的结构和参数,能够有效抑制干扰,增强系统的鲁棒性。

2 STATCOM 的控制策略

2.1 STATCOM 的数学模型^[4]及前馈解耦控制^[5-7]

图3是STATCOM的结构原理框图。STATCOM通过耦合变压器接在节点1上,用来维持节点1电压的稳定或向系统输入(或输出)所需的无功功率,图中 U_s 为系统电源电压, U_2 为系统末端电压, L_s 为电源的等效电抗, U_{sh} 为换流器交流侧输出的电压, R_{sh} 为换流器和变压器的等效电阻, L_{sh} 为换流器和变压器的等效电感, U_{dc} 为直流电容电压。

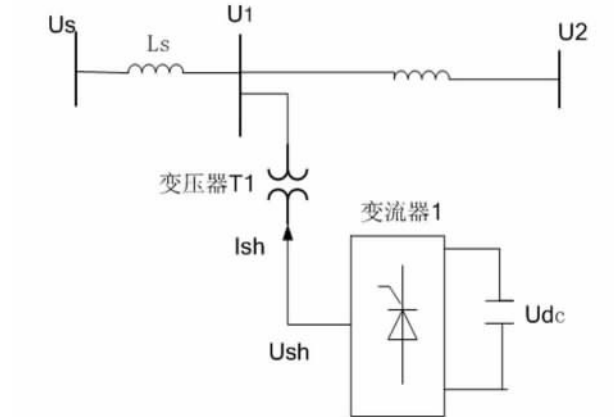


图3 STATCOM 的基本结构原理框图

由图3可得STATCOM的数学模型如下。

$$\begin{aligned} u_{1a} &= u_{sha} - R_{sh} \cdot i_{sha} - L_{sh} \cdot \frac{di_{sha}}{dt} \\ u_{1b} &= u_{shb} - R_{sh} \cdot i_{shb} - L_{sh} \cdot \frac{di_{shb}}{dt} \\ u_{1c} &= u_{shc} - R_{sh} \cdot i_{shc} - L_{sh} \cdot \frac{di_{shc}}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)可化为如下的矩阵形式。

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{sha}}{dt} \\ \frac{di_{shb}}{dt} \\ \frac{di_{shc}}{dt} \end{bmatrix} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \begin{bmatrix} i_{sha} \\ i_{shb} \\ i_{shc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} u_{sha} - u_{1a} \\ u_{shb} - u_{1b} \\ u_{shc} - u_{1c} \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式(4)进行3/2Park变换可得。

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{shd}}{dt} \\ \frac{di_{shq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ \omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{shd} \\ i_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} u_{shd} - u_{1d} \\ u_{shq} - u_{1q} \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(5)进行拉普拉斯变换,可得频域内的系统模型如图4。

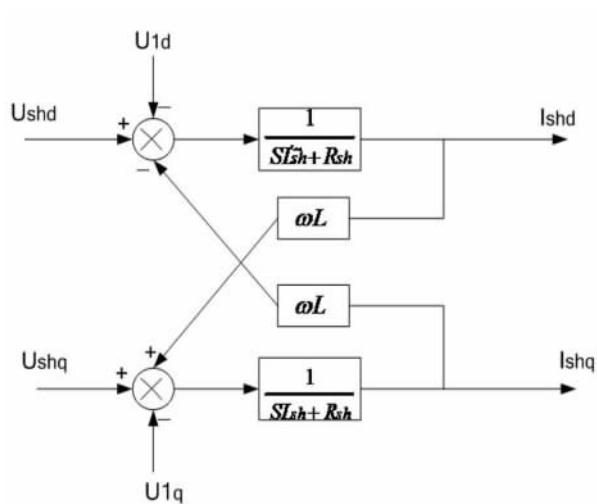


图4 系统模型

由式(5)和图4可以看出 d 、 q 轴电流 I_{shd} 、 I_{shq} 之间通过耦合项 ωL 存在着交叉耦合,很难实现 d 轴电压对 d 轴电流, q 轴电压对 q 轴电流的快速、有效的跟踪控制,所以下面将其进行前馈解耦控制。

为了实现 d 、 q 轴电流的解耦,引入两个新变量,

$$\Delta u_d, \Delta u_q, \text{ 令 } \begin{cases} u_{1d} = u_{shd} - \omega L i_{shq} - \Delta u_d \\ u_{1q} = u_{shq} + \omega L i_{shd} - \Delta u_q \end{cases}$$

$$\text{并令 } \begin{cases} \Delta u_d = W_{ACR1} (i_{shd}^* - i_{shd}) \\ \Delta u_q = W_{ACR2} (i_{shq}^* - i_{shq}) \end{cases}$$

其中 W_{ACR1} 、 W_{ACR2} 为电流控制器。将式(6)、(7)

进行拉普拉斯变换可得 STATCOM 的前馈解耦控制模型,如图 5 所示。

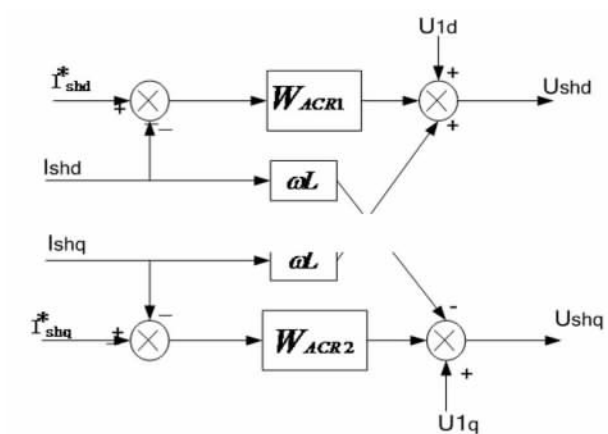


图 5 STATCOM 的前馈解耦控制模型

则由图 4、5 并结合 STATCOM 的控制目标^[8]可得系统解耦后的控制模型,如图 6 所示。

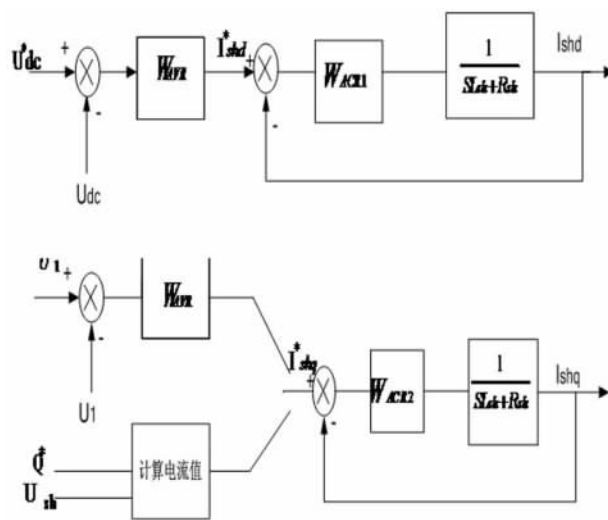


图 6 系统解耦后的控制模型

由图 6 可以看出 d 、 q 轴电流 i_{shd} 、 i_{shq} 不存在任何的关联,即成功地实现了对 d 、 q 轴电流的解耦控制。

2.2 基于内模控制的双闭环调节器的设计^[9]

2.2.1 电流内环控制器设计^[10-12]

由于实际中换流器存在延时,可用一阶惯性环节 $\frac{T_{PWM}}{T_{PWM}S + 1}$ 来等效,则电流内环的过程模型为

$$P(S) = \frac{K_{PWM}}{(T_{PWM}S + 1)(SL_{sh} + R_{sh})} \quad (8)$$

由于 d 、 q 轴电流内环模型相同,所以 d 、 q 轴电流控制器相等,令 $W_{ACR} = W_{ACR1} = W_{ACR2}$,假设被控对象与模型匹配时,则内模控制器, $M(S) = P(S)$, 由于 $M(S)$ 为最小相位系统,此时取 $Q(S) = \frac{1}{M(S)} \cdot F(S)$

($F(S)$ 为滤波器),一般来说,低通滤波器取为

$$F(S) = \frac{1}{T_{ci}S + 1} \quad (9)$$

此时可得电流反馈控制器为

$$W_{ACR} = C(S) = \frac{(T_{PWM}S + 1)(SL_{sh} + R_{sh})}{K_{PWM}T_{ci}S} \quad (10)$$

由式(10)可以看出内模控制器只有一个调节参数 T_{ci} (滤波器的时间常数),调节起来比较简单容易。

2.2.2 电压外环调节器设计^[11-14]

在控制对象与模型匹配时,将设计好的电流环进行如下的等效,由式(10)和图 6 可以得出。

$$\frac{I}{I^*} = \frac{1}{T_{ci}S + 1} \quad (11)$$

由式(11)可以看出电流闭环只与 $F(S)$ 的参数 T_{ci} 有关,而与电流环的被控对象参数(整流器、电机、线路的参数)无关。说明内模控制对被控对象的参数变化具有较强的鲁棒性。

当忽略换流器的有功损耗时,流进换流器的有功功率等于直流电压吸收的有功功率(图 3),即可得出下面的关系式。

$$U_{dc} \cdot C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2}(u_{shd} \cdot i_{shd} + u_{shq} \cdot i_{shq}) \quad (12)$$

将 d 轴定在三相电压矢量上时,则 $u_{shq} = 0$, $u_{shd} = U_{sh}$, 此时式(12)可化为

$$U_{dc} \cdot C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2}U_{sh} \cdot i_{shd} \quad (13)$$

将电流内环等效变换后的直流电压闭环控制框图如下。

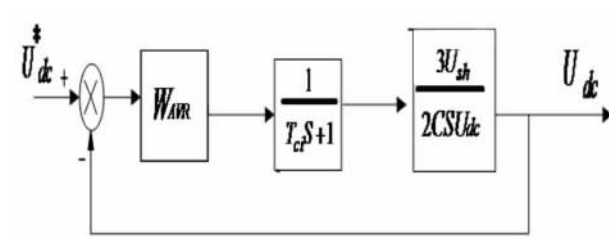


图 7 直流电压闭环控制框图

由图 7 可以得出电压调节器的对象模型为

$$M(S) = \frac{3U_{sh}}{2CSU_{dc}(T_{ci}S + 1)} \quad (14)$$

由于对象模型中含有积分环节,为了控制对象与模型匹配,选取滤波环节为

$$F(S) = \frac{2T_{cu}S + 1}{(T_{cu}S + 1)^2} \quad (15)$$

则此时可得直流电压反馈控制器为

$$W_{AVR} = C(S) = \frac{2C(2T_{cu}S + 1)(T_{ci}S + 1)}{3U_{sh}T_{cu}^2S} \quad (16)$$

电流控制器调节好以后,电压调节器中只有一个调节参数 T_{cu} ,调节简单,具有较强的鲁棒性。

有上面的分析可知:用内模原理进行控制器设计,调节器要整定的参数只有一个,它与系统的结构和参数无关,具有较强的鲁棒性。

在这里采用频率特性,通过绘制 Bode 图来对控制器的控制效果进行分析,采用的参数如表 1 中所示,则此时可以得到图 7 中受控系统(对象模型)的 Bode 图,如图 8 所示,由图可见受控系统的截止频率约为 83.7 Hz 且受控系统有很大的稳定裕度,此时说明组成被控系统模型的一部分 $\frac{1}{T_{ci}S + 1}$ 的参数 T_{ci} 设置合理,图 7 的开环传递函数的 Bode 图如图 9 所示,由图中可以看到系统是稳定的,说明在电流内环控制器设计好的基础上直流电压控制器的参数选取是合理的。

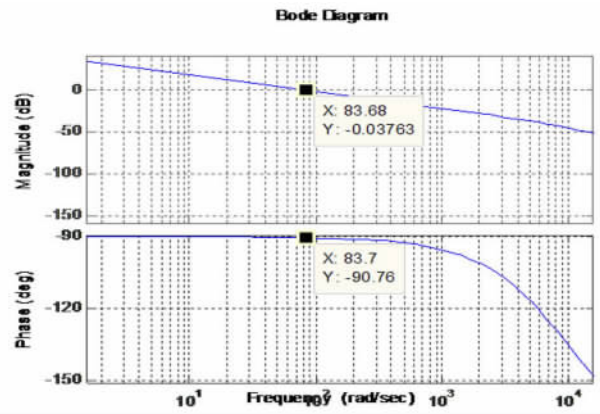


图 8 受控对象 M(S) 的频率特性

3 仿真实验结果验证分析

为了验证内模控制器的有效性,在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建系统和控制器模型进行仿真验证分析,系统及控制器参数如表 1 所示。

当采用定电压控制时,刚开始时只有负载 1 运行,在 0.3 s 时投入负载 2,0.7 s 时将负载 2 切除。仿真结果如图 10、11、12 所示;当采用定无功功率控制时(无功功率参考值设定为:刚开始为 0,在 0.3 s 时变为 10 kVar,在 0.7 s 时又变为 0),末端负载只有负载 1 时的仿真结果如图 13、14、15、16、17。

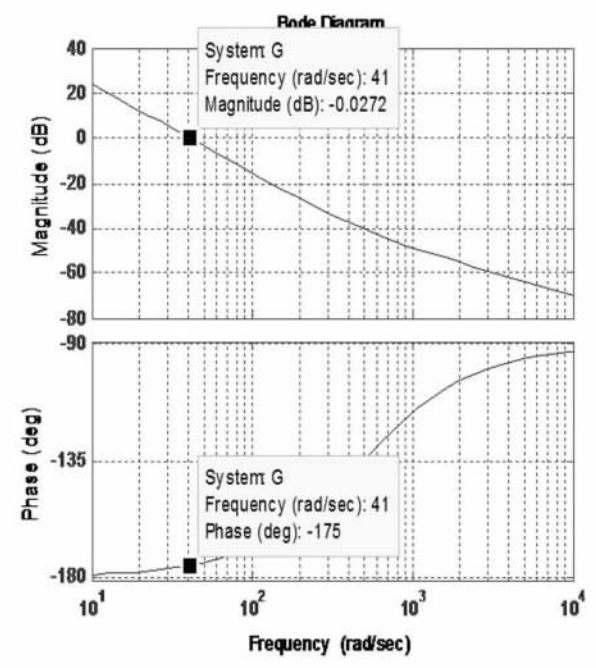


图 9 控制系统开环频率特性

表 1 系统及控制器参数

参数	数值
电源线电压 $\dot{U}_s$	$380 \angle 10^\circ$
电网频率 f	50 Hz
变压器 T(Y/d1) 变比	2:1
电源连接的电感 L_s	2 mH
末端负载 1 $\tilde{S}_1$	50 kW + j0.5 kVar
末端负载 2 $\tilde{S}_2$	20 kW
换流器侧的电阻 R_{sh}	0.01 Ω
换流器侧的电感 L_{sh}	2.5 mH
直流侧电容 C	4 500 μ F
直流侧电压 U_{dc}	600 V
电流环滤波器参数 T_{ci}	0.001
直流电压环滤波器参数 T_{cu}	0.001

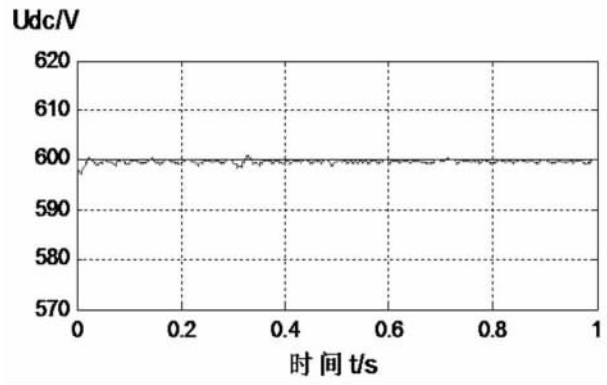


图 10 直流电容电压 U_{dc}

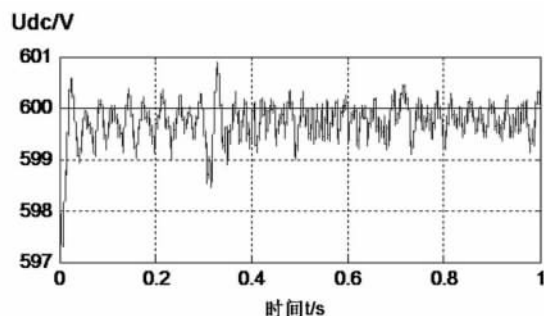


图 11 直流电容电压 U_{dc} 局部放大图

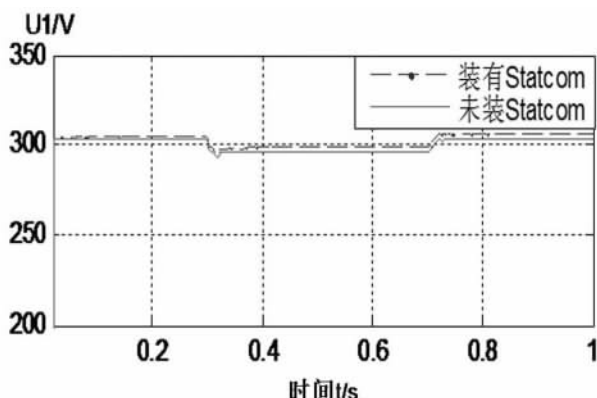


图 12 节点电压幅值 U_1

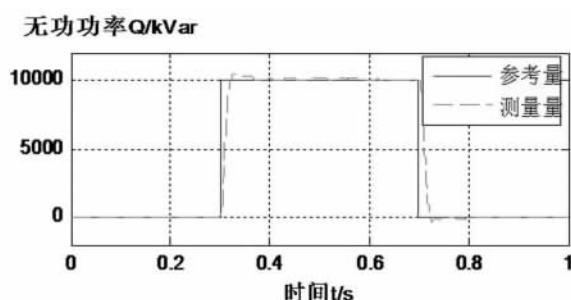


图 13 STATCOM 注入系统的无功功率

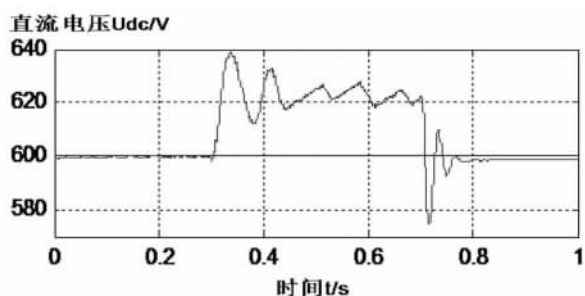


图 14 直流电容电压 U_{dc}

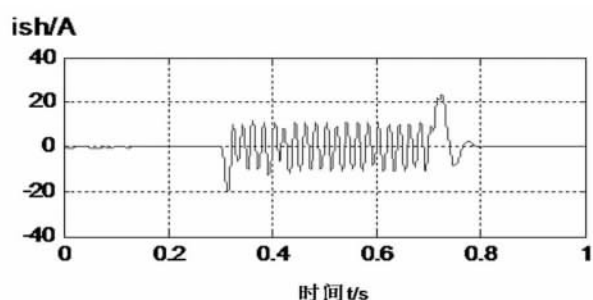


图 15 STATCOM 交流测的电流

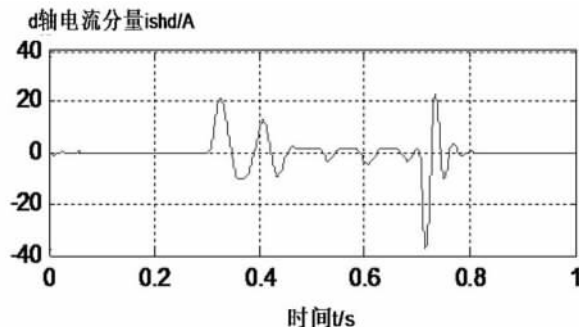


图 16 STATCOM 交流测的电流的直轴分量

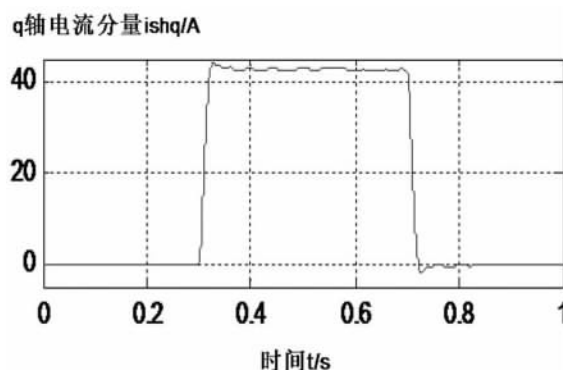


图 17 STATCOM 交流测的电流的交轴

从图 10、11 中可以看出当负载变化时,直流电压基本无变化,保持在 600 V,由图 12 可知在 0.3 s 投入大容量负载 2 时,装有 STATCOM 时的节点电压 U_1 比没安装时大约提升了 4 V。从图 13 中可以看出在 0~0.3 s 时 STATCOM 向系统基本不输入无功功率,即无功功率为 0,能够很好地跟踪无功功率参考值,当无功功率参考量由 0 变为 10 kVar(在 0.3 s)时,STATCOM 向系统输入的功率与参考值相比有一定的波动,但经过大约 2 个周波后基本上稳定下来,同时,由图 15 可知,在 0.3 s 时由于无功功率的增加,STATCOM 交流侧的电流也大幅度的增加,而在 0.7 s 时无功功率的减少 STATCOM 交流侧的电流也随之减少。无功功率的变化引起了直流电容电压的波动(如图 14),d 轴电流分量(如图 16)的变化是为了使直流电压保持平衡所做的调节。由以上的分析表明,采用内模解耦控制策略,能够使 STATCOM 向系统输入的无功功率、节点电压和直流侧电压快速、有效地调整到其期望值。

4 结 语

以上理论分析和实验结果分析可知,对 STATCOM 采用内模解耦控制策略,通过双闭环对电压的

平衡稳定和电流的跟踪,能够使系统获得良好的补偿效果,而且内模控制器只有一个调节参数(滤波参数),调节简单,具有很好的跟踪效果。

参考文献

- [1] 罗霄华. 一阶线性时滞系统的内模控制设计[J]. 山西电子技术, 2011(6): 1-5.
- [2] 齐菲. 多变量内模控制的仿真研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2008: 7-9.
- [3] 宋立军. 基于电流环内模控制的 IPMSM 矢量控制研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2008: 35-36.
- [4] 郭锐, 刘国海. 静止同步补偿器数学模型及其无功电流控制研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(1): 21-24.
- [5] 刘小园, 章勇高, 朱鹏程, 等. UPFC 并联侧控制器设计及仿真[J]. 华东交通大学学报, 2005, 22(1): 1-4.
- [6] Xiong Jian. Simplified control circuit of three phase PWM rectifier,
- [7] 汤赐, 罗安. 配电网静止同步补偿器的前馈解耦控制策略[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 1-5.

(上接第14页)

关,类无功功率差值只与电压的幅值差有关,从而得出改进的下垂控制策略。针对虚拟功率和类功率的下垂控制策略,给出了一个通用的微电源控制方案示意图,详细分析了它的工作原理,最后对类功率控制策略理论做了仿真,证明了该理论的正确性。

参考文献

- [1] 肖朝霞. 微网控制及运行特性分析[D]. 天津: 天津大学, 2008: 15-20.
- [2] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.
- [3] 杨淑英, 张兴, 张崇巍. 基于下垂特性的逆变器并联技术研究[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(2): 7-10.
- [4] 徐青山. 分布式发电与微电网技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011: 127-131.
- [5] 王立乔, 孙孝峰. 分布式发电系统中的光伏发电技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 110-124.
- [6] 周贤正, 荣飞, 吕志鹏, 等. 低压微电网采用坐标旋转的虚拟功率 V/f 下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 47-51.
- [7] 张纯江, 王晓寰, 薛海芬, 等. 微网中三相逆变器类功率下垂控制和并联系统小信号建模与分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 32-39.

- [8] Pengcheng Zhu, Liming Liu, Xiaoyuan Liu, et al. Analysis and Comparison of two Control Strategies for UPFC. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, 2005, 1-3.
- [9] 程汉湘. 柔性交流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 287-292.
- [10] 郑连清, 王青峰. 馈能型电子负载的并网控制[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-4.
- [11] 王宇. 统一潮流控制器(UPFC)的模型与仿真研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008: 17-19, 37-43.
- [12] 刘永江, 康积涛, 李林, 等. UPFC 并联侧双环控制策略的研究[J]. 输配电技术, 2011(7): 1-5.
- [13] 唐杰, 罗安, 周柯. 静止同步补偿器电压控制器的设计与实现[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 103-106, 116.
- [14] 鞠儒生, 陈宝贤, 邱晓刚. UPFC 控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 60-65.

作者简介:

张花芝(1988),女,硕士研究生,研究方向为电力系统的运行与控制。
(收稿日期:2012-05-22)

- [8] 阚志忠, 张纯江, 薛海芬, 等. 微网中三相逆变器无互连线并联新型下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 68-74.
- [9] 阚加荣, 谢少军, 吴云亚. 无互连线并联逆变器的功率解耦控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 40-45.
- [10] 林新春, 段善旭, 康勇, 等. UPS 无互连线并联中基于解耦控制的下垂特性控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 118-122.
- [11] 雷之力. 微网谐波振及电压暂降的评估与控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2011: 32-56.
- [12] 吕志鹏, 罗安, 荣飞, 等. 电网电压不平衡条件下微网 PQ 控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(6): 71-74.
- [13] 刘杨华, 吴政球, 林舜江. 孤岛运行的微电网三相不平衡潮流计算方法研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(7): 36-40.
- [14] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 164-168.

作者简介:

罗锐鑫(1988),男,硕士研究生,从事微电网控制策略、继电保护方面的研究。

(收稿日期:2012-06-05)

地区电网日负荷特性分析及预测方法研究

张莉, 蒲晓瑛, 卢政尧

(成都电业局, 四川 成都 610021)

摘要: 夏季负荷波动大, 预测难度较大。如何提高日负荷预测精度, 成为调度部门迫切需要解决的一项重要任务。为有效提高夏季日负荷预测精度, 对成都电网日负荷特性进行了深入研究。借鉴电力系统分析中的标么制理论, 将日负荷曲线解析为标么负荷曲线与最大负荷。针对两者不同的变化特征和影响因素, 分别引入与之匹配的自适应指数平滑法和基于模糊聚类的径向基函数(RBF)神经网络法, 为负荷预测精度的提高提供了有效的解决途径。实例计算证明, 该方法可获得理想的预测效果, 能为调度部门提供负荷预测的决策依据。

关键词: 负荷预测; 标么曲线; 自适应指数平滑; 径向基函数(RBF)神经网络; 模糊聚类

Abstract: It's difficult to forecast the load because of the considerable load fluctuation of Chengdu Power Grid in summer. How to enhance the accuracy of daily load forecasting becomes a vital task which is urgent to be solved for dispatching departments. In order to effectively enhance the accuracy of daily load forecasting, the daily load characteristics of Chengdu Power Grid are studied. Drawing lessons from per unit theory of power system analysis, the daily load curve is resolved into per unit load curve and peak load. Aiming at their variation characteristics and influence factors, the methods of self-adaptive exponential smoothing and radial basis function (RBF) neural network are introduced respectively to match with them, which provides the effective solution to enhance the accuracy of load forecasting. The practical example shows that the proposed method can obtain an ideal predictive result and can provide the decision-making basis of load forecasting for dispatching departments.

Key words: load forecasting; per unit curve; self-adaptive exponential smoothing; radial basis function (RBF) neural network; fuzzy clustering

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0021-07

0 引言

如何深入把握地区负荷特性, 在此基础上研究适用于本地负荷特性的预测方法, 提高日负荷预测精度, 成为调度部门迫切需要解决的一项重要任务。特别是针对隶属于亚热带湿润季风气候地区, 具有春早、夏热、秋凉、冬暖的气候特点。由于空气潮湿, 夏季虽然最高气温一般不超过 35℃, 却显得闷热; 冬天气温平均在 5℃以上, 但由于阴天多, 空气潮, 显得很阴冷。这种气候特征导致用电负荷在冬、夏两季明显增长, 尤其是夏季, 每年最高负荷一般都发生在夏季, 并且夏季负荷波动较大, 导致预测难度较大, 对电网安全稳定经济运行造成了一定影响。

通过对成都电网夏季日负荷特性展开深入研究, 借鉴电力系统分析中的标么制理论, 将日负荷解析为标么负荷曲线与最大负荷, 并分别探寻两者不

同的发展变化规律和相关影响因素, 研究与之发展特性相匹配的预测方法, 引入自适应指数平滑法和基于模糊聚类的 RBF 神经网络法, 从根本上抓住了影响负荷变化的内在因素, 最后通过实例验证了该方法对 2011 年成都电网夏季负荷预测的有效性。

1 成都电网夏季日负荷特性

1.1 年负荷曲线分布

从年负荷曲线可以看出, 成都电网负荷呈现出“W”形状, 冬季负荷水平较高, 到春节时负荷快速回落, 3 月份逐渐恢复, 但随着气候的转暖, 负荷呈平稳下降趋势, 直到 6 月份, 负荷开始出现攀升, 到 7 或 8 月份达到高峰后下降, 一直到 11 月份, 随着气候的变冷, 负荷再次出现攀升。全年存在两个高峰, 即夏季和冬季高峰, 从近 4 年来看, 成都电网夏季高峰负荷与冬季高峰负荷相差不大, 但一般高于

冬季高峰负荷,成为全年最高负荷。

依据历年负荷发展变化情况,考虑到夏季高峰负荷一般出现在7或8月份,将7、8月份负荷作为研究对象,展开后续相关特性分析和预测。

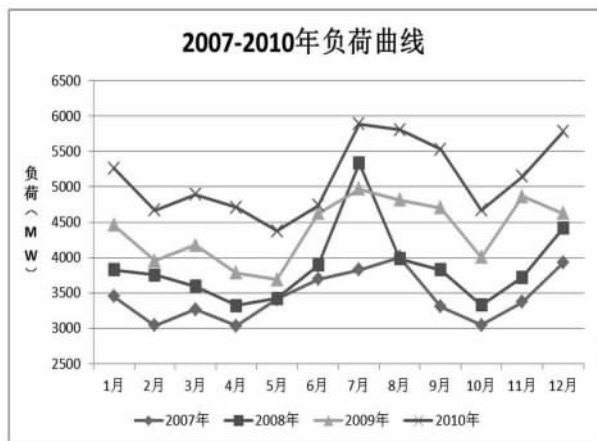


图1 2007—2010年负荷曲线

1.2 夏季典型日负荷曲线

以2011年7月份为例,选取与当月的平均日负荷率最接近的一天作为典型日,典型日负荷曲线如图2所示。

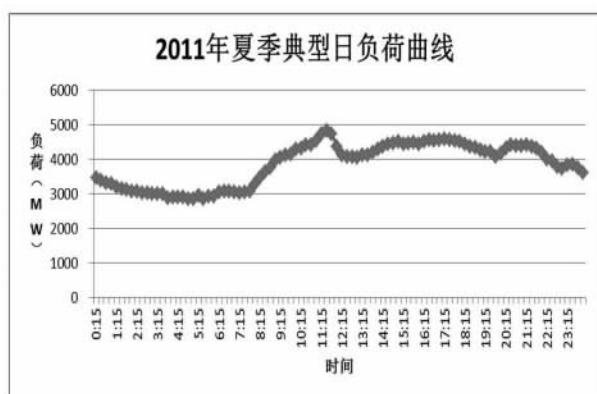


图2 2011年夏季典型日负荷曲线

从夏季典型日负荷曲线的形状来看,成都负荷变化与人们生产生活习惯密切相关,每日0:00到7:00,负荷处于全天低谷,但负荷曲线相对平稳;7:00后随着人们开始一天的生产与生活,负荷逐渐攀升,在中午11:30左右达到全天最大值;其后负荷有小幅下降,在14:30后呈现平稳的趋势,并且一直维持在较高水平;在17:30后,随着人们工作的结束,负荷有小幅下降,直到晚上7:30左右达到一个小低谷后再次攀升;在20:30左右达到最后一个晚高峰后,负荷呈现快速下降趋势。

用相关系数^[4]描述夏季其他日与典型日的相关程度。相关系数无量纲,其值在 $[-1, 1]$ 范围内,

并且绝对值越接近1,相关性越强。当 $r_{xy} = 0$,两者不存在相关关系;当 $r_{xy} > 0$,称两者正相关;当 $r_{xy} < 0$,称两者负相关。

从相关系数来看,夏季其他日与典型日负荷曲线相关度非常高,除个别天较低外,大部分天相关系数大于0.95,这也在一定程度上体现了人们生产生活的规律性。

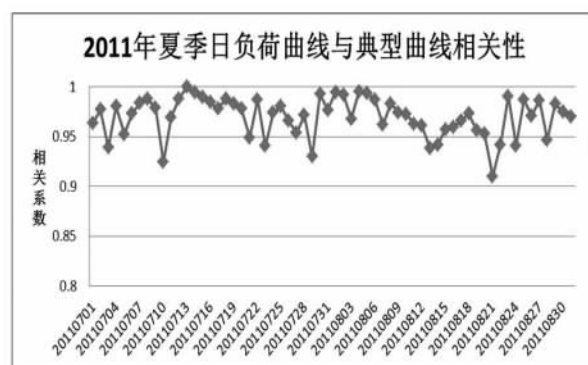


图3 2011年夏季日负荷曲线与典型曲线相关性

1.3 夏季最大负荷

从2011年夏季最大负荷发展变化情况以及发生时间来看,成都夏季日最大负荷波动较大,7至8月份日最大负荷最大值为6743 MW,最小值为2586 MW,最大值为最小值的2.6倍,并且从图3上来看,时间序列上的直接规律性并不强,这也是成都夏季负荷预测精度不高的重要原因;另一方面,从最大负荷发生时间上来看,相对稳定,大部分都发生在中午11:30左右,只有极少部分日发生在其他时间,这又从另一个角度说明了日最大负荷的特点,日最大负荷主要发生在中午时段,表明了其与气候的密切相关性。

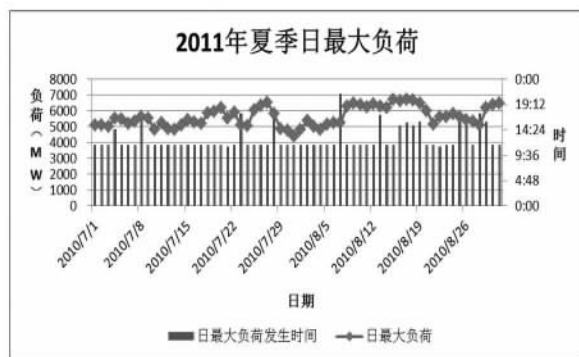


图4 2011年夏季日最大负荷

2 成都电网夏季负荷影响因素

2.1 负荷标么化

在电力系计算中,广泛采用标么制^[5],标么制是相对单位制的一种,在标么制中各物理量都用标么值表示,标么值的定义如下。

$$\text{标么值} = \frac{\text{实际值}}{\text{基准值}} \tag{1}$$

借鉴电力系统分析中的标么制理论,将日负荷进行解析,解析为标么负荷曲线与最大负荷,如式(2)。

$$\text{日负荷标么曲线} = \frac{\text{日负荷曲线实际值}}{\text{日最大负荷}} \tag{2}$$

其中日负荷标么曲线表征了负荷曲线形状,而日最大负荷表征了负荷水平。由上节的分析可知,成都夏季日负荷曲线形状表现出了相对的稳定性,而日最大负荷波动较大,两者表现出了不同的特性。针对其不同特性下面展开了影响其发展变化的相关因素分析,为预测方法的建立提供依据。

2.2 日负荷标么曲线影响因素

2.2.1 日类型

日负荷标么曲线的发展变化在很大程度上受到人们生产生活习惯的影响,而影响人们生产生活习惯的主要因素就是日类型。由于预测对象为夏季负荷(7、8 月份负荷),因此,日类型中仅包括星期类型,即周一到周日,而不包括节假日。取 2011 年夏季每一种星期类型日负荷曲线作为参照日,将其他

同星期类型日标么曲线与之展开相关性分析,计算结果如表 1 所示。

可以看出,每个星期类型与其同属于同一星期类型的典型日标么曲线相关系数都比较高,最低也超过了 0.97。具体来看,工作日(周一到周五)与工作日之间相关系数较高;而工作日与休息日(周六与周日)之间相关系数较低;休息日与休息日之间相关系数较高。

2.2.2 日期距离

在短期负荷预测中,距离某日时间越长,对该日负荷影响就越小,为比较星期类型与日期距离哪一项对负荷曲线形状影响更大,表 2 列出了分别考虑工作日与休息日后,2011 年夏季不同星期类型与其上星期同星期类型日及前 1~6 日(工作日与休息日分别独立排序)的相关关系。

可以看出,同一星期类型日以及前 4 日的负荷标么曲线都与待预测日保持了较高的相关性。对于工作日而言,独立排序后,前 5 日正好是其同一星期类型日,从第 6 日开始相关性明显降低;对于休息日而言,则直接从第 5 日开始相关性就大幅降低。此外,还可以看出,同一星期类型日与独立排序后距离较近的几日相比,与待预测日的相关性并没有体现出明显的优势。

表 1 2011 年不同星期类型日负荷标么曲线相关系数

指标	平均相关系数						
	周一	周二	周三	周四	周五	周六	周日
周一	0.984	0.986	0.988	0.986	0.980	0.972	0.960
周二	0.987	0.989	0.989	0.988	0.985	0.980	0.964
周三	0.984	0.986	0.985	0.984	0.983	0.980	0.964
周四	0.965	0.967	0.968	0.971	0.963	0.964	0.954
周五	0.969	0.975	0.981	0.976	0.972	0.960	0.951
周六	0.958	0.960	0.963	0.962	0.958	0.977	0.975
周日	0.960	0.954	0.950	0.956	0.967	0.980	0.975

表 2 2011 年夏季不同日期距离日负荷标么曲线相关系数

指标	平均相关系数						
	周一	周二	周三	周四	周五	周六	周日
同一星期类型	0.987	0.986	0.982	0.962	0.972	0.979	0.980
前 1 日	0.982	0.992	0.992	0.988	0.979	0.969	0.983
前 2 日	0.988	0.987	0.992	0.985	0.980	0.979	0.980
前 3 日	0.985	0.984	0.989	0.985	0.977	0.962	0.975
前 4 日	0.986	0.986	0.987	0.965	0.980	0.970	0.973
前 5 日	0.987	0.986	0.982	0.962	0.972	0.953	0.961
前 6 日	0.965	0.975	0.976	0.959	0.957	0.952	0.963

2.3 日最大负荷影响因素

2.3.1 日类型

日最大负荷的发展变化也与日类型息息相关,如图5所示,工作日与休息日最大负荷有明显差别,工作日负荷水平普遍偏高,周六负荷开始下降,周日负荷降到全星期最低水平,这也是受企业生产周期的影响,因此,历年夏季最大负荷普遍发生在工作日。



图5 2011年夏季不同星期类型日最大负荷

2.3.2 气象因素

除日类型外,影响成都夏季日最大负荷的关键因素就是气象因素,包括温度、湿度、降雨量等气象指标。气象因素对最大负荷的影响比较复杂,主要是受气象累积效应的影响。气象的累积效应体现在两个方面:一方面是指日累积效应,即多日高温与突然一日高温将带来不同的负荷增长;另一方面是指多气象指标的累积效应,例如相同温度下,不同湿度、不同降雨量情况下负荷水平并不完全相同。表3列出了2011年夏季日最大负荷与其相关气象因素的相关关系。

表3 2011年夏季日最大负荷与相关气象因素相关系数

指标	平均相关系数				湿度	降雨量
	最高温度	平均温度	最低温度	湿度		
日最大负荷	0.790	0.634	0.634	-0.418	-0.143	

可以看出,温度与日最大负荷呈现正相关性,即随着温度的升高,日最大负荷增加;而湿度与降雨量则与日最大负荷呈现反相关性,即随着降雨量的增加、湿度的增大,日最大负荷下降。其中,正相关指标中最高温度与夏季日最大负荷平均相关系数最高,达到0.790;而反相关指标中湿度与夏季日最大负荷平均相关系数最高,达到-0.418,因此,预测时

宜同时考虑最高温度与湿度。

为进一步考虑气象的日累积效应,取连续3天日平均最高温度与日平均湿度,与日最大负荷展开相关性分析,发现相关系数分别为0.819和-0.445,较当日相关系数分别提高0.029和0.027个百分点,因此,在预测过程中考虑的气象因素选取为连续3天的日平均最高温度与日平均湿度。

3 成都电网夏季日负荷预测

针对日负荷标么曲线和日最大负荷的影响因素不同,发展变化规律不同,采用不同的预测方式分别展开预测,可分别提高两者的预测精度,最终将两者的预测结果合成后,形成准确率较高的日负荷预测结果。

3.1 基于自适应指数平滑法的标么曲线预测

从2.2节的分析可以看出对于相同日类型(工作日与休息日),距离待预测日较近的若干天与待预测日的标么曲线表现出了明显的相似性。对于这种情况的预测一般可采用指数平滑法这类时间序列预测方法。但指数平滑法中的一个重点就是平滑系数的确定,其选择的优劣直接关系到最终预测效果。引入了虚拟预测策略,形成了自适应的指数平滑预测方法,打破传统的平滑参数需人工设定的模式,利用历史预测精度对平滑指数进行动态调整,以提高标么曲线预测的准确度。

3.1.1 指数平滑法

指数平滑法是时间序列分析的重要分支之一,是产生平滑时间序列的一种流行方法,在生活、生产及统计等领域的预测研究之中被广泛地应用,使用频次仅低于回归分析法。对于时间序列 $y_1, y_2, \dots, y_n$,要求预测 y_{n+1} ,则有公式^[6]如下。

$$\begin{aligned}
 S_0 &= y_1 \\
 S_t &= \alpha y_t + (1 - \alpha) S_{t-1} \\
 \hat{y}_{t+1} &= S_t
 \end{aligned} \quad (3)$$

指数平滑法计算过程中 α 是给定的,其取值依赖于用户的经验,预测结果受主观经验影响;此外,静态的平滑参数无法适应时间序列自身的变化。

3.1.2 自适应指数平滑法

引入虚拟预测概念,建立自适应指数平滑法,通过平滑参数的自适应动态调整,提高预测精度。所

谓虚拟预测^[7],即对过去时间展开预测,对于过去时间,其日负荷已经具有实际值,为避免与实际预测混淆,故称为虚拟预测。由于待预测对象为日标么曲线,一般为96点(每15分钟1点),为保持曲线的平滑性,每日96点取相同的平滑系数,选取优化目标为与待预测日同类型,且相邻 n 日的日负荷平均预测精度。即优化模型如下。

$$\min(\frac{1}{n} \sum_{p=1}^n E_n)$$

$$= \min(\frac{1}{n} \sum_{p=1}^n \sqrt{\frac{1}{96} \sum_{j=1}^{96} [\frac{\hat{x}_{nj} - x_{nj}}{x_{nj}}]^2}) \quad (4)$$

其中, E_n 为第 n 个虚拟预测日负荷标么曲线预测精度; $\hat{x}_{nj}$ 为第 n 个虚拟预测日第 j 点负荷标么曲线预测值; x_{nj} 为第 n 个虚拟预测日第 j 点负荷标么曲线实际值。

在该模型中,依据2.2节分析结论,选参加指数平滑的同类型日个数为4,选取虚拟预测的天数也为4。首先给指数平滑法 α 中设置任意一个0到1范围内的初值,通过不断调整步长,使得待预测日相邻 n 日的日负荷平均虚拟预测精度最小化,实现平滑系数的自适应与最优化。

3.2 基于模糊聚类与 RBF 神经网络的最大负荷预测

3.2.1 RBF 神经网络

人工神经网络模拟人类部分形象思维的能力,具有高度自适应性、自学习性以及容错性等突出特征,其应用已经渗透到多个领域,包括计算机视觉、模式识别、期货预测、负荷预测等。目前应用较多的是BP神经网络,但由于其自身的算法缺陷,计算速度低下,且宜陷入局部最小。RBF神经网络可以根据问题确定相应的网络拓扑结构,学习速度快,不存在局部最小问题,正在越来越多的领域内成为替代BP网络的一种新型网络。

RBF神经网络属于多层前向网络,一般为3层,第1层为输入层,由输入节点组成;第2层为隐含层,其神经元个数受所预测的问题需要而定;第3层为输出层,由输出节点组成。由输入层到隐含层的变换函数通常选择高斯函数^[8],即为

$$h_j(z) = \Phi(\|z - c_j\|, \sigma_j) = \exp(-\frac{\|z - c_j\|^2}{2\sigma_j^2}) \quad (5)$$

式中, $\|\cdot\|$ 表示范数,通常为2范数; z 为 m 维输

入向量; c_j 为第 j 个隐含层单元的中心; σ_j 为第 j 个隐含层单元非线性变换函数的宽度。

由隐含层到输出层的输出为

$$f(z) = \sum_{j=1}^q h_j(z) \omega_j \quad (6)$$

式中, ω_j 为第 j 个隐含层单元与输出之间的连接权; q 为隐含层单元数。

取误差指标如下。

$$E = \sum_{i=1}^k (\hat{o}_i - f(z_i))^2 \quad (7)$$

式中, $\hat{o}_i$ 为训练样本的输出。

采用LMS算法即最小均方误差算法进行网络训练,这是基于最陡下降的一种算法,即使权矢量沿着误差函数负梯度的方向逼近其最佳值,其迭代公式^[9]如下。

$$w_i^{n+1} = w_i^n - \eta_1 \frac{\partial E}{\partial w_i}(n) \quad (8)$$

$$c_i^{n+1} = c_i^n - \eta_2 \frac{\partial E}{\partial c_i}(n) \quad (9)$$

式中, η_1 、 η_2 为学习效率因子,且均在0~1范围内。如满足收敛条件,则停止;否则,令 $n = n + 1$,利用迭代公式重新修正权重和中心。算法收敛条件如下。

$$|E^{n+1} - E^n| < \varepsilon \quad (10)$$

式中, ε 为给定的足够小的允许误差。

3.2.2 模糊聚类在 RBF 神经网络中的应用

在人工神经网络运算过程中,选择合适的训练样本对于提高运算效率、提高预测精度具有重要意义。这里应用模糊聚类对训练样本进行智能筛选。

聚类分析是数理统计中的一种多元分析方法,它是用数学方法定量地确定样本的亲疏关系,从而客观地划分类型。由于事物之间的界限往往有些是确切的,有些是模糊的,由此衍生出模糊聚类。这里应用模糊聚类中的模糊等价矩阵动态聚类分析法,结合2.3节分析得到的日最大负荷影响因素,以及考虑到负荷变化的相对连续性,取日类型、连续3天平均最高温度与湿度、前1天最大负荷作为日特征值,展开模糊聚类。

为使数据具有可比较性,首先需要对原始数据进行预处理,采用映射的方式,依据各日特征值对应的最大负荷分布情况,将日特征值映射[0,1]区间内,例如日类型映射表如表4。

而对于温度和湿度类指标,对于不具有连续性的中间值采用线性插值法进行补充。

表 4 日类型映射表

日类型	平均最高温度	映射值
周一	5 947	0.921 5
周二	5 964	0.938 3
周三	6 027	1.000 0
周四	5 763	0.740 2
周五	5 699	0.677 2
周六	5 497	0.478 7
周日	5 214	0.200 0

在此基础上,采用 1.2 节中介绍的相关系数来确定相似程度,并建立模糊相似关系矩阵 R ,进而利用平方自合成法建立模糊等价矩阵,并设置合适的阈值,阈值大小直接影响聚类结果。经过实验测试选择阈值为 0.55,将样本分为 4 类,每类包含 10 ~ 15 个样本。

在对样本进行分类后,则需依据各类的聚类中心^[10]找到与待预测日相符的分类作为最终输入 RBF 神经网络中的训练样本。

$$\bar{z}_{kj} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z'_{ij} \quad (11)$$

式中, $\bar{z}_{kj}$ 为包含 N 个样本的第 k 类聚类中心中的第 j 个分量。

按照式(11)计算待预测日与各类中心的欧式距离。

$$d_{ik} = \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{j=1}^l (z'_{ij} - \bar{z}_{kj})^2} \quad (12)$$

式中, l 为分类的数目; z'_{ij} 为待预测日的特征值向量。

以欧式距离最短的类别作为送入待预测日中进行训练的样本类别。

4 实例验证

选用成都电网 2011 年 7 ~ 8 月日负荷作为预测对象,利用自适应指数平滑法对标么曲线展开预测,参加指数平滑的同类型相邻日个数选为 4 天,虚拟预测的天数也为 4 天;利用 RBF 神经网络进行日最大负荷预测,输入量为日类型、连续 3 天平均最高温度、连续 3 天平均湿度、前 1 天日最大负荷,输出量为待预测日最大负荷;利用模糊聚类进行神经网络训练样本的选择,阈值选取为 0.55。2011 年 7 ~ 8 月平均预测精度分别达到 97.6 % 和 97.1 %,满足考核指标要求。

以 8 月 20 日为例,预测得到的最大负荷为 6 214 MW,实际最大负荷为 6 028 MW,相对误差

3.1%;实际最大负荷为标么曲线预测值与实际值对比如图 6。

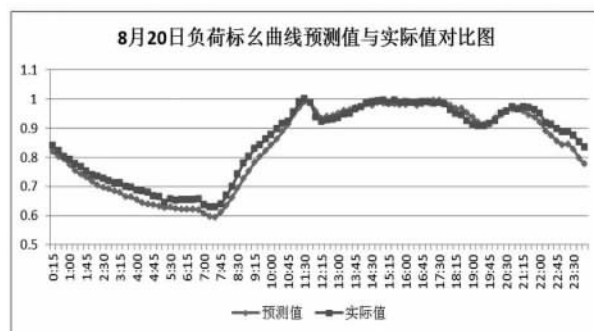


图 6 8 月 20 日负荷标么曲线预测值与实际值对比图

合成后,8 月 20 日负荷预测精度达到 97.2 %,预测效果理想。

5 结 语

借鉴电力系统分析中的标么制理论,将成都电网日负荷曲线分解为标么负荷曲线与最大负荷,分别研究其发展变化规律和影响因素。对于标么负荷曲线,利用其同类型日、相近日标么负荷曲线的相似性,引入自适应指数平滑法进行预测;对于最大负荷,综合考虑日类型、连续 3 日平均最高温度与湿度等日特征值,引入基于模糊聚类的 RBF 神经网络预测方法,最终形成合成的日负荷曲线预测。实例验证,该预测方法通过对负荷解析,针对不同组成部分研究与之相匹配的预测方法,可获得令人满意的预测效果。

参考文献

- [1] 朱振伟,方鸽飞,王国福,等. 电网夏季气象敏感负荷特性分析[J]. 华东电力,2008,36(9): 53 - 58.
- [2] 钱卫华,姚建刚,龙立波,等. 基于负荷特性分析的短期负荷预测相似日选择方法[J]. 华中电力,2007,20(1): 17 - 21.
- [3] 李民,朱慰慈. 2005 年夏季镇江地区空调负荷特点分析[J]. 2006,25(2): 39 - 41.
- [4] 贾俊平,何晓群,金勇进. 统计学[M]. 北京: 中国人民大学出版社,2009.
- [5] 何仰赞,温增银. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社,2002.
- [6] 高百宁. 经济预测与决策[M]. 上海: 上海财经大学出版社,2009.
- [7] 康重庆,夏清,刘梅. 电力系统负荷预测[M]. 北京: 中

国电力出版社,2007.

- [8] 彭显刚,胡松峰,吕大勇. 基于 RBF 神经网络的短期负荷预测方法综述[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(17):144-148.
- [9] 陈刚,周杰,张雪君,等. 基于 BP 与 RBF 级联神经网络的日负荷预测[J]. 电网技术,2009,33(12):118-123.
- [10] 周虎,江岳春,陈旭,等. 模糊聚类分析和代数算法结合的短期负荷预测[J]. 电力系统及其自动化学报,

2011,23(3):101-105.

作者简介:

张莉(1962),女,工程师,从事电网运行管理及负荷预测;

蒲晓瑛(1978),女,工程师,从事电网调度运行方式管理;

卢政尧(1957),男,高级工程师,从事电网调度运行管理。

(收稿日期:2012-06-18)

(上接第10页)

系统在电力系统突然短路或负荷突然增、减时,对发电机进行强行励磁或者强行减磁,以此来提高电力

6 结 语

通过仿真得出了重合闸冲击电流在鼠笼式风机下与风机容量以及负荷容量的关系,即随着风机容量以及负荷容量的增加,重合闸冲击电流增加。然后比较了鼠笼式风机类型和双馈直驱通用风机类型对重合闸冲击电流的影响,即鼠笼式风力发电机系统的重合闸冲击电流比双馈直驱通用风力发电机系统的重合闸冲击电流大。仿真的结果与理论分析相一致,为研究继电保护重合闸提供了更为可靠的理论依据。

参考文献

- [1] 张保会,尹项根. 继电保护(第2版)[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [2] 辜承林,陈乔夫. 电机学(第2版)[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2005.
- [3] 何仰赞,温增银. 电力系统分析(第3版)[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [4] 崔家佩,孟庆岩,等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算(第一版)[M]. 北京:中国电力出版社,1993.
- [5] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护实用技术问答(第一版)[M]. 北京:中国电力出版社,1997.
- [6] 宋少群,付超,张兰英,等. 风电场并网线路重合闸的合理配合方式[J]. 电力系统自动化,2010,34(20):77-79.

作者简介:

王银萍(1987),女,硕士研究生,研究方向为风机控制与继电保护;

王维庆(1959),男,博士生导师,研究方向为风机继电保护及并网技术;

常喜强(1976),男,高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制及风力发电技术。

(收稿日期:2012-05-30)

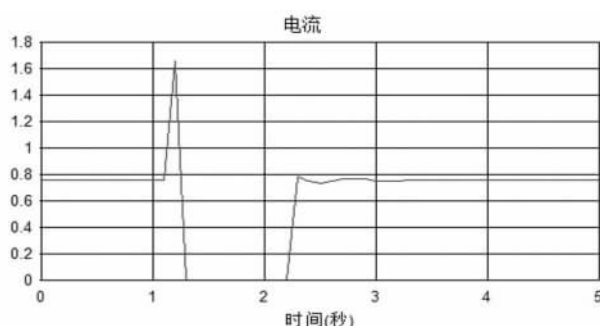


图7 鼠笼式风力发电机的电流仿真图

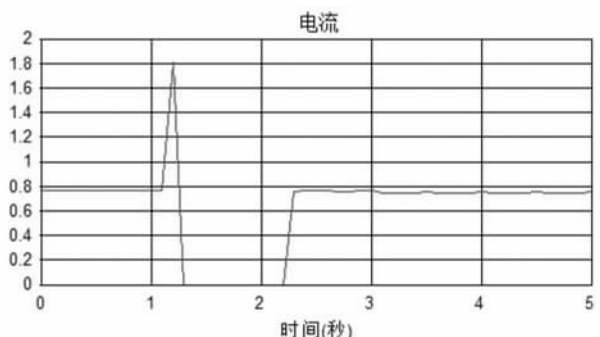


图8 双馈直驱通用风力发电机的电流仿真图

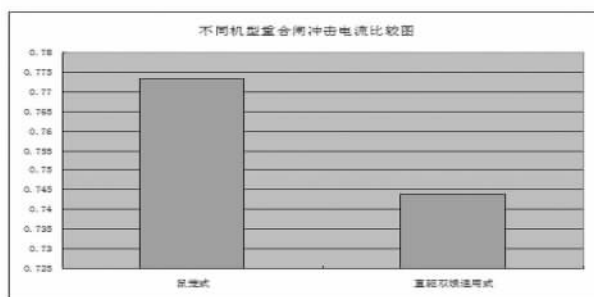


图9 不同机型重合闸冲击电流比较图

系统的稳定性^[5],因此在重合时比异步发电机产生的波动相对小,产生的冲击也相对较小。故鼠笼式风力发电机系统的重合闸冲击电流比双馈直驱通用风力发电机系统的重合闸冲击电流大。

电力市场下风电 - 抽水蓄能混合系统的运行优化

罗承军, 李安军, 王 曦, 旷良富
(德阳电业局, 四川 德阳 618000)

摘 要: 针对风电场与抽水蓄能电站联合运行中可能涉及的发电计划制定及运行优化问题, 在风电场功率预测偏差及电价预测模型基础上, 通过场景分析以应对风电场出力及电价的不确定性因素, 将其划分为日前发电计划制定及运行方式调整的两阶段问题并建立了相应评价模型, 在制定发电计划的基础上, 通过运行方式调整能一定程度提高风电场及抽水蓄能电站的经济效益, 最后通过对一实际算例进行分析, 验证了该方法可行有效。

关键词: 风力发电; 抽水蓄能电站; 场景分析; 发电计划

Abstract: In order to solve the problem about generation scheduling and operation optimization of wind - pumped storage hybrid power system in electricity market, the uncertainty of wind farm output and electricity price is solved by scenario analysis on the basis of wind power prediction error model and electricity price model. Then the operation optimization process is translated to a two - stage problem about generation scheduling and operation adjustment. Firstly, the reasonable generation schedule is calculated, then the operation adjustment based on the schedule is implemented, which can increase the revenue of generation companies. The effectiveness of the proposed method is validated by studying a specified case at last.

Key words: wind generation; pumped storage power plant; scenario analysis; generation scheduling

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2012) 05 - 0028 - 05

随着能源短缺及环境问题的不断加剧, 作为可再生能源重要组成部分的风电, 已成为改善能源结构的重要环节。

由于风电具有很强的随机性及波动性, 其接入电力系统须具备同时应对负荷及风电输出功率变化的能力, 因此当接入电网的风电功率超过一定比例后, 会对电力系统的稳定运行及电能质量造成严重影响。同时随着电力改革的不断推进, 当风电达到一定规模后, 风电场在日常运行中也必定需要参与电力市场竞争, 即提前签订双边合同或参与日前市场竞价^[1-2], 以确定其各时段发电计划。而目前风电功率预测技术的精度仍不能满足要求^[3-5]以及实时电价波动带来的影响, 故提前确定风电场各时段的发电计划会给发电商带来一定的风险。

抽水蓄能机组具有启停迅速、运行灵活等特点, 如将具有良好调节能力^[6-7]的抽水蓄能电站与风电场组成风电 - 抽水蓄能混合系统(wind - pumped storage hybrid power system, HPS) 运行, 不仅可改善风电场功率输出特性, 也可降低 HPS 因违背混合发电计划的惩罚, 并给发电商带来一定的经济效益。文献[8]在考虑风电电价补贴及出力越限惩罚的基

础上, 得出不同约束下的日最佳运行方式能够提高 HPS 的经济效益。文献[9]利用场景分析应对风电功率预测及市场电价的不确定性, 其将 HPS 的日前竞价决策分为两阶段处理能较好地降低决策风险。文献[10]则在计及投资及运行维护费用的基础上, 建立了 HPS 的能量转化效益评估模型。针对 HPS 在运行中可能涉及的日前发电计划制定及运行优化问题, 将其转化为两阶段问题进行处理, 在风电功率及电价预测基础上, 考虑预测偏差并运用场景分析以应对风电功率及电价波动的不确定性因素, 并由此制定发电计划, 之后在实际运行中再进行运行方式调整能一定程度提高 HPS 的经济效益。

1 风电场与抽水蓄能电站联合运行

当风电场与抽水蓄能机组组成 HPS 联合运行后, 因抽水蓄能机组能迅速在发电、抽水、发电调相等运行工况之间转换, 故风电场实时出力过大或欠缺时, 抽水蓄能电站能够做出相应调节, 以避免 HPS 实际出力违背发电计划而带来的损失。但由于 HPS 中抽水蓄能电站的装机容量和调节库容有限, 为避

免HPS实际出力违背发电计划并提高HPS的经济效益,需考虑风电功率预测及电价波动中的不确定因素,并对未来各时段的电量报价及发电计划做出合理决策。

2 场景分析

场景分析^[11]通过将不确定因素转化为多个确定性场景处理,从而在不确定性问题中避免对不确定因素的建模。以场景分析求解多阶段决策过程时,场景数量随决策阶段数量呈指数增加,为避免场景过多,采用蒙特卡罗仿真获取计及预测偏差的风电场出力场景及电价场景。

2.1 风电场出力场景

目前相关研究多假设风电功率预测偏差服从正态分布或截尾正态分布^[12],且与风速的波动剧烈程度及预测时间尺度相关。通过对历史数据的分析可得出风电功率预测偏差的均值 μ 和方差 σ^2 ,并绘制出预测偏差的概率密度曲线。

峰度可表征概率密度分布曲线尾部厚度,定义为

$$K(\varepsilon) = \frac{\mu_4}{\sigma^4} \quad (1)$$

式中, ε 为随机变量; μ_4 和 σ 分别为 ε 的四阶矩和标准差。

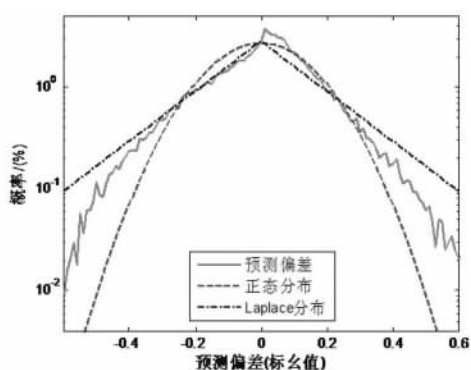


图1 风电场出力预测偏差

正态分布及拉普拉斯分布分别具有固定的峰度值3和6,文献[13]对含32台风机的某风电场数据(运用持续预测法的风电功率预测值及实测值)进行分析,得出风电功率预测偏差曲线的峰度介于3至6之间,且与预测时间尺度有关,实际预测偏差及具有相同均值方差的正态分布和拉普拉斯分布曲线如图1所示。

综上可知,若采用正态分布模拟风电功率预测

偏差并不能反映实际情况,故将历史数据按预测功率值 P_f 等分为10个等级,并建立不同预测功率等级及不同预测时间对应的历史偏差集合,通过将偏差波动的连续范围离散化,可建立对应预测偏差的概率密度函数(probability density function, PDF)。

在风电功率预测的基础上,根据预测功率 P_f 的等级及预测时间尺度选择各时段对应的偏差PDF,在进行一定次数的蒙特卡罗抽样之后,即可得出未来调度时段的风电场出力场景。

2.2 电价场景

电价模型采用一级自回归模型对电价建模,该模型对电价预测的有效性已得到认可^[14],模型如下。

$$\begin{cases} x_t = \bar{x}_w + \Delta x_t \\ \Delta x_t = \theta x_{t-1} + \xi \varepsilon_t \end{cases} \quad (2)$$

式中, x_t 为电价序列; $\bar{x}_w$ 为电价的周均值; Δx_t 为 x_t 的残差序列; θ 为回归系数; ξ 为电价序列的标准方差; $\varepsilon_t \sim WN(0,1)$ (白噪声,期望值为0,方差为1)。

在电价模型建立后,通过一定次数的蒙特卡罗抽样可得到未来调度时段可能的电价场景。

2.3 场景缩减

蒙特卡罗抽样方法相对于考虑不确定因素在多阶段的所有可能组合能一定程度减少生成的风电场出力及电价场景数量,但为保证问题的可解性,须进一步降低场景的数量并保证其能充分表示随机变量特征,故采用基于线性运输的递归缩减算法^[15],将缩减后的风电场出力场景及电价场景两两组合,即得到调度时段内的综合场景及其相应概率。

3 HPS运行优化模型

在日前电力市场竞价过程中,这里仅考虑HPS的最优发电计划制定策略问题,忽略电量报价对发电计划的影响,电量报价按照市场边际电价确定且不考虑竞价失败问题,即HPS申报的发电计划均竞价成功。

由于发电计划是在交易实际开始前确定并上报,而当发电计划确定后,在交易开始后各调度时段HPS可能因当前风电场实际可用功率与预测结果偏差较大,而利用抽水蓄能电站做出一定补偿调节,故将上述问题转化为两阶段问题^[16]:①调度时段开始前的HPS发电计划确定;②调度时段开始后HPS根

据发电计划进行相应运行方式调整,以追求效益最大化。

3.1 发电计划制定

在考虑风电出力波动、市场电价波动、违背发电计划的惩罚及抽水蓄能机组启停费用的基础上,以调度周期内 HPS 经济效益最大化作为其发电计划制定的目标函数。

$$\max \sum_{s \in S} \rho_s (C_s^{in} - C_s^{Ps} - \sum_{t=1}^T (C^U y_{st} + C^D z_{st})) \quad (3)$$

其中,

$$C_s^{in} = \sum_{t=1}^T [x_{st} \Delta t (P_{st}^W + \sum_{i=1}^N (P_{sti}^P - d_{sti}^P))] \quad (4)$$

$$C_s^{Ps} = \sum_{t=1}^T \omega x_{st} \Delta t |P_{st}^W + \sum_{i=1}^N (P_{sti}^P - d_{sti}^P) - \nu_t| \quad (5)$$

式中, S 为所有综合场景的集合; T 为调度时段总数; N 为抽水蓄能机组数; 下标 s 、 t 和 i 分别表示综合场景 s 、时段 t 和机组 i ; Δt 为调度时段 t 的时长; ρ 为场景概率; C^{in} 为 HPS 售电收益; C^{Ps} 为 HPS 输出功率偏离发电计划的惩罚费用; C^U 和 C^D 分别为抽水蓄能机组的启动费用和停机费用; y 和 z 分别为抽水蓄能机组启动和停止的台数; P^W 为风电场输出功率; P^P 和 d^P 分别为抽水蓄能机组的输出功率和抽水消耗功率; ν 为 HPS 发电计划; x 为交易电价; ω 为惩罚系数。

3.2 约束条件

上述模型除风电场出力约束外,还需考虑以下约束。

1) 抽水蓄能机组出力约束

$$\begin{cases} P_{imin}^P \leq P_{sti}^P \leq P_{imax}^P \\ d_{imin}^P \leq d_{sti}^P \leq d_{imax}^P \end{cases} \quad (6)$$

2) 抽水蓄能电站的水库容量约束

$$Q_{min} \leq Q_{st} \leq Q_{max} \quad (7)$$

$$Q_{s(t+1)} = Q_{st} + \Delta t (\eta^d \sum_{i=1}^N d_{sti}^P - \eta^p \sum_{i=1}^N P_{sti}^P) \quad (8)$$

式中, Q_{st} 为场景 s 时段 t 结束时刻的水库蓄水量; η^d 和 η^p 分别为抽水蓄能机组在抽水状态和发电状态下综合效率系数。

3.3 HPS 运行方式调整

由上述模型及约束条件,采用改进粒子群算法^[15]求解可得到未来调度时段的发电计划,在此基础上,通过比较时段 t 抽水蓄能电站带来的效益及其机组开停费用,即可判定抽水蓄能电站的机组是否应在时段 t 启动。抽水蓄能电站的运行应满足下列原则。①当 $P_t^W \geq \nu_t$ 时,且式(9)成立时,则按照

最少开机数量的原则确定工作于抽水工况的抽水蓄能机组;②当 $P_t^W < \nu_t$ 时,且式(10)成立时,则按照最少开机数量的原则确定工作于发电工况的抽水蓄能机组。

$$\begin{cases} (P_t^W - \nu_t) \eta^d \eta^p x_{max} \omega > C^U + C^D \\ (Q_{max} - Q_{(t-1)}) \eta^p x_{max} \omega > C^U + C^D \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} (\nu_t - P_t^W) \eta^d \eta^p x_{max} \omega > C^U + C^D \\ Q_{(t-1)} \eta^p x_{max} \omega > C^U + C^D \end{cases} \quad (10)$$

式中, P_t^W 为实际调度时段 t 的风电场可用功率; x_{max} 为历史电价均值中最高电价时段的电价。

4 运行优化流程

HPS 的发电计划制定及运行方式调整流程如下。

- 1) 输入原始数据;
- 2) 根据风电功率预测及实测历史数据,生成不同功率等级及不同时间尺度的历史误差集合,通过将偏差波动范围离散化得到各集合对应 PDF;
- 3) 根据风电预测功率等级及时间尺度,选择未来各调度时段对应预测偏差 PDF;
- 4) 蒙特卡罗抽样生成风电场出力场景;
- 5) 根据 2.2 节电价模型及历史电价数据,通过蒙特卡罗抽样生成电价场景;
- 6) 利用 2.3 节方法对风电场出力及电价场景进行场景缩减;
- 7) 由缩减后风电场出力及电价场景生成综合场景;
- 8) 根据 3.1 节模型通过改进粒子群算法求解 HPS 未来调度时段最优发电计划;
- 9) 在发电计划基础上,在各实际调度时段到来时根据 3.2 节方法对 HPS 的运行方式做出调整。

5 算例分析

将调度周期 1 d 等分为 24 个时段,且假定每一时段开始至下一时段到来之前,风速、电价及机组出力等均恒定不变;风电场额定有功输出 60 MW;抽水蓄能电站装设两台可逆式水轮机,额定有功输出及抽水功率均为 2×10 MW,水库容量 100 MW · h,机组发电及抽水综合效率均取为 0.9;水库初始蓄

水量为 $0\text{ MW}\cdot\text{h}$; 风电场历史数据采用归一化后的美国东部某风电场(2004.01.01 至 2006.12.31)实测数据^[17]; 电价数据由转化后得到^[18]; 抽水蓄能机组启停费用仅在开机或不同工况之间的转换时考虑^[19], 取为 $1\ 000\text{ 元/台}\cdot\text{次}$; 惩罚系数 ω 取 1.1。

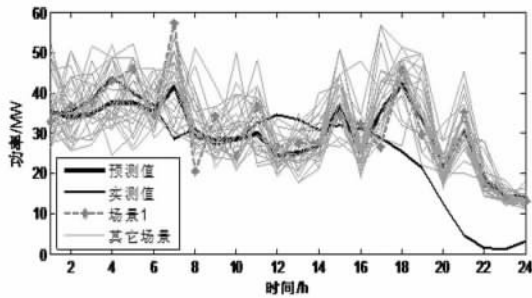


图2 风电场出力场景

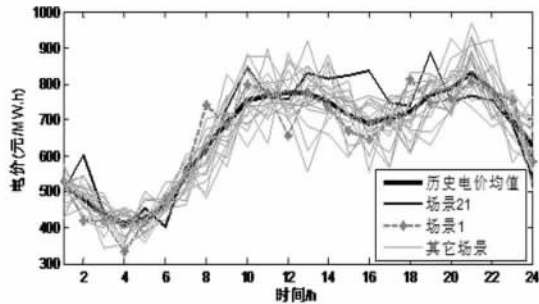


图3 电价场景

经蒙特卡罗抽样及场景缩减后, 在未来调度时段分别生成了可能的 30 个风电场出力场景及 20 个电价场景, 如图 2 和图 3。将上述两类场景两两任意组合, 即可生成未来调度时段可能的 600 个综合场景及其相应的发生概率, 如综合场景 1 由风电场出力场景 1 及电价场景 1 组成, 则其概率为二者之积, 如表 2。

表 1 场景概率

类型	风电场出力场景 1	电价场景 1	综合场景 1
概率	0.028	0.017	0.000 476

为验证不同策略及运行模式下的经济效益, 制定如下几种方案: ①风电场无抽水蓄能电站联合运行, 按 3.1 节模型制定发电计划; ②HPS 按未来时段风电场出力预测数据制定发电计划, 且按照 3.3 节方法进行运行方式调整; ③HPS 按 3.1 节制定发电计划并按 3.2 节方法进行运行方式调整。

各方案发电计划如图 4, 由结果可知, 考虑到 HPS 在初始调度时段水库无蓄水量, 无法对风电场欠出力进行补偿, 故方案 3 发电计划在初始阶段相对于风电功率预测数据(方案 2)来说较保守, 以降

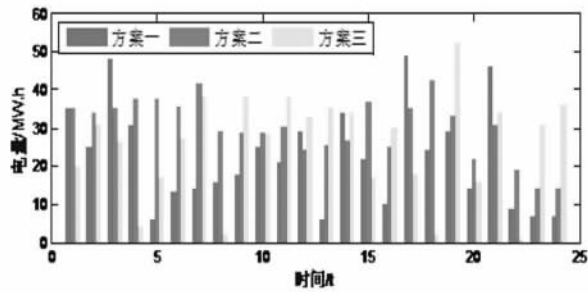


图4 发电计划

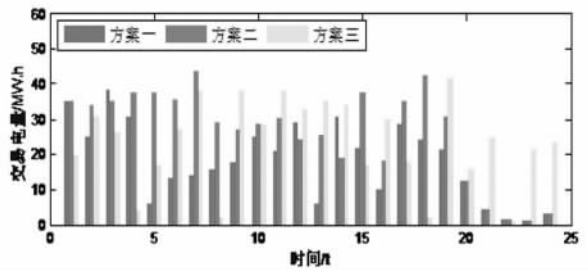


图5 实际交易电量

低违背发电计划的惩罚。而当 HPS 水库有一定蓄水之后, 其发电计划逐渐增加; 而方案 1 风电场无抽水蓄能电站联合运行, 则大部分调度时段内相对于方案 3 其发电计划均偏保守。

表 2 发电计划执行情况及收益

	违背发电计划的电量 (绝对值和) / $\text{MW}\cdot\text{h}$	惩罚/万元	收益/万元
方案 1	100.15	8.020	21.166
方案 2	92.82	7.507	33.322
方案 3	42.43	3.311	34.504

为验证发电计划确定后风电场单独运行或 HPS 的运行及收益情况。采用风电场出力实测数据(如图 2)作为各调度时段的风电场可用功率, 考虑无电价实际数据, 故由电价模型生成新的电价场景 21 作为实际数据。

由表 2 可知, 相对于风电场单独运行(方案 1), 当抽水蓄能电站与风电场组成 HPS(方案 2、3)联合运行后, 由于其调节能力的增加, 故能够提高发电收益并降低因违背发电计划所导致的损失; 但因方案 2 根据风电功率预测信息直接制定发电计划, 某些时段预测偏差较大, 故抽水蓄能电站并不能完全进行调节; 当采用方案 3 制定发电计划后, 其违背发电计划的电量进一步降低且收益增加(相对方案 2), 各方案在各调度时段的实际交易电量情况见图 5。

在方案 3 制定的发电计划基础上, HPS 在实际运行方式调整过程中的水库蓄水量、抽水及发电功

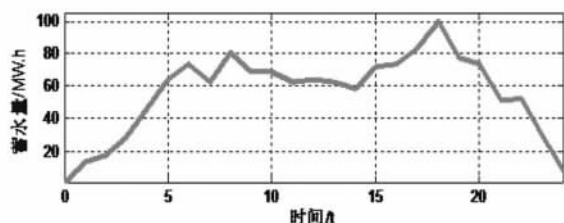


图6 水库蓄水量(方案3)

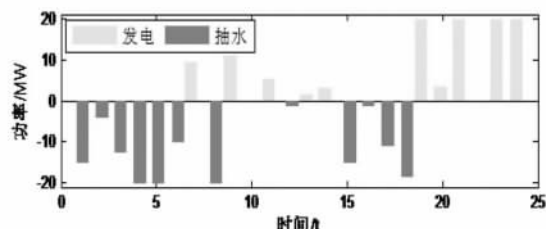


图7 发电及抽水功率(方案3)

率情况分别如图6和图7,在初始调度时段(发电计划偏保守)HPS中抽水蓄能机组多工作于抽水模式,当水库有一定蓄水量后,抽水蓄能机组开始发电,而在调度时段中后期,抽水蓄能机组则多工作于发电模式以合理利用水库已有蓄水量提高HPS利益。

6 结 语

(1) 根据风电预测功率等级及时间尺度建立了对应预测偏差模型。

(2) 采用场景分析处理风电出力及电价波动的不确定性,将HPS运行优化转化为两阶段问题处理,通过合理制定发电计划及运行方式调整,能提高HPS运行的经济效益。

(3) 对日前市场竞价做出一定假设,未考虑电量报价对竞价的影响,将合理报价与发电计划制定及运行优化结合仍有待进一步研究。

参考文献

- [1] Matevosyan J, Soder L. Minimization of Imbalance Cost Trading Wind Power on the Short-term Power Market [J]. IEEE Trans on Power System, 2006, 21(3): 1396-1404.
- [2] Bathurst G N, Weatherill J, Strbaac G. Trading Wind Generation in the Short Term Energy Market [J]. IEEE Trans on Power System, 2002, 17(3): 782-789.
- [3] 杨秀媛,肖洋,陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 1-5.
- [4] 罗海洋,刘天琪,李兴源. 风电场短期风速的混沌预测方法[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 67-71.
- [5] Jursa R, Lange B, Rohrig K. Advanced Wind Power Prediction with Artificial Intelligence Methods [C]. The 1st International ICSC Symposium on Artificial Intelligence in Energy System and Power(AIESP 2006), Funchal, Island of Madeira, Portugal, 2006.
- [6] 陆佑楣,潘家铮. 抽水蓄能电站[M]. 北京: 水利水电出版社, 1993.
- [7] 万永华. 抽水蓄能电站规划及运行[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [8] Castronuovo E D, Lopes J A P. On the Optimization of the Daily Operation of Wind-hydro Power Plant [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1599-1606.
- [9] Garcia-Gonzalez J, Moraga R, Matres L, et al. Stochastic Joint Optimization of Wind Generation and Pumped-storage Units in an Electricity Market [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(2): 460-468.
- [10] 李强,袁越,李振杰,等. 考虑峰谷电价的风电-抽水蓄能联合系统能量转化效益研究[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 13-18.
- [11] Hoyland K, Wallace S W. Generating Scenario Trees for Multistage Decision Problems [J]. Management Science, 2001, 47(2): 295-307.
- [12] Makarov Y V, Loutan C, Ma Jian, et al. Operation Impacts of Wind Generation on California Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(2): 1039-1050.
- [13] Bludszuweit H, Dominguez Navarro J A, Llombart A. Statistical Analysis of Wind Power Forecast Error [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(3): 983-991.
- [14] Xian Zhang, Xifan Wang, Song Y H. Modeling and Pricing of Block Flexible Electricity Contracts [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1382-1388.
- [15] Heitsch H, Romisch W. Scenario Reduction Algorithm in Stochastic Programming [J]. Computational Optimization and Applications, 2003, 24(2): 187-206.
- [16] 刘红岭,蒋传文,张焰. 基于随机规划的水电站中长期合约电量优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 101-108.
- [17] NREL. Wind integration datasets [EB/OL]. [2011-05-15] <http://www.nrel.gov/wind/integrationdataset/eastern/methodology.html>.
- [18] Mateo A, Munoz A, Garcia-Gonzalez J. Modeling and Forecasting Electricity Prices with Input/output Hidden Markov Models [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 1-12.
- [19] Nilsson O, Sjelvgren D. Hydro Unit Start-up Costs and Their Impact on the Short Term Scheduling Strategies of Swedish Power Producers [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 38-44.

(收稿日期: 2012-05-22)

备自投在 DTS 逻辑式仿真中的配置

陈曦, 任铃, 韦涛

(德阳电业局, 四川 德阳 618000)

摘要: 提出了备自投在 DTS 逻辑式仿真运用中的一种简单实用的配置方法, 解决 DTS 逻辑式仿真运用中备自投不正确动作的问题。

关键词: 备自投; DTS; 配置

Abstract: A simple and practical configuration method for automatic throw-in device of standby power supply in the logistic dispatcher training simulator (DTS) is presented, which can deal with the incorrect action of automatic throw-in device in the logistic DTS.

Key words: automatic throw-in device of standby power supply; dispatcher training simulator (DTS); configuration

中图分类号: TM762 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)05-0033-04

0 前言

调度员仿真系统(简称 DTS)是调度员进行技术培训、反事故演习、事故预想的平台,也为继电保护和自动装置的分析研究提供了科学的分析工具。DTS 在近年来得到了广泛的推广和运用,极大提高了调度员事故处理的能力和水平。根据《地(市)级智能电网调度技术支持系统应用功能规范》的要求设计, DTS 将作为智能电网调度技术支持系统平台的一个应用功能模块,其功能要求将逐步提升。

德阳电业局 DTS 于 2008 年年底建设并投入运行。经过两年来的运行实践,运行情况较好,但在自动装置配合尤其是备自投配置上出现了动作逻辑不正确的情况。针对上述问题进行了详细的分析并提供了一种简单实用的解决方法。

1 DTS 仿真的保护动作原理

就保护动作原理而言, DTS 仿真分为两种类型,一种为逻辑式仿真,一种为定值式仿真。

定值式仿真的动作原理与实际电网继电保护动作原理基本一致。由各种状态量发送到保护装置,通过定值判断,启动相关保护出口,跳开故障开关。定值式仿真 DTS 能精确地进行各种故障类型的分析,对短路电路、电网潮流等提供准确的分析结果。

因此,定值式仿真 DTS 维护量巨大,需要将线路型号、长度等参数、保护配置、保护装置的型号、保护定值单、TA 变比、TV 变比等信息一并输入,否则会因为参数录入不准确而造成保护不正确动作。此外,定值式仿真 DTS 软件费用高,资金投入量大,在实际工程运用中一般不采用。图 1 为定值式仿真动作逻辑图。

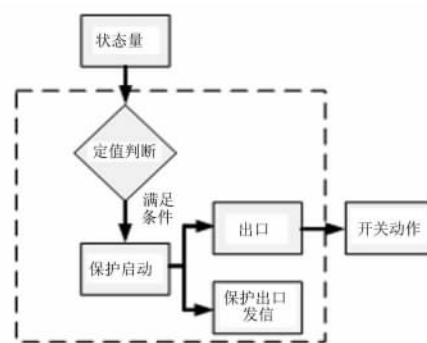


图 1 定值式仿真动作逻辑图

逻辑式仿真根据已设定好的故障类型的动作逻辑进行模拟,是一种人工干预并遵照人为意愿的模拟方法。由于缺少定值启动判据,并不能真实地反应电网的现实运行过程。因此,运用逻辑式仿真必须以设定的正确动作逻辑为基础,否则逻辑关系出错,必将导致 DTS 系统保护不正确动作。逻辑式仿真比定值式仿真要便宜许多,同时只需要对一次接线、保护配置进行维护,相对定值式仿真来说维护方便。因此,在实际工程中运用较为广泛。图 2 是逻

辑式仿真动作逻辑图。

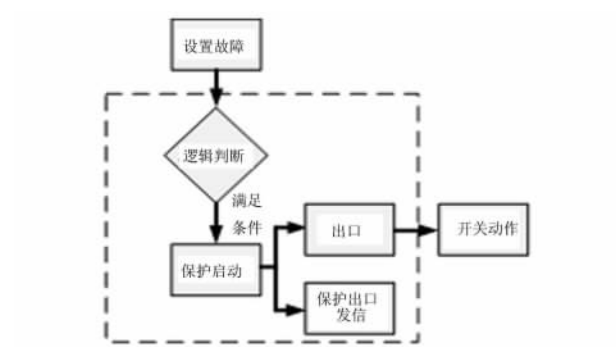


图 2 逻辑式仿真动作逻辑图

因此,要解决 DTS 中备自投动作逻辑不正确的问题,必须对备自投动作逻辑进行调整和完善。

2 线路备自投与线路重合闸间的配合

逻辑式仿真中,线路备自投与线路重合闸动作配合不正确。

2.1 理论分析

装有线路备自投的变电站,当主电源侧失电时,本站线路备自投启动,经过备自投动作时限(一般为 5~6 s),备自投动作——拉开主电源侧开关,合上备电源侧开关。装有线路重合闸的线路跳闸后,经过线路重合闸时限(一般为 1~1.5 s),开关重合一次。在备自投动作时限(一般为 5~6 s)内,如果线路重合成功,则线路备自投不会动作;如果线路重合不成功,则经过备自投动作时限(一般为 5~6 s),备自投动作。

2.2 结论

在配置了线路重合闸与 110 kV 线路备自投的线路上,线路重合闸与 110 kV 线路备自投均启动时,重合闸动作优先。以 110 kV 五城线为例,图 3 为线路备自投与线路重合闸配合动作逻辑对比图。

2.3 措施

在自动装置设置界面中,将重合闸动作时间设定小于线路备自投动作时间,使得重合闸先于线路备自投动作。以 110 kV 五城线为例,将五里堆站 110 kV 五城线重合闸时间改为 1.5 s,将城南站 110 kV 线路备自投时间改为 6 s。见图 4、图 5。

2.4 测试

仍以五城线为例,当 110 kV 五城线发生永久性故障时(图 6 为五城线发生永久性故障的设置图),

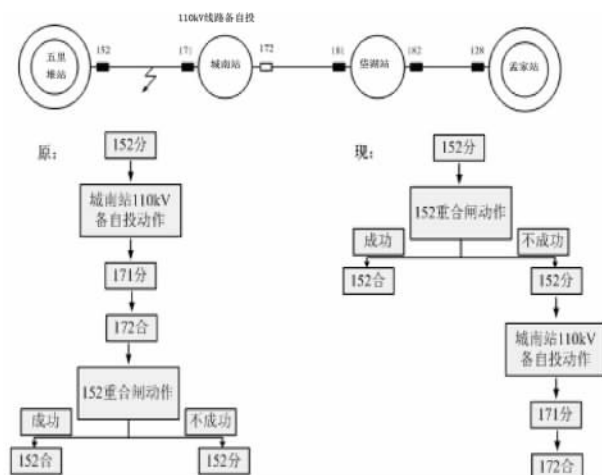


图 3 线路备自投与重合闸配合动作逻辑对比图



图 4 线路重合闸设置图



图 5 线路备自投设置图

五里堆侧 152 号开关跳闸,重合闸动作不正确,线路备自投动作,城南站 171 号开关合闸。图 7 为逻辑

式仿真动作逻辑改进后,线路备自投与线路重合闸动作结果图。由图7可知,线路备自投与线路重合闸配合动作结果正确无误。

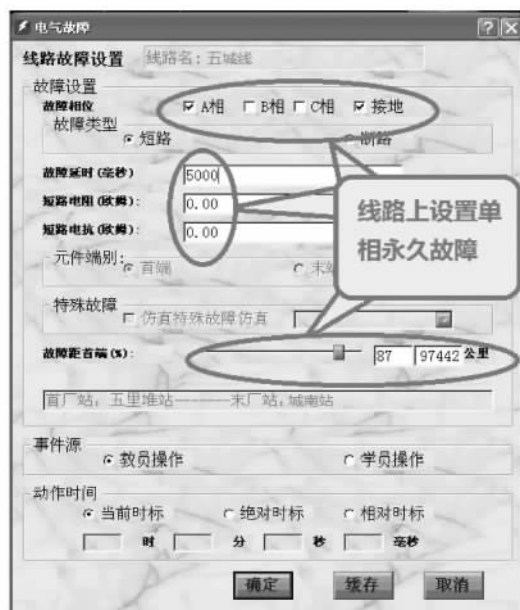


图6 五城线永久性故障设置图



图7 线路备自投与线路重合闸动作结果图

3 内桥接线 10 kV/35 kV 分段备自投与 110 kV 线路备自投的配合

逻辑式 DTS 中,内桥接线 10 kV/35 kV 分段备自投与 110 kV 线路备自投的动作配合与实际不符。

3.1 理论分析

10 kV/35 kV 分段备自投能减少短路电流,提高供电可靠性,是分段母线重要的自动装置之一。当一段母线失压,而另一段母线有压时,10 kV/35

kV 分段备自投动作合上分段开关,使失电母线继续带电。内桥接线时,因 110 kV 线路备自投动作过程中会出现短时全站失压,两段 10 kV/35 kV 母线均失压,满足 10 kV/35 kV 分段备自投放电条件,所以 10 kV/35 kV 分段备自投不应该动作。

3.2 结论

10 kV/35 kV 分段备自投是否动作要看 110 kV 线路备自投动作过程中 10 kV/35 kV 侧母线是否失去电压。以内桥接线的元石变电站为例,图8是DTS改进前后的线路备自投与分段备自投动作逻辑对比

3.3 措施

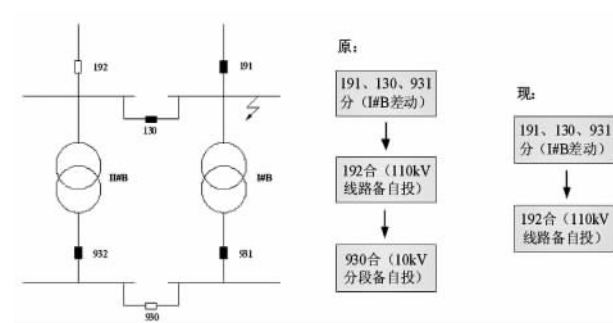


图8 线路备自投与分段备自投动作逻辑对比图

在自动装置设置界面中,增加分段备自投电压判据——当一段母线电压大于 80 V,而另一段母线电压小于 30 V 时,10 kV/35 kV 分段备自投才能动作。以元石变电站为例,图9、图10为10 kV 分段备自投判据设置图。

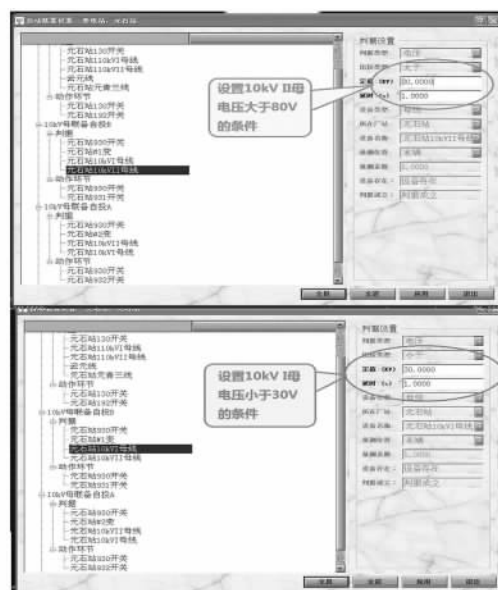


图9 10 kV 分段备自投判据设置 1

3.4 测试

仍以元石变电站为例,当内桥接线的元石变电

站 110 kV II 母发生永久性故障(图 11 为元石变电站 110 kV II 母发生永久性故障的设置图)时,满足元石变电站 2 号变

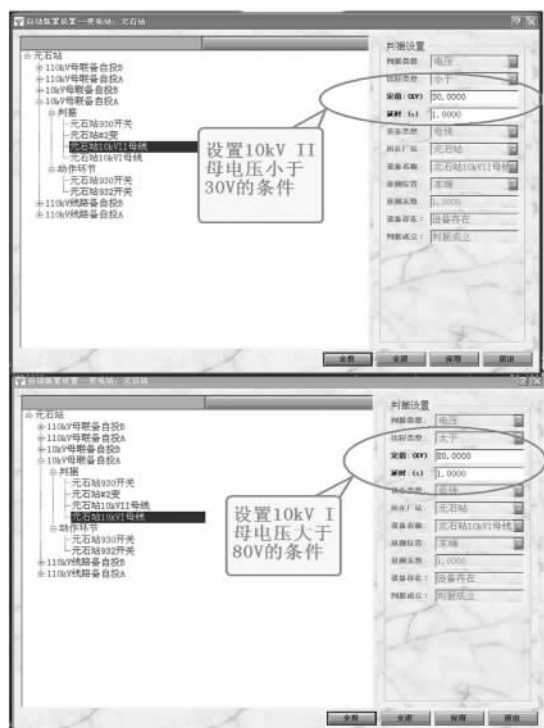


图 10 10 kV 分段备自投判据设置 2

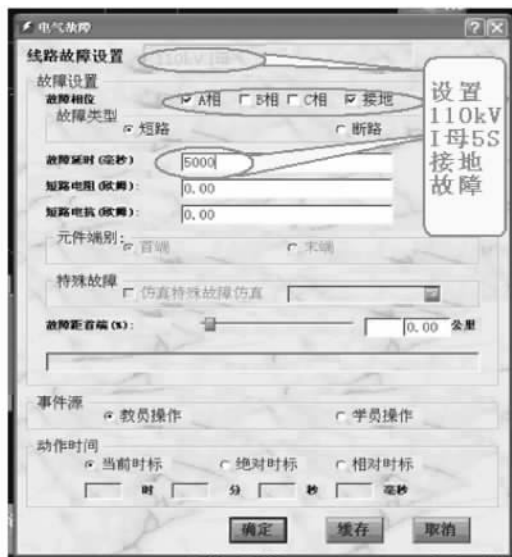


图 11 元石站 110 kV II 母永久性故障设置图

压器差动动作条件而使得元石变电站全站失压,元石变电站 10 kV 备自投放电,而线路备自投动作,192 进线合闸使元石变电站 110 kV I 母带电。图 12 为逻辑式仿真动作逻辑改进后,线路备自投与分段备自投动作结果图。由图 12 可知,线路备自投与分段备自投配合动作结果正确无误。

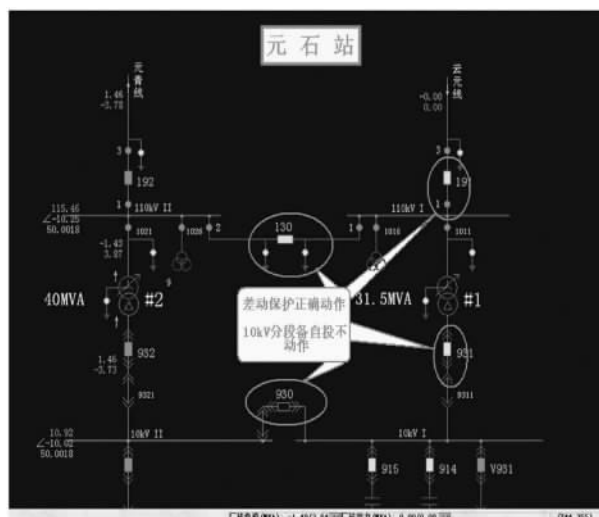


图 12 线路备自投与分段备自投动作结果图

4 结 语

通过对逻辑式仿真以及备自投动作原理的分析,在不改变仿真类型的前提下,改进并完善了动作逻辑,提供了一种简单实用的备自投配置方法,解决了备自投等自动装置动作配合不正确的问题,从而提高了 DTS 平台的实用性和针对性。

参考文献

- [1] DL/T 584-95, 3-110kV 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.
- [3] GB/T 14285-2006, 继电保护和安全自动装置技术规程[S].

作者简介:

陈 曦(1973),女,硕士,工程师,主要研究方向为电网运行调度继电保护及管理;

任 铃(1976),女,硕士,工程师,主要研究方向为电网调度运行;

韦 涛(1982),男,本科,助理工程师,主要研究方向为电网调度运行。

(收稿日期:2012-04-01)

对一起主变压器零序过流保护动作逻辑缺陷的分析

岑冬梅, 欧昌岑

(中山供电局, 广东 中山 528400)

摘要: 从中山供电局二次人员在新站验收时发现的某厂家主变压器保护缺陷着手, 深入分析了该型号主变压器零序过电流保护的逻辑, 并提出了解决方案。

关键词: 电力系统; 主变压器保护; 缺陷; 解决方案

Abstract: From the protection defects in main transformer of some manufacturer during the acceptance inspection of a new sub-station by the staff in charge of secondary equipment in Zhongshan Power Supply Bureau, the action logic of zero sequence overcurrent protection for main transformer is analyzed, and the solutions are proposed too.

Key words: power system; main transformer protection; flaw; solution

中图分类号: TM588.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0037-01

0 引言

2010年, 中山供电局二次人员在某220 kV站验收调试由某厂家设计的主变压器保护时发现以下问题: 该型号的零序方向过流逻辑中, 用开关TA判方向, 中性点套管TA判大小, 且开关TA的零序电流必须大于0.5倍的零序电流整定值才能判断出方向。该220 kV变电站高压侧开关TA取800/1, 中压侧开关TA取2 400/1, 高压侧及中压侧的中性点套管TA最大只能取600/1, 中压侧开关TA的零序电流只有中性点套管TA的0.25倍, 因此在接地故障时会出现中压侧零序一次电流大于整定值时方向元件不动作情况。当系统发生接地故障时主变压器后备保护可能拒动, 从而严重影响电网安全运行。

表1 主变压器高压侧和中压侧TA变比列表

	开关TA变比	中性点套管TA变比
高压侧	800/1	600/1
中压侧	2 400/1	600/1

2 原因分析

该主变压器零序过流保护思路如下。

①带方向的零序过流保护, 其判别方向的零序电流取各侧开关TA的自产零序电流, 其判别幅值的

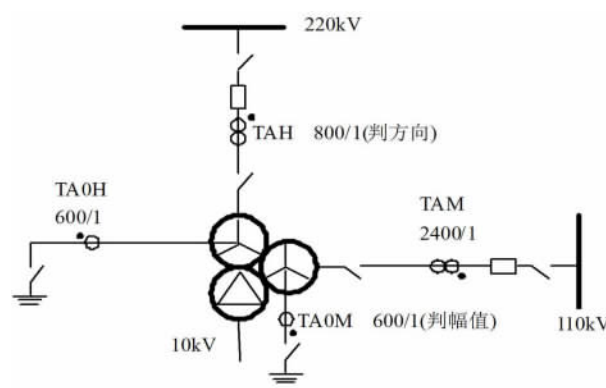


图1 主变压器零序方向过流保护电流互感器示意图
零序电流可通过控制字设置取各侧开关TA的自产零流或中性点TA电流, 此处选择了中性点TA电流; 同时为了保证方向元件的灵敏性大于幅值的判别, 零序方向的电流门槛取过流定值的0.5倍;

②不带方向的零序过流保护, 一般其判别幅值的零序电流取中性点TA的值。

其缺陷如下。

当零序方向过流保护的幅值使用中性点TA采样值时, 保护程序没有考虑到中性点TA与对应侧开关TA的变比不一致的情况。当零序方向过流保护的幅值判别电流采用中性点TA采样时, 如果对应侧开关TA变比大于2倍的中性点TA变比时, 则会导致零序方向元件的灵敏度达不到定值要求。对于该220 kV变电站主变压器, 中压侧的TA变比为2 400, 中性点TA变比为600, 就存在中侧零序一次

(下转第91页)

题不是很大当时并没有引起重视。对于此批次的断路器怀疑可能均有此问题,对于在恶劣雷雨天气下断路器可能发生多次单相重合的情况下发生断路器拒合故障,影响电网安全稳定运行。

4 结 语

BLK 弹簧机构属于较为成熟的进口卷簧机构,成套性高,维护量小,整体运行可靠性较高。对于储能回路的问题,大部分是发生在电气回路,例如储能电机短路、行程开关失灵或受潮短路引起,机械故障也多发生于卷簧质量不佳导致断裂所致,而此次故障是由卷簧的辅料造成比较罕见。根据安装和运行经验,BLK 机构发生程度较严重衬垫位移时,合闸成功率不能到 100%。弹簧机构的多种优良性能使得其占有率近年来不断增长。虽然弹簧机构检修维护量小,但对它的维护工作仍应当引起检修人员的

高度重视,弹簧机构一旦出现故障,后果是比较严重的。定期检修维护中,弹簧机构的检查,限于无法进行解体检查,主要进行尺寸测量、目测检查、定期润滑等工作,并且继保定检时不应频繁传动,尽量降低对断路器的机械冲击,进一步提高弹簧机构的运行可靠性。

参考文献

- [1] 刘国荣. 涡卷弹簧储能操作机构的设计与应用[J]. 机电工程技术, 2004(10): 64-66.

作者简介:

刘滨涛(1980),男,工学硕士,电力工程师,从事电力系统运行工作;

肖建华(1979)男,工学硕士,电力工程师,从事电力系统规划工作;

黄倩(1986),女,本科,助理工程师,从事电力系统运行工作。

(收稿日期:2012-05-07)

(上接第 37 页)

电流大于整定值时零序过流保护不动作情况。

3 解决方案

针对该 220 kV 变电站的实际情况,中山供电局与该厂家共同分析,提出如下解决方案。

2.1 方案 1

将零序方向过流保护的零序电流选择由外接中性点的零序电流改为取开关电流。该方案不改变原定值项目,不改变原有接线;

该方案可以通过装置调试工具将系统定值“中压侧零流 I 段动作电流选择”整定值由“0”改为“1”,中压侧的零序电流 I 段动作电流定值按照中压侧开关 TA 的二次值整定;试验验证中压侧零序电流 I 段保护的定值精度;验证无问题后,保护装置可以投入运行。

2.2 方案 2

升级保护程序,将零序方向过流保护判方向所用电流固定改为 0.04 倍开关 TA 的额定值,该方案不改变原定值项目,不改变原有接线。

该方案可以在现场程序基础上修改软件版本,现场通过数据线升级后备保护程序,仅改变 CPU1 插件(后备保护)的程序;试验验证零序方向过流 I

段保护的定值精度和方向性及动作逻辑;预计升级程序和现场针对性验证试验的时间为 2~3 h。

2.3 方案 3

调整中性点 TA 的变比或者中压侧开关 TA 的变比,在开关 TA 变比不大于中性点 TA 变比 2 倍的情况下,保护软件可以不做任何处理,仅需按照调整后的 TA 变比整定定值即可解决此问题。

该方案可以在现场调整中性点 TA 的变比或者中压侧开关 TA 的变比;按照调整后的 TA 变比整定零序方向过流定值;现场试验验证零序方向过流 I 段保护的定值精度;验证无问题后,保护装置可以投入运行;

中山供电局技术人员经充分考虑,决定采用方案 2。因该方案只需升级保护程序,工作量小,时间短,反措可操作性强,而且不影响设备如期投运。

3 结 语

该型号的主变压器保护在广东电网范围内应用较广,该缺陷的及时发现及消除对广东省电网的安全稳定有着非常重要的意义。

希望这里的研究及分析对全国同行在设计、验收及原理分析方面起到参考意义。

(收稿日期:2012-05-25)

基于 110 kV 内桥接线的母线保护思考

曾 明

(攀枝花电业局, 四川 攀枝花 617067)

摘 要: 针对无专用母线保护装置的 110 kV 内桥接线, 在电网实际运行中出现的各种客观问题进行了深入分析, 并提出设置专用的 110 kV 母线保护的对策。这将有效提高供电的可靠性、系统运行的稳定性, 具有较高的工程实用价值。

关键词: 内桥接线; 母线保护; 供电可靠性; 电力系统稳定性

Abstract: All kinds of objective problems about 110 kV substation with internal bridge connection without the special bus-bar protection in the actual operation of power grid are analyzed, and a strategy of utilizing a special bus-bar protection for 110 kV substation with internal bridge connection is proposed. The reliability of power supply, flexibility of operating mode and stability of the grid can be enhanced due to this strategy, and a high practical value for engineering can be realized.

Key words: internal bridge connection; bus-bar protection; reliability of power supply; power system stability

中图分类号: TM645.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0038-03

0 引言

近年来, 随着电网规模的扩大与改造, 对于只有两回输电线路、两台主变压器的 110 kV 变电站一般采用断路器数量最少、投资较少的内桥接线方式。

此种接线方式, 主变压器高压侧无断路器, 仅通过隔离开关与母线连接。其主变压器的差动保护范围已经包括了 110 kV 母线, 故未对高压侧母线配置专用的 110 kV 母线保护装置。但在实际电网运行中, 无专用母线保护装置的 110 kV 内桥接线对供电可靠性、电网运行稳定性带来很大影响。

1 无专用母线保护装置的 110 kV 内桥接线运行分析

1.1 主变压器纵差动保护范围分析

某地区 110 kV 河石坝变电站采用无专用母线保护装置的內桥接线, 如图 1 所示。主变压器纵差动保护用电流互感器 TA, 除分别安装于主变压器中、低压侧外, 还在母线桥及出线上分别进行了安装。图 1 中主变压器 1B 差动保护范围除了主变压器回路本身外, 还扩大至母线桥 113 断路器以及坝密线 151 线路断路器。可见, 主变压器 1B、2B 差动保护分别兼作了 110 kV 母线 1M、2M 的快速保护。

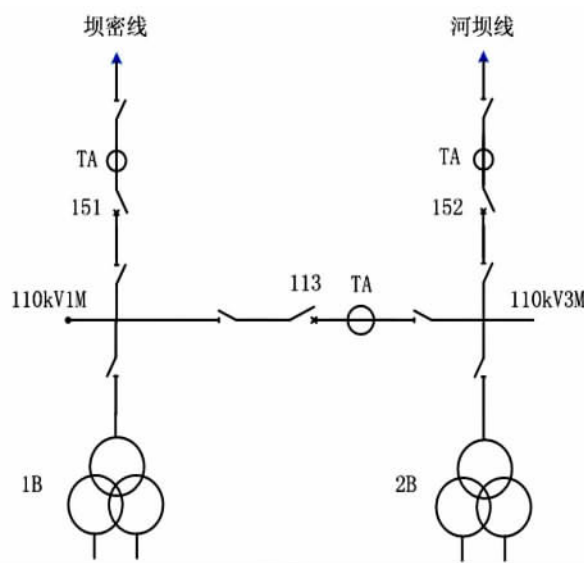


图 1 河石坝变电站 110 kV 内桥接线图
(无母线保护)

1.2 正常运行方式分析

河石坝变电站在本地区 110 kV 电网中的位置如图 2 所示, 在系统正常运行方式下, 图 2 中所有元件全部带电运行, 135 MW 发电机通过 110 kV 双通道(环网)在 220 kV 银江变电站并入四川主网运行。河石坝变电站是河门口电厂 135 MW 机组出力通道的组成部分, 成为 110 kV 环网内重要的节点, 其两台主变压器担负着片区市政供电、矿务局等高危用户的供电任务。

此系统中, 除河石坝 110 kV 母线外, 所有元件



图2 四川某地区部分 110 kV 电网结构图

(输电线路、母线、主变压器)均配置了能保证快速性、选择性的专用纵联或者纵差动保护。正常情况下,河石坝变电站母线桥 113 断路器处于运行状态,两台主变压器高压侧并联运行,分别承担 40 MW 负荷;当河石坝 110 kV 1M 故障,主变压器 1B 差动保护快速动作使 1B 中、低压侧,以及 151、113 断路器跳闸,确保了电网稳定运行。

1.3 特殊运行方式分析

在以下 3 种特殊运行方式下,将造成内桥接线的 110 kV 母线其中一段失去快速保护,从而会出现降低供电可靠性、系统稳定性的严重问题,呈现出很高的安全风险。

(1) 正常运行方式下,因为某一主变压器差动保护临时退出运行(如:差动保护断线告警、装置死机等)时,该主变压器所连接的一段母线失去快速保护。

(2) 当 1 台主变压器检修期间,为保证 110 kV 网络处于环网运行状态,短时停电配合拉开主变压器高压侧隔离开关后,母线桥需要恢复运行。主变压器差动保护属检修范围,故该主变压器所连接的一段 110 kV 母线无快速保护。

(3) 当主变压器 1B 检修结束后,因大修或者差动回路二次改动,按规程要求需带负荷测试主变压器差动保护电流互感器极性,测试期间差动保护将退出运行。该段时间区间,110 kV 1M 无快速保护。

特殊运行方式下的故障情况分析如下。

当处于上述特殊运行方式时,若该段母线故障,需要通过该站 110 kV 两段母线上所有电源元件的后备保护(输电线路对侧 II 段保护、主变压器高压侧方向闭锁过电流保护)越级动作才能切除故障,这势必导致:

(1) 切除故障的时间较长,严重降低系统的稳

定性;

文献[1]中电力系统受到大干扰后,发电机转轴上出现的不平衡转矩将使发电机产生剧烈的相对运动;当发电机的相对角的振荡超过一定限度时,发电机便会失去同步。可见,由于无法快速切除故障(特别是三相短路),将给河门口电厂 135 MW 机组带来很大冲击,容易诱发机组失稳而导致更严重的系统影响。

(2) 本站及其所带负荷全部失压的后果,供电可靠性极差;

(3) 隔离故障、恢复送电的速度受到制约。地调调度员在处理事故时,无法根据保护动作情况,就能立即判断故障点的位置。特别是雷雨季节,很难仅仅通过 110 kV 线路 II 段的动作情况就能断定是线路本身末端故障还是变电站母线故障。明确故障点的时间越长,隔离故障就慢,从而影响恢复送电的速度。

1.4 其他隐患分析

1.4.1 母线桥无专门的充电保护

在实际检修工作中,当 110 kV 一段母线检修结束,而相应主变压器检修工作仍在进行的情况非常普遍。该段母线送电时,由于无专门的充电保护,送电需要线路对侧保护来作该段母线的充电保护。同理,该段母线故障,由于切除故障时间较长,降低系统运行的稳定性。

1.4.2 风险极高、最薄弱的运行方式将导致局部电网崩溃

图 2 中,当环网内任一输电线路停电计划检修或发生永久性故障,河门口电厂 135 MW 机组将通过单通道(环网打开)与主网并列运行。2008 年至 2010 年,该 110 kV 环网线路故障情况统计如表 1。

可见近 4 年来,线路因计划检修导致该 110 kV

表 1 图 2 环网中,110 kV 输电线路计划检修
与故障情况统计

	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年
线路计划检修的停电天数	20	18	15	12
线路故障的条次	8	7	5	4

备注:计划检修的时间包括线路本身停电检修、配合其他线路施工而停电两部分。

电网开环运行的时间平均达到每年 16 天以上,而线路因永久性故障跳闸共 24 条次,年平均 6 条次,存在较高的故障概率。

环网中某一元件计划检修或者故障,110 kV 环网即刻出现开环运行。根据 $N-1$ 事故策略,为保证其余某一元件故障后,该机组及其负载所形成的孤立电网(以下称孤网)能够保持频率与电压稳定,调度员将有关传输断面进行功率控制。如 110 kV 银凤线检修时,110 kV 银密线、坝密线的有功负荷将按“零”、无功功率尽量调至最小的要求进行控制。如果此时出现上述“特殊运行方式”时,河石坝失去主变压器差动保护的一段母线发生三相短路,靠相邻 110 kV 线路 II 段保护切除故障。容量如此小的孤网在三相短路的巨大冲击下,还要“较长”的时间才能脱离故障,该局部电网崩溃的概率与风险将非常高。之前所做的负荷控制,将会因为功角稳定问题付诸东流。这种情况,会由于内桥接线未设置专用母线保护而形成最严重的灾难。

2 对策建议

当 110 kV 变电站主接线采用内桥接线方式时,110 kV 母线应配置专用的微机母线差动保护,上述问题即可有效解决。

2.1 母差保护实施依据

文献[2]中在 110 kV 及以上的双母线和分段单母线上,为保证有选择性地切除任一组(或段)母线上所发生的故障,而另一组(或段)无故障的母线仍能继续运行,应装设专用的母线保护。

文献[3]中电力系统元件(发电机、变压器、线路、母线、电动机等)继电保护的基本任务,也是对继电保护配置的总体要求,就是当被保护的电力系统元件发生故障时,应该由该元件继电保护装置迅速准确地给距离故障元件最近的断路器发出跳闸命令,使故障元件及时从电力系统中断开,以最大限度

地减少对电力元件本身的损坏,降低对电力系统安全供电的影响,并满足电力系统的某些特定要求(如保持电力系统的暂态稳定性等)。

2.2 母差保护实施方案

内桥接线方式下,母差保护的主变压器高压侧电流需用其本体套管的 TA 接入母差保护来实现,桥断路器以及其他支路电流仍采用其断路器的 TA 电流。主变压器高压侧套管 TA 作为母线一支路电流参与差流计算,与正常方式无异,在此不再赘述。

需要特别指出的是,母差保护也应跳主变压器三侧断路器,防止主变压器中、低压侧的电源反送至故障点,达到可靠、自动地隔离故障的目的。可以采用母差保护跳主变压器高压侧断路器的出口接点启动中间继电器去联切中、低压侧断路器的方式来具体实现,如图 3 所示。

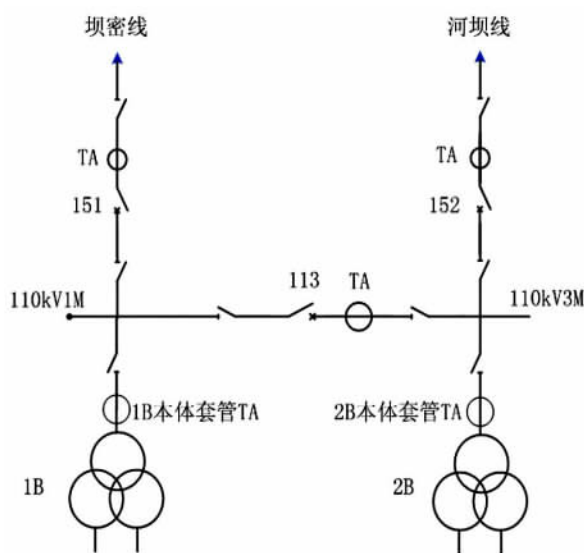


图 3 110 kV 内桥接线图(配有母线保护)

2.3 母线差动与主变压器差动保护范围、动作结果对比

110 kV 母差保护范围扩大至主变压器本体高压侧套管 TA 处,与主变压器差动保护 110 kV 部分的保护范围重叠。正常运行方式下,两者均投入运行,虽然其动作结果一样,但是故障点未必相同。

2.4 母差保护动作情况分析

当在上述“特殊运行方式”期间,河石坝 110 kV 1M 故障,其 110 kV 母差保护首先以“零秒”快速且有选择性地动作,使 151、113 以及主变压器 1B 中、低压侧断路器同时跳闸,而 110 kV 3M、主变压器 2B 依然可以正常运行,避免了河石坝全站及其所供负

(下转第 88 页)

线路杆塔接地装置必须考虑其感性作用。在杆塔接地存在不同程度腐蚀的情况下,冲击接地阻抗比工频接地阻抗大。此时,不能把杆塔接地体看作单一的集中接地体,而是要考虑冲击电流流过时的波过程,电感对冲击接地电阻的影响显然比土壤火花放电的影响要大。

(2) 频谱法可利用两个频率点的数据,将接地阻抗的阻性和感性分量分别求得,并且通过频域内计算有效的避免电压电流数据采集不同时带来的麻烦。缺点是傅里叶变换会产生频谱泄漏而导致误差。另外,其计算精度需要通过现场试验进一步验证。

参考文献

[1] 崔宇,李建国,戴玉松. 基于冲击电流法测量接地电阻

的装置[J]. 电力学报, 2009(4): 299-302.

[2] 李建国,朱康. 高压电气设备试验方法[M]. 北京: 中国电力出版社,2001.

[3] 孙家营. 杆塔冲击接地阻抗测量系统的研制[D]. 成都: 西华大学,2007.

[4] 张振军. 用冲击电流法测量接地网阻抗系统的设计[D]. 成都: 西华大学,2008.

[5] DL 475-92, 接地装置工频特性参数的测量导则[S].

[6] 孙家营,戴玉松,等. 冲击电流法测量接地电阻研究[C]. 中国电机工程学会第九届青年学术会议论文集, 2006.

[7] Che Yunping, Zha Xiaoming, Zhao Lei. The Measurement of Impulse Grounding Resistance and Inductance of Grounding Network [C]. IEEE. Catalogue No: 98EX137, 1998.

(收稿日期: 2012-08-20)

(上接第 40 页)

载全部失压的后果,达到迅速、有选择性将故障隔离的目的,确保了供电可靠性以及系统运行的稳定性。

为进一步提高供电可靠性,可以在确保主变压器 2B 不过载、不发生与小电源非同期并列等有关条件下,主变压器 1B 所供的失压负荷可以通过备用电源自动投入装置自动转移给 2B 供电(备用电源自动投入装置动作后将中、低压侧母线分段断路器自动投入来实现)。

当主变压器 1B 差动与母线 I 段差动保护同时动作时,就能说明故障在河石坝 110 kV 1M 范围内,可以重点检查达到省时的目的。当 1B 差动动作、而母线 I 段差动保护未动作,则说明故障在 1B 本体及其中、低压侧的范围内,调度员在拉开 1B 高压侧隔离开关后,可将 110 kV 系统恢复环网运行,从而降低开环运行可能带来的元件过载或者发电机“窝电”问题。

最重要的是,“零秒”切除故障,确保了发电机组的安全运行。文献[1]中快速切除故障在提高系统暂态稳定性方面起着首要的、决定性的作用。

3 结 语

无专用母线保护装置的 110 kV 内桥接线,在正常运行情况,当某段母线故障时,可利用主变压器差动保护快速且有选择性地动作;在上述特殊运行方

式下,当某段母线故障时,因主变压器差动保护不能够动作,则需要通过输电线路对侧 II 段保护越级动作才能切除故障,这势必导致切除故障的时间较长,严重降低系统的稳定性,甚至可能引起发电机失去同步而导致更严重的系统影响。

内桥接线方式下,配置专用的微机母差保护,有利于提高母线故障时继电保护的快速性与选择性;此外,母线保护装置具备完善的充电保护功能,所以在对检修后的母线段充电时,它能够灵敏、快速地反映各种故障,同样提高了系统运行的稳定性。

需要指出的是,当变电站在系统中处于联络地位时,建议主接线的设计不宜采用桥形接线;若因土地、配电装置结构等条件所限,则应安装母线保护。

参考文献

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

[2] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理(3 版)[M]. 北京: 中国电力出版社,1994.

[3] 《中国电力百科全书》编辑委员会. 中国电力百科全书 电力系统卷[M]. 北京: 中国电力出版社,2000.

作者简介:

曾 明(1978),男,本科,助理工程师,研究方向为电网运行。

(收稿日期: 2012-04-18)

风电接入对电能计量影响的初探

晏荣贵, 黄 程

(崇州供电局, 四川 崇州 611230)

摘 要: 为了研究风电接入对现行电能计量装置影响的问题, 分析了双馈电机转子侧变频器的机理, 并给出了变频器输出电压的谐波成分。在此基础上根据现行电能计量装置工作机理, 说明了谐波影响电能计量的原理, 论证了风电接入将对电能计量的准确性和公平性造成较大影响, 最后给出了针对新情况下电能计量的改进措施。

关键词: 风电; 双馈电机; 谐波; 电能计量

Abstract: In order to study the impact of wind power integration on the existing electric energy metering devices, the working mechanism of the frequency converter in rotor side of double-fed motor is analyzed, and the harmonic components of the output voltage of the inverter are given. On this basis, according to the working mechanism of the existing electric energy metering devices, the principle of how the harmonics affecting electric energy metering is also described, and it is demonstrated that the wind power integration will lead to a great impact on the accuracy and fairness of electric energy metering. At last, some improvements of electric energy metering in the new circumstances are put forward.

Key words: wind power; double-fed motor; harmonic; electric energy metering

中图分类号: TM933 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0041-05

0 前言

近年来, 随着世界经济的高速发展, 以煤、石油、天然气等化石燃料为主的传统能源的消耗也越来越巨大。但这些燃料储量有限且不可再生, 所以人类正面临着空前严重的能源危机。为解决能源危机, 保护赖以生存的环境, 各国积极探索可用的新能源来替代传统能源。风能作为一种储量丰富且可再生的能源, 正越来越受到各国的青睐。中国也很重视风能的利用, 尤其是在风能发电这一块。到目前为止, 中国的风能发电总装机容量已超过 25 000 MW, 而且每年这个数字都在增长。可见, 未来中国风电产业将成为中国能源的重要组成部分, 这也给中国乃至世界经济的发展带来巨大的机遇^[1]。

然而, 风电的大量接入也会对电网带来一些负面冲击。风能发电机组大多采用双馈电机, 通过变速恒频的方式来获得正弦电压。为获得稳定的正弦电压, 往往要在发电机端装设电力电子设备来控制发电机的转速和频率^[2]。这些电力电子设备一般采用 SPWM 控制技术, 故而会给电网带来大量的谐波污染, 使电力系统电压、电流波形发生畸变^[3]。

谐波的一大危害就是给电能计量带来计量误差。电能计量是电网经济核算的依据, 电能计量精度直接关系到电力供需双方的经济效益和社会效益。电能表是电能计量的基本量具, 其准确度直接关系到电能计量的精度。随着电力系统规模的不断扩大以及风电等新能源的不断接入, 系统中非线性负荷如大功率整流和变频装置以及各种电力电子设备等不断增加, 电力系统受到的谐波污染也越来越严重。所以, 研究风电接入后谐波对电能计量的影响具有重要的现实意义^[4]。下面将分析风电接入后谐波产生的机理, 并对谐波给电能计量带来的影响做出分析, 最后, 对解决谐波问题的措施进行初探。

1 双馈电机谐波特性分析

1.1 双馈电机变频器工作原理

双馈电机是在异步电机和同步电机的基础上出现的一种新型电机, 它的定子绕组和转子绕组均采用三相绕组的连接方式, 结构与一般常见的绕线式异步电机相似。双馈电机的定子绕组和转子绕组分别和各自对应的三相对称电源相接, 其中定子绕组所接电源是固定工频电源, 而转子绕组所接电源则

是电压幅值、频率和相位能按照运行的具体要求进行调节的三相电源。由于电机的定子侧和转子侧都可以向外馈送电能,所以称之为双馈电机。图 1 为双馈电机的结构框图,图中双馈发电机的定子绕组直接和工频电网相连,稳定运行时其电压幅值、频率和电网电压的幅值、频率保持一致。转子绕组则由变频器供电,变频器输出频率、幅值变化的交流励磁电压来实现双馈发电机的变速运行,变频器的另一侧则直接或通过隔离变压器接入电网。

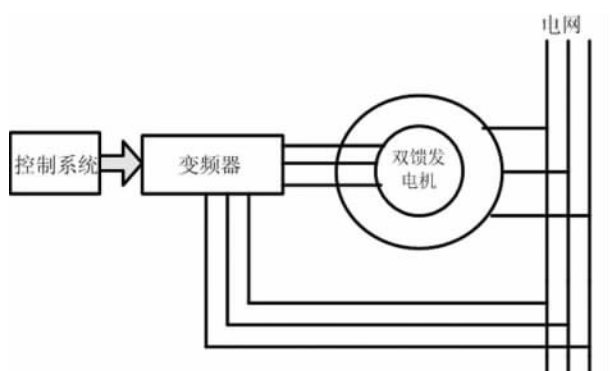


图 1 双馈发电机系统结构框图

1.2 双馈电机变频器中的谐波分析

目前双馈发电机广泛用于风电机组之中,电机本身的谐波可忽略不计,其最大的谐波源是转子回路上大功率变频器。由于风机变频器的容量约占机组容量的 15% ~ 20%,因此,变频器成为风机最大的谐波源。变频器的整流电路与电网侧连接,其产生的谐波直接注入电网,对电网影响最大,是整个变频器最主要的谐波源。

单相交交变频器由两组反向并联的晶闸管整流电路构成^[5],图 2 所示为 6 脉波桥式结构的单相交交变频器电路原理图。

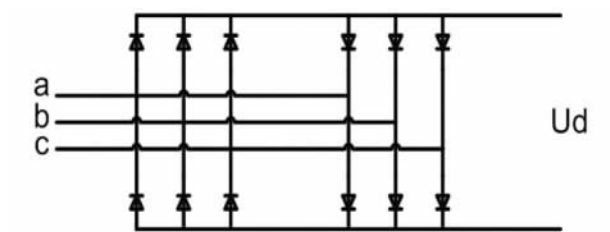


图 2 单相交交变频器电路原理

装置中晶闸管的触发控制机理基本上同整流电路相同,唯一不同的是触发角的控制计算上,为实现交交变频器输出电压正弦化,在晶闸管的触发控制方式上一般采用余弦交点法^[3,6]。所谓余弦交点法是一系列“余弦同步电压波” U_i 作为载波信号,用给定的调制电压波 U_r 作为调制信号,并由载波和调制

波的交点去决定整流电路中相应晶闸管的触发时刻和顺序。根据余弦交点法的原理可知输出电压是由输入电压的一些片段组成的,这必然引入大量谐波。

交交变频器每相的输出电压是正、反两组整流桥输出电压之和,改变正、反两组桥的切换频率就可实现频率的变化,这样由正组桥和反组桥组成的电路就可达到变频的目的。

$$U_d = U_{d+} \cdot p + U_{d-} \cdot n \quad (1)$$

其中,

$$U_{d+} = 2.34 U_\theta \cdot \cos(\beta) \quad (2)$$

$$U_{d-} = 2.34 U_\theta \cdot \cos(180 - \beta) \quad (3)$$

$p = 1, 0$ 分别表示正组桥工作和不工作; $n = 1, 0$ 分别表示反组桥工作和不工作; U_θ 为整流电路输入相电压; β 为触发角。

这里主要分析交交变频器输出电压谐波中的特征谐波含量,即在理想条件下根据变频器工作原理必然会产生谐波分量。设组成交交变频器的相控整流器脉波数为 p ,供电电源(电网)频率为 f_i ,则当相控整流器输出恒定直流时,输出的电压谐波最低频率为 $p \times f_i$,其他高次谐波频率为其整数倍。但是当交交变频器输出电压基波频率逐渐增大时,电压谐波频谱也逐渐以 $p \times f_i \times n$ 为中心向两边发散偏移,表现为边带谐波,也即所谓的“旁频谐波”。边带谐波不仅与变频器输入频率 f_i 有关,还与输出频率 f_o 有关,表现为两者的拍频。初步分析表明,电压型交交变频器输出电压波形与以下因素有关。

- (1) 变流器脉波数 p ;
- (2) 输入频率 f_i ;
- (3) 输出频率 f_o ;
- (4) 电压调制深度 r_o ;
- (5) 负载功率角 φ_o ;
- (6) 触发角控制方法。

为了分析变频器输出电压的谐波含量,充分分析谐波源的谐波特性,在前面已有的对交交变频器结构和工作原理介绍基础上,用开关函数法^[7-9]分析理想条件下交交变频器输出电压谐波特性。

开关函数法的基本思想就是将被分析的波形表示成一系列已知波形(通常是三角函数波)与某些开关函数的乘积和的形式,只要将其中的开关函数展开成谐波序列,通过整理化简,可得到被分析波形的三角级数表达式。

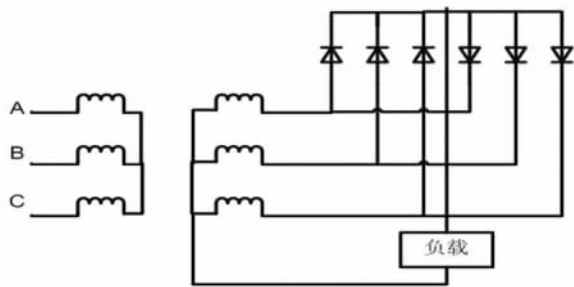


图3 零式结构的单相交变频器

由于各种交交变频器的结构一般都由三相零式整流电路为基本单元组合而成,因此通过分析结构最为简单的零式变频电路的输出电压,便可导出其他形式交交变频器的输出电压表达式。

参考文献[10]利用开关函数法可以推导出有环流模式交交变频器输出电压解析表达式。

$$v_0 = c \frac{3\sqrt{3}V_{ph}}{2\pi} \left\{ 1.1r_0 \sin\theta_0 + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{3q} \left[\frac{a_{(pq-1)(2n+1)}}{pq-1} + \frac{a_{(pq+1)(2n+1)}}{pq+1} \right] \times [\sin(pq\theta_1 + [2n+1]\theta_0) - \sin(pq\theta_1 - [2n+1]\theta_0)] \right\} \quad (4)$$

其频谱分布为

$$f_k = |pqf_i \pm (2n+1) \cdot f_0| \quad (5)$$

其中, $q=1, 2, \dots; n=0, 1, 2, \dots, 3q$

系数 p, c 与变频器类型有关。

$p=6$ 为6脉波电路, $p=12$ 为12脉波电路;

$c=1.0$ 为6脉波零式或12脉波零式结构;

$c=2.0$ 为6脉波桥式或12脉波并联桥式结构;

$c=4.0$ 为12脉波串联桥式结构。

根据上面的讨论,由于双馈发电机采用交交变频器励磁,因此转子电压中不但含有转差频率的基波电压,同时还含有大量的零序、正序和负序谐波分量。将变频器输出电压中的基波电压分量和各次正、负序谐波电压分量分别看为一系列独立励磁电源,使它们分别独立作用在双馈发电机转子回路上,这样就可以计算出基波电压分量和各次正、负序谐波电压分量在定子侧引起的基波、谐波电流的幅值。

通过本节的论证说明并网后双馈发电机定子侧电压波形含有丰富的谐波,严重畸变的波形将对电能质量造成影响,此时注入电网的谐波主要表现为定子电流谐波分量,发电机发出的电能质量不能满足电网要求,必须采取相应的措施。

2 谐波对电能计量的影响

2.1 不同形式负载下的谐波分析

电力系统中的负载根据其特性可分为线性负载和非线性负载。线性负载参数不随电压或电流变化而变化,而非线性负载参数则会随电压或电流变化而变化。

这里采用图4的简化电路分析谐波电能的来源。电压源 $u(t)$ 采用工频正弦电压,电路中 $Z_s = R_s + jX_s$ 为电源内阻抗, $Z_l = R_l + jX_l$ 为线路等值阻抗, $Z_L = R_L + jX_L$ 为线性负载阻抗, $Z_{FL} = R_{FL} + jX_{FL}$ 非线性负载阻抗。

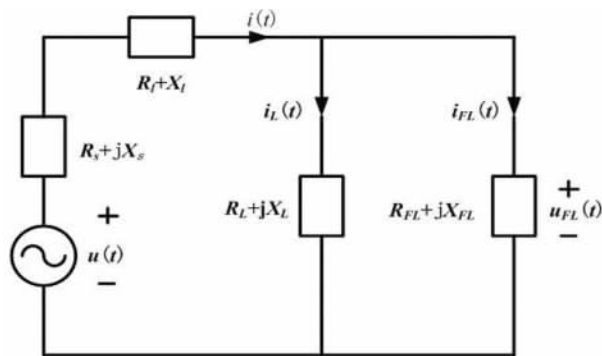


图4 系统简化电路

由于非线性负载的存在,从而系统电路中的电压、电流为基波分量和谐波分量的叠加。

$$i(t) = i_l(t) + \sum_{n=2}^N i_n(t) \quad (6)$$

$$i_L(t) = i_{L1}(t) + \sum_{n=2}^N i_{Ln}(t) \quad (7)$$

$$i_{FL}(t) = i_{FL1}(t) + \sum_{n=2}^N i_{FLn}(t) \quad (8)$$

$$u_{FL}(t) = u_{FL1}(t) + \sum_{n=2}^N u_{FLn}(t) \quad (9)$$

电压源提供给系统的电能为

$$W = \int_0^t u(t) i(t) dt = \int_0^t u(t) i_l(t) dt + \sum_{n=2}^N \int_0^t u(t) i_n(t) dt \quad (10)$$

式(10)中第一项为电压源向系统提供的基波电能,第二项为电压源向系统提供的谐波电能,根据电路正交原理^[11],该项为0,即正弦电压源不向系统提供谐波电能,所以

$$W = W_1 = \int_0^t u(t) i_l(t) dt \quad (11)$$

电压源内阻和线路吸收的电能 W_{sl} 为

$$W_{sl} = \int_0^t (R_s + R_l) i_l^2(t) dt + \sum_{n=2}^N \int_0^t (R_s + R_l) i_n^2(t) dt$$

$$= W_{sl} + \sum_{n=2}^N W_{ln} \quad (12)$$

线性负载吸收的电能 W_L 为

$$W_L = \int_0^t R_L i_{Ll}^2(t) dt + \sum_{n=2}^N \int_0^t R_L i_{Ln}^2(t) dt$$

$$= W_{Ll} + \sum_{n=2}^N W_{Ln} \quad (13)$$

非线性负载吸收的电能 W_{FL} 为

$$W_{FL} = \int_0^t R_{FL} i_{FLl}^2(t) dt + \sum_{n=2}^N \int_0^t R_{FL} i_{FLn}^2(t) dt$$

$$= W_{FLl} + \sum_{n=2}^N W_{FLn} \quad (14)$$

根据能量守恒定律有

$$W = W_{sl} + W_L + W_{FL} \quad (15)$$

即

$$\left. \begin{aligned} \text{基波能量守恒: } W_1 &= W_{sl1} + W_{Ll} + W_{FLl} \\ \text{谐波能量守恒: } 0 &= \sum_{n=2}^N W_{sln} + \sum_{n=2}^N W_{Ln} + \sum_{n=2}^N W_{FLn} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

故

$$\sum_{n=2}^N W_{FLn} = - \left(\sum_{n=2}^N W_{sln} + \sum_{n=2}^N W_{Ln} \right) < 0 \quad (17)$$

式(17)表明非线性负载是系统的谐波来源,由于非线性负载吸收系统的电能,即 $W_{FL} > 0$, 所以根据式(14)可知 $W_{FL} < W_{FLl}$, 而非线性负载本身是吸收消耗功率的,这就意味着非线性负载产生的谐波能量是由吸收的基波电能中的一部分转换而来的^[12]。

3.2 电能计量表因谐波产生的误差分析

现如今,常用的电能计量表主要有两种,即感应式电能表和电子式电能表。无论是感应式电能表还是电子式电能表都能对基波电能和一定频率范围内的谐波电能进行计量,但因其计量时没有完全把谐波功率考虑进去,故而在含有大量谐波的电网中会产生很大的计量误差。下面将对两种电能表误差产生的原因做出简单分析。

谐波对感应式电能表的误差分析,针对不同的电压电流波形,则从以下3个方面来讨论。

(1) 当电压为正弦波,电流发生畸变时,由于磁路的非线性使电压磁通中出现与谐波电流磁通同阶次的分量,产生附加的驱动力矩。当电流畸变增大时,感应式电能表误差随之增大且为正方向,但电流畸变小于10%时,电能表计量误差在其准确度要求

范围之类^[13]。

(2) 当电流为正弦波,电压发生畸变时,谐波电压及电流磁通要产生附加的自制动力矩^[13]使感应式电能表产生负误差,但电压畸变率在30%以内时其计量准确度仍在规定范围之内。

(3) 存在谐波功率时,感应式电能表基本忽略了5次以上的高次谐波功率。感应式电能表少计量3次谐波5%~30%,5次谐波80%~95%。但值得注意的是,谐波的功率潮流也会对其产生计量误差。当用户为线性用户时,基波和谐波潮流一致,电能表计量的能量大于基波能量,为基波能量和谐波能量之和,这就使线性负载用户吸收了谐波却多交了电费;而用户为非线性用户时,基波和谐波潮流方向,电能表计量能量小于基波功率,为基波能量和谐波能量之差,这样非线性负载用户产生了谐波却少交了电费,给电力部门带来巨大的经济损失^[14]。

而电子式电能计量表分热电乘法器式及时分割乘法器式电能表。文献[13]将电子式电能表分为A、B两类,A类能反映宽频带范围内电能,B类只能反应基波和二次谐波电能。相对于感应式电能表,电子式电能表的计量误差要小一些,但是都忽略了谐波功率的计量,这是现行电能计量装置的通病。类似于感应式电能表,可从两个方面来考虑电子式电能表的计量误差。

(1) 当电压和电流信号只有一个发生畸变,而另一个还是正弦波时,根据正旋函数的正交性,在这种情况下电子式电能表的误差变化很小,可认为不变。

(2) 当存在谐波功率时,对于能计量谐波功率的电能表,同样可以按其频响特性来进行分析。一般来说,频率越高,带来的计量误差就越大。而误差的来源跟很多因素有关,比如电子式电能表的机械性能,乘法器内部和外部的各项参数等等都会影响到其计量的准确性。对于电子式电能表的计量误差可以建立一个数学模型,但其过程相当繁琐复杂,这里就不予分析和说明了。这里,可以参考文献[15]中的模型。

3 解决措施的初探

根据前面的分析,双馈发电机的大功率变频器是非线性负载的一种,会给系统带来大量谐波,而谐

波对于电能计量装置(主要是感应式和电子式电能表)会带来计量误差,从而给电力部门和用户带来巨大的经济损失。这也是风电的接入会给系统的电能计量带来负面影响的直接原因。

研究风电接入的谐波环境后,针对目前的计量现状,人们已经有了一些初步的措施来应对谐波对电能计量的影响。为了减小谐波对电能计量的影响,可以在计量装置或者双馈发电机的变频器上加装滤波装置,滤掉谐波电流。

除此之外,现行的计量方式存在缺陷。由第3部分的分析,知道无论是对于感应式电能表还是电子式电能表,在计量线性用户用电和非线性用户用电时都会出现误差。线性用户不但多交电费,而且受到谐波损害;非线性用户虽然污染了电网,反倒少交了电费。由此可见,对现行的电能计量方式进行改变也十分重要。解决的方法可以采用分别计量基波电能和谐波电能,并且同时记录谐波电能方向的计量方式。按照电力成本合理分摊的电价体系,对吸收谐波电能的客户在电力价格或用电量上适当给予谐波分量补偿;对向电网注入谐波电能的客户要给予电力成本合理分担,按谐波分量的比例对其用电价格进行调整或处罚,是非常有必要的^[16]。计量方式要改变,首先还得从计量装置的改进出发,比如采用傅氏算法电能计量装置,这样可以把各次谐波产生的有功电能和无功电能都考虑进去,其结果肯定更加接近系统实际^[17-18]。

4 结 语

在国家未来的电网结构中,风电所占的比例会越来越大,其并网带来的谐波问题对电能计量的影响也会与日俱增。而如今,社会对电能质量的要求也越来越高,那么如何抑制谐波,如何进一步提高电能计量的精度这个课题将会重新引起人们的重视。针对此问题,对风电接入产生谐波的原因和谐波对电能计量的影响进行了分析,并由此对去除风电谐波和改良电能计量的措施进行了初步性探索。

参考文献

[1] 田德. 国内外风力发电技术的现状与发展趋势[J]. 新

能源产业,2007(1):51-56.

- [2] Manfred Stiebler. 风力发电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2011
- [3] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [4] 高笑,王步云,龙燕,等. 电力谐波及其对电能计量的影响[J]. 后勤工程学院学报,2004.
- [5] 朱宁. 风力发电 PWM 变流器及其控制策略[D]. 北京:北京交通大学,2007.
- [6] 任永峰. 并网型交流励磁双馈电机风力发电系统研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2008.
- [7] 李斌. 变速恒频风力发电系统的运行仿真及谐波特性研究[D]. 南昌:南昌大学,2010.
- [8] 万航羽. 双馈风力发电机建模及谐波分析[J]. 电机电器,2008,27(5):53-57.
- [9] 林成武,王凤翔,姚兴佳. 变速恒频风力发电机励磁控制技术[J]. 中国电机工程学报,2003(11):122-125.
- [10] 王文举. 交流励磁发电机输出电力谐波抑制[D]. 杭州:浙江大学,2001.
- [11] 周守昌. 电路原理第2版(上册)[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [12] 韩如成,赵旭,等. 谐波对电能计量影响的分析及对策研究[J]. 太原重型机械学院学报,2002,23(3):216-220,240
- [13] 高次谐波对不同类型电能表计量误差影响的分析[R]. 上海表计工厂技术报告,1991.
- [14] 杨本渤. 谐波对电能计量仪器的影响[J]. 电测与仪表,1993,30(11):5-10,21.
- [15] 许仪勋. 谐波对电能计量的影响与对策[D]. 上海:上海交通大学,2008.
- [16] 张卓,骆盛君. 对谐波影响下的电能计量方式的探讨[J]. 广东电力,2002,15(4):55-57.
- [17] 赵建国,石岩. 电能计量中的谐波分析[J]. 中国电力,1997,30(12):21-24.
- [18] 郑春强. 谐波对电能计量的影响[D]. 济南:山东大学,2008.

作者简介:

晏荣贵(1978),男,西南交通大学毕业,主要研究方向为发电厂及电力系统与电能计量;

黄程(1979),男,中国农业大学毕业,主要研究方向为电力系统及其自动化。

(收稿日期:2012-03-23)

基于智能开关的广州 10 kV 架空馈线自动化新模式

宋友文, 廖伟炎

(中国南方电网责任有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 根据广州地区 10 kV 架空线路的实际情况, 提出两种基于柱上智能开关的广州地区 10 kV 架空馈线自动化新模式, 应用了柱上智能开关、线路设备保护、智能控制器和 PLC 控制器, 可实现二遥监测、减少变电站出线开关跳闸、缩小停电范围、自动隔离故障、迅速恢复非故障区域的正常供电等功能。分阶段在广州不同地区对馈线自动化新模式进行试点, 结果表明架空线路馈线自动化新模式适合广州实际, 在广东地区具有广阔的应用前景。

关键词: 馈线; 自动化; 智能开关; 线路保护; 应用

Abstract: Based on the actual situation of 10 kV overhead line in Guangzhou, the new automation mode for 10 kV overhead feeder in Guangzhou based on two kinds of pole-mounted smart switches is proposed. It uses the pole-mounted smart switch, line equipment protection, intelligent controller and PLC controller, which can realize the functions such as the secondary remote monitoring, decreasing the tripping times of outlet switch in substation, reducing the range of power interruption, isolating the fault automatically, recovering the normal power supply for the non-trouble area quickly etc. The pilot for the new automation mode of feeders is carried out in different areas of Guangzhou by stages. The results show that the new automation mode for 10 kV overhead feeder is suitable for the actual situation of Guangzhou, which will have a wide application in Guangdong area.

Key words: feeder; automation; smart switch; line protection; application

中图分类号: TM762 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)05-0046-05

0 引言

馈线自动化是配电线路自动化的重要组成部分^[1]。近年来, 随着馈线自动化技术的不断发展, 柱上开关具有了自动隔离故障、测量、保护、通信等功能。在架空线路上安装具有自动化功能的柱上开关(这里统称为柱上智能开关), 发生故障时柱上开关能自动隔离故障区域, 缩短故障查找的时间, 迅速恢复非故障区域的正常供电。同时, 馈线自动化能显著降低馈线出线开关的跳闸次数, 提高重合闸成功率, 是提升配电网架空线路运行水平的有效手段。因此馈线自动化的实施对提高供电可靠性具有非常重要的意义。

目前广州地区 10 kV 架空线路覆盖范围广阔, 跳闸率高, 柱上开关数量严重不足, 这些因素直接导致架空线路所在的农村地区供电可靠率低, 远远低于市中心区的供电可靠性水平, 对广州地区供电可靠性水平造成了很大的影响。因此, 为了提高广州

地区的供电可靠性水平, 必须寻求有效的技术手段弥补架空线路现状的不足。实施架空馈线自动化就是一种主要的技术手段。

从广州地区 10 kV 架空线路现状出发, 对柱上智能开关的应用进行深入探讨, 提出实现遥测、遥信功能, 应用线路设备保护的架空馈线自动化新模式, 实现减少馈线出线开关跳闸, 缩小停电范围, 提高供电可靠性的目标。

1 广州地区 10 kV 架空线路现状

1.1 广州 10 kV 架空馈线规模

广州地区 10 kV 馈线情况如表 1 所示, 10 kV 架空线路主要集中在城镇和农村地区, 线路平均长度约 11.6 km, 以放射型线路为主, 分支线路多。

表 1 广州地区 10 kV 馈线情况

10 kV 馈线总体情况		架空线	
回路数	总长度 /km	总长度 /km	占馈线比例 /%
3 774	23 796	10 787	45.3

1.2 广州10 kV 架空馈线跳闸特点

(1) 永久故障跳闸以架空线路为主

根据2008年10 kV 馈线共发生永久故障跳闸统计(见表2),架空线路永久故障跳闸占了82.7%。

表2 2008年广州地区10 kV 馈线故障情况

总跳闸次数 /次	架空线永久故障 跳闸比例 /%	电缆线路 跳闸比例 /%
1 090	82.7	17.3

(2) 架空线路跳闸以瞬时性跳闸为主

2008年架空线路跳闸4 231次,78.7%为瞬时性跳闸(重合闸成功)。

(3) 架空线路跳闸以单相接地故障为主

广州地区10 kV 配电网是中性点小电阻接地系统,单相接地故障将引起变电站10 kV 出线开关零序保护动作。2008年单相接地故障引起的零序保护跳闸占架空线路跳闸次数的66%。

(4) 用户出门跳闸逐年增长

2008年因用户出门事故引起的10 kV 架空馈线跳闸占架空线路跳闸次数的6.7%,同比增加1.3个百分点。

1.3 广州10 kV 架空馈线自动化实施现状

从1999年开始^[2],广州供电局开展了电压型馈线自动化的初步实施,累计安装柱上自动化开关700多台,主要实施模式是采用电压型自动化柱上开关,配合馈线出线开关二次重合闸、实现故障区域的隔离。这种电压型馈线自动化模式具有设备配置简单、隔离故障成功率高的特点^[3],但存在以下不足。

(1) 隔离故障需要馈线出线开关多次分闸、合闸配合,造成非故障区域的多次重复停电。

(2) 馈线出线开关跳闸次数多。

(3) 隔离故障所需时间长,需要逐段延时合闸分段负荷开关。

(4) 不能实现馈线潮流、开关工况的远方监视控制。

(5) 不能缩小停电区域,导致非故障段停电。

广州地区架空馈线以自然延伸辐射型为主,主干线上带有多条分支线,分支线再延伸出多条小分支线,线路结构复杂,而且分支线上的每一次永久或瞬时故障均会引起全条馈线停电,影响范围较大,因此传统的电压型馈线自动化模式已不能满足广州地区配电网实际发展需求,需要探讨一种功能丰富、适

合广州地区的馈线自动化新模式。

2 柱上智能开关

柱上智能开关指具有电流电压信号采集、线路保护、智能就地自动隔离故障、采用多种通信方式等功能的柱上开关,由一次开关设备、自动化控制器和电源变压器3部分组成。按照开关类型可分为柱上智能断路器、柱上智能负荷开关、柱上智能用户分界负荷开关3类。

(1) 柱上智能断路器

柱上智能断路器是配置自动化控制单元和保护单元的柱上断路器,满足馈线自动化的功能要求,可切断相间短路电流、负荷电流、零序电流。可装设在主干线和分支线上,配备三相电压或电流互感器、零序电流互感器。可带两种保护配置,一种配置带时限的过流或速断保护、零序保护,另一种配置重合闸后加速保护。

根据功能位置分类可分为主干线分段断路器、分支线分界断路器、用户分界断路器3种。

(2) 智能柱上负荷开关

智能柱上负荷开关是配置自动化控制单元的柱上负荷开关,满足馈线自动化的功能要求,可切断负荷电流、零序电流,并且可灵活配置为电流型或电压型。可装设在主干线和分支线上,配备三相电压和电流互感器和零序电流互感器。具有有压延时合闸、无压延时分闸等功能,可自动隔离故障区域。

根据功能位置分类可分为主干线分段负荷开关、分支线分界负荷开关两种。

(3) 用户分界负荷开关与柱上智能负荷开关功能基本一致,配置了自动化控制器,可自动切除用户侧单相接地故障,不引起上一级线路跳闸。配备三相电流互感器和零序电流互感器。

(4) 馈线自动化智能控制器(feeder terminal unit, FTU)

馈线自动化控制器可与断路器、重合器、负荷开关连接,可设置多种控制参数,灵活使用多种通信方式,使得柱上开关实现馈线自动化两遥功能。控制器可选择配备多种保护功能,包括配置带时限的过流或速断保护、零序保护、电压时限型、电流时限型控制等模式。

3 10 kV 架空馈线自动化新模式的主要特点

架空馈线自动化新模式应用柱上智能断路器或柱上智能负荷开关将馈线分成若干区段,实现对馈线的分段监测、控制,以实现二遥为核心,应用线路设备保护与变电站保护进行有效的配合。主要特点如下。

(1) 减少变电站出线开关跳闸

馈线出线开关跳闸将影响整条馈线的全部供电区域,停电影响范围最大。馈线发生故障时,通过增设分段断路器的方法,利用线路设备保护尽可能在出线开关跳闸之前有效隔离故障区域,减少出线开关动作。

(2) 提高变电站出线开关重合闸成功率

配合二次重合闸,馈线出线开关跳闸后应依靠自动化开关自动切除永久性故障区域,最终重合闸成功,快速恢复非故障区域供电,提高重合闸成功率,减少重合闸不成功的跳闸次数。

(3) 减少靠近电源侧的开关动作次数

靠近电源侧越近的开关,其跳闸引起的停电范围也越大,应尽量使靠近电源侧的开关少动作。

(4) 自动隔离用户侧单相接地故障

由于广州供电局 10 kV 配电网是中性点小电阻接地系统,单相接地故障频繁引起馈线出线开关零序保护动作,因此采取有效措施避免单相接地故障所引起的跳闸,在用户出门处设置用户分界负荷开关自动切除单相接地故障。

(5) 控制单元灵活采用多种通信方式,可上传开关状态信号

馈线自动化开关控制器(FTU)应根据需求灵活配置多种通信模块,开关动作后控制器(FTU)可采用无线、载波、光纤等多种通信方式将告警信号上传至后台,缩短运行人员的故障查找时间。架空线路覆盖范围广阔,前期建设可使用无线通信方式。

4 10 kV 馈线自动化功能新模式

4.1 断路器、负荷开关与智能控制器配合(模式 1)

(1) 如图 1 所示,线路设备配置如表 2 所示。其中方框表示断路器,圆圈表示负荷开关;开关填充黑色表示闭合,填充白色表示分闸;断路器、负荷开

关均与馈线自动化控制器相连接。

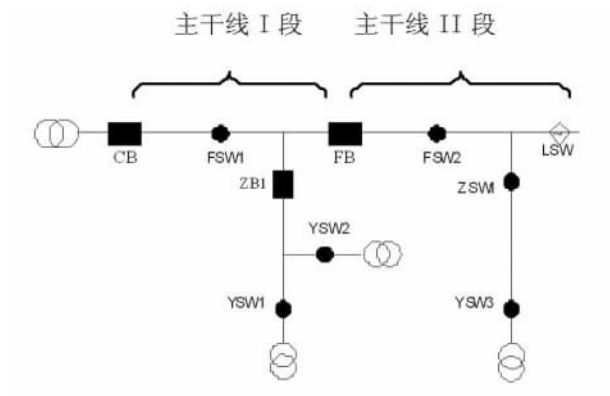


图 1 模式 1 典型配置示意图

表 3 模式 1 设备配置

符号	名称	功能	参数
CB	变电站馈线出线断路器	时限保护 二次重合闸	过流 0.30 s, 零序 1.0 s
FB	主干线分段断路器	时限保护 二次重合闸	过流 0.15 s, 零序 0.6 s
FSW1 FSW2	电压型主干线分段负荷开关		
ZB1	分支线分界断路器	时限保护 二次重合闸	过流 0.15 s, 零序 0.6 s
ZSW1	电压型分支线分界负荷开关		
YSW1 ~ YSW3	分支线用户分界负荷开关		
LSW	联络开关		

(2) 故障处理

故障点: ZSW1 和 YSW1 之间发生永久性故障。

步骤 1: FB 在 0.15 s 内先于 CB 保护动作跳闸, CB 不动作。FSW2、ZSW1、YSW3 两侧失压自动分闸。

步骤 2: FB 在 5 s 之后重合闸。

步骤 3: FSW2 一侧有压,在延时 5 s 后合闸,合闸后没有检测到故障电流,FSW2 在 3 s 后闭锁分闸。

步骤 4: ZSW1 一侧有压,在延时 5 s 后合闸。

步骤 5: 由于是永久故障,FB 再次跳闸,ZSW1 分闸并闭锁合闸,FSW2 保持合闸。

步骤 6: FB 在 60 s 后第二次重合闸。ZSW1 成功隔离故障,隔离故障约 75 s。

故障隔离后线路情况,如图 2 所示。

(3) 主要实现功能

①设置主干线分段断路器(配备时限保护)将主干线分为两段,第二段发生故障由主干线分段

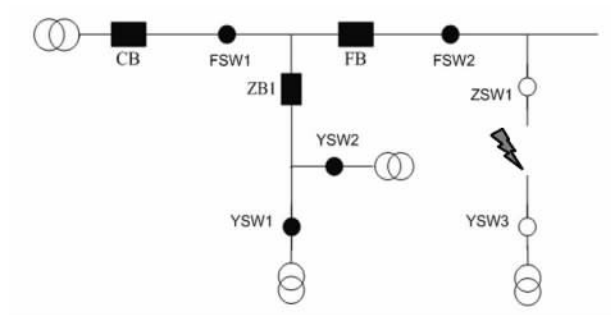


图2 模式1故障隔离示意图

断路器自动切除,不会引起变电站出线断路器跳闸,相当于减少了50%变电站出线断路器的跳闸,同时缩小了故障引起的停电范围,保障了上一级线路的正常供电。

②提高重合闸成功率到90%以上。

③分段负荷开关具有分闸闭锁功能,减少了恢复供电时逐级合闸的时间,减少了非故障段的停电时间。

④用户分界负荷开关的应用有效隔离了用户侧单相接地故障,不会引起上一级线路跳闸,减少了用户出门事故。

⑤通过通信手段即可实现故障的迅速隔离,若配合通信手段可实时监控各开关的状态,开关动作时向后台发送故障信号,实现故障的快速定位。同时,实时采集监视馈线潮流和开关运行信息。

(4) 线路保护与变电站开关保护的配合

广州地区变电站出线开关过流保护时间为0.3 s,零序保护时间为1 s;主干线分段断路器过流保护时间为0.15 s,零序保护时间为0.6 s,两级过流保护的时间级差为0.15 s,零序保护的时间级差为0.4 s。根据上下级保护时间级差的配合原则。

$$\Delta T = T_1 + T_2 + T_d + T_y$$

T_1 为变电站保护时间继电器的正、负误差,取 ± 30 ms; T_2 为线路保护时间继电器的正、负误差,取 ± 30 ms; T_d 为断路器跳闸时间; T_y 为裕度时间取 30 ms。

相间故障: 断路器跳闸时间 $T_d \leq 150 - 30 - 30 - 30 = 60$ ms,即断路器保护动作时间和断路器分闸时间之和 ≤ 90 ms;

接地故障: 断路器跳闸时间 $T_d \leq 400 - 30 - 30 - 30 = 310$ ms,即断路器保护动作时间和断路器分闸时间之和 ≤ 340 ms。

目前柱上断路器的分闸时间一般为 40 ~ 60

ms,在裕度时间允许范围之内,过流保护时间满足级差保护配合要求,零序保护时间配合裕度更高,也完全满足级差保护配合要求的。因此模式1中使用线路保护与变电站开关保护进行配合是可行的。

4.2 断路器、负荷开关与 PLC 控制器配合(模式2)

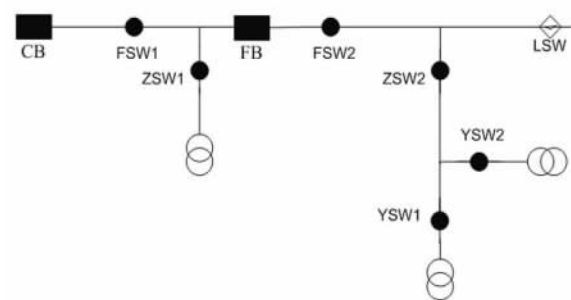


图3 模式2典型配置示意图

(1) 如图3所示,线路设备配置如下。

CB 为带时限保护(过流 0.30 s, 零序 1.0 s) 和二次重合闸功能的馈线出线断路器;

FB 为带时限保护(过流 0.15 s, 零序 0.6 s) 和二次重合闸功能的主干线分段断路器;

FSW1 ~ FSW2 为主干线分段负荷开关;

ZSW1 ~ ZSW2 为分支线分界负荷开关;

YSW1 ~ YSW4 为分支线用户分界负荷开关;

LSW 为联络开关;

方框表示断路器,圆圈表示负荷开关;

开关填充黑色表示闭合,填充白色表示分闸;

采用电力线载波通信(power line communication),馈线自动化控制器带有专用 PLC 通信装置。

(2) 故障处理

故障点: FSW1 和 FSW2 之间发生永久故障。

步骤 1: CB 保护动作跳闸, FSW1、FSW2、FB、ZSW1、ZSW2、YSW1 均不动作。

步骤 2: CB 在 5 s 之内第一次重合闸。

步骤 3: 由于是永久故障, CB 再次跳闸, 各个负荷开关之间通过 PLC 通信, 快速判断故障点位置, 故障点邻近开关分闸, 其余开关不动作。

步骤 4: CB 在 60 s 之后第二次重合闸, FSW1、FSW2 成功隔离故障点, 可合上 LSW 联络开关转供。隔离故障时间约为 65 s。

故障隔离后线路情况, 如图 4 所示。

(3) 主要实现功能

①设置主干线分段断路器(配备时限保护) 将主干线分为两段, 第二段发生故障由主干线分段

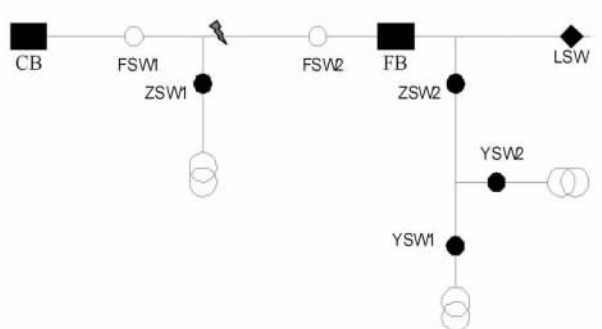


图4 模式2故障隔离示意图

断路器自动切除,不会引起变电站出线断路器跳闸,相当于减少了50%变电站出线断路器的跳闸,同时缩小了故障引起的停电范围,保障了上一级线路的正常供电。

②利用架空电力导线作为通信载体,解决了馈线自动化的通信难题,线路上每台开关可两两通信。

③由于采用PLC通信功能以及故障电流方向判别,在永久故障发生后瞬间即可判定故障所在区域并进行跳闸隔离,无需逐级延时合闸,大大缩短了故障区间定位隔离时间。

④仅有最接近故障区域的开关跳闸动作,非邻近故障区域的开关无需跳闸,减少开关不必要的动作,有效地延长开关寿命,并且大大缩短了非故障区域的供电恢复时间。

⑤对于瞬时故障,可以利用开关的过电流次数计数功能,通过二次重合闸来判定是否瞬时故障,完成永久故障区间的隔离。

模式2适用于多分支长距离馈线,可在广州地区选择农网线路进行试点。

5 其他关键问题

(1) 终端后备电源问题

方案中断路器和负荷开关需要配备蓄电池作为后备电源,目前户外终端后备电源普遍应用铅酸电池而不采用锂电池,这是由于锂电池耐高温性能一般,不宜长时间运行在户外高温环境之下,因此宜采用铅酸电池,并成立专业的维护队伍对电池进行定期维护,终端具备电池告警功能,并上传告警信号。

(2) 转供电

当线路需要转供电时,先将智能柱上开关从自动状态转换到手动状态,然后再合上联络开关,转电期间暂时退出自动化功能,避免出现保护失配。

• 50 •

(3) 控制器的防盗和防雷击

控制器由于安装在杆上靠下的位置,比较容易被盗,并且防雷击措施不足,2008年白云局已发生多起被盗及控制器雷击事件。

(4) 通信方式

对于方案1在实施第一阶段采用无线公网(2G和3G)通信方式,实施简单,应用灵活,不受地域限制,在条件成熟后可试点架设OPGW地线光缆,开展光纤通信应用。

6 馈线自动化新模式实施及应用前景

广州供电局在2009年6月启动了第一阶段架空线路自动化项目,实施范围包括荔湾、白云等297条架空线路,涉及线路长度3564 km,占广州地区架空馈线总长度的35%,新增柱上智能断路器306台,柱上智能负荷开关948台,主要应用模式1。而模式2适用于多分支长距离馈线,因此在增城地区选择了5~10条农网线路进行试点。2010年7月启动了第二阶段架空线路自动化项目,实施范围包括番禺、花都、增城、从化100%的架空馈线。广州供电局10 kV故障跳闸次数预计将显著下降,重合闸成功率提高到90%以上。

广东地区10 kV架空线路总长度84799 km,占线路总长度60%。广东大部分地区电网以架空线路为主,与广州地区具有相似的特点。随着柱上智能开关设备质量水平的不断提高和功能不断丰富,架空线路自动化新模式将在广东地区具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 陈堂,赵祖康,陈星莺. 配电系统及其自动化技术[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [2] 江文东,苏忠阳. 10 kV架空线配电自动化系统的初步实施[J]. 继电器,2002(8):22-25.
- [3] 海涛,陈勇,武建文. 以电压式馈线自动化为基础的配电自动化方案[C]. 第一届配电网自动化会议论文集,烟台:1998.

(收稿日期:2012-02-13)

电力光纤通信的技术原理及其应用前景分析

肖 丽

(四川省电力公司眉山公司, 四川 眉山 620010)

摘要: 随着智能电网的建设, 智能电表在国内居民用户大批量推广并已开始全面挂网运行。对终端用户大量用电信息数据的采集, 则是智能电网建设过程中的重要基础。为提高数据采集的效率, 首先对传统用电信息采集系统进行了对比分析, 找到了各个系统的不足之处; 然后对光纤信息传播技术的工作原理及发展现状进行了简单介绍, 最后针对目前信息采集系统的不足, 对电力光纤 EPON 技术应用的可行性进行了分析。以上理论分析, 对未来电力光纤入户提供了理论指导。

关键词: 智能电网; 用电信息采集; 光纤; EPON; 可行性

Abstract: With the construction of smart grid, a large number of intelligent watt-hour meters have been spreaded and used in China. Moreover, the acquisition of the huge electric energy data of the end-users becomes an important foundation of the construction of smart grid. In order to improve the efficiency of the data acquisition, firstly, the traditional electric energy data acquisition systems are compared and analyzed to find out their shortages. Then, the working principle and development situation of the optical fiber communication are introduced briefly. At last, as viewed from the shortages of the current electric energy data acquisition system, the feasibility of EPON technology is analyzed. The above theoretical analysis is a good guidance for the future application of power optical fiber.

Key words: smart grid; electric energy data acquisition; optical fiber; EPON; feasibility

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0051-04

0 引言

电力光纤入户是指在低压通信接入网中采用光纤复合低压电缆, 将光纤随低压电力线铺设, 实现到表到户, 配合无源光网络技术, 承载用电信息采集、智能用电双向交互、三网融合等业务。电力光纤到户能够满足国家智能电网建设的需求, 全面支撑国家“三网融合”战略, 目标是在“三网融合”的基础上结合物联网的应用, 人们将可以方便地实现实时控制式的“智能家庭体验”, 如在家里的电视、手机等终端上, 遥控指挥冰箱、空调、洗衣机、电饭煲等家电设备, 甚至开关电动门窗等。其中, 用户用电信息采集是构建智能电网的重要基础。采集系统的优劣将直接影响智能电网的建设, 因此有必要对采集系统的优劣进行全面的分析。

目前, 电力通信网络在骨干层上已建立了以同步数字体系(SDH)、多业务传输平台(MSTP)技术为基础的光纤传输系统, 并形成向智能化自动交换

光网(ASON)^[1]技术发展的趋势。但在接入网上, 采用何种通信方式解决电力通信终端的问题, 一直缺少有效的解决办法。以往的数据采集是通过电力线载波、GPRS等方式实现数据采集。GPRS通道用的是移动公司的公共网络, 不仅大量占用公共资源, 而且存在电力信息安全和抄表费用等问题; PLC通道(电力线载波)谐波干扰大, 数据传输量小, 抄表成功率低; 因此都无法满足智能电网的要求。以太网无源光纤网络(EPON)^[2-3]的出现将有效地解决了这个难题。

因此, 首先全面地分析了现有用电信息采集系统的不足之处, 然后对光纤信息传播技术的工作原理及发展现状进行了简单介绍, 最后针对目前信息采集系统的不足, 对电力光纤 EPON 技术应用的可行性进行了分析。以上理论分析, 对未来电力光纤入户提供了理论指导。

1 电力光纤应用背景

智能电网要求配电侧实现信息采集全覆盖, 数

据全采集,达到实时了解负荷情况的要求,通过电力用户负载情况来预测电网的容量,进一步提高发电、输、配电的效率,改变传统的粗放式的电力供应,达到节省能源的目的。以往的数据采集是通过电力线载波、GPRS 等方式实现数据采集。GPRS 通道用的是移动公司的公共网络,不仅大量占用公共资源,而且存在电力信息安全和抄表费用等问题; PLC 通道(电力线载波)谐波干扰大,数据传输量小,抄表成功率低;因此,上述数据传输方式都不能很好地服务于智能电网建设,不能满足智能电网运行过程中智能电表与主站间各种数据的大容量、高速率、高可靠性传输。

随着光纤信道成本的降低,光电子器件的进步,光收发模块和光纤的价格大大降低,网络系统的普及,光纤到户已经成为国家电网公司建设智能电网的一个重要环节。目前为止,配电侧的 AMI 和发电侧的风光储联合发电以及电力光纤到户成为智能电网建设中进展最快的领域。因此,具有维护成本低、系统可靠、扩容方便的光纤传输智能电表及光纤抄表系统完全符合国家发展建设智能电网的要求。

2009 年 5 月国家电网公司提出了坚强智能电网发展战略,全面推进智能电网建设工作,开始研究并试点智能小区和智能家居,从原来单一的管理模式转向优质服务。2010 年 3 月“加强智能电网建

设”被写入 2010 年《政府工作报告》,标志着中国智能电网进入快速发展阶段。2010 年至今,国网智能电表已经累计招标 1 亿只左右,并实现信息采集及费控功能。而智能电表作为智能电网中最基础的用电信息采集设备,必将产生大量的用户用电数据信息,而如何保证各电力终端海量信息之间传输的实时性、准确性,将是未来智能电网发展的一个重要基础。下面也将以智能电表的用电信息采集作为切入点进行研究。

2 传统的用电信息采集系统

2.1 传统的用电信息采集系统结构

从计划经济时代开始,随着电力负荷控制系统及限电为主的负控装置 10 多年的发展推广,全国各省会、各地及市等都不同程度地建立发展了负荷控制系统。

随着采集功能应用的逐步扩大,在大用户、台区监测及居民抄表应用中也部分投运了配变监测系统和居民集抄系统。传统的用电信息采集系统主要包括电力营销系统的数据服务器、时间同步机以及通信信道所使用的局端设备等。主要采取 GPRS/CDMA /230M 电台进行数据传输,其网络结构图如图 1 所示。

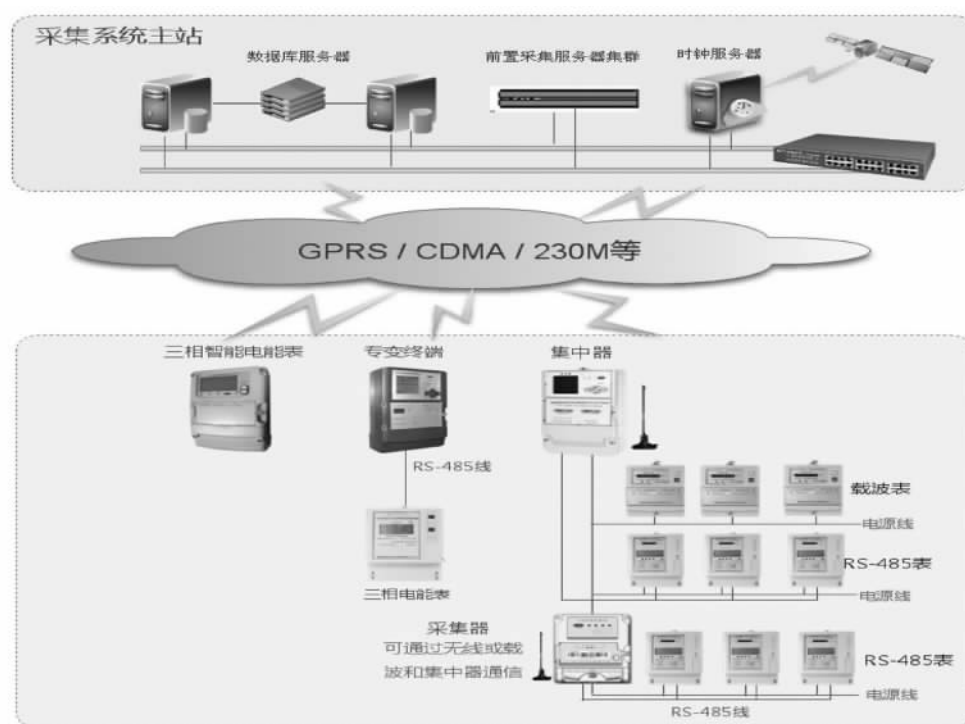


图 1 传该用户用电信息采集系统

2.2 传统的用电信息采集系统的不足

长期以来中国用电系统建设相对比较薄弱,自动化、信息化程度不高。各系统分别建设,没有很好整合各种系统资源,主站软件对多种信道的综合运用能力存在不足,目前应用的有230MHz无线专网、GPRS/CDMA无线公网、电力线载波(PLC)等,缺乏统一管理,存在重复建设、信道资源利用率低等问题。同时这些系统各自独立,数据没有有效地共享,数据的应用价值没有充分挖掘,缺乏统一全面的技术标准和规范,不利于营销信息化的进一步发展。

① GPRS/CDMA 组网的弊端

以GPRS/CDMA为组网的传输链路需要借助移动通讯平台,存在单点故障隐患,业务保护能力差;通讯介质和业务接口繁杂,管理维护难度较大;传输带宽低,关键数据的服务质量无法保障,扩展综合能力低;GPRS/CDMA技术需要依托运营商网络平台,电力内部信息安全无法得到有效保障。GPRS/CDMA资费开销较大,且不利于控制。

② 电力载波 PLC 的弊端

传输距离短,传输效率较低,传输带宽低;易受到谐波等电力线干扰;不能跨越变压器。

③ 交换机组网的弊端

变电站到终端属于点到多点网络拓扑,交换机组网势必造成光纤资源的极大浪费;交换机和光纤收发器均需要供电,不易于沿途的部署;交换机更适合于变电站内部局域网。

以上用电信息采集系统的不足严重限制了智能电网的发展,因此必须采取新的信息传输技术,保障智能电网的全面建设顺利实施。

3 光纤技术原理及现状

光纤接入从技术上可分为两大类:有源光网络(AON)和无源光网络(PON)。1983年,BT实验室首先发明了PON技术。PON是一种纯介质网络,由于消除了局端与客户端之间的有源设备,它能避免外部设备的电磁干扰和雷电影响,减少线路和外部设备的故障率,提高系统可靠性,同时可节省维护成本,是电信维护部门长期期待的技术。PON的业务透明性较好,原则上可适用于任何制式和速率的信号。目前基于PON的实用技术主要有APON/BPON/GPON/EPON/GEAPON等几种,其主要差异在

于采用了不同的二层技术。

EPON系统由网络侧的光线路终端(optical line terminal, OLT)、用户侧的光网络单元(optical network unit, ONU)和光分配网络(ODN)组成,如图2所示。OLT放在中心机房,ONU放在用户设备端附近或与其合为一体。POS(passive optical splitter)是无源光纤分支器,是一个连接OLT和ONU的无源设备,它的功能是分发下行数据,并集中上行数据。EPON中使用单芯光纤,在一根芯上转送上下行两个波。

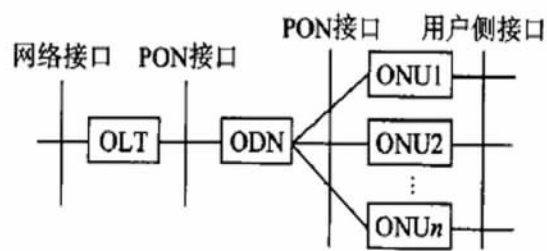


图2 EPON系统结构示意图

EPON是几种最佳的技术和网络结构的结合。EPON采用点到多点结构,无源光纤传输方式,在以太网上提供多种业务。目前,IP/Ethernet应用占到整个局域网通信的95%以上,EPON由于使用上述经济而高效的结构,从而成为连接接入网最终用户的一种最有效的通信方法。10Gbps以太主干和城域网的出现也将使EPON成为未来全光网中最佳的最后一公里的解决方案。

EPON主要优点有如下几点。

① 相对成本低,维护简单,容易扩展,易于升级。EPON结构在传输途中不需电源,没有电子部件,因此容易铺设,基本不用维护,长期运营成本和管理成本的节省很大;EPON系统对局端资源占用很少,模块化程度高,系统初期投入低,扩展容易,投资回报率高。

② 提供非常高的带宽。EPON目前可以提供上下行对称的1.25Gbps的带宽,并且随着以太网技术的发展可以升级到10Gbps。

③ 服务范围大。EPON作为一种点到多点网络,可以利用局端单个光模块及光纤资源,服务大量终端用户。

④ 高质量。EPON具有同时传输时分多路复用(TDM)、IP数据和视频广播的能力,其中TDM和IP数据采用IEEE 802.3的以太网格式进行传输,辅以

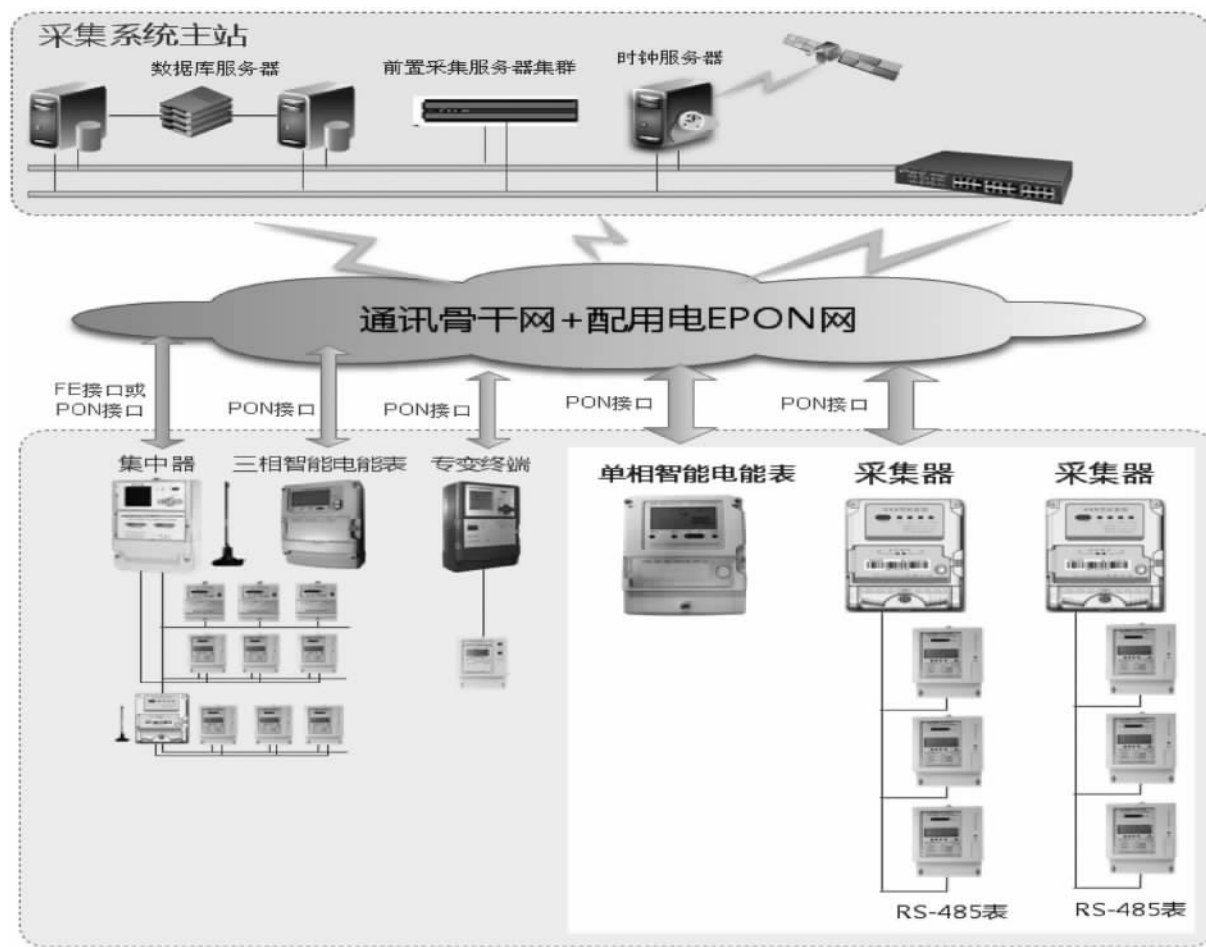


图3 典型组网模型

电信级的网管系统,以保证传输质量。

全可以实现的,其典型的组网模型如图3所示。

4 电力光纤 EPON 技术的应用前景分析

电力光纤 EPON 技术可实现点到多点通信,由用电信息采集系统终端数量和分布的特点决定,符合 EPON 星型网络结构,各终端之间无需信息交互。

分光设备对环境因素不敏感。由用电信息采集系统特点决定,楼道、配电站环境比较恶劣,而分光设备对环境因素不敏感,可以保证数据信息的稳定传输。

再次,电力光纤 EPON 技术具有 1.25G 带宽,带宽资源丰富、光纤传输稳定可靠。且网络扩展性好。扩展不影响整网架构。频繁的网络架构变化显然是配电网通信所不能允许的。

目前光纤资源已经铺设到台变级,新架设的电缆中包含光纤。台变级就是专变采集终端和集中器所在处,目标到楼道,甚至入户。通过以上分析,并和传统用电信息采集系统相比,电力光纤 EPON 技术具有明显的优势,解决了传统用电信息采集系统的不足。综上所述,电力光纤 EPON 技术入户是完

5 结 语

电力光纤入户可解决信息末端接入问题,满足智能电网信息化、自动化、互动化的需求。总结了传统用电信息采集系统的不足,然后对电力光纤 EPON 技术应用的可行性进行了分析,结果表明电力光纤 EPON 技术入户完全可行。

参考文献

- [1] 王敏,姚灏. 自动交换光网络技术在广州电力通信网中的应用策略[J]. 广东电力, 2010, 23(5): 34-37.
- [2] 瑞斯康达科技发展股份有限公司. 电力配网自动化通信白皮书[Z]. 北京: 瑞斯康达科技发展股份有限公司, 2009.
- [3] 北极星电力网新闻中心. 智能电网规模引入 EPON [EB/OL].

(收稿日期:2012-05-29)

失压后多功能电表差错电量的计算

李 琦

(大安供电局,四川 自贡 643000)

摘 要: 电力企业在处理计量故障时,原有计算更正系数及追补电量方法的应用对象主要是机械式感应电能表,随着多功能电子式电能表技术的大面积运用,由于电能表电压回路内部结构原理的不同,在失压时对计量的影响与感应式电能表有很大区别。通过多年工作经验总结出了三相三线多功能电子式电能表在各种失压状态下的运行情况及如何正确进行有功、无功退补电量的 K 值计算方法。

关键词: 三相三线多功能电能表; 退补电量计算; 失压故障

Abstract: The application object for original methods of calculating the correction coefficient and the recover from electricity quantity are primarily mechanical induction watt-hour meter while dealing with the metrological fault in power enterprise. With the wide application of multi-functional electronic watt-hour meter, because of the differences of internal structural principle in voltage circuit, the influence on metering after loss of voltage quite differs from the induction watt-hour meter. The operating condition of three-wire three-phase multi-functional electronic watt-hour meter under different loss of voltage and the method how to calculating correctly K value of active/reactive recover from electricity quantity are summarized through the working experiences for many years.

Key words: three-wire three-phase multifunction watt-hour meter; calculation of recover from electricity quantity; loss-of-voltage fault

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0055-06

0 前 言

三相三线多功能电能表正全面替代机械式感应系有功、无功电能表联合接线方式计量三相电能,在实际工作中发现当三相三线多功能电能表出现失压故障时,退补电量若仍按传统的追补电量方法来进行计算时,常常会发现计算出来的有功、无功退补电量会与事实不符,供电企业经常就此与电力客户发生纠纷,如何准确地计算三相三线多功能电能表在失压期间的退补电量是目前用电、计量部门必须研究和解决的课题。

1 三相三线多功能电能表内部电压回路结构简述

目前新型三相三线多功能电能表内部电压回路均采用的是三元件结构,即在表的每两个电压输入端钮之间均接有采样元件,如图 1 所示,电压采样元件除了进行电压采样外,还为表计内部集成电路提

供工作电源,图 1 中 a、b 和 b、c 之间所接的分别为多功能表电压采样元件的等效阻抗 Z_{ab} 和 Z_{bc} ,它们主要的功能是将交流输入电压进行采样后输入电能表的计量芯片。为了提高表计的工作可靠性在 a、c 之间也接入了一个电压采样元件等效阻抗 Z_{ac} ,它只用于为表计提供工作电源,在这种结构下,当任何一相失压时,均可保证多功能电能表的正常工作电源,而三相三线机械式感应电能表只有两个电压线圈,如图 2 所示,分别接在 a、b 和 b、c 之间。正是由于这种结构上的差别,导致在失压时多功能表的运行状态和机械表不同。

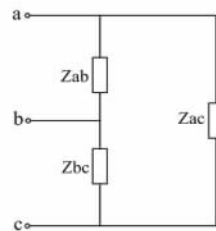


图 1 三相三线多功能电能表内部电压结构图

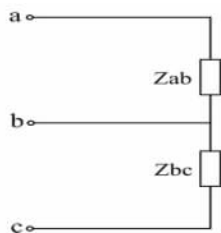


图2 三相三线机械式感应电能表内部电压结构图

2 三相三线多功能电表无功计量原理

目前使用的多功能电表无功计量回路都采用 90° 移相滤波器,将电压信号移相 90° 来进行无功的计量,如图3所示,而机械式感应系三相无功电能表多数则采用内相角为 60° 的三相三线无功表进行计量,相量图如图4所示。

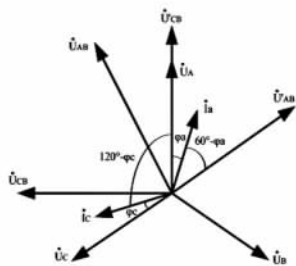


图3 三相三线多功能表无功计量向量图

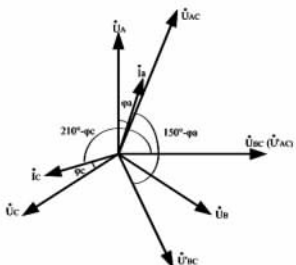


图4 机械式感应系三相三线多无功表向量图

如图3所示,可写出三相三线多功能电表无功计量的表达式。

$$Q = U'_{AB} I_a \cos(60^\circ - \varphi_a) + U'_{CB} I_c \cos(120^\circ - \varphi_c) \quad (1)$$

$$\text{当三相电路对称时, } U'_{AB} = U'_{CB} = U_{\text{线}}, I_a = I_c = I_{\text{相}}, \varphi_a = \varphi_c = \varphi \quad (2)$$

$$\text{可得: } Q = UI \times (\cos 60^\circ \cos \varphi + \sin 60^\circ \sin \varphi + \cos 120^\circ \cos \varphi + \sin 120^\circ \sin \varphi)$$

$$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi \quad (3)$$

如图4所示,可写出机械式感应系三相三线无功表功率的表达式。

$$Q = U'_{BC} I_a \sin(150^\circ - \varphi_a) + U'_{AC} I_c \sin(210^\circ - \varphi_c) \quad (4)$$

$$\text{当三相电路对称时, } U'_{BC} = U'_{AC} = U_{\text{线}}, I_a = I_c = I_{\text{相}}, \varphi_a = \varphi_c = \varphi \quad (5)$$

$$\text{可得: } Q = UI \times (\sin 150^\circ \cos \varphi - \cos 150^\circ \sin \varphi + \sin 210^\circ \cos \varphi - \cos 210^\circ \sin \varphi)$$

$$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi \quad (6)$$

3 三相三线多功能电表失压情况下有功、无功计量的分析

通常在10 kV中性点不接地电网中,计量用电压互感器一般采用两台单相互感器接成不完全星形,也称为V-V接线,用来测量各相间电压,以下就是对三相三线多功能电表在V-V接线时发生在电压互感器一、二次出现电压断线的故障分析。

3.1 TV一次回路断线

3.1.1 TV一次A相断线

TV一次A相保险熔断导致断线时的电路及二次电压回路的等效电路如图5、6所示,此时接在A、B相之间的TV一次绕组失压,导致二次绕组ax无感应电势输出,则其可等效成一个阻抗 Z_{ax} ,从TV及多功能电表的结构原理可知 Z_{ax} 的数值为欧姆级,只有几个欧姆,而多功能表的电压采样电路阻抗很大,至少为千欧级,所以有: $Z_{ax} \ll Z_{ab}, Z_{ab} = Z_{ac} = Z_{bc}$,因此 Z_{ax} 与 Z_{ab} 并联后的等效电阻 $Z < Z_{ax} \ll Z_{ab}, Z$ 和 Z_{ac} 串联后接在 U_{cb} 上,根据串联分压原理可得出加在 Z_{ab} 上的电压几乎为零, U_{cb} 的绝大部分加在 Z_{ac} 上,所以表计的第一元件基本上可以认为因输入电压为零而停止计量。

如图7所示,多功能表测量的有功功率表达式为

$$p_x = U_{cb} I_c \cos(30^\circ - \varphi) = UI \times \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi + \frac{1}{2} \sin \varphi \right) \quad (7)$$

$$K = \frac{p}{p_x} = \frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi}{UI \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \varphi + \frac{1}{2} \sin \varphi \right)} = \frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{3} + \tan \varphi} \quad (8)$$

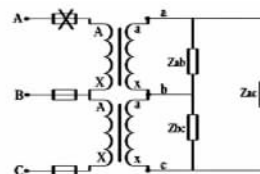


图5 TV一次A相断线接线图

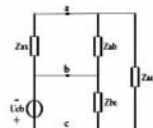


图6 等效电路图

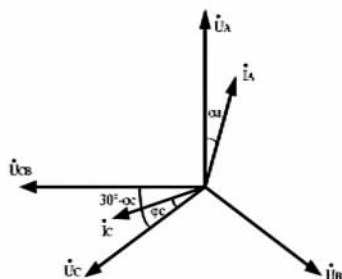


图7 A相断线有功相量图

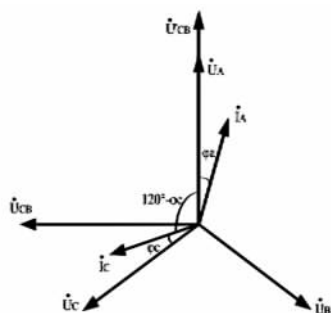


图8 A相断线无功相量图

如图8所示,多功能表测量的无功功率表达式为

$$Q_X = U_{cb} I_c \cos(120^\circ - \varphi) \\ = UI \times \left(-\frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right) \quad (9)$$

$$K = \frac{Q}{Q_X} = \frac{\sqrt{3} UI \sin \varphi}{UI \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi - \frac{1}{2} \cos \varphi \right)} = \frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{3} - \operatorname{ctg} \varphi} \quad (10)$$

3.1.2 TV一次B相断线

TV一次B相保险熔断导致断线时的电路及二次电压回路的等效电路如图9、10所示,此时接在A、B相之间的TV一次绕组电压为A、C间相电压值的一半,B、C相之间的TV一次绕组电压为C、A间相电压值的一半。所以此时多功能表第一元件输入的是 $0.5U_{ac}$ 、 I_a ,第二元件输入的 $0.5U_{ca}$ 、 I_c 。

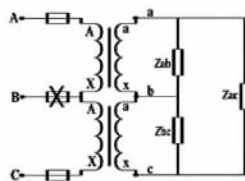


图9 B相断线接线图

如图11所示,多功能表测量的有功功率表达式

为

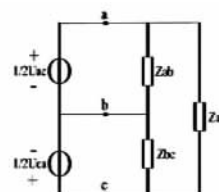


图10 二次电压回路等效电路图

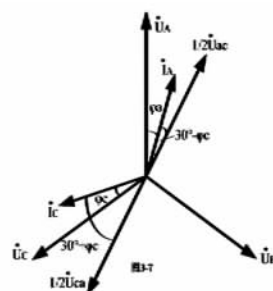


图11 B相断线有功相量图

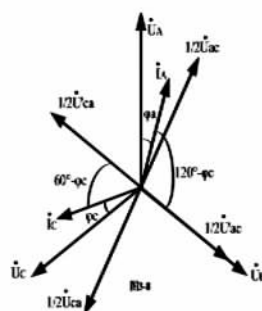


图12 B相断线无功相量图

$$p_X = \frac{1}{2} U_{ac} I_a \cos(30^\circ - \varphi) + \frac{1}{2} U_{cb} I_c \cos(30^\circ + \varphi) \\ \varphi = \frac{\sqrt{3}}{2} UI \cos \varphi \quad (11)$$

$$K = \frac{p}{p_X} = \frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi}{\frac{\sqrt{3}}{2} UI \cos \varphi} = 2 \quad (12)$$

如图12所示,多功能表测量的无功功率表达式为

$$Q_X = \frac{1}{2} U_{ac} I_a \cos(120^\circ - \varphi) + \frac{1}{2} U_{ca} I_a \cos(60^\circ - \varphi) \\ \varphi = \frac{\sqrt{3}}{2} UI \sin \varphi \quad (13)$$

$$K = \frac{\sqrt{3} UI \sin \varphi}{\frac{\sqrt{3}}{2} UI \sin \varphi} = 2 \quad (14)$$

3.1.3 TV一次C相断线

TV一次C相保险熔断导致断线时的电路及二次电压回路的等效电路如图13、14所示,此时接在B、

C相之间的TV一次绕组失压,导致二次绕组 ax 无感应电势输出,则其可等效成一个阻抗 Z_{ax} ,从A相一次断线的分析可以得到类似的结果,即加表计 Z_{ax} 电压几乎为零,所以表计的第二元件基本上可以认为因输入电压为零而停止计量。

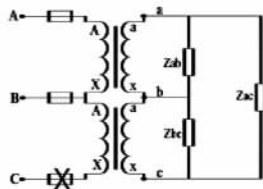


图13 C相一次断线接线图

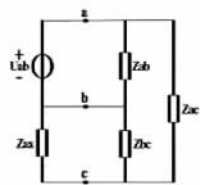


图14 C相一次断线等效电路图

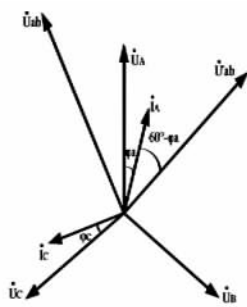


图15 C相断线有功相量图

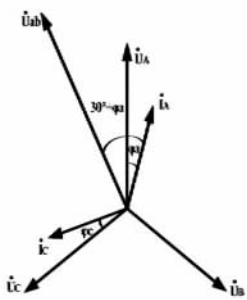


图16 C相断线无功相量图

如图15所示,多功能表测量的有功功率表达式为

$$P_X = U_{ab} I_a \cos(30^\circ + \varphi) = UI \times \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos\varphi - \frac{1}{2} \sin\varphi \right)$$

$$K = \frac{P}{P_X} = \frac{\sqrt{3} UI \cos\varphi}{UI \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cos\varphi - \frac{1}{2} \sin\varphi \right)} = \frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{3} - \tan\varphi} \quad (15)$$

相量图如图16所示。多功能表测量的无功功率表达式为

$$Q_X = U_{ab} I_a \sin(60^\circ - \varphi) = UI \times \left(\frac{1}{2} \cos\varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\varphi \right) \quad (16)$$

$$K = \frac{2\sqrt{3}}{\tan\varphi + \sqrt{3}} \quad (17)$$

3.2 TV二回路断线

3.2.1 TV二次A相断线

在此故障情况下,二次电压回路的电路如图17所示,此时多功能表A、B相之间电压采样电路等效阻抗 Z_{ab} 和A、C相之间的 Z_{ac} 串联后再与 Z_{bc} 并联在 U_{cb} 上, $U_{cb} = 100\text{ V}$,因为 $Z_{ab} = Z_{ac} = Z_{bc}$,所认加在表计A、B相之间的电压 $= 0.5 U_{cb} = 50\text{ V}$,多功能表第一元件输入的是 $0.5 U_{cb}$ 、 I_a ,第二元件输入的 U_{bc} 、 I_c 。

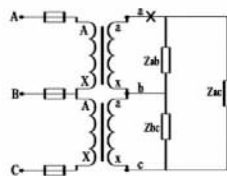


图17 TV二次A相断线接线图

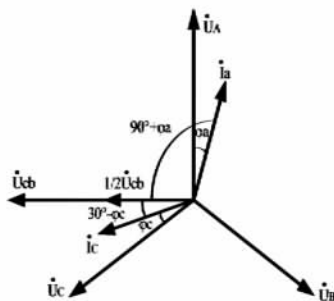


图18 TV二次A相断线有功相量图

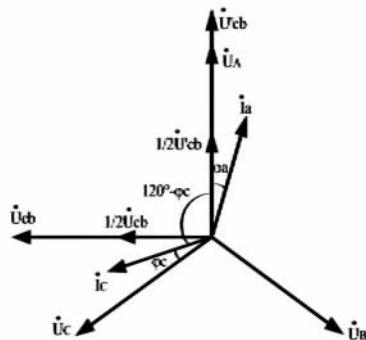


图19 TV二次A相断线无功相量图

如图18可得此时多功能电能表所计有功功率的表达式为

$$\begin{aligned} p_X &= \frac{1}{2} U_{cb} I_a \cos(90^\circ + \varphi) + U_{cb} I_c \cos(30^\circ - \varphi) \\ &= UI \times \left[\frac{1}{2} \cos(90^\circ + \varphi) + \cos(30^\circ - \varphi) \right] \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} UI \cos \varphi \end{aligned} \quad (17)$$

$$K = \frac{p}{p_X} = \frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi}{\frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi}{2}} = 2 \quad (18)$$

如图19可得此时多功能电能表所计无功功率的表达式为

$$\begin{aligned} Q_X &= \frac{1}{2} U_{cb} I_a \cos \varphi + U_{cb} I_c \cos(120^\circ - \varphi) \\ &= UI \left(\frac{1}{2} \cos \varphi - \frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right) \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} UI \sin \varphi \end{aligned} \quad (19)$$

$$K = \frac{Q}{Q_X} = \frac{\sqrt{3} UI \sin \varphi}{\frac{\sqrt{3}}{2} UI \sin \varphi} = 2 \quad (20)$$

3.2.2 TV 二次 B 相断线

在此故障情况下,二次电压回路的电路如图20所示,此时多功能表A、B相之间电压采样电路等效阻抗 Z_{ab} 和B、C相之间的 Z_{bc} 串联后再接在A、C相之间, $U_{ab} = 100$ V,因为 $Z_{ab} = Z_{bc}$, $U_{ab} = 0.5 U_{ac} = 50$ V, $U_{cb} = 0.5 U_{ca} = 50$ V,多功能表第一元件输入的是 $0.5 U_{ac}$ 、 I_a ,第二元件输入的 $0.5 U_{ca}$ 、 I_c 。

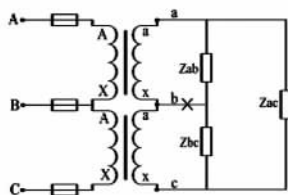


图20 TV 二次 B 相断线后接线图

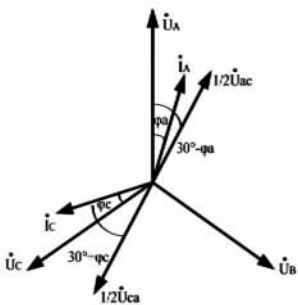


图21 TV 二次 B 相断线后有功相量图

如图21可得此时多功能电能表所计有功功率

的表达式为

$$\begin{aligned} p_X &= \frac{1}{2} U_{ac} I_a \cos(30^\circ - \varphi) + \frac{1}{2} U_{ca} I_c \cos(30^\circ + \varphi) \\ &= \frac{1}{2} UI \times [\cos(30^\circ - \varphi) + \cos(30^\circ + \varphi)] \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} UI \cos \varphi \end{aligned} \quad (21)$$

$$K = \frac{p}{p_X} = \frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi}{\frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi}{2}} = 2 \quad (22)$$

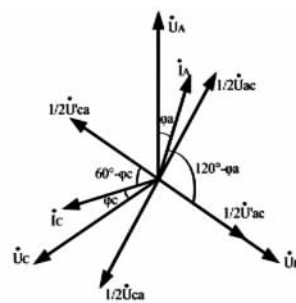


图22 TV 二次 B 相断线后无功相量图

如图22可得此时多功能电能表所计无功功率的表达式为

$$\begin{aligned} Q_X &= \frac{1}{2} U_{ac} I_a \cos(120^\circ - \varphi) + \frac{1}{2} U_{ca} I_c \cos(60^\circ - \varphi) \\ &= \frac{1}{2} UI \times [\cos(120^\circ - \varphi) + \cos(60^\circ - \varphi)] \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} UI \sin \varphi \end{aligned} \quad (23)$$

$$K = \frac{Q}{Q_X} = \frac{\sqrt{3} UI \sin \varphi}{\frac{\sqrt{3}}{2} UI \sin \varphi} = 2 \quad (24)$$

3.2.3 TV 二次 C 相断线

在此故障情况下,二次电压回路的电路如图23所示,此时电表B、C相之间等效阻抗 Z_{bc} 和A、C相之间的 Z_{ac} 串联后再与A、B相之间的 Z_{ab} 并联在 U_{ab} 上, $U_{ab} = 100$ V,因为 $Z_{ab} = Z_{ac} = Z_{bc}$,所认加在表计C、B相之间的电压为 $0.5 U_{ab} = 50$ V,多功能表第一元件输入的是 U_{ab} 、 I_a ,第二元件输入的 $0.5 U_{ab}$ 、 I_c 。

如图24可得此时多功能电能表所计有功功率的表达式为

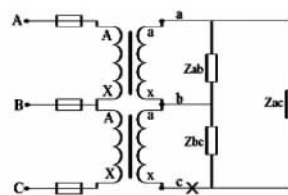


图23 TV 二次 C 相断线接线图

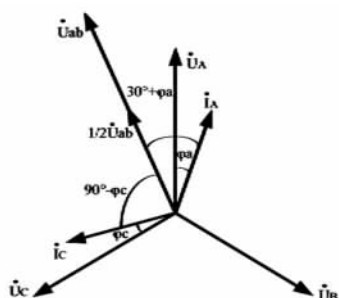


图24 TV二次C相断线有功相量图

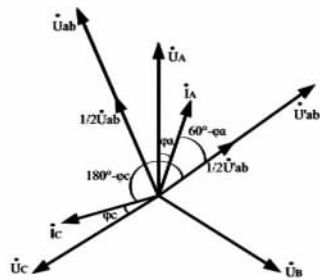


图25 TV二次C相断线无功相量图

$$\begin{aligned}
 p_x &= U_{ab} I_a \cos(30^\circ + \varphi) + \frac{1}{2} U_{ab} I_c \cos(90^\circ - \varphi) \\
 &= UI \times [\cos(30^\circ + \varphi) + \frac{1}{2} \cos(90^\circ - \varphi)] \\
 &= \frac{\sqrt{3}}{2} UI \cos \varphi
 \end{aligned} \quad (25)$$

$$K = \frac{p}{p_x} = \frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi}{\frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi}{2}} = 2 \quad (26)$$

如图25可得此时多功能电能表所计有功功率的表达式为

$$\begin{aligned}
 Q_x &= U_{ab} I_a \cos(60^\circ - \varphi) + \frac{1}{2} U_{ab} I_c \cos(180^\circ - \varphi) \\
 &= \frac{\sqrt{3}}{2} UI \sin \varphi
 \end{aligned} \quad (27)$$

$$K = \frac{Q}{Q_x} = \frac{\sqrt{3} UI \sin \varphi}{\frac{\sqrt{3} UI \sin \varphi}{2}} = 2 \quad (28)$$

4 综合分析及结论

根据上述分析计算,可总结得出三相三线多功能表在各类电压断线的情况下的更正系数 K 值。

从表1可以看出当三相三线多功能电表发生失压故障后,在计算其差错电量更正系数 K 值时,应弄清其故障断线点的位置,判断其失压是发生在TV的一次侧或二次侧后,再计算出其 K 值。通过多功

表1 三相三线多功能表失压时有功、无功更正系数 K 值

	有功 K 值	无功 K 值
TV一次侧A相断线	$\frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{3} + \tan \varphi}$	$\frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{3} - \tan \varphi}$
TV一次侧B相断线	2	2
TV一次侧C相断线	$\frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{3} - \tan \varphi}$	$\frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{3} + \tan \varphi}$
TV二次侧A相断线	2	2
TV二次侧B相断线	2	2
TV二次侧C相断线	2	2

能电表与机械式感应系电能表在失压情况下更正系数计算的比较,可得出以下结论。

(1) 当断线点发生在电压互感器一次侧时,其有功电量更正系数与机械式感应系有功表一样。

(2) 当断线点发生在电压互感器二次侧时,因三相三线多功能表内部多一个电压线圈的原因,会使失压相的元件仍然会因其他相电压而工作,所以此时计算差错电量时若仍按传统式算法将会出现很大偏差。经过计算可知:当多功能电能表在TV二次侧发生失压时,其有功、无功差错电量更正系数 K 值均为2。

(3) 无功更正系数的计算因其三相三线多功能表无功计量原理与内相角为 60° 的三线三相无功表计量原理的不同,更不能沿用传统的 K 值算法,应根据具体情况进行计算。

5 结 语

随着三相三线多功能电能表的大面积使用,如何正确地计算其在失压时的退补电量工作已经显得非常重要,将在电能计量工作多年的经验总结出来,希望能对电力企业电能计量及用电检查人员在面对这些问题的时候,提供一定的帮助和借鉴。而实际工作中要求只有以更加严谨的工作态度和科学的工作方法才能保证电能计量工作的公平、公正,在维护供用电双方合法权益的同时,树立供电企业严谨科学的工作作风和优质服务的良好形象,实现经济效益和社会效益的双赢。

参考文献

- [1] 韩玉. 电能计量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 康广庸. 电能计量装置故障接线分析模拟与检测[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.

(收稿日期: 2012-06-11)

一种新型故障限流器在电力系统中的应用研究

姚守学¹,程健雄²,蔡盛舟³,李建明⁴

(1. 广元电业局,四川 广元 628000; 2. 四川省电力公司资阳公司,四川 成都 610039;
3. 攀枝花电业局,四川 攀枝花 617067; 4. 四川电力科学研究院,四川 成都 610072)

摘要:提出了一种基于集成门极换流晶闸管 IGCT 和固态电力电子开关的故障限流器,它由电感和 IGCT 等组成。正常时,串在电路中,基本无能量损耗,故障时控制短路电流大小。通过 PSCAD 的仿真分析和现场试验,证明了其有良好的限流性能,可以作为电力系统中有用的保护设备。

关键词: 短路电流; FCL; PSCAD

Abstract: A fault current limiter based on integrated gate commutated thyristors (IGCT) and solid-state power electronic switches is proposed, which consists of components such as inductors and IGCT. It is in series with the circuit without energy loss on the whole in the normal state, while in the fault state, it controls the amplitude of short-circuit current. By PSCAD simulation analysis and field test, its good performance of current limiting is proved, which can be used as the effective protection equipment in power system.

Key words: short-circuit current; fault current limiter (FCL); PSCAD

中图分类号: TM771 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0061-03

0 引言

随着电力系统规模的扩大,系统电网功率不断增大,短路电流水平也相应增加,电力系统安全稳定性问题越来越重要。为了保证稳定地输送大容量、高质量的电能,继电保护装置等必须满足高值短路电流带来的更严格的要求,为了保证变压器等电力设备不会在系统故障电流冲击下损坏。通常限制短路电流的措施可从电力网结构、系统运行方式和设备性能三方面考虑。改造电力网结构昂贵,改变系统运行方式容易造成电力系统运行的不稳定性。在设备端加装电抗器、高阻抗变压器则会导致网络损耗增加,并降低系统的稳定性。因此,研制应用于超高压电网的故障限流装置成为比较理想经济的选择^[1-4]。

研究了一种基于集成门集换流晶闸管(integrated gate commutated thyristors, IGCT)和固态电力电子开关的快速、可关断特性的短路电流限制器(fault current limiter, FCL)。

1 FCL 简介

1.1 新型 FCL 拓扑结构

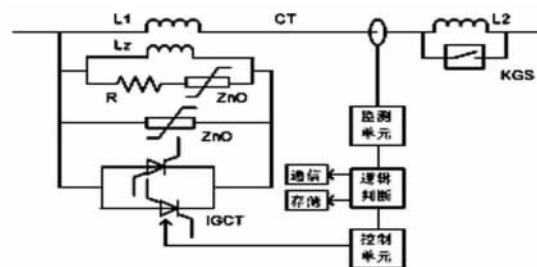


图1 FCL的拓扑结构

FCL由以下几部分组成:限流电抗 L_1 、 L_2 , 阻尼回路(采用电抗+ZnO串电阻型),快速隔离器KGS,门集可关断开关IGCT和保护用ZnO避雷器组成。

1.2 工作原理和特点

系统正常工作时,门集可控开关IGCT和快速隔离器KGS都处于导通态,限流电感被旁路,不影响系统的正常运行。当系统发生短路故障时,通过监测单元对来自CT的电流信号进行取样,由逻辑控制单元对电流分析,然后给控制单元提供动作信

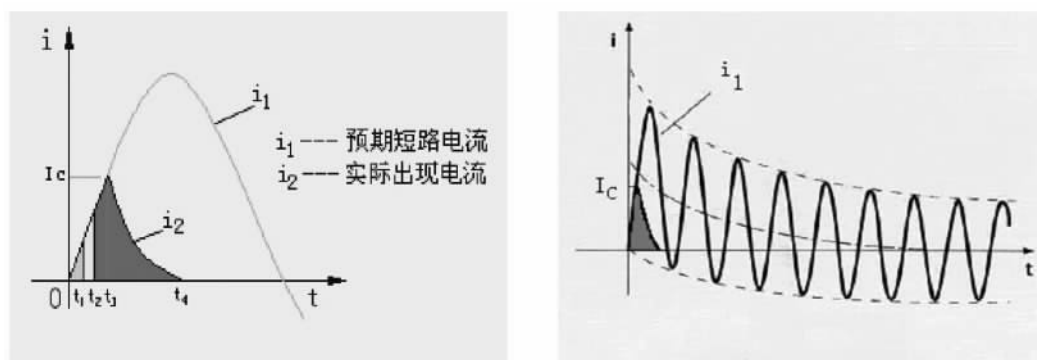


图2 动作电流波形

号,触发IGCT开断,将限流电抗 L_1 串入电路,然后等待来自监测单元和逻辑判断单元的信号。若仍未达到要求,则由控制单元发出KGS动作信号,将限流电抗 L_2 投入电路完成最后的限流。当故障排除后,先将KGS合闸,然后导通IGCT,使系统恢复正常运行。

该FCL具有以下的特点。

(1) 具有超高速($100 \sim 200 \mu\text{s}$)开断短路电流特性。

(2) 具有较高的短路电流开断能力($6 \sim 10 \text{ kA}$)。其开断短路电流波形如图2所示。图中 i_1 为预期短路电流波形, i_2 (阴影部分)为IGCT动作后的短路电流波形。

由图2可见,因其高速开断性能,实际出现的短路电流的峰值 I_c 在短路电流第一个半波的上升过程中被限制到预期短路电流峰值的 $15 \sim 50\%$, i_2 的持续时间仅为 $100 \mu\text{s}$,开断速度比常规断路器快约100倍。

1.3 该FCL与传统的限流器电抗器相比具有以下优点

(1) 节能降耗。接入FCL之后避免了传统电抗器串联在电路中每年产生的大量有功和无功损耗,造成的经济损失,同时又能发挥正常的限流作用。不但节省了企业的投资,也符合建设节约型社会的国策。

(2) 改善电能质量。电抗器对母线电压质量有影响,会使母线电压波动 $6 \sim 10\%$,致使很多给大型钢铁化工厂矿企业供电的变电站的电压质量指标达不到国网公司的要求。装备FCL后上述电压波动消除了,电压质量提高,得以满足国网公司供电指标的要求。

(3) 减少并补装置的投资和事故率。用IGCT限流器旁路电抗器后,变电站可以不装或少装并联补偿电容器,可节约大量基建投资;在原来已经装设了并联补偿电容器的变电站,则可以不投或少投运并联补偿电容器,延长其使用寿命,减少运行和维修费用,并减少因并补电容器和与之串联的小电抗等的自身故障所引起的供电事故。

(4) 可连续供电。在IGCT动作后,断路器按继电保护正常动作程序跳闸或重合闸,重合成功后继续运行,可连续供电。

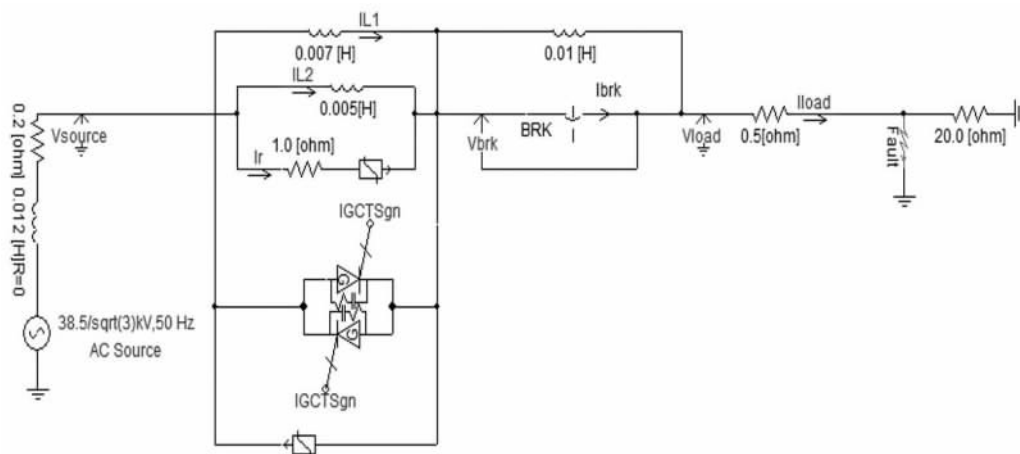


图3 仿真系统示意图

(5) 消除电磁干扰。消除了电抗器磁场及噪声对运行人员和周围电子设备的干扰,消除由其引起的附属设备的涡流发热和二次设备放电打火等异常现象,满足国家有关电磁场干扰的强制标准。

(6) 配置简单易行。电抗器投入后的继电保护和旁路前相同,故用(IGCT)旁路电抗器时无需改变原先的继电保护的配合和整定值。在新变电站装配简单,在老变电站改造也变得很容易。

2 FCL 仿真分析

以实际系统参数为例,利用PSCAD仿真变压器出口短路的情况。仿真系统示意图如图3所示^[5-6]。

单相线路参数如下。

$U_l = 38.5 \text{ kV}$, $U_s = 22.23 \text{ kV}$, $U_m = \sqrt{2}U_s = 31.43 \text{ kV}$, $U_s = U_m \cos(\omega t + \varphi)$, $L_s = 12 \text{ } \Omega$, $R_s = 0.2 \text{ } \Omega$

FCL 参数为 $L_1 = 7 \text{ mH}$, $L_2 = 10 \text{ mH}$, $L_z = 5 \text{ mH}$, $R = 1 \text{ } \Omega$

阻尼回路 ZnO 避雷器额定电压为 10 kV(非线性电阻);保护用 ZnO 额定电压为 4 kV。其中, U_s 、 U_m 、 ω 、 φ 分别为电源相电压的有效值、峰值、工频角频率与初相位; U_s 为电源电压瞬时值; L_s 、 R_s 为变压器出口短路时,折算到 38.5 kV 侧的短路阻抗; L_1 、 L_2 为故障限流器中电抗值; L_z 为阻尼电感, R 为阻尼电阻;短路电流的衰减时间常数 $\tau = 17 \text{ ms}$ 。

假设系统在 0.2 s 发生短路故障,短路发生 5 ms 时完全投入 FCL。

短路时,没有加入 FCL 的故障电流波形如图4所示。

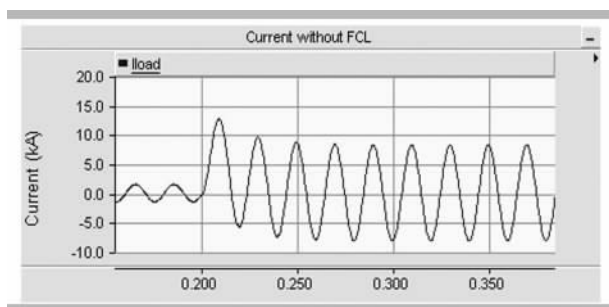


图4 无 FCL 时短路电流波形

短路时,加入 FCL 的故障电流波形如图5所示。

由仿真电流波形可以看出,故障时短路电流第一峰值为 12.50 kA,稳态峰值电流为 8.18 kA;投入 FCL

后,电流第一峰值为 10.67 kA,稳态峰值电流为 3.98 kA。可见,FCL 的投入对短路电流的第一峰值和稳态电流峰值都有明显的抑制作用,有效地降低了短路电流对电气设备的冲击。

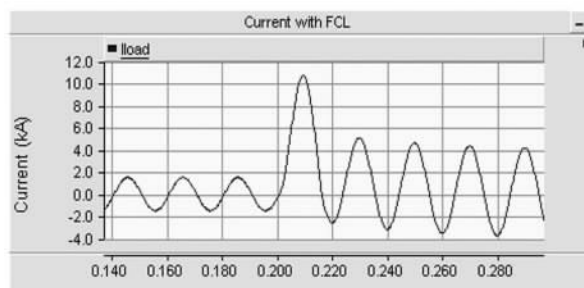


图5 有 FCL 时短路电流波形

短路时,无 FCL 系统电压波形如图6所示。

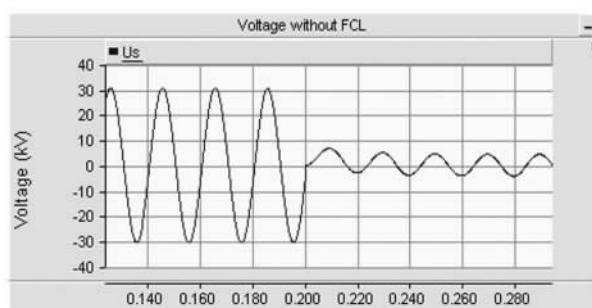


图6 无 FCL 系统电压波形

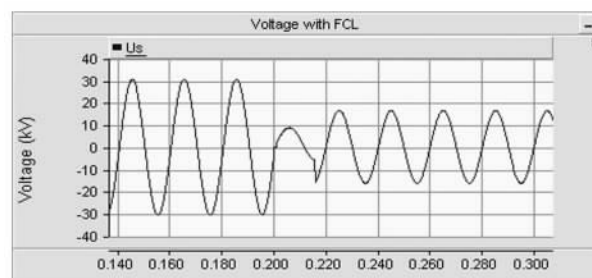


图7 有 FCL 系统电压波形

由仿真电压波形可以看出,故障时系统电压跌落严重,对用户设备的安全造成严重影响,投入 FCL 后,系统电压降落明显减小,从而降低了对用户设备的影响。可见,FCL 的投入对改善系统电压有积极的作用。

3 试验

为了验证该 FCL 的可行性,制作了试验样机进行了试验,试验结果如图8~9所示。

从以上试验结果可以看出,该故障限流器明显抑制了变压器出口的短路电流的峰值和稳态值,限流效
(下转第72页)

(3) 对与设备相关的成本费用支出进行全面的控制分析。科学控制成本的思想应该贯穿在整个寿命周期中,从最初的可研阶段,就应该拿出各种方案的预计后续支出和状态报告。在设备运行的各个阶段都进行收入成本的配比分析,对设备的使用效率进行评价。

(4) 提高人员素质。针对目前变电设备更新换代快、高科技含量高的特点,加大岗位培训和操作技能培训。认真组织好对有关反措和规程、规范的学习,深刻领会内涵;有针对性的开展各种专业技术、技能比武,以赛促练,促进职工学技术、练技能的积极性,使职工的专业技术水平有显著的提高。

4 结 语

提出了固定资产全寿命周期理论,并将 LCC 全

寿命周期理论应用于供电企业固定资产管理环节。通过回归分析,确定了影响固定资产运行的重要因素,确立了状态检修在固定资产维护过程中的主导地位。

本系统只考虑了影响固定资产正常运行的主要因素,由于数据问题没能将其影响因素再作细分。对于一些辅助因素考虑的也不够全面。例如:由于计量问题,忽略了惩罚成本因素。为了方便计算,对固定资产的报废成本取了一个固定值。这都对模型的精确性产生了影响。固定资产全寿命周期的管理方法,比较适用于供电企业中资产净值较大、对企业的生产经营活动有着比较重要的影响和技术含量高的设备。从成本效益原则和精细化管理的初衷考虑,对于资产价值较小,重要性较低的资产不适用于此方法。

(收稿日期:2012-08-20)

(上接第63页)

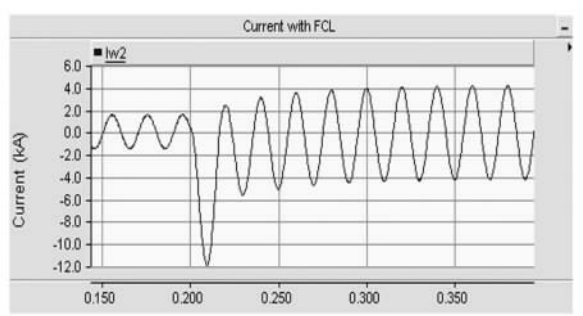


图8 加入 FCL 时变压器出口短路电流波形

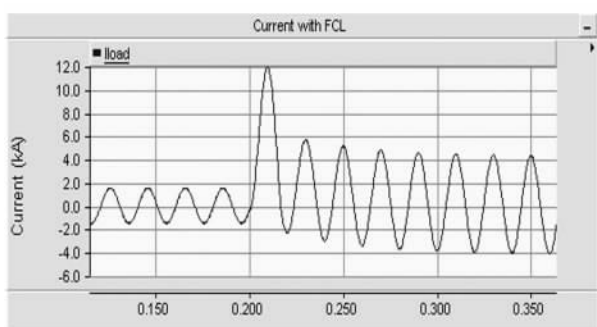


图9 加入 FCL 时线路短路电流波形

果良好,电流波形良好,能够在实际中得到应用。

4 结 语

研究了一种新型的基于可控门极晶闸管(IGCT)的故障电流限制器,正常运行时串在电路中,功耗很小;短路时,投入限流电抗限流。通过实际试验,证明

该故障限流器不仅能够限制短路电流还能够抑制电压跌落,提高系统的暂态稳定性,具有良好的技术和经济性能,在电力系统中具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 何仰赞,温增银.电力系统分析(第三版)[M].武汉:华中科技大学出版社,1996.
- [2] 李光琦.电力系统暂态分析[M].北京:水利电力出版社,1985.
- [3] 江道灼,敖志香,卢旭日,等.短路故障限流技术的研究与发展[J].电力系统及其自动化学报,2007,19(3):8-19.
- [4] 王华昕,习贺勋,汤广福,等.面向超高压电网的故障限流器的应用研究[J].高电压技术,2007,33(5):99-102.
- [5] 曾琦,李兴源,蔡鑫贵,等.带串联补偿故障限流器的仿真和实验[J].电力系统自动化,2003,27(14):54-56.
- [6] 郑敏,李兴源,刘俊勇,等.具有串联补偿作用的新型故障限流器的拓扑结构和仿真[J].中国电机工程学报,1999,19(6):52-55.

(收稿日期:2012-07-18)

四川省电力公司输变电设备状态检修体系建设与应用

吴晓晖¹, 甘德刚², 王红梅¹, 刘平³, 陈洪波²

(1. 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072;
3. 内江电业局, 四川 内江 641100)

摘 要: 随着四川电网规模的快速发展和不断扩大, 四川省电力公司之前一直沿用的定期设备检修模式已不能适应电网发展的需求。状态检修作为解决当前检修工作面临问题的重要手段, 是以设备当前的实际状态为依据, 根据设备状态的评价结果来指导检修工作, 能为设备的安全稳定运行提供可靠的技术和管理保障。从2008年起, 四川省电力公司根据国家电网公司出台的状态检修相关规章制度和技术标准, 在充分保证电网安全稳定运行和可靠供电的前提下, 从管理、技术、资料与信息收集、执行、宣贯与保障等5个方面建立了四川省电力公司的输变电设备状态检修体系。同时四川省电力公司积极在全省范围内推进状态检修工作, 目前所有电业局(公司)都已建立了相应的状态检修工作体系, 实现了现行管理体制与状态检修管理体制的有机融合, 保证了全省状态检修工作的科学有序开展。

关键词: 状态检修; 四川电网; 体系建设; 带电检测; 辅助决策

Abstract: With the fast development and expansion of Sichuan Power Grid, the former regular maintenance of electrical equipment adopted by Sichuan Electric Power Corporation can not meet the demand of power grid. Condition-based maintenance (CBM), which directs the maintenance work according to the evaluations of equipment condition, is an important strategy for the current maintenance problem and can guarantee the safety and stability of equipment. Since 2008, a series of technical standards and regulations have been stipulated; considering the safety and stability of Sichuan Power Grid, a CBM structure has been established ranging from the management, technology, reference and information collection, implementation, safeguard etc. Meanwhile, the Sichuan Electric Power Corporation promotes the CBM positively and all power bureaus have established the CBM system, which combines with the current management system and CBM, and guarantees the promotion of CBM in Sichuan province in a scientific way.

Key words: condition-based maintenance; Sichuan Power Grid; architecture construction; live detection; assistant decision
中图分类号: F407.6 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0064-04

0 引言

四川省电力公司在结合多年生产运行经验以及对大量设备缺陷、故障规律的统计分析基础上, 建立并一直沿用定期检修和事后检修相结合的检修模式, 有效减少了设备的突发事件, 保证了设备的良好运行。随着四川电网规模的快速发展和不断扩大, 电网设备数量急剧增加, 以及用户对供电可靠性要求的逐步提高, 相应的检修维护工作量也急剧增加, 检修人员紧缺问题日益突出^[1]。延续传统的设备检修模式不但需要增加人力物力财力的投入力度, 收效也不明显^[2]。而且近年来电网设备制造质量大幅提升, 集成式、少维护设备得到大量采用, 早期制定的设备检修、试验周期已不能适应设备诊断和

管理水平的进步^[3]。

因此传统的基于周期的设备检修模式已经不能适应电网发展的要求, 迫切需要在充分考虑电网安全、环境、效益等多方面因素情况下, 研究、探索提高设备运行可靠性和检修针对性的新的检修管理方式。状态检修作为解决当前检修工作面临问题的重要手段, 是按照设备的健康状态来安排检修工作的一种策略, 是在设备发生实质性故障之前及时进行检修的方式, 针对性较强, 具有明显的社会效益和经济效益, 逐步成为世界电力生产管理模式的主流^[4]。

近年来, 国网公司积极开展状态检修相关工作的研究和探索。从2006年起, 国网公司全面组织开展了状态检修相关准备和规章制度体系建设工作, 组织编制了状态检修相关规章制度和技术标准, 确

定了开展设备状态检修工作的指导思想和基本原则,对状态检修工作进行了全面的规范,使状态检修工作有了系统的技术和管理标准。四川省电力公司根据国网公司确定的状态检修工作思路与原则,对生产管理流程进行了梳理和整合,从管理、技术、资料与信息收集、执行、宣贯与保障等5个方面建立了一套完整的以状态评价为基础、辅助决策系统为支撑、标准化作业为保障的输变电设备状态检修体系^[5],保证了全省状态检修工作的科学有序开展。

1 输变电设备状态检修体系建设

建设状态检修体系是保证输变电设备状态检修工作取得实效的关键,要以制度建设为基础,以安全水平提升为目标,从管理、技术、资料与信息收集、执行、宣贯与保障等5个方面建立四川省电力公司相应的状态检修结构体系,落实生产主管领导负责的生产管理部门、车间、班组三级管理体系^[3-5]。明确状态检修工作的基本流程,加强管理,规范流程,落实责任,强化设备状态评价,提高设备检修工作的针对性和有效性。

为了积极有序地开展四川省电力公司输变电设备状态检修体系建设,需要根据国网公司出台的状态检修相关标准制度,结合四川电网设备的情况,制定四川相应的状态检修相关规程规范、实施细则,从体系建设上确保设备检修工作的安全、质量和效益^[5-6]。管理体系是为了保证状态检修顺利开展所建立的管理规定和管理标准,对工作范围、工作内容、程序、方法、检查和考核等进行规范。主要包括《四川省电力公司输变电设备状态检修管理规定(试行)》、《四川省电力公司输变电设备状态检修绩效评估标准(试行)》、《输变电设备全寿命管理指导性意见》等。

技术体系是指支撑状态检修工作的一系列技术标准和导则,是开展状态检修的技术保证。主要包括《四川省电力公司输变电设备状态检修试验规程实施细则(试行)》、《四川省电力公司输变电设备状态评价及检修实施细则(试行)》、《输变电设备风险评价导则》、《四川省电力公司状态检修试验仪器和设备操作规范汇编》以及《四川省电力公司标准化作业指导书编制导则(试行)》等。

资料与信息收集是开展状态检修的基础,是为

了加强四川省电力公司输变电设备基础资料与信息收集的管理,明确设备信息收集部门和人员职责,规范设备基础资料与信息收集工作内容和要求,加强信息采集的检查、监督与考核,为设备实施状态检修提供基础资料 and 数据分析依据。主要包括《四川省电力公司输变电设备基础资料管理办法(试行)》。

执行体系是包括组织机构在内的状态检修流程中各环节的具体实施,它包括管理流程、状态评价、检修决策、计划编制、现场实施和绩效评估等方面。主要包括《四川省电力公司输变电设备状态检修管理规定(试行)》、《四川省电力公司输变电设备状态检修绩效评估标准(试行)》等。

宣贯与保障主要包括宣贯培训、保障机制等方面,特别强调对各级生产人员的培训和检测、试验装备的配备。四川省电力公司尤其注重选拔、培养一支合格的状态检修专家队伍,为状态检修工作的有效开展提供必要的技术支持。

结合四川省电力公司之前在电网设备、生产管理、人才队伍建设以及先进技术应用等方面做了大量工作的基础上,经过一年的不懈努力,四川省电力公司形成了一套成熟的输变电设备状态检修体系,并且在乐山电业局进行了成功试点应用,顺利通过了国网公司的状态检修工作验收。

2 输变电设备状态检修工作的创新与改进

2.1 输变电设备状态检修制度创新

国网公司在制定《国家电网公司设备状态检修管理规定(试行)》时,在第三章就明确指出了:“各区域电网有限公司、省(自治区、直辖市)电力公司负责贯彻国家电网公司设备状态检修相关管理规定和技术标准,并制定本单位实施细则;组织领导所属各单位开展设备状态检修工作”^[1]。因此根据四川电网设备状态、地域环境、电网结构等特点,在参考四川电网输变电设备的运行维护经验基础上,对国网公司相关标准制度进行了改进,制定了四川省电力公司的状态检修相关规程规范、实施细则等^[5]。

对于国网公司《输变电设备状态检修试验规程》,结合四川电网输变电设备的特点,根据测试项目的有效性对油浸式电力变压器和电抗器、电流互感器、高压并联电容器和集合式电容器等设备的试

验项目及周期进行了调整,其中部分试验项目的例行试验基准周期都较国网公司标准有所缩短^[7]。并将所有设备的红外热成像检测列为巡检项目,周期按巡检周期执行,由运行人员完成,国网为例行试验,周期相对较长。将气体密度表(继电器)校验列为例行试验,国网为诊断性试验。例如对于变压器设备,诊断性试验新增项目为:局部放电超声测量、油中铜铁含量、油中糠醛含量测量。对于绝缘油,例行试验新增项目为:水溶性酸(pH)、诊断性试验新增项目为:油糠醛含量测试、油中铜铁含量、绝缘油腐蚀性硫测试。

四川省电力公司进一步扩大了状态检修工作的设备范围,制定了四川省电力公司《输变电设备状态评价及检修导则(试行)》,还涉及的主要设备有:GIS设备、电磁式电压互感器、电容式电压互感器(耦合电容器)、电流互感器、隔离开关、并联电容器、金属氧化物避雷器、电力电缆线路、继电保护设备等。并且对评价状态量进行了细化,进一步完善判断依据的内容,使之在基层单位开展状态检修工作时更具有实用性。

2.2 输变电设备状态检修工作流程优化

四川省电力公司在已有的设备检修工作流程的基础上,根据国网公司的状态工作流程要求,进一步优化了状态检修工作流程,明确了各级生产管理人员的工作职责^[5]。具体内容如下。

各专业班组负责信息收集、数据整理,并编制班组初评意见上报专业所(车间、县局)。该工作每年至少一次,在每年7月1日前完成。专业所(车间、县局)在接到班组初评意见后5个工作日内,组织技术人员完成工区初评报告,并递交本单位状态检修工作小组。

各单位工作小组在收到初评报告后,在5个工作日内组织专家组完成初评报告的专业评审,并形成状态评价专业报告,提交生产技术部。各单位生技部依据状态评价专业报告,在5个工作日内综合相关部门意见,形成状态检修综合报告,上报本单位领导小组审批。领导小组应在5个工作日内完成审批工作。220 kV及以上输变电设备状态检修综合报告报省公司审批。

省公司状态检修工作小组在收到基层电业局(公司)状态评价综合报告后8个工作日之内,组织专家组对报告进行审核,并出具专业报告,报省公司

生产技术部。省公司生产技术部依据专业报告,在5个工作日之内形成综合报告,报状态检修领导小组。省公司状态检修领导小组在8个工作日之内批复综合报告并反馈给省公司生产技术部。

省公司生产技术部在3个工作日之内将省公司状态检修领导小组批复的综合报告下达各单位。各电业局(公司)依据本单位领导小组和省公司批复的综合报告,编制各类检修计划,并按设备分级管理权限上报审批。

3 新技术新方法在状态检修工作中的应用

3.1 开展带电检测技术推广与应用

国网公司在其颁布的Q/GDW 168《输变电设备状态检修试验规程》中清晰地表明了适当放宽停电的例行试验,加强带电检测的技术路线。为进一步加强输变电设备状态管理,积极应用带电检测技术到电力生产中,国网公司专门印发了《电力设备带电检测技术规范(试行)》,用以规范和有效开展电力设备带电检测工作^[8]。伴随着中国科学技术的突飞猛进,电力设备的带电检测技术也在与时俱进。全新的检测技术的出现不仅拓展了电力设备检测的范围,而且能更为有效地进行潜伏性隐患的分析与判断,与传统试验方法的结合能够为电力设备的可靠运行提供全方位的技术支持。目前电力设备带电检测技术已经是电力设备安全、稳定运行的重要保障,它可以大大提高试验的真实性和灵敏度,及时发现绝缘缺陷,而且还不影响电力设备的正常运行,不需要停电,能够很好地弥补传统常规试验检测方法的不足。

目前在四川电网状态检修工作中开展较多的带电检测技术主要有红外/紫外检测技术、SF₆气体成像检漏技术、SF₆气体分解物检测技术以及局部放电超声波检测技术/超高频检测技术等^[9]。为进一步提高带电检测的准确性和可靠性,四川电网更多的是侧重于非电量在线检测技术的应用与推广,其中主要原因是非电量检测技术受现场复杂的电磁场环境影响较小,编著出版了《输变电设备状态检修非电量测试技术》科技专著,为电力系统中从事生产管理、科研、试验、检修等人员提供了一本技术性与实用性并重的专业书籍^[10]。随着今后带电检测

技术的不断发展和成熟,将会在状态检修工作中显得越来越重要。

3.2 建立状态检修辅助决策系统

开展状态检修工作应积极推进设备管理信息化建设,有助于加强对设备信息的全过程管理和分析,提高状态诊断的效率和准确性,避免手工分析可能造成的数据不全面、分析不深入、标准不统一等问题,为设备状态的确定奠定良好的基础。因此国家电网公司在《国家电网公司设备状态检修管理规定(试行)》中明确提出了“依据《输变电设备状态检修辅助决策系统技术导则》,逐步建立状态检修信息管理系统”^[1]。该导则是指导和规范输变电设备状态评价系统建设的主要技术依据,规定了输变电设备状态检修辅助系统应具备的统一业务功能模型、接口规范、系统平台、软件设计等技术要求^[11]。

辅助决策系统主要是根据状态评价相关导则,实现对输变电设备的参数、状态量、信息点、判断依据、预警规则和评价规则作模型定义,为数据采集、数据处理、监测预警和状态评价等业务模块提供依据^[12]。首先需要从外部生产系统获取设备台帐数据、巡检数据、试验数据和其他数据(如不良工况等),形成反映设备健康状态特征指标的原始数据集。再进行原始数据分析处理,根据评价业务需要对数据采取必要的过滤、解析、组合等处理手段,使其成为反映设备健康状态的状态量^[13]。并依据输变电设备状态特征量和状态评价相关导则标准,对反映设备健康状态的各指标项数据进行分析评价,并最终得出设备总体健康状态等级。

辅助决策系统最后能给出决策建议,是以设备状态评价结果为基础,依据状态检修导则确立分级维修标准,推荐具体检修项目和检修时间,并递交设备管理人员进行实施安排。同时该系统能实时监控状态量的变化,对于超出状态评价导则和规程规定阈值范围的状态量指标,依据不同的类别和等级及时向各级设备管理人员发布预警信息。

4 结 语

四川省电力公司按照国网公司颁布的状态检修

相关制度标准,结合四川电网设备特点,积极开展制度创新与流程优化,从管理、技术、资料与信息收集、执行、宣贯与保障等5个方面建立了一套完整的以状态评价为基础、辅助决策系统为支撑、标准化作业为保障的输变电设备状态检修体系。通过带电检测技术与辅助决策系统等新技术的推广应用,顺利保障了四川电网设备检修制度从定期检修向状态检修的转变,以及今后全省状态检修工作的科学有序开展。

参考文献

- [1] 国家电网公司生产技术部. 国家电网公司设备状态检修规章制度和技术标准汇编[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 杨红军, 刘国贤, 郭继芳, 等. 500 kV 变电设备状态检修技术[J]. 电气应用, 2008, 27(6): 79-82.
- [3] 张怀宇, 朱松林, 张扬, 等. 输变电设备状态检修技术体系研究与实施[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 70-73.
- [4] 陈安伟. 输变电设备状态检修的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 215-218.
- [5] 四川省电力公司. 四川省电力公司输变电设备状态检修管理规定(试行)[Z]. 2009.
- [6] 陈海波. 华东电网公司开展输变电设备状态检修工作的实践[J]. 华东电力, 2009, 37(7): 1059-1062.
- [7] 四川省电力公司. 四川省电力公司输变电设备状态检修试验规程实施细则(试行)[Z]. 2009.
- [8] 国家电网公司. 电力设备带电检测技术规范(试行)[Z]. 2010.
- [9] 徐克华. 非电量在线检测技术在状态检修中的应用[J]. 四川电力技术, 2009, 32(6): 79-81.
- [10] 胡灿, 刘平. 输变电设备状态检修非电量测试技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011.
- [11] 国家电网公司. 国家电网公司输变电设备状态检修辅助决策系统建设技术原则(试行)[Z]. 2008.
- [12] 柳劲松, 李晓露, 刘东, 等. 输变电设备状态检修系统的基础数据服务平台分析[J]. 华东电力, 2010, 38(2): 216-219.
- [13] 宋人杰, 王晓东. 输变电设备状态检修评估分析系统的研究[J]. 继电器, 2008, 36(9): 54-57.

(收稿日期: 2012-06-05)

电力设备全寿命周期管理分析模型的建立 及应用研究

马 薇

(北京市电力公司, 北京 100031)

摘 要: 主要探讨如何对供电企业固定资产进行精细化管理, 以实现供电企业安全供电的基本目标和追求利润最大化的目标。研究思路是遵循固定资产购置、运行、维护、报废这一生命周期过程, 找出影响供电企业固定资产全生命周期正常运行的技术因素和成本费用因素, 运用精细化管理理论构建出一套完整的固定资产精细化管理方法。还对供电企业中最重要固定资产——变电设备的技术参数进行回归分析、对其成本费用进行因素分析, 找出了影响固定资产运行的重要因素, 确立了状态检修在固定资产维护过程中的主导地位。

关键词: 固定资产; 全生命周期; 精细化管理; 回归分析; 绩效考核

Abstract: The main subject is to discuss how to apply the fine management to the fixed assets of power supply enterprises so that to achieve their fundamental aim, that is, supplying power safely, and their enterprise goal, that is, profit maximization. The research thought is to find out the technical factors and the cost factors that affect the normal operation of the life circle of the fixed assets in power supply enterprises by following the life circle of purchase, running, maintenance and retirement of the fixed assets, and to launch a full set of fine management measures for fixed assets according to the fine management theories. And then, taking the most important fixed assets of power supply enterprises – the transformation equipment as an example, its technical parameters are analyzed by using regression analysis as well as its costs by using factor analysis, so that the important factors influencing the running of fixed assets are found out, and the leading role of condition – based maintenance is defined during the maintenance of fixed assets.

Key words: fixed assets; life circle; fine management; regression analysis; performance assessment

中图分类号: TM407.6 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0068-05

0 前 言

变电设备的主体是变压器, 它是电力生产企业最主要的生产资产之一, 它的特点是设备价值高、专业性强、技术复杂、故障率也高, 对管理维护的要求很高, 一旦出现问题, 将会导致大面积停电。由于供电企业固定资产的自身特点, 对其进行精细化管理主要是对其整个寿命周期进行控制。以变电设备为例, 其寿命周期主要包括购置、运行、维护、报废 4 个大的阶段。每个阶段的管理状况都直接影响变电设备的使用寿命和成本支出状况, 下面将通过数学模型对其进行详细分析。

1 变电设备全寿命周期管理的回归分析

影响变电设备正常运行的因素有很多, 例如产

地、已使用年限、定期寿命检修频率、绝缘方式、一般缺陷处理频率、有载开关检验频率、状态检修频率、购置成本等。北京电网的安全可靠性为 99.97%, 且没有停滞的变电设备, 也就是说一组变电设备一年只允许停止运行 2.628 h。现以某供电公司运行不超过 10 年的变电设备为研究对象, 采集了 20 组数据样本, 以分析上述 8 个因素对变电设备正常运行的影响为目的, 建立线性回归模型。

1.1 线性回归模型的建立

采集了某供电公司 20 组变电设备的各类数据, 根据调研结果, 变电设备按照电压等级分为 500 kV、220 kV、110 kV、35 kV。不同等级的变电设备从成本, 到安装调试、运行维护的差别都很大, 故在采集数据样本时, 只选取电压等级为 110 kV 的变电设备, 因此不会影响问题的研究。产地、已使用年限、定期寿命检修频率、绝缘方式、一般缺陷处理频率、

有载开关检验频率、状态检修频率、购置成本、故障频率,分别用变量 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, y$ 表示,其中变量 x_1, x_4 为虚拟变量。

$$x_1 = \begin{cases} 1 & \text{进口设备} \\ 2 & \text{合资设备} \\ 3 & \text{国产设备} \end{cases} \quad x_4 = \begin{cases} 1 & \text{SF}_6 \\ 2 & \text{油} \end{cases}$$

假设以上变量有如下的线性关系。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 + \beta_7 x_7 + \beta_8 x_8 + \varepsilon \quad (1)$$

式中,令 $\beta_0 = 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8$ 是未知参数, ε 是随机误差。用一组变量 ($y_i, y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, y_{i4}, y_{i5}, y_{i6}, y_{i7}, y_{i8}$) 表示样本的第 i 组数据,由 (1) 式可知 y_i 具有如下数据结构式。

$$y = \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3} + \beta_4 x_{i4} + \beta_5 x_{i5} + \beta_6 x_{i6} + \beta_7 x_{i7} + \beta_8 x_{i8} + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, 20) \quad (2)$$

其中, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{20}$ 相互独立,且均服从 $N(0, \sigma^2)$ 。

1.2 利用 EXCEL 进行回归分析

对其进行回归,由表 1 可得 $\hat{\beta}_1 = 0.046\ 711, \hat{\beta}_2 = -0.043\ 816, \hat{\beta}_3 = 0.942\ 688, \hat{\beta}_4 = 0.471\ 23, \hat{\beta}_5 = 0.262\ 359, \hat{\beta}_6 = 1.491\ 73, \hat{\beta}_7 = -1.566\ 19, \hat{\beta}_8 = 0.072\ 32$ 可得如下结果。

$$y = 0.046\ 711x_1 - 0.043\ 86x_2 + 0.942\ 688x_3 + 0.471\ 23x_4 + 0.262\ 359x_5 + 1.491\ 73x_6 - 1.266\ 19x_7 + 0.072\ 324x_8 \\ (0.308) \quad (-1.050) \quad (0.683) \quad (3.318) \quad (2.731) \\ (1.004) \quad (-2.729) \quad (1.303)$$

$$R^2 = 0.941\ 699 \quad \bar{R}^2 = 0.886\ 797$$

1.3 置信度检验

对故障频率与其影响因素所作的线性关系假设是否成立,进行如下检验。如果假设不成立,即有条件 $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = \beta_7 = \beta_8$ 。根据运算结果得 $F = 11.750$,在 $\alpha = 0.05$ 的水平下,查 F 分布表得, $F_{0.95}(8, 11) = 4.74$,由于 $11.750\ 52 > 4.74$,故拒绝 H_0 ,即故障频率关于其影响因素的 8 个变量的回归方程在 $\alpha = 0.05$ 水平下有显著意义。

1.4 显著性检验

由运行结果表 1 可得

$$t_1 = 0.308\ 714, t_2 = -1.050\ 99, t_3 = 0.683\ 36, \\ t_4 = 3.318\ 813, t_5 = 2.730\ 566, t_6 = 1.003\ 695, \\ t_7 = -2.729\ 09, t_8 = 1.303\ 238$$

α 取 $=0.05$,查 T 分布表得 $t_{0.95}(11) = 1.796$,由于 $|t_1| < 1.796, |t_2| < 1.796, |t_3| < 1.796, |t_4| > 1.796, |t_5| > 1.796, |t_6| < 1.796, |t_7| > 1.796, |t_8| < 1.796$,所以对 $j=4, 5, 7$ 接受 $H_0, j=1, 2, 3, 6, 8$ 拒绝 H_0 ,也就是说在 0.05 的水平下,一般缺陷处理频率、绝缘方式、状态检修频率对故障频率有显著影响,而产地、已使用年限、定期寿命检修频率、有载开关检验频率、购置成本对故障频率没有显著影响。

1.5 多重共线分析

通过 EXCEL 程序检验相关系数,可得 $x_1, x_4; x_1, x_8; x_8, x_4$ 可能存在多重共线,即产地、绝缘方式、产地、购置成本、绝缘方式、状态检修频率,可能存在严重的线性相关性。运用回归法对其进行分析,步骤如下。

对 x_1 和 y 进行回归,得出

$$R^2 = 0.098\ 374 \quad \bar{R}^2 = 0.045\ 743$$

对 x_4 和 y 进行回归,得出

$$R^2 = 0.422\ 831 \quad \bar{R}^2 = 0.370\ 199$$

对 x_1, x_4 和 y 进行回归,得出

$$R^2 = 0.467\ 914 \quad \bar{R}^2 = 0.382\ 798$$

对 x_4 和 y 进行回归,得出

$$R^2 = 0.422\ 831 \quad \bar{R}^2 = 0.370\ 199$$

对 x_8 和 y 进行回归,得出

$$R^2 = 0.608\ 743 \quad \bar{R}^2 = 0.556\ 111$$

由于 x_8 和 x_4 是负相关,所以用 x_8 倒数进行回归。

对 x_4, x_8 和 y 进行回归,得出

$$R^2 = 0.588\ 137 \quad \bar{R}^2 = 0.509\ 7$$

方程调整:对于故障频率、绝缘方式、购置成本存在严重线形相关。由于加入 x_4 后,拟合度并没有很大变化,所以剔除变量 x_4 。原方程调整为

$$y_i = \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3} + \beta_5 x_{i5} + \beta_6 x_{i6} + \beta_7 x_{i7} + \beta_8 x_{i8} + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, 20) \quad (3)$$

其中, y 为故障时间。

对方程进行回归:由运行结果可得 $t_2 = 3.915\ 8, t_3 = 0.243\ 1, t_5 = 3.383\ 7, t_6 = 1.522, t_7 = -2.098, t_8 = -2.141$ 。取 $\alpha = 0.05$,查 T 分布表得 $t_{0.95}(13) = 1.770\ 9$,由于 $|t_2| > 1.770\ 9, |t_3| < 1.770\ 9, |t_5| > 1.770\ 9, |t_6| < 1.770\ 9, |t_7| > 1.770\ 9, |t_8| > 1.770\ 9$,对 $j=2, 5, 7, 8$ 接受 $H_0, j=3, 6$ 拒绝 H_0 ,也就是说在 0.05 的水平下,一般缺陷处理频率、状态检修频率、已使用年限、购置成本对故障频率有显著影响,而定

期寿命检修频率、有载开关检验频率对故障频率没有显著影响。

方程为

$$y = 1.162x_2 + 2.037x_3 - 6.43x_7 - 0.63x_8 \\ (3.915\ 8) \ (3.383\ 7) \ (-2.098) \ (-2.141) \\ R = 0.700\ 803 \quad \bar{R}^2 = 0.690\ 735$$

由以上分析可以得出结论:一般缺陷处理频率、已使用年限与故障频率是正相关;购置成本、状态检修频率与故障频率是负相关。

2 变电设备成本因素分析

前面提到的全寿命周期方程为基础构建模型:

$$LCC = CI + CO + CM + CD$$

式中,LCC 为全寿命周期成本(life cycle cost)。

CI 为投入成本,包括采购成本及建设成本 (investment costs); 安装时花费的运输、人工、调试等全部费用; CO 为运行成本(operation costs); 试验

表 1 运用差额分析法算出与均值相比较各种成本变化量对总成本变化量的影响

设备型号	运行成本 变化量	占总成本 %	维护成本 变化量	占总成本 %	废弃成本 变化量	占总成本 %	购置成本 (M) 变化量	占总成本 %	总成本 变化量
合肥 ABB/SSZ	27.23	77.80	8.09	23.11	0	0	-47.5	-135.71	35
奥地利伊林 (ELIN) / TDQ - 504L11	-141.8	152.44	49.09	-52.78	0	0	102.5	-110.22	-93
西安变压器厂 /SSZ9	360.23	90.51	38.09	9.57	0	0	-197.5	-49.62	398
比利时 PAUWELS/ORF	-33.77	-225.13	49.09	327.27	0	0	52.5	350.00	15
中山 ABB /SSZ9	-20.77	159.77	8.09	-62.23	0	0	-47.5	365.38	-13
西安变压器厂 /SSZ9	214.23	81.46	49.09	18.67	0	0	-147.5	-56.08	263
奥地利伊林 (ELIN) / TDQ - 255R22T9K - 99	-20.77	159.77	8.09	-62.23	0	0	102.5	-788.46	-13
奥地利伊林 (ELIN) / TDQ - 255R22T9K - 100	-73.77	88.88	-8.91	10.73	0	0	102.5	-123.49	-83
中山 ABB /SSZ9	6.23	-56.64	-16.91	153.73	0	0	-47.5	431.82	-11
中山 ABB /SSZ9	126.23	97.10	4.09	3.15	0	0	-47.5	-36.54	130
中山 ABB /SSZ9	27.23	85.09	5.09	15.91	0	0	-47.5	-148.44	32
保定保菱 /SSZ9	206.23	91.66	19.09	8.48	0	0	2.5	1.11	225
中山 ABB /SSZ9	-193.8	116.73	28.09	-16.92	0	0	-47.5	28.61	-166
法国施耐德 (JST) /PLN	53.23	166.34	-20.91	-65.34	0	0	102.5	320.31	32
法国施耐德 (JST) /PLN	74.23	72.77	28.09	27.54	0	0	102.5	100.49	102
保定保菱 /SSZ9	74.23	75.74	24.09	24.58	0	0	2.5	2.55	98
中山 ABB /SSZ9	-103.8	117.92	16.09	-18.28	0	0	-47.5	53.98	-88
法国施耐德 (JST) /PLN	-193.8	90.97	-18.91	8.88	0	0	102.5	-48.12	-213
中山 ABB /SSZ9	-193.8	120.35	33.09	-20.55%	0	0	-47.5	29.50	-161
法国施耐德 (JST) /PLN	-193.8	95.45	-8.91	4.39	0	0	52.5	-25.86	-203

费用:在认定设备技术标准中所进行的必要型式或特殊试验项目,如短路耐受能力试验、温升试验和局部放电测量等所发生额外试验费用,以及状态检修所需要的一切费用。CM 为维护成本(maintenance costs);在寿命周期内按照寿命检修要求,定期更换零部件等备件的费用,以及抢修、维护、试验、巡检等所需要的材料费、人工费、交通费等。CD 为废弃成本(disposal costs)。变电设备退役后拆除、运输等费用减去变电设备报废后可回收的费用。

变电设备的使用阶段是变电设备寿命周期中占时最长的一个阶段,以 LCC 最小为目标的设备管理是必要的手段。将 LCC 值除以变电设备的使用寿命(即使用年限,通常为 30 年),得到每年的运行成本,称为 EUAC, $EUAC = LCC/N$ (equivalent uniform annual cost)。在相同使用效果的条件下,EUAC 越小,系统和设备的经济效益越高。

根据收集的原始数据,运用差额分析法算出与均值相比较各种成本变化量对总成本变化量的影响(见表 1)。

结论:由差额分析法可以得出运行成本是总成本变化的主因素,由于运行成本主要包括状态检修的相关成本,这也就和回归分析的结论一致。

3 模型结果分析以及专业管理目标的改进方法

3.1 模型结果分析

对于以上两个模型,可以得出以下几点结论。

(1) 提倡状态检修。状态检修就是在设备的运行在有可靠的保证措施(其他监测手段:如在线监测设备的发热、运行参数、运行中测试绝缘油及气体分析数据)及依据(历次的检修、调试、试验情况良好)的情况下,适当延长或缩短(如果数据不良也可能缩短)检修周期,根据设备的运行状况和绝缘状态进行检修的一种做法。一般缺陷处理频率、状态检修频率是变电设备运行状态的参数,必要的维护是必须的,检修工作应结合设备的健康状况评估结果确定。

(2) 频繁定期寿命检修工作不应提倡,寿命检修与设备的正常运行没有必然关系。反之工作状态良好的设备若强制按照计划进行寿命检修,一方面影响了设备的正常工作,另一方面,容易造成相关零

件的损坏及新问题发生,反而不利于设备正常工作。供电企业历史上长期沿用寿命检修方式,这并没有遵循变电设备自身特点,不但造成了成本的大幅提高,也没有起到好的效果。因此在以后的设备管理中,应提倡状态检修。

(3) 质量好的设备(如进口、合资产品)可以适当延长检修与维护周期。从以上分析中可以看出,购置成本较高的设备绝缘方式比较先进,设备运行状态也比较稳定。对设备的管理应该分门别类。对于老化比较严重,技术比较落后且还在运行的设备应给予更多关注。对状态比较好的设备没有必要浪费过多成本进行检修管理。对于重要缺陷,进行及时检修是必须与必要的,通过状态监控设备发现异常的设备,及时给予修理,可以保证设备的安全运行及延长设备寿命。

(4) 追求利润最大化,提高绩效水平是企业追求的目标。在固定资产的管理中,每一年的运行成本越小,资产的绩效水平也就越高。每年的运行成本由整个寿命周期的运行成本分摊到使用年份。因此,应该对总成本进行控制的同时尽量延长设备的寿命周期,这样才能使得单位期间的成本最小化。

3.2 专业管理目标改进方法

为实现电网坚强的目标,确保变电设备的管理和运行水平不断得到提高,更为了提高企业的绩效水平,下一步应该从以下几个方面加大工作力度,使变电设备管理不断得到改进。

(1) 进一步实现设备的全过程管理。从组织订货、设备选型、安装调试、验收投运到运行维护、日常检修每个环节都加大管理力度,抓好执行,进一步明确完善设备管理各个环节的流程和相关单位的责任,严肃责任追溯和考核。日常工作中重视设备的缺陷管理,引导职工加深对各自分管设备的了解程度,对设备运行状态做到心中有数,打好状态检修的基础。在状态检修的基础上,根据设备的状况开展有针对性的大修和改造,进一步提高设备在全寿命周期的可控、在控水平。

(2) 大力推广精细化作业。在实现专业化检修和运行的基础上,继续深化精细化建设,按照设备的寿命周期特点和技术特点对其进行管理,针对各种设备的特点和影响其运行的重要环节制定管理方法,并对其进行详细分析,使之专业化、系统化,更加符合精细化管理需要,在具体执行中狠抓落实。

(3) 对与设备相关的成本费用支出进行全面的控制分析。科学控制成本的思想应该贯穿在整个寿命周期中,从最初的可研阶段,就应该拿出各种方案的预计后续支出和状态报告。在设备运行的各个阶段都进行收入成本的配比分析,对设备的使用效率进行评价。

(4) 提高人员素质。针对目前变电设备更新换代快、高科技含量高的特点,加大岗位培训和操作技能培训。认真组织好对有关反措和规程、规范的学习,深刻领会内涵;有针对性的开展各种专业技术、技能比武,以赛促练,促进职工学技术、练技能的积极性,使职工的专业技术水平有显著的提高。

4 结 语

提出了固定资产全寿命周期理论,并将 LCC 全

寿命周期理论应用于供电企业固定资产管理环节。通过回归分析,确定了影响固定资产运行的重要因素,确立了状态检修在固定资产维护过程中的主导地位。

本系统只考虑了影响固定资产正常运行的主要因素,由于数据问题没能将其影响因素再作细分。对于一些辅助因素考虑的也不够全面。例如:由于计量问题,忽略了惩罚成本因素。为了方便计算,对固定资产的报废成本取了一个固定值。这都对模型的精确性产生了影响。固定资产全寿命周期的管理方法,比较适用于供电企业中资产净值较大、对企业的生产经营活动有着比较重要的影响和技术含量高的设备。从成本效益原则和精细化管理的初衷考虑,对于资产价值较小,重要性较低的资产不适用于此方法。

(收稿日期:2012-08-20)

(上接第 63 页)

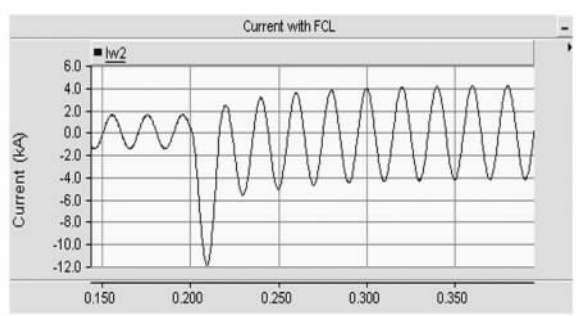


图 8 加入 FCL 时变压器出口短路电流波形

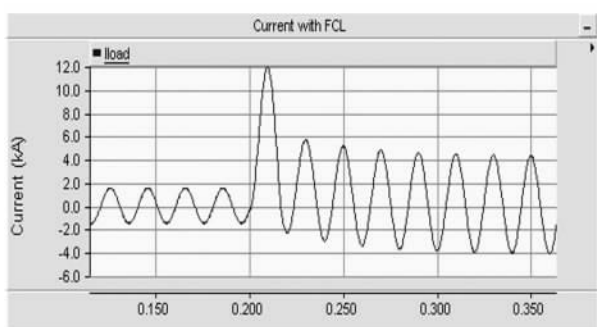


图 9 加入 FCL 时线路短路电流波形

果良好,电流波形良好,能够在实际中得到应用。

4 结 语

研究了一种新型的基于可控门极晶闸管(IGCT)的故障电流限制器,正常运行时串在电路中,功耗很小;短路时,投入限流电抗限流。通过实际试验,证明

该故障限流器不仅能够限制短路电流还能够抑制电压跌落,提高系统的暂态稳定性,具有良好的技术和经济性能,在电力系统中具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 何仰赞,温增银.电力系统分析(第三版)[M].武汉:华中科技大学出版社,1996.
- [2] 李光琦.电力系统暂态分析[M].北京:水利电力出版社,1985.
- [3] 江道灼,敖志香,卢旭日,等.短路故障限流技术的研究与发展[J].电力系统及其自动化学报,2007,19(3):8-19.
- [4] 王华昕,习贺勋,汤广福,等.面向超高压电网的故障限流器的应用研究[J].高电压技术,2007,33(5):99-102.
- [5] 曾琦,李兴源,蔡鑫贵,等.带串联补偿故障限流器的仿真和实验[J].电力系统自动化,2003,27(14):54-56.
- [6] 郑敏,李兴源,刘俊勇,等.具有串联补偿作用的新型故障限流器的拓扑结构和仿真[J].中国电机工程学报,1999,19(6):52-55.

(收稿日期:2012-07-18)

变压器状态评估技术现状研究

郑朝晖¹, 徐伟¹, 吕鸿宾¹, 张登²

(1. 泸州电业局, 四川 泸州 646000;

2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 介绍了变压器状态评估技术的现状和最新进展, 列举了目前现有的几种典型变压器状态评估方法, 对每种评估方法的评估过程和优缺点进行了分析, 指出了目前变压器状态评估技术存在的问题和困难, 并提出了变压器状态评估技术的研究方向和发展趋势。分析表明, 电力系统要实现状态检修这个长远目标, 有效的状态评估手段是其中不可或缺的一部分。

关键词: 变压器; 状态评估; 人工智能; 数据挖掘; 状态检修

Abstract: The present situation and the latest progress of condition assessment technology for transformer are presented. Several representative condition assessment methods for transformer are provided. The assessment process, the merits and demerits of each assessment method are analyzed. The existing problems and difficulties in condition assessment technology of transformer are pointed out. The research orientation and development trend of condition assessment technology for transformer are presented. The analysis results show that the effective condition assessment method is an indispensable part of power system, if condition-based maintenance will come true.

Key words: transformer; condition assessment; artificial intelligence; data mining; condition-based maintenance

中图分类号: TM407 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0073-04

0 引言

随着中国电力系统建设规模的日益增大以及复杂程度的日益提高, 电网运行可靠性与安全性的要求也越来越高, 传统的计划检修模式因为存在“检修过剩”和“检修不足”的问题, 经常造成变压器盲目检修, 增加了产生新隐患的概率, 已经满足不了现代变压器在安全性、稳定性与经济性上的要求。

状态检修是以设备的当前实际工作状况为依据, 通过先进的状态监测手段、可靠的评价手段和准确的寿命预测手段来判断设备的状态。在当前电力企业市场化的环境下, 状态检修取代传统检修方式是电力系统发展的必然趋势。状态检修提出“该修必修, 修必修好”的检修形式, 能够节省检修工作中的大量人力物力财力, 大大提高变压器的运行安全性与稳定性, 因此状态检修在变压器的检修中得到了越来越广泛的应用与推广。

科学合理的状态评估作为实现变压器状态检修的重要前提之一, 也受到越来越多的重视, 准确的状态评估对指导变压器的检修工作、降低变压器维修费

用以及提高变压器运行可靠性都具有十分重要的意义。资料表明, 对电力变压器等设备运行状态实施状态评估, 可使每年的维修费用减少 25% ~ 50%, 故障停电时间减少 75%^[1]。

1 变压器状态评估现状

1.1 状态评估现状

对变压器进行状态评估即结合某台变压器的出厂试验数据、交接试验数据、历年预试数据、历年在线监测数据等各类试验数据, 采用一定的方法(人工智能、数据挖掘等)对这些数据以及它们的变化趋势进行科学地分析, 并同时考虑变压器的家族缺陷数据、运行环境数据等非试验数据的影响, 来综合判断变压器的整体运行状态情况。变压器状态评估流程如图 1 所示。

随着状态检修制度的推进与在线监测技术的发展, 变压器的状态评估已经具备了较强的技术基础, 国内外学者针对变压器状态评估技术也进行了大量的研究工作。目前针对变压器运行状态的评估方法主要分以下为 3 类。

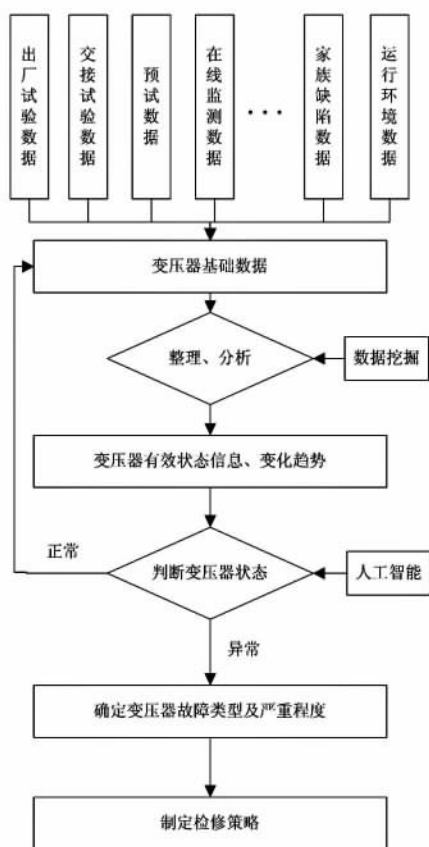


图 1 变压器状态评估流程

(1) 评分法。这种方法是按照一定的评分标准,根据变压器的不同状态参量数值变化,对变压器进行打分或者扣分,分值的大小即决定变压器处于何种运行状态。中国电网公司组织编制的《油浸式变压器(电抗器)状态评价导则》即是采用这种状态评分的解决方案^[2]。另外还有加拿大 Powertech Labs 公司开发了一套软件,程序根据各测试项的测试值、运行历史和寿命等自动计算出设备的健康指标,从而确定变压器的状态等级^[3]。这种采用评分标准的方法来判断变压器的运行状态,具有良好的可操作性与状态量全面等特点,对状态检修工作具有一定的指导作用。然而,其判据及阈值的选定缺乏相应的理论基础,因此这种方法在实际中的应用还有待考察。

(2) 部分特征判别法。这种方法是根据变压器的某一部分故障特征表现来判断变压器的运行状态,印尼国家电力公司提出的基于热应力的变压器状态评估方法就属此类^[4]。他们将变压器状态分为好、良好和差三个等级,采用顶层油温、负荷比、热点温度、油界面张力、产气量以及产气率等参数,结合神经网络对变压器状态进行评估。其中各参量所决定的状态等级根据绝缘介质承受应力的极限以及统计数据获取。这种方法仅考虑某一部分与变压器运行状态

关系十分密切的特征量,因此其并不能全面反映变压器的整体状态。

(3) 基于信息处理技术的评估方法。这类方法主要是针对变压器状态信息种类繁多与数量庞大的特点,采用合适的信息处理技术来判断变压器的实际运行状态。近年来国内外对于变压器状态评估的研究重点也集中在本类方法的应用,如基于模糊理论的评估方法^[5]、基于证据推理的评估方法^[6-7]、基于灰靶理论的评估方法^[8]、基于支持向量机的评估方法^[9]、基于人工神经网络的评估方法^[10]、基于可拓分析的评估方法^[11]等。

1.2 典型状态评估方法

1.2.1 基于模糊理论的评估方法

基于模糊理论的评估方法也有很多种,如变权模糊综合评判法^[12]、模糊层次分析法^[13-14]等。这类方法主要针对变压器状态信息不确定性或模糊性的特点,引进模糊理论的知识,提出基于模糊综合评判的变压器状态评估的方法,建立变压器状态综合评判模型。它的引入打破了以往变压器评估工作中简单地变压器状态进行合格还是不合格的划分,从而达到了评估变压器这个复杂系统时精确性和有意义性的相对统一。基于模糊理论的评估方法的重点在于权重集、评判集与隶属函数的确定,而模糊理论并没有明确的权重确定方法,因此经常结合其他方法一起来评估变压器的状态。

1.2.2 基于证据推理的评估方法

证据推理又称为 D-S 证据理论^[15],是一种不确定性推理方法,可根据 D-S 融合规则,依靠证据的积累,不断地缩小假设集,有效地融合不同的信息,具有较强的决策处理能力。证据推理理论可应用于多种设备的状态评估或故障诊断领域^[16],其在信息融合处理方面具有明显的优越性,而不足之处在于当证据冲突严重的情况下,基于 D-S 证据理论推导的结果往往与实际情况不符。据此,文献[17]提出了一种改进的证据推理方法来对变压器进行状态评估,解决了证据出现冲突所带来的问题。

1.2.3 基于支持向量机的评估方法

支持向量机^[18-19]是数据挖掘中的一项新技术,其在解决小样本、非线性及高维模式识别问题中表现出许多特有的优势,并能够推广应用到函数拟合等其他机器学习问题中。基于支持向量回归的变压器状态评估就是将各个评价指标作为支持向量机的输入

样本,将支持向量机的实际评估结果作为输出,调整相关的参数通过学习和测试使不同的输入向量得到相应的输出值,这样通过一定的样本就可以训练这个系统,就将各个指标的权重存储在网络中(权重是隐含在训练模型中),实现非线性回归^[20-21]。为了解决支持向量机不能用于多类问题的缺陷,文献[22]提出了基于多分类支持向量机的变压器状态评估方法,在传统支持向量机的基础上进行了一定的改进。

1.2.4 基于可拓分析的评估方法

物元分析由中国学者蔡文于 1983 年提出,结合可拓集合的基本思想,利用关联函数可以取负值的特点,使得根据事物的特征量值判断事物属于某集合的程度更加全面和精细化^[23]。文献[11]对可拓分析在变压器状态评估中的应用进行了研究,证明了可拓分析用于变压器状态评估的可行性;文献[24]在可拓分析的基础上,提出了基于多级可拓理论的变压器状态评估方法,能有效解决二级甚至多级评价问题,其应用范围更广。

2 目前存在的问题

尽管近年来变压器及其他电气设备的状态评估工作受到越来越多的重视,但由于在技术条件等方面存在相当大的局限性,状态评估仍然大多处于学术研究阶段,能够应用于实际的很少。目前变压器状态评估工作存在的问题主要有如下几个方面。

(1) 变压器在线监测技术水平处于起步阶段,无法为状态评估工作提供准确可靠的在线监测数据。目前变压器在线监测方面的研究有很多,如局部放电、介质损耗因数、油中溶解气体(DGA)、泄漏电流等等,但除了油中溶解气体在线监测技术较成熟,能够为检修工作提供一定的指导之外,其他在线监测技术都还在研究与待验证之中,没有发展到能够应用于实际生产的阶段。没有准确的在线监测数据支持,使得变压器的状态评估工作产生了相当大的局限性。

(2) 电力系统数据管理方法落后,对数据挖掘工作形成了一定的制约性。多年以来,由于计算机应用尚未普及,电力系统中数据都是采用纸质文件记录,这极易导致相当一部分的数据错误甚至丢失的情况。而近年来虽然逐步开始采用计算机管理数据,但现场的数据一般还是靠工作人员手写输入到纸质文件,然后再录入计算机,因此数据错误或丢失的情况虽然有

了一定的改善,但仍然存在较多的问题。数据的不完整性直接导致数据挖掘工作的开展受到了极大的限制,甚至会得出错误的结论,这对变压器的状态评估工作也产生了不利的影响。

(3) 数据挖掘与人工智能技术在电气设备状态评估领域的应用发展还不成熟。目前变压器的状态评估主要还是依靠单一状态量的测量结果来确定,常常会导致故障错判或漏判的情况,而要综合大量离线数据、在线数据、家族缺陷数据、运行环境数据等来对变压器进行整体评估,就必须要用到数据挖掘或人工智能技术,因此近年来数据挖掘和人工智能技术在变压器状态评估方面的应用研究发展的很快,但由于研究的时间不长,也没有经过实际的检验,还需要进一步的讨论与验证。

3 今后发展趋势

针对变压器状态评估的现状与存在的问题,可以预测其在今后的发展方向应集中在以下几个方面。

(1) 进一步加强变压器故障机理的基础理论研究。变压器发生某种故障往往是有多种诱因的,只有对这些故障诱因的机理进行深入的研究,才能了解清楚变压器各种故障是如何发生以及各种故障之间的相互联系,才能为在线监测与状态评估技术的发展提供扎实的理论基础。

(2) 继续致力于变压器在线监测技术水平的提高。先进的在线监测技术是实现状态检修的基础,也是变压器准确进行状态评估的前提,只有在具有准确可靠的在线监测数据的基础上,变压器的状态评估工作才能够在状态检修中体现出它的重要意义。因此,当前应大力发展更多种类更先进的在线监测技术,为状态评估的发展提供所需的技术条件。

(3) 在电力系统中提倡数据管理规范化,防止数据错误或丢失的发生。目前国家电网公司正在推广的 sg186 生产管理系统,能够有效汇集下属各子公司的生产管理数据,但由于其故障记录与下属员工绩效评分挂钩,必然会导致许多子公司瞒报故障,这人为造成了数据丢失的发生,给数据挖掘工作增加了不小的难度,需要对此管理办法进行相应的改进。另外现场记录数据可发展平板电脑或 PDA 等便携系统的应用来防止数据丢失或二次录入的错误。

(4) 数据挖掘与人工智能技术需大力发展并在

生产实际中得到检验。由于变压器具有大量并且复杂的数据信息,要通过提取有用的数据信息来对变压器进行状态评估,有效的数据挖掘或人工智能技术的应用是必不可少的。在研究相对成熟的条件下,将之应用于生产实际以得到验证也是其中重要的一个步骤。

4 结 语

近年来,变压器的状态评估已经得到了电力行业各相关部门的高度重视,其在状态检修中所起到的作用也是众所周知的。在变压器状态评估技术上进行细致深入的研究,不仅对变压器在电网中安全运行具有重大的意义,也在学术界具有重要的科研价值,同时也具有广阔的市场前景。虽然目前变压器的状态评估工作还不完善,不能满足电力系统实现状态检修的要求,但只要假以时日,学者们在变压器故障机理、在线监测技术、数据管理以及数据挖掘和人工智能技术等方向上不断地深入探索,必将能够实现对变压器准确可靠的状态评估,为电力系统从计划检修过渡到状态检修奠定坚实的基础。

参考文献

- [1] 赵文清,朱永利. 电力变压器状态评估综述[J]. 变压器, 2007,11(44):9-12,74.
- [2] 国家电网公司,Q/GDW 169-2008,油浸式变压器(电抗器)状态评价导则[S].
- [3] Nick Dominelli, Avaral Rao, Prabha Kundur. Life Extension and Condition Assessment Techniques for an Aging Utility Infrastructure [J]. Power and Energy Magazine, 2006, 4(3):24-35.
- [4] Y. Tamsir, Sumaryadi, H. Gumilang, et al. Thermal Condition Assessment for Power Transformers Operated in Tropical Condition [C]. Condition Monitoring and Diagnosis, International Conference, 2008: 559-561.
- [5] 王谦. 基于模糊理论的电力变压器运行状态综合评估方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [6] W. H. Tang, K. Spurgeon, Q. H. Wu, et al [D]. An Evidential Reasoning Approach to Transformer Condition Assessments [J]. Power Delivery, Transactions, 2004, 19(4): 1696-1703.
- [7] 吴莉琳. 变压器状态评估与信息管理系统的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
- [8] 李建坡, 赵继印, 郑蕊蕊, 等. 基于灰靶理论的电力变压器状态评估新方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2005, 31(1): 201-205.
- [9] 申涛, 朱永利, 李强, 等. 基于支持向量机和 DGA 的变压器状态评估方法[J]. 电力科学与工程, 2008, 24(2): 47-50.
- [10] M. Farrokhi and M. Rafiee. Evaluation of Used and Repaired Power Transformers Using Neural Networks [C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001: 143-146.
- [11] 廖瑞金, 张懿议, 黄飞龙, 等. 基于可拓分析法的电力变压器本体绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 521-526.
- [12] 骆思佳, 廖瑞金, 王有元, 等. 带变权的电力变压器状态模糊综合评判[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 106-110.
- [13] 徐建军, 闫丽梅, 刘小斌. 模糊层次分析法在变压器脆性分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 94-98.
- [14] Feng - Jiao Wu, Guan - Jun Zhang, Shi - Qiang Wang, et al. Research on Condition Assessment Method of Intelligent Power Transformer [C]. International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Bandung, Indonesia, 2011.
- [15] 段新生. 证据决策[M]. 北京: 经济科学出版社, 1996.
- [16] 卜乐平, 刘开培, 侯新国. 采用 D-S 证据推理的电机转子故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(1): 23-26, 126.
- [17] 朱承治, 郭创新, 孙旻, 等. 基于改进证据推理的变压器状态评估研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2332-2337.
- [18] Vapnik V N. Statistical Learning Theory [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1998.
- [19] 邓乃扬, 田英杰. 数据挖掘中新方法-支持向量机[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [20] 赵文清, 朱永利, 张小奇. 应用支持向量机的变压器故障组合预测[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 14-19.
- [21] 赵文清. 基于数据挖掘的变压器故障诊断和预测研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- [22] Ning Hao, Zhuo Dong. Condition Assessment of Current Transformer Based on Multi-classification Support Vector Machine. International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering [C]. Changchun, China, 2011.
- [23] 杨春燕, 蔡文. 可拓工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [24] Qing Xie, Yanqing Li, Hongling Xie, et al. Large Power Transformer Condition Evaluation Based on Multilevel Extension Theory [C]. DRPT, Nanjing, China, 2008.

作者简介:

郑朝晖(1969),女,工程师,主要研究方向为电力系统继电保护。
(收稿日期:2012-07-17)

ZF11-252(L)型断路器控制回路安全隐患分析

李宗宇

(四川超(特)高压运检公司绵阳中心,四川 绵阳 621000)

摘要:河南平高生产的ZF11-252(L)型断路器在500 kV茂县变电站220 kV系统已运行多年,其控制回路是按厂家设计接线。根据厂家提供的资料和现场实际接线,对该断路器控制回路存在的安全隐患进行了分析,并提出改进方案及运行操作中的注意事项,希望对变电安全运行有所帮助。

关键词: ZF11-252(L)断路器;控制回路;安全分析

Abstract: The ZF11-252(L) type circuit breaker manufactured by Pinggao company in Henan province has been run for years in 220 kV system which is controlled by 500 kV Maoxian Substation, its design of control circuit wiring follows the criterion of its producer. According to the actual wiring in the field and the documentations provided by the company, the existing potential safety hazards are analyzed. An improvement scheme and the matters needing attention during the operation are put forward, which will be helpful for the safe operation of substations.

Key words: ZF11-252(L) type circuit breaker; control circuit; security analysis

中图分类号: TM561 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0077-04

ZF11-252(L)型断路器在国内使用较多,断路器的控制采用远方和就地控制。根据厂家提供的资料和现场实际接线,经过认真分析,该型号的断路器在控制回路上存在一定的安全隐患。

1 国内外现状

随着电力系统电压等级的不断升高,国内外对设备安全运行的要求也不断提高,对高电压等级设备的安全控制在不断完善,但国内早期投运的220 kV设备的控制还存在安全隐患,虽然220 kV系统一般不允许就地进行控制^[1],但特殊情况下不可避免地必须进行就地操作,而早期的厂家回路设计却不能满足开关就地控制时保护动作开关跳闸的要求,留下安全隐患,这些隐患在国外设备的控制设计上已有好的解决办法,如ABB的500 kV ERK-3型开关的控制就比较完善^[4],现在投运的国内设备也作了改进,但仍不能满足设备在各种状态下的安全要求。

2 控制回路原理接线图

控制回路中的“远方/就地”切换开关SPT1安装在断路器就地控制柜内,正常运行时置“远方”位置。远方分、合闸脉冲均来自断路器保护屏。遥控分闸/保护动作跳闸时,操作箱——跳闸回路26(主

分闸回路,见图1)——SPT1:15-16——K8接点(低气压、低油压闭锁)——接通跳闸回路开关分闸;操作箱——跳闸回路27(副分闸回路,见图2)——SPT1:19-20——接通跳闸回路开关分闸。

下面就该控制回路存在的问题进行分析,并提出改进方案(本次引用的接线图为三相联动机构,其他分相机构也存在同样问题)。

3 安全隐患分析

“远方/就地”切换开关正常时置于“远方”位置,开关在检修状态时,为了防止开关检修时保护对开关进行传动,对开关检修人员或设备造成伤害而设置的“就地”操作方式。虽然正常情况下严禁切“就地”方式^[1],但在进行事故处理或某种原因运行方式必须立即进行调整等情况,而远方操作又失灵时(监控系统故障、测控故障、监控和测控通讯故障、操作箱故障、遥信回路故障监控不能正确判断设备状态等情况都将不能进行遥控),不得不采取就地操作方式,这时就会承担很大的安全风险。

1) 在该接线方式下,当“远方/就地”切换开关SPT1置“就地”位置时^[3],SPT1:11-12、15-16、19-20三对接点断开;SPT1:9-10、13-14、17-18三

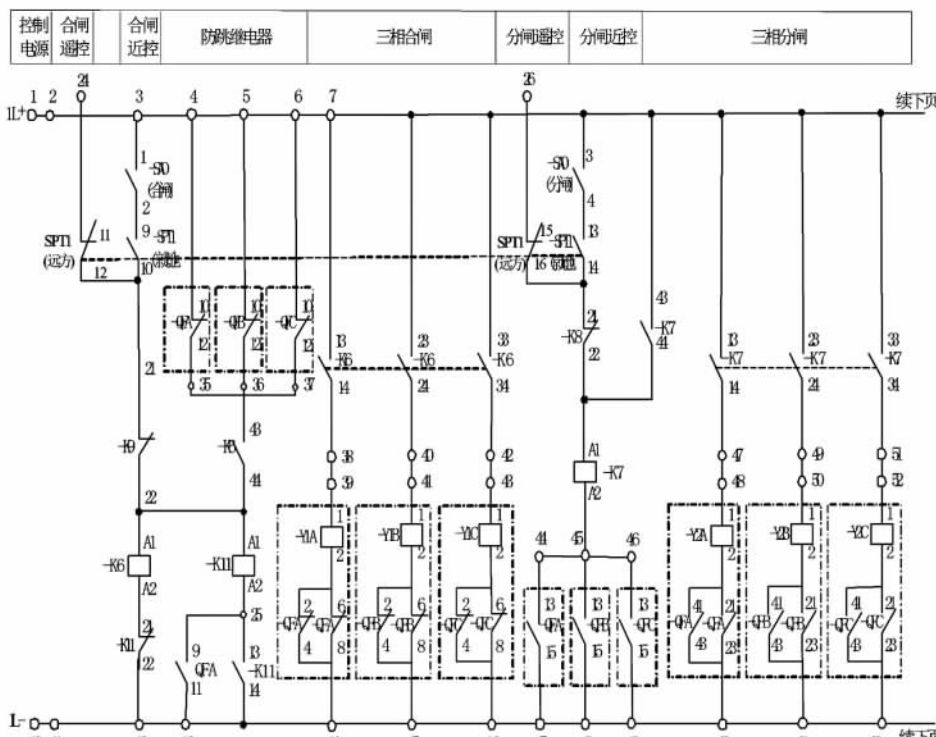


图 1 合闸和主分闸回路

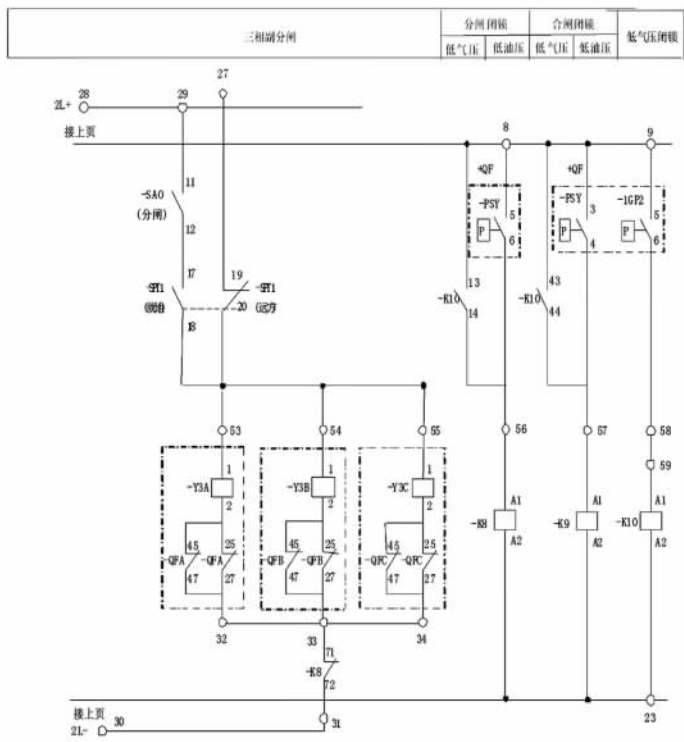


图 2 副分闸回路

注: SAO 就地控制开关、PSY 油泵启动微动开关、1GP2 密度继电器触点

对接点闭合。因断路器的远方操作和保护动作跳、合闸^[3]均经 24、26、27 三个回路引入操作机构,而此时该 3 个回路均被 SPT1: 11 - 12、15 - 16、19 - 20 三对接点断开,断路器不能进行遥控操作,保护动作时断路器不能跳闸,此时,若线路故障,保护正确动作,断路器也不能跳闸,将由失灵保护切除该断路器所接母线上的所有开关,必将扩大事故范围,且延长故障切除时间,对系统的稳定运行造成破坏,甚至造成设备损坏;

2) 如果正好在线路单相故障跳闸后开关控制

由远方切至就地,重合闸动作后将因 SPT11 - 12 断开而造成开关不能合闸,最终由开关机构三相不一致保护动作将开关跳闸,降低了运行的可靠性。

4 改进方案

(1) 方案 1: 将 SPT1: 19 - 20 接点短接,使第二组跳闸回路不受“远方/就地”切换继电器控制。这时即使“远方/就地”切换开关 SPT1 置“就地”位置,也不影响保护动作后的断路器分闸。但是,该接线方式下,当“远方/就地”切换开关 SPT1 置“就地”位置时,因 SPT1: 15 - 16 接点断开,所以远方跳闸只有一组线圈(被短接的 SPT1: 19 - 20),其分闸可靠性将降低一半;另一方面,按该方式改接时,“远方/就地”切换打在就地后,断路器仍可进行远方分闸操作,在开关检修时,可能因保护传动,对人员和设备造成伤害,这也是不允许的。

(2) 方案 2: 将“远方/就地”切换开关进行改造,使切换开关能提供 3 种状态接点: 远方、就地、检修,其接点 SPT1: 21 - 22 接入测控装置前经操作箱引入断路器操作机构^[4],远方跳闸回路触点 SPT1: 15 - 16、SPT1: 19 - 20 在“就地”位置时不断开,只有在检修方式时断开。当“远方/就地”切换开关 SPT1 切至“远方”位置时,SPT1: 11 - 12、SPT1: 15 - 16、SPT1: 19 - 20、SPT1: 21 - 22 接通,沟通远方操作回路,而 SPT1: 9 - 10、SPT1: 13 - 14、SPT1: 17 - 18 断

开,切断就地操作回路;当“远方/就地”切换开关 SPT1 切至“就地”位置时,SPT1: 9 - 10、SPT1: 11 - 12、SPT1: 13 - 14、SPT1: 15 - 16、SPT1: 17 - 18、SPT1: 19 - 20 接通,断路器可以就地操作,保护动作也可以跳闸,SPT1: 21 - 22 断开,断开开关经测控操作回路,开关不能在后台或测控装置进行操作;当“远方/就地”切换开关 SPT1 置“检修”位置时,SPT1: 9 - 10、SPT1: 11 - 12、SPT1: 13 - 14、SPT1: 15 - 16、SPT1: 17 - 18、SPT1: 19 - 20 断开,断开开关远方操作回路和保护动作跳闸回路,SPT1: 9 - 10、SPT: 13 - 14、SPT: 17 - 18 接通,开关只能在控制柜进行就地分/合闸操作。

该方案优点: 按照改进后的接线方案,既满足了就地操作时保护正确动作跳闸的要求,又保证了在检修状态下,对人员、设备安全的保障。

表 1 PST1 远方/就地/检修切换开关

触头	方 式		
	远方	就地	检修
9 - 10		×	×
11 - 12	×	×	
13 - 14		×	×
15 - 16	×	×	
17 - 18		×	×
19 - 20	×	×	
21 - 22	×		

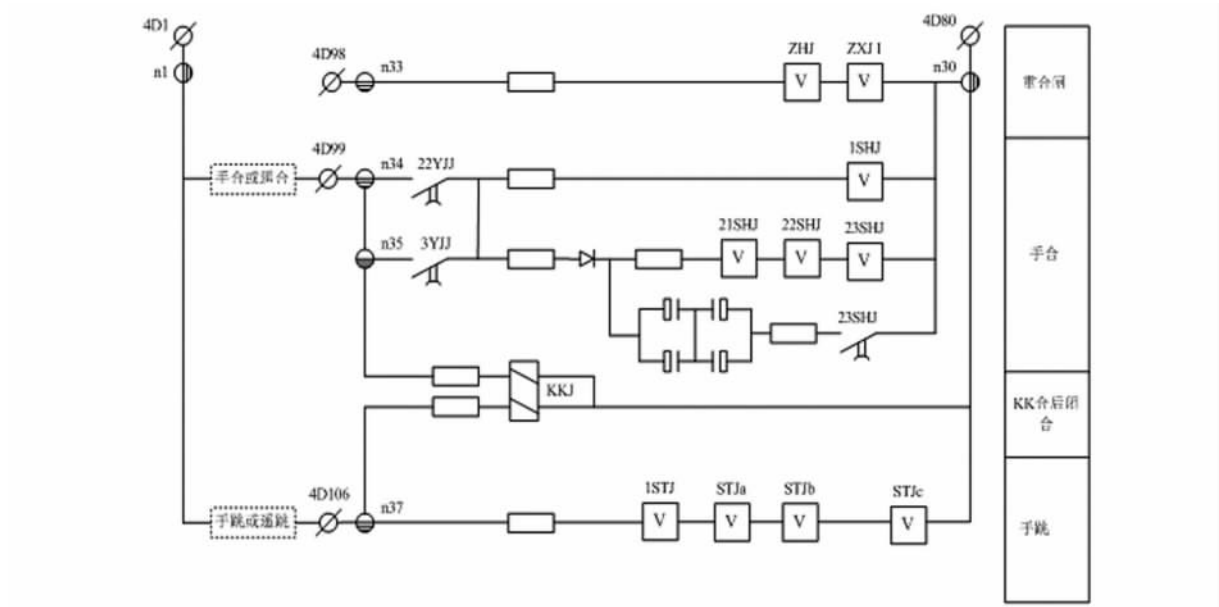


图 3 操作箱改前部分接线图

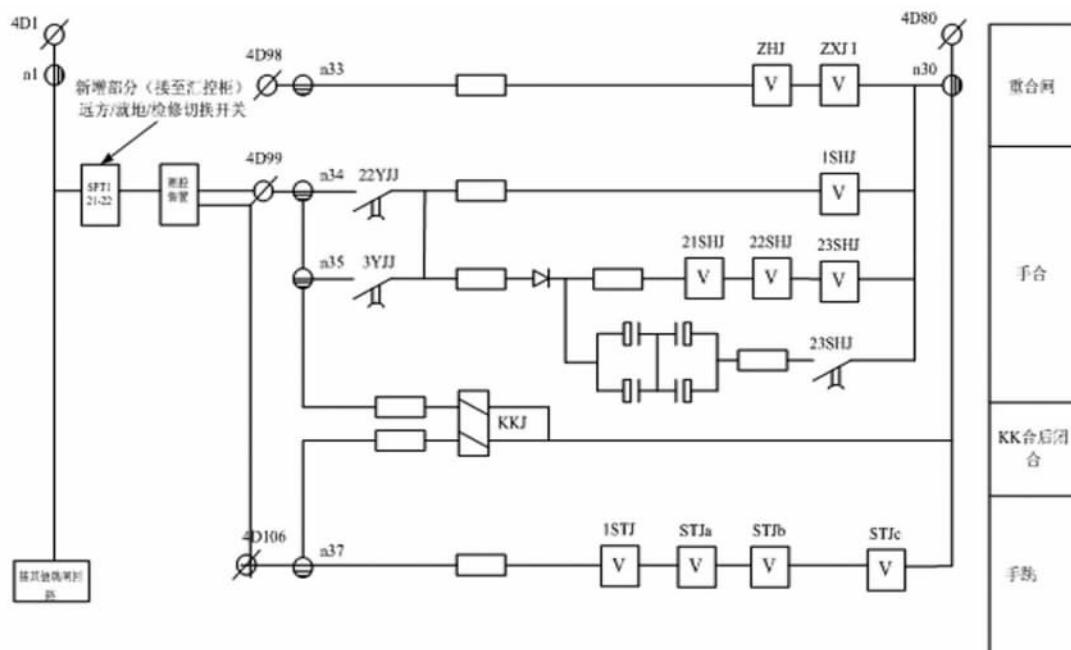


图4 操作箱改后部分接线图

不得将切换开关切至“就地”位置,切换开关的切换纳入防误装置管理。

5 当前系统设备一般改进方案

现投运的设备控制回路一般都进行了改进,如500 kV 富乐变电站2011年投运的220 kV 间隔,500 kV 色尔古变电站2012年投运的220 kV 间隔都是将远方/就地接点引入操作箱,避免了在就地操作方式下保护动作不能切除故障的隐患,但这些改进都不彻底,没有对远方/就地切换开关进行改进,只是将SPT1:11-12、15-16、19-20短接,另引一对接点到操作箱,满足了就地操作方式下保护动作切除故障的要求,但在就地操作方式下保护也能对开关进行传动,对检修状态下的人身、设备安全没有保障。

6 运行注意事项

在回路改造前,非事故处理等极端情况,任何人

7 结 语

综上所述,应充分了解断路器“远方/就地”切换开关的接线,各种状态对运行的影响,并结合设备状态进行正确切换才能保证安全运行。

参考文献

- [1] 四川省电力公司,四川电力系统调度规程[S].
- [2] 四川省电力公司,四川电力系统电气设备操作规程[S].
- [3] 河南平高,220 kV ZF11-252(L) GIS 开关控制回路[R].
- [4] ABB 公司,500 kV ELK-3GIS 开关控制回路[R].

作者简介:

李宗宇(1965),男,技师,大专,主要从事500 kV 变电运行与维护。

(收稿日期:2012-05-11)

欢迎订阅《四川电力技术》

高速铁路电力电缆不对称接地故障 对二次电缆的影响

周思宇¹, 冷 怡²

(1. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072; 2. 四川省电力公司远维检修部, 四川 成都 610041)

摘 要: 由于空间走廊和建设成本的限制, 新建高速客货共线铁路 10 kV 供电电缆、通信电缆、信号电缆等二次电缆同沟敷设。这些电缆之间相邻距离近、平行距离远, 处于同一电磁环境中的电气线缆通过各种电磁耦合方式彼此紧密联系在一起。通过理论分析、计算机仿真计算等方法, 分析高速铁路电力电缆不对称接地故障对通信信号电缆的影响。

关键词: 电缆; 电磁耦合; 不对称接地故障

Abstract: Owing to the limitation of space corridor and construction cost, the construction of newly - built high - speed railway needs to put the 10 kV power supply cable, communication cable and signal cable in one cable pit. These cables are very close to each other and run parallel to others for a long distance. They are in the same electromagnetic environment and closely connecting with each other through a great variety of electromagnetic coupling ways. By the theoretical analysis and using electromagnetic transient program (EMTP), the influence of asymmetrical ground fault in power cable of high - speed railway on the communication cable and signal cable is analyzed.

Key words: cable; electromagnetic coupling; asymmetrical ground fault

中图分类号: TM862 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2012) 05 - 0081 - 04

0 引 言

由于空间走廊和建设成本的限制, 新建高速客货共线铁路建设中将 10 kV 供电电缆、通信电缆、信号电缆同沟敷设。这些电缆之间相邻距离近、平行距离远, 处于同一电磁环境中的电气线缆通过各种电磁耦合方式彼此紧密联系在一起。将通过理论分析、计算机仿真计算等方法分析高速铁路电力电缆不对称接地故障对通信电缆、信号电缆等二次电缆的影响。

1 三相电力电缆系统不对称接地故障分析

考虑电力电缆对通信信号电缆可能产生的电磁感应影响, 10 kV 三相电力电缆系统不对称运行方式主要有 3 种形式: 三相电力电缆有相线断线、三相电力电缆发生单相对屏蔽层的短路、三相电力电缆发生两相对屏蔽层的短路。下面就这 3 种情况分别加以分析。

1.1 三相电力电缆的相线断线引起的不对称运行分析

当三相电力电缆的相线发生一相断线时, 系统若是不接地系统, 则在非故障相流过的电流相同, 但方向相反, 两者对外界产生交变磁场相互抵消, 故不会在信号电缆芯线上产生较大的纵向感应电势; 系统若是直接接地系统, 则在非故障相流过的电流相位相差 120° , 两者叠加恰好是一相的电流, 即这时产生了幅值为正常相电流的零序电流, 该电流产生的磁场会在信号电缆芯线上产生纵向感应电势。

当三相电力电缆的相线发生两相断线时, 若是不接地系统, 非故障相的电流无法流通亦应为零; 系统若是直接接地系统, 则在非故障相流过的电流应为相电流, 即这时产生的零序电流为相电流, 该电流产生的磁场会在信号电缆芯线上产生纵向感应电势。

当三相电力电缆的相线发生三相断线时, 电力电缆中将无电流输出, 亦不会产生能交链信号电缆的磁场, 故不会对信号电缆产生影响。

综上所述, 当三相电力电缆系统发生断相故障时, 对于中性点直接接地系统可能产生的最大零序

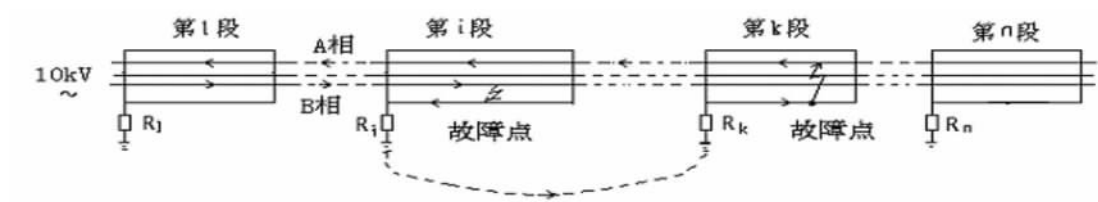


图1 分析电力电缆单相接地故障电流分布示意图

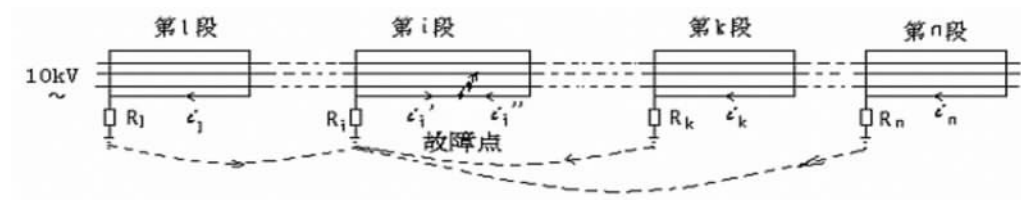


图2 分析电力电缆两相接地故障电流分布示意图

电流为系统运行的相电流,而系统的相电流一般不超过 80 A;而对于中性点不接地系统,不会产生对信号电缆有影响的纵向感应电势。

1.2 三相电力电缆发生单相对屏蔽层的短路故障分析

在电力系统中,单相对地短路是最常见的故障形式。对于电力电缆发生单相短路,是指电缆相导线对屏蔽层的短路,当系统中性点不接地时,流过故障点的电流是非故障相的分布对地电容电流的矢量和,而能引起同沟信号电缆纵向电势的短路电流,是指流经电力电缆屏蔽层的短路电流。

当电力电缆发生单相对屏蔽层的短路故障时,流经外皮的电流可用图 1 加以说明。图 1 中设铁路三相电力电缆由 n 段构成,其中 n 段电缆的三相导线串联联接,而每段电力电缆的屏蔽层为一段经接地装置接地,另一端经保护器接地(相当于开路),每段电力电缆长度约为 1 km。

假设第 i 段内发生单相对屏蔽层的短路故障,则非故障段的对地电容电流经接地体流向故障段的故障点,再返回电源,电缆屏蔽层的电容电流流向如图 1 所示。该零序电流产生交变磁场,会交链相邻的信号电缆,在信号电缆芯线上产生感应电势 E_1 。

若故障点发生在 i 段首端(图 1 中靠近接地装置处),则 n 段电缆外皮流过相同的电流,且电流流向相同,在相邻电缆上产生的感应电势相叠加为 $n E_1$;

若故障点发生在 i 段末端,则在故障相外皮上流过的电流为非故障段的对地电容电流之和,且方向相反,相应综合在信号电缆上产生的感应电势就

很小。

1.3 三相电力电缆发生两相对屏蔽层的短路故障分析

同样假设三相电力电缆由 n 段构成,假设在第 i 段内 L2 相发生对电缆屏蔽层的短路,而在第 k 段内发生 L1 相对屏蔽层短路,如图 2 所示。

由电流分布可知,在 i 段的左侧靠近电源的所有电缆段内,流过故障相(两相)的短路电流大小相等,方向相反,不会在相邻信号电缆产生纵向感应电势;在 k 段的右侧靠近负载的所有电缆段内,无故障电流,亦不会在相邻信号电缆中产生感应电势;在第 i 段与 k 段间的所有电缆段的一相导线(图中 L1 相)中有故障电流流过,该电流会在相邻信号电缆中产生感应电势;而在第 k 段内,若故障点在其端部,则在该段内相导线与屏蔽层流过的短路电流相等,流向相反,不会产生磁感应电势;在第 i 段内,不论故障点在什么位置,都有相间短路电流可以产生磁感应电势。

在相邻信号电缆中产生感应电势最严重的情况是,在第 1 段电缆的首端发生一相(例 L2 相)对屏蔽层短路,而在第 n 段电缆内发生另一相(例 L1 相)对屏蔽层短路。若 1 段(一般 1 km)两相短路电流在相邻信号电缆产生的感应电势为 E_2 ,则 n 段电缆发生两相短路故障时,在相邻信号电缆芯线上产生的最大感应电势为 $(n-1) E_2$ 。

2 感应电压的仿真计算

针对以上的理论分析,利用国际通用的电磁暂

态仿真计算程序 ATP – EMTP 的图形输入程序 ATP – Draw 对电力电缆发生不对称接地故障时,在通信信号电缆芯线产生的感应电压进行仿真计算。仿真计算主要考虑了信号电缆屏蔽层多点接地(最理想屏蔽状况)、信号电缆屏蔽层两端经接地装置接地两种情况。

2.1 二次电缆屏蔽层理想接地

二次信号电缆屏蔽层理想接地时,电缆芯线纵向感应电动势的仿真计算模型如图 3 所示。

图 3 中电源为电力电缆故障状态下,流过其外皮的短路电流值;LCC 为电力电缆外皮与带屏蔽层的二次电缆并列运行模型,其中二次电缆屏蔽层理想接地,测量信号电缆芯线上的纵感应电动势值。

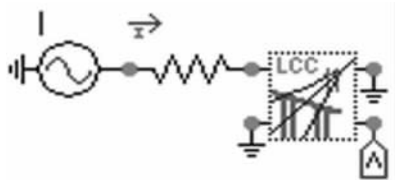


图 3 二次电缆芯线纵向感应电动势
计算模型(屏蔽层理想接地)

当电力电缆外皮流过短路电流时,在并列运行二次电缆芯线上产生的感应电压仿真计算结果见表 1。

表 1 电缆外皮流过短路电流时,二次电缆芯线上的纵向感应电动势

表 1							
I/A	1	10	20	23.5	50	100	800
U/V	0.024	0.24	0.48	0.56	1.19	2.37	18.98

注:二次电缆与电力电缆间距 100 mm,二次电缆长度 1 km。

由表 1 中数据可画出,流过电力电缆外皮的短路电流值与二次电缆芯线上的纵向感应电动势关系曲线如图 4 所示。

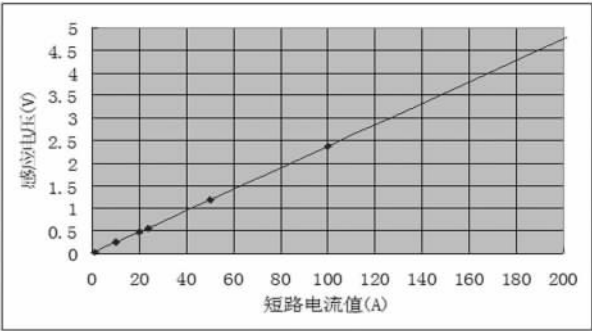


图 4 二次电缆芯线纵向感应电动势与流过
电力电缆屏蔽层短路电流的关系

由图 4 可见,二次电缆芯线上的纵向感应电动

势随电力电缆外皮的短路电流值增大而增大,两者间满足线性关系。

2.2 二次电缆屏蔽层经接地装置接地

二次电缆屏蔽层两端经接地装置接地,二次电缆芯线感应电压的仿真计算模型如图 5 所示。

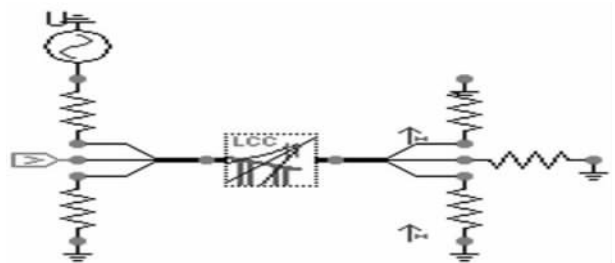


图 5 二次电缆芯线纵向感应电动势计算模型

图 5 中电源为电力电缆故障状态下,流过外皮的短路电流值;LCC 为电力电缆外皮与带屏蔽层的二次电缆并列运行模型;二次电缆屏蔽层两端分别经电阻接地,目的是为了引入接地电阻对感应电压的影响,并通过改变接地方式、接地电阻值得出二次电缆芯线感应电动势与接地电阻的关系。

2.2.1 二次电缆屏蔽层一端接地时,电缆芯线感应电压的计算

当二次电缆屏蔽层一端直接接地时,电缆芯线上的纵向感应电动势与电缆间距的关系数据见表 2。

表 2 二次电缆芯线纵向感应电动势与电缆间距 d 的关系

电缆间距/mm	50	100	200	400	800	1000
U/V	33.13	30.84	28.57	26.31	24.01	23.31

注:线路长度 1 km,短路电流恒定,二次电缆屏蔽层一端直接接地。

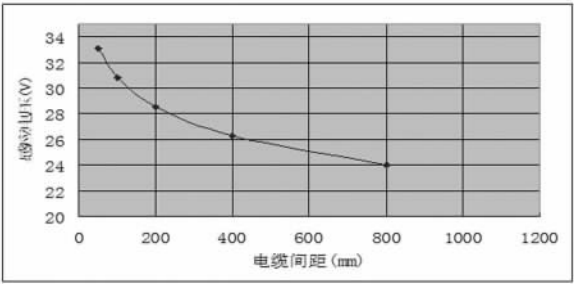


图 6 二次电缆芯线纵向感应电动势与电缆间距的关系

由表 2 中数据可知,二次电缆屏蔽层一端接地时,电缆芯线上的感应电压值相比于理想接地的情况已急剧增大。由理论分析可知,二次电缆屏蔽层一端接地只能消除静电感应分量,而不能起到电磁电缆屏蔽的作用。仿真计算还进一步表明,这时二次电缆芯线感应电压与屏蔽层的接地电阻无关,而

与电力电缆外皮流过的短路电流值成正比关系。二次电缆芯线感应电压与电缆间距的关系如图 6 所示。与前面结果相同,二次电缆芯线上的感应电压值随电缆间距增大而逐渐减小,这与理想屏蔽时的变化趋势相同。

信号电缆屏蔽层一端接地时,二次电缆芯线感应电压值与接地电阻的关系数据见表 3。由表 3 可以看出,二次电缆屏蔽层一端接地时,二次电缆芯线纵向感应电动势与接地电阻大小无关。

2.2.2 二次电缆屏蔽层两端接地时,电缆芯线感应电压的计算

当二次电缆屏蔽层两端直接接地时,信号电缆芯线上的纵向感应电动势与电缆间距关系的仿真计算结果见表 4。

表 3 二次电缆芯线纵向感应电动势与接地电阻大小的关系

接地电阻值 $/\Omega$	0	0.1	0.5	1	5	10	15
U/V	30.85	30.84	30.85	30.84	30.85	30.85	30.85

注:线路长度 1 km,短路电流恒定,电缆间距 100 mm。

表 4 二次电缆芯线纵向感应电动势与电缆间距 d 的关系

电缆间距 d $/mm$	50	100	200	400	800	1000
U/V	2.70	2.51	2.33	2.14	1.96	1.90

注:线路长度 1 km,短路电流 100 A,二次电缆屏蔽层两端直接接地。

由表中数据可知,二次电缆屏蔽层两端理想直接接地时,比二次电缆屏蔽层理想接地(屏蔽层各点均理想接地)情况下的表 2 数据稍大一些,相应的结论同前。表 4 数据亦表明,二次电缆芯线纵向感应电动势随着电缆间距增大而减小。当二次电缆屏蔽层两端经接地装置接地时,电缆芯线上的纵向感应电动势与接地电阻值关系的仿真计算结果见表 5。由表 5 数据可得,二次电缆芯线纵向感应电动势与接地电阻的关系曲线见图 7。

表 5 二次电缆芯线纵向感应电动势
与接地电阻大小的关系

$R_1 = R_2 / \Omega$	0	0.1	0.2	0.5	1	5	10	12
U/V	2.51	2.67	3.39	5.39	7.34	10.16	10.60	10.73

注:线路长度 1 km,短路电流恒定,电缆间距 100 mm。

从表 5 中的数据和图 7 可以看出,当二次电缆屏蔽层两端经电阻接地后,电缆芯线感应电压值随着接地电阻值的增大而增大,并且在接地电阻阻值

较小时感应电压上升幅度较大。

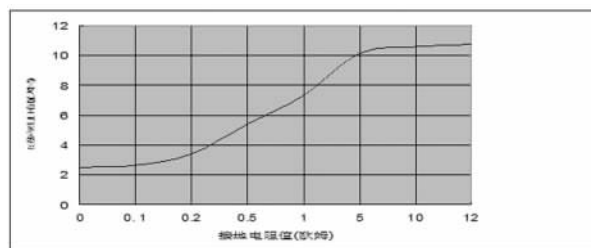


图 7 二次电缆芯线纵向感应电动势与
接地电阻大小的关系

3 结 语

经过理论分析和仿真计算,主要得出以下几个结论。

(1) 同沟铺设的电力电缆与二次电缆,在一定间距范围内,当三相电力电缆发生单相接地、两相接地故障时,会在二次电缆芯线上产生纵向感应电动势。

(2) 二次电缆芯线上的纵向感应电动势与影响电流满足线性关系。

(3) 当二次电缆屏蔽层一端接地时,其芯线上的纵向感应电动势与接地电阻大小无关;当二次电缆屏蔽层两端接地时,其芯线上的纵向感应电动势与接地电阻大小有关。

参考文献

- [1] 冯慈璋. 电磁场 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.
- [2] 庞延智. 电力线路对电信线路的影响和保护 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [3] 肖小军. 铁路电气化对通信电磁干扰影响的分析与计算 [J]. 电信技术, 2004(3): 63-66.
- [4] 邱关源. 电路 [M]. 高等教育出版社, 1993.
- [5] 何仰赞, 等. 电力系统分析 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1984.
- [6] 马任明. ATP-EMTP 程序使用说明 [R]. 武汉高压研究所, 1991.
- [7] 陆家榆, 等. 电力线路附近金属管线的感应电流和电压的计算 [D]. 电磁兼容论文集, 1999.
- [8] 北京全路通信信号研究设计院. 铁路内屏蔽数字信号电缆技术条件(讨论稿), 2003.

作者简介:

周思宇(1982),男,硕士研究生,工程师,从事高电压绝缘研究工作。

冷 怡(1981),女,本科,工程师,从事大修技改管理工作。
(收稿日期:2012-05-11)

输电线路杆塔冲击接地阻抗测量

何云峰¹, 赵若涵², 张榆³, 李建明⁴

(1. 广元电业局, 四川 广元 628000; 2. 西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039;
3. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610016; 4. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 对冲击电流下输电线路杆塔的接地阻抗特性进行了论述, 并选取其中3种影响冲击接地阻抗感性分量的因素做了图表分析, 最后利用基于冲击接地法的频谱法分别进行实验室模拟试验和巴中江城输电线路部分杆塔接地体的现场试验, 取得了理想的测量效果。实践表明该方法对今后接地阻抗的测量工作有指导性意义。

关键词: 杆塔接地; 测量装置; 冲击接地阻抗; 频域

Abstract: The characteristics of earthing impedance of poles and towers in transmission line under surge current are discussed. Three kinds of influencing factors for inductive component of impulse earthing impedance are selected for chart analysis. Finally, the laboratory simulation experiment and the field test for earthing electrode of some poles and towers in transmission line in Jiangcheng of Bazhong are carried out with spectral method based on impulse earthing method, and the ideal measurement results are obtained. The practice shows that the proposed method has the guidance significance for the future measurement of earthing impedance.

Key words: tower earthing; measuring device; impulse earthing impedance; frequency domain

中图分类号: TM835 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)05-0085-04

0 引言

随着近年来电网向超高压、大容量、远距离输电方向的发展, 对于接地系统的安全、经济和稳定运行变得越来越重要。电力系统接地是直接关系到人身、设备和系统安全的重要问题, 而输电线路杆塔又是电力系统中分布最广、遭受雷击概率最高的电力设备, 其接地阻抗的大小是影响雷击跳闸率的主要因素之一。在雷电冲击作用下, 只有冲击接地阻抗才能真实地反映杆塔接地状况的好坏, 加之当前接地体长度的增大和土壤电阻率的降低, 电抗分量中的感性影响已不可忽略。而像传统的摇表法, 电压-电流法、四极法等不能测量出地网中感性分量值。

对冲击电流下输电线路杆塔的接地阻抗特性进行了论述, 并选取其中4种影响冲击接地阻抗感性分量的因素做了图表分析, 最后利用基于冲击接地法的频谱法分别进行实验室模拟试验和巴中江城输电线路部分杆塔接地体的现场试验, 取得了理想的测量效果。实践表明该方法对今后接地阻抗的测量工作有指导性意义。

1 接地电阻与接地阻抗的差异

通常所说的接地电阻并不是接地装置的纯电阻, 而是含有电抗分量在内的接地阻抗。工频电流向大地散流时, 接地网的感性分量占接地阻抗的比例较小, 一般就将接地阻抗称为接地电阻。但在接地体较长、土壤电阻率较低的情况下发生高频冲击电流放电时, 接地阻抗中的感性分量就不可忽略, 称为冲击接地阻抗或接地阻抗。

冲击接地阻抗区别于工频接地阻抗的特性如下。

①由于冲击电流本质是高频高幅冲击波, 所以抛除引下线、接地极、接触电阻、土壤杂散电阻等固有电阻的影响外, 接地体电感和对地电容对冲击阻抗的影响已变得越来越明显。其取决于接地装置的规模、电流注入点的位置、接地体的结构、冲击电流的波形和幅值等。也正由于如此多的因素作用冲击阻抗, 所以高频大电流下的接地体表现出明显的非线性时变特性, 使得传统测量方法不能有效的测量冲击接地阻抗。

②不同于工频接地阻抗下的电性能参数和可以

近似为常数,冲击电流下的这两个参数在很大程度上向减小的方向变化。

③冲击电流作用下,接地极附近电场强度很大,会发生局部放电,即火花放电,这相当于增大了接地极的有效散流直径。

④由于冲击电流的频率很高,很大的导体感抗阻碍冲击电流向接地体的远端流动,接地体没有被充分利用。

2 感性分量对冲击特性的重要影响

接地阻抗的感性分量一般以阻抗角来表示。改变影响接地阻抗的各种因素进行模拟计算,了解这些因素对接地阻抗角的影响程度。现选其中的土壤电阻率、接地体长度和电流注入点3种因素进行图表分析。

如图1所示。可以看出随土壤电阻率的减小,接地网感抗的影响越来越明显,冲击接地阻抗也越大。

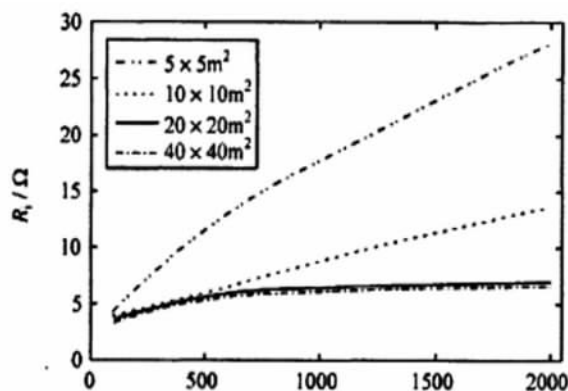


图1 土壤电阻率对冲击接地阻抗的影响

图2所示为接地网面积对接地阻抗的影响^[1]。由图2可知,随接地体长度的增大,冲击接地阻抗减小得越来越慢。这是由于接地体的感性作用使得接地极附近的电压降很大,电流被限制在一个有限的长度内散流,没有充分利用整个接地体。

图3是电流注入点对冲击接地阻抗的影响。对于同一接地体,端部注入的冲击接地阻抗比中心注入的值要高得多。这是因为从端部引入冲击电流时,由于其感性作用的影响,将明显阻碍电流向远端运动,使得接地体得不到充分利用。

由上述图表可知,接地阻抗的概念是包含电感性分量的复阻抗,它对输电线路杆塔接地装置有很重要实际意义;随着接地体长度的增加,土壤电阻率

的降低和接地极自身的原因,接地阻抗中感性分量的影响已越来越大,冲击电流下的接地体必须考虑感性作用的影响。

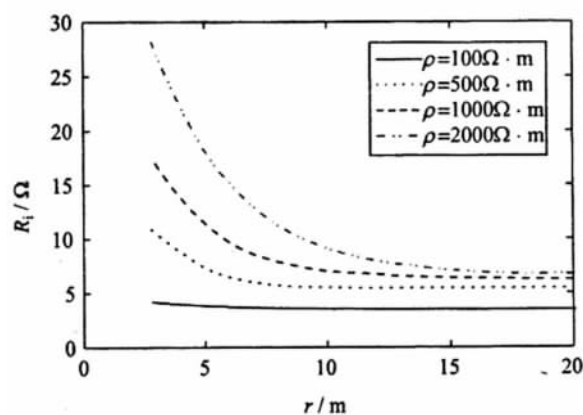


图2 冲击接地阻抗与接地体长度的关系

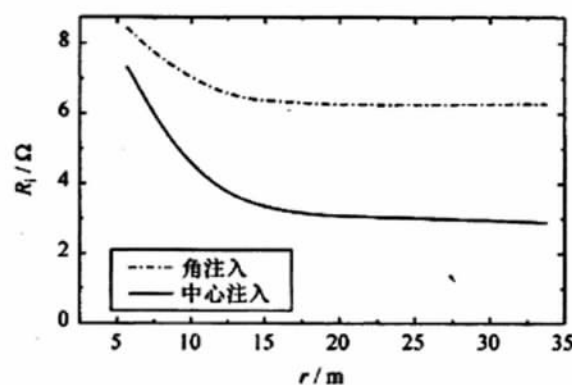


图3 电流注入点对冲击接地阻抗的影响

3 输电线路杆塔接地装置的冲击特性

可知,雷击塔顶时,塔顶电位 $V_t = (1 - \beta) R_i i + L \frac{di}{dt}$,即雷击塔顶时,塔顶电位与冲击接地电阻 R_i 密切相关。在其它因素一定时, R_i 越小, V_t 也就越小,线路反击闪络的概率也就越低。因此在线路杆塔的设计中,线路杆塔接地装置的冲击接地电阻取值,直接影响到线路的防雷效果。

接地装置冲击特性试验研究方法分为真型试验和模拟实验。真型试验是对实际中采用的接地装置进行冲击试验。这种方法的优点是可以直接得到接地装置的真实冲击特性。但在技术上改变与接地装置有关的参数,如改变土壤的电阻率等也是不可能的,很难对接地极进行全面系统的研究。模拟试验很容易改变土壤电阻率、接地装置的几何尺寸、雷电流参数及接地装置的埋深等相关参数,可严格控

表 2 接地阻抗杆塔现场测量值

	江城 44 杆		江城 43 杆		江城 6 杆		江城 5 杆		江城 1 杆	
	1 侧	2 侧	1 侧	2 侧	1 侧	2 侧	1 侧	2 侧	1 侧	2 侧
电阻/ Ω	—	0.959	0.8958	—	1.01	2.85	3.578	3.606	2.125	3.044
电感/ μH	—	14.89	10.85	—	28.28	49.42	43.21	45.55	32.33	47.4
冲击接地电阻 Ω	—	0.9868	1.5146	—	1.997	2.927	3.929	3.984	3.902	6.993

制住试验对象的主要参数而不受外界条件的影响,使实验结果及反映的规律比较准确。国内外的研究表明,如果严格按照模拟实验的理论来进行模拟实验,其结果是比较准确的,基本是可信的^[1]。

雷电流流经接地装置,在地中的散流是相当复杂的。不仅接地装置的冲击特性与其结构尺寸、土壤电阻率、接地装置的埋深及雷电流参数等因素有关,而且频率很高的雷电流在地中散流时,电荷具有宏观的运动特性,它们在空间的分布随时间的变化而变化,具有时变场的特性,其暂态过程要用理论分析的方法来进行研究是比较困难的。到目前为止,国内外学者进行了很多关于接地极冲击特性的研究。但都是基于一些假设条件下,对于一些比较简单的水平接地极和垂直接地极建立了简化数学模型,如大多没有考虑火花效应,显然这些研究得到的结论只能是接地极冲击特性的近似估计。

4 输电线路杆塔实测及数据分析

冲击电流法测量接地电阻是采用冲击电流发生器模拟雷电流,产生最大幅值 2 kV、波头时间低于 10~70 μs 、放电时间的冲击电流,作为测试电流注入接地体,数据采集装置经测量回路得到接地体电压、电流信号进行计算分析。由频谱法算出的数值与实际数据的比较如表 1 所示

表 1 接地阻抗实验测量值

冲击电流参数		频谱法计算值		真实 / Ω
幅值/ A	波形/ μs	电阻/ Ω	电感/ μH	
174.94	7/67	4.56	50.41	4.5
185.09	7/72	4.58	49.05	4.5
74.64	9/31	1.074	59.39	1
130.04	9/35	1.072	59	1

用冲击电流法实测 110 kV 输电线路杆塔冲击接地阻抗时得到电压和电流波形(图 4)。由电压和电流波形可以看到杆塔放电波形良好,电压波形高

频震荡时间较长,电流上升沿时间只有 1 μs ,且放电时间很长,接近 5 000 μs 。根据测量数据基本判断为:杆塔接地电阻合格,但是接地网受限地形影响造成冲击阻抗较大。

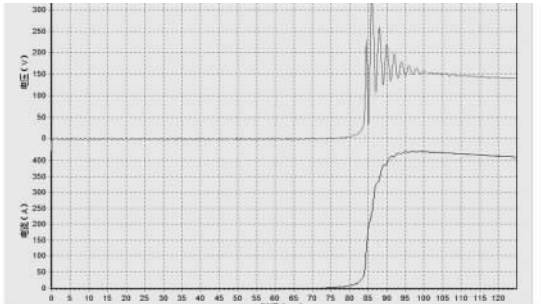


图 4 冲击电流法测量杆塔接地阻抗时的电压电流波形

对四川巴中的部分线路杆塔进行了接地阻抗参数测量。这条线路是三江水电站送往巴中城区的江城输电线路,该线路已建成 20 多年,线路杆塔的接地存在着不同程度的问题,因此这条线路很有典型性,用基于冲击电流法的频谱法进行测量和计算。得到的接地参数如表 2。

从表 2 可以看出,冲击电流法测出的冲击接地电阻值比接地体的纯阻抗值都要大,而杆塔接地体的纯电阻值与其工频接地阻抗值相差很小,可近似等于工频接地阻抗值。一般理论上杆塔的冲击系数 α 小于 1,即冲击接地电阻应比工频接地阻抗小,但实验所测结果相反。杆塔的冲击接地电阻的大小受土壤火花放电和接地体自身电感的影响,小冲击电流测量时电感效应超过火花效应,冲击电流大时火花效应超过电感效应。从测量结果看,接地体自身电感的影响导致冲击接地电阻的变大。

5 结 语

(1) 接地阻抗的概念是包含电感性分量的复阻抗,它对输电线路杆塔接地装置有很重要的实际意义;而随杆塔接地体长度的增大以及土壤电阻率的降低,接地阻抗中感性分量的作用越来越明显,输电

线路杆塔接地装置必须考虑其感性作用。在杆塔接地存在不同程度腐蚀的情况下,冲击接地阻抗比工频接地阻抗大。此时,不能把杆塔接地体看作单一的集中接地体,而是要考虑冲击电流流过时的波过程,电感对冲击接地电阻的影响显然比土壤火花放电的影响要大。

(2) 频谱法可利用两个频率点的数据,将接地阻抗的阻性和感性分量分别求得,并且通过频域内计算有效的避免电压电流数据采集不同时带来的麻烦。缺点是傅里叶变换会产生频谱泄漏而导致误差。另外,其计算精度需要通过现场试验进一步验证。

参考文献

[1] 崔宇,李建国,戴玉松. 基于冲击电流法测量接地电阻

的装置[J]. 电力学报, 2009(4): 299-302.

[2] 李建国,朱康. 高压电气设备试验方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[3] 孙家营. 杆塔冲击接地阻抗测量系统的研制[D]. 成都: 西华大学, 2007.

[4] 张振军. 用冲击电流法测量接地网阻抗系统的设计[D]. 成都: 西华大学, 2008.

[5] DL 475-92, 接地装置工频特性参数的测量导则[S].

[6] 孙家营,戴玉松,等. 冲击电流法测量接地电阻研究[C]. 中国电机工程学会第九届青年学术会议论文集, 2006.

[7] Che Yunping, Zha Xiaoming, Zhao Lei. The Measurement of Impulse Grounding Resistance and Inductance of Grounding Network [C]. IEEE. Catalogue No: 98EX137, 1998.

(收稿日期: 2012-08-20)

(上接第40页)

载全部失压的后果,达到迅速、有选择性将故障隔离的目的,确保了供电可靠性以及系统运行的稳定性。

为进一步提高供电可靠性,可以在确保主变压器2B不过载、不发生与小电源非同期并列等有关条件下,主变压器1B所供的失压负荷可以通过备用电源自动投入装置自动转移给2B供电(备用电源自动投入装置动作后将中、低压侧母线分段断路器自动投入来实现)。

当主变压器1B差动与母线I段差动保护同时动作时,就能说明故障在河石坝110 kV 1M范围内,可以重点检查达到省时的目的。当1B差动动作、而母线I段差动保护未动作,则说明故障在1B本体及其中、低压侧的范围内,调度员在拉开1B高压侧隔离开关后,可将110 kV系统恢复环网运行,从而降低开环运行可能带来的元件过载或者发电机“窝电”问题。

最重要的是,“零秒”切除故障,确保了发电机组的安全运行。文献[1]中快速切除故障在提高系统暂态稳定性方面起着首要的、决定性的作用。

3 结 语

无专用母线保护装置的110 kV内桥接线,在正常运行情况,当某段母线故障时,可利用主变压器差动保护快速且有选择性地动作;在上述特殊运行方

式下,当某段母线故障时,因主变压器差动保护不能够动作,则需要通过输电线路对侧II段保护越级动作才能切除故障,这势必导致切除故障的时间较长,严重降低系统的稳定性,甚至可能引起发电机失去同步而导致更严重的系统影响。

内桥接线方式下,配置专用的微机母差保护,有利于提高母线故障时继电保护的快速性与选择性;此外,母线保护装置具备完善的充电保护功能,所以在对检修后的母线段充电时,它能够灵敏、快速地反映各种故障,同样提高了系统运行的稳定性。

需要指出的是,当变电站在系统中处于联络地位时,建议主接线的设计不宜采用桥形接线;若因土地、配电装置结构等条件所限,则应安装母线保护。

参考文献

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

[2] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理(3版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1994.

[3] 《中国电力百科全书》编辑委员会. 中国电力百科全书电力系统卷[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

作者简介:

曾 明(1978),男,本科,助理工程师,研究方向为电网运行。

(收稿日期: 2012-04-18)

一起断路器弹簧储能故障分析与处理

刘滨涛, 肖建华, 黄 倩

(广东电网公司揭阳供电局, 广东 揭阳 522000)

摘要: 针对 ABB 公司断路器出现的弹簧储能空开跳闸的故障, 通过对断路器“涡卷”式弹操机构解体分析, 找出了引起故障的机械原因并提出了相应的整改措施。

关键词: 断路器, 弹簧储能, 操作机构

Abstract: Aiming at the tripping fault of spring energy – storage air switch in circuit breaker manufactured by ABB, after the disassembled scroll – type spring operating mechanism of circuit breaker is analyzed, the mechanical reasons for the fault are found out and some corresponding improving measures are put forward.

Key words: circuit breaker; spring energy – storage; operating mechanism

中图分类号: TM769 文献标志码: B 文章编号: 1003 – 6954(2012) 05 – 0089 – 03

断路器弹簧储能机构常用拉簧或卷簧构成。卷簧具有结构紧凑、性能稳定、操作功低等优点。ABB 公司的 LTB245E1 型断路器就采用了 BLK222 型“涡卷”式弹簧操动机构。它的主要特点是: 成套性高、零部件数量少、动作迅速。但是, 工艺要求高、结构复杂。

2011 年年底, 1 台恢复送电的 220 kV LTB245E1 型断路器在操作过程中机构发生弹簧未储能故障, 在处理过程中发现该批次产品因制造工艺等原因存在隐患, 在厂家的指导下检修人员及时进行了处理。

1 故障经过

2011 年, 220 kV 榕揭乙线停电进行保护定检, 期间保护短时间内频繁传动开关多次。定检结束后, 恢复送电。合上开关控制电源后大概 10 min 后, 后台“弹簧未储能”光子牌亮。运行人员立即停止操作到现场查看, 发现 L3 相弹簧未到储能满位置, 打开机构箱发现储能电机空开已跳开, 运行人员怀疑电机短路造成空开跳闸, 于是用万用表测量电机相间电阻无异常后, 再次合上储能电机空开, 正常情况下储能在 10 s 左右就应完成, 现场却发现储能电机一直在运转, 但储能指示却一直无法到达“储能满”位置。几分钟后, 储能空开过负荷跳开。运行人员无法处理故障, 随即汇报调度将开关转检修。继保和检修人员到现场后, 初步怀疑是储能位置继

电器故障造成电机无法自动切断回路, 造成电机堵转。根据电机储能回路分析, 电机储能控制是由储能位置辅助接点直接控制的。

2 故障分析

BLK222 型操作机构采用“涡卷”式合闸弹簧直接驱动断路器的操作杆, 不需要任何中间凸轮盘、连接杆或轴。卷簧由一个通用电机储能, 所有动力元件均安装在一根由箱体支撑的主轴上。分闸和合闸脱扣相同, 具有速动和防震的特点。分闸缓冲器用于阻尼触头系统在行程末期的运动。其结构如图 1 所示。

在厂家技术人员指导下, 检修人员对 L3 相开关机构箱进行了解体, 发现储能位置辅助接点继电器功能是正常的, 但是储能限位挡板并未到位, 继续解体才发现合闸弹簧间的白色衬垫已发生严重变形。

该“涡卷”式弹簧操动机构中, 断路器在合闸过程中就先完成了对分闸弹簧的储能。涡卷弹簧装于弹簧盒内, 其内外端有钩环, 分别与主轴和弹簧盒连接, 弹簧盒外圆有齿轮。储能时主轴不动, 电机带动弹簧盒旋转, 使涡卷弹簧储能^[1], 储能到位后, 由合闸掣子闭锁, 弹簧储能继电器限位开关动作切断储能回路。当合闸线圈接到合闸指令脉冲后, 使合闸掣子脱扣, 合闸弹簧的能量经合闸驱动轴带动驱动

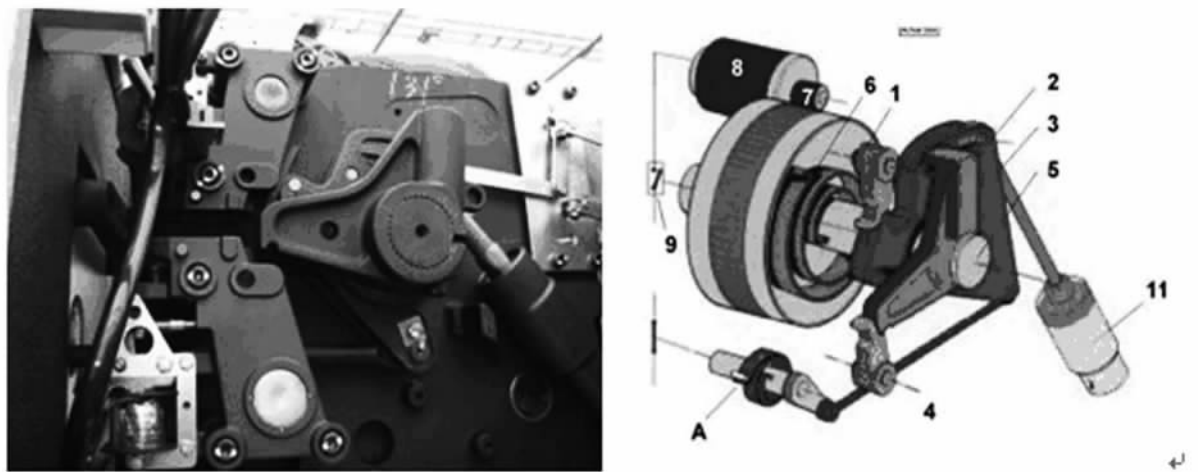


图1 BLK222型“涡卷”式弹簧操动机构结构图

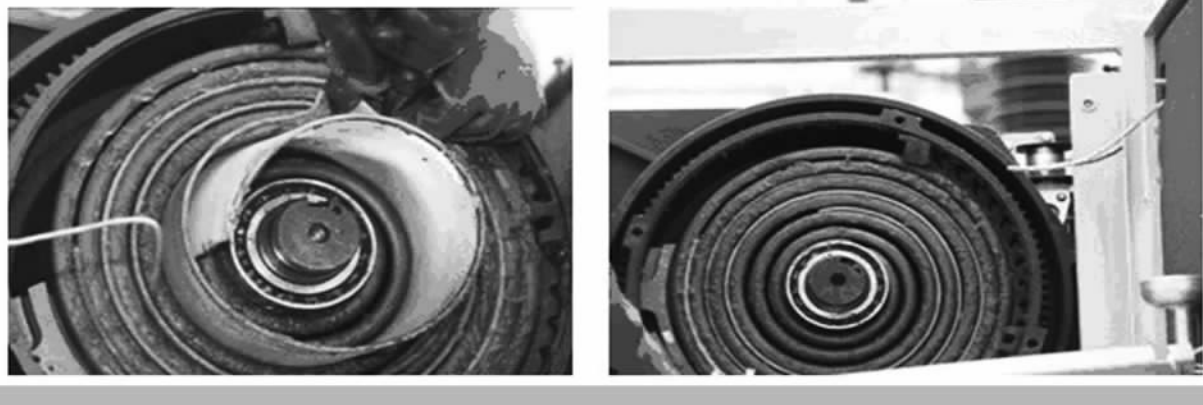


图2 衬垫切割前后对比图

拐臂,再由驱动拐臂牵引偏心拐臂传递给断路器的拉杆和分闸弹簧,断路器合闸,这时电机对合闸弹簧再次储能。牵引偏心拐臂由分闸掣子闭锁,合闸驱动拐臂由合闸掣子闭锁,断路器保持在合闸位置。在这次定检中,由于保护人员传动断路器,使得合闸弹簧层间的白色衬垫发生了位移,在短时间内多次传动后,由于最内圈卷簧不断收紧,留给衬垫的空间越来越小,随着衬垫逐渐向弹簧内部移动,最终衬垫受到卷簧的挤压导致变形,使卷簧无法正常储能到位。

该衬垫在弹簧外侧主要是为均衡弹簧各部分受力的作用。衬垫的固定主要是依靠装配时卷簧首端的夹紧件,在运行初期衬垫刚开始位移,卷簧的变形量还能够保证正常储能,随着操作次数增多,白色衬垫逐步挤压使弹簧行程受到限制,储能行程挡板无法到位,造成无法切断储能回路,从而电机堵转过负荷跳开储能空开。

3 措施及原因分析

由于线路受运行方式影响不能长时间停电,厂家人员决定暂时采取临时措施,决定切割掉已变形的白色衬垫,使卷簧可以储能到位,等新的机构箱运到以后再进行更换,旧的机构箱返厂维修。并对此批次断路器随停电进行检查来杜绝隐患。图2为衬垫切割前后对比图。

通过机构解体 and 操动原理分析,可以判断此次机构故障的原因是由于制造装配工艺质量问题使得合闸弹簧层间白色衬垫位移,厂家事后对此次故障发来确认函,认为是由于装配工艺不当造成的,本身卷簧无问题。

值得注意的是,此次故障也不是第一次出现,在2010年也出现过一起类似故障,当时白色衬垫位移和变形没有那么厉害,厂家人员只是重新调整了衬垫位置并没有采取切割方式就解决了问题,由于问

题不是很大当时并没有引起重视。对于此批次的断路器怀疑可能均有此问题,对于在恶劣雷雨天气下断路器可能发生多次单相重合的情况下发生断路器拒合故障,影响电网安全稳定运行。

4 结 语

BLK 弹簧机构属于较为成熟的进口卷簧机构,成套性高,维护量小,整体运行可靠性较高。对于储能回路的问题,大部分是发生在电气回路,例如储能电机短路、行程开关失灵或受潮短路引起,机械故障也多发生于卷簧质量不佳导致断裂所致,而此次故障是由卷簧的辅料造成比较罕见。根据安装和运行经验,BLK 机构发生程度较严重衬垫位移时,合闸成功率不能到 100%。弹簧机构的多种优良性能使得其占有率近年来不断增长。虽然弹簧机构检修维护量小,但对它的维护工作仍应当引起检修人员的

高度重视,弹簧机构一旦出现故障,后果是比较严重的。定期检修维护中,弹簧机构的检查,限于无法进行解体检查,主要进行尺寸测量、目测检查、定期润滑等工作,并且继保定检时不应频繁传动,尽量降低对断路器的机械冲击,进一步提高弹簧机构的运行可靠性。

参考文献

- [1] 刘国荣. 涡卷弹簧储能操作机构的设计与应用[J]. 机电工程技术, 2004(10): 64-66.

作者简介:

刘滨涛(1980),男,工学硕士,电力工程师,从事电力系统运行工作;

肖建华(1979)男,工学硕士,电力工程师,从事电力系统规划工作;

黄倩(1986),女,本科,助理工程师,从事电力系统运行工作。

(收稿日期:2012-05-07)

(上接第 37 页)

电流大于整定值时零序过流保护不动作情况。

3 解决方案

针对该 220 kV 变电站的实际情况,中山供电局与该厂家共同分析,提出如下解决方案。

2.1 方案 1

将零序方向过流保护的零序电流选择由外接中性点的零序电流改为取开关电流。该方案不改变原定值项目,不改变原有接线;

该方案可以通过装置调试工具将系统定值“中压侧零流 I 段动作电流选择”整定值由“0”改为“1”,中压侧的零序电流 I 段动作电流定值按照中压侧开关 TA 的二次值整定;试验验证中压侧零序电流 I 段保护的定值精度;验证无问题后,保护装置可以投入运行。

2.2 方案 2

升级保护程序,将零序方向过流保护判方向所用电流固定改为 0.04 倍开关 TA 的额定值,该方案不改变原定值项目,不改变原有接线。

该方案可以在现场程序基础上修改软件版本,现场通过数据线升级后备保护程序,仅改变 CPU1 插件(后备保护)的程序;试验验证零序方向过流 I

段保护的定值精度和方向性及动作逻辑;预计升级程序和现场针对性验证试验的时间为 2~3 h。

2.3 方案 3

调整中性点 TA 的变比或者中压侧开关 TA 的变比,在开关 TA 变比不大于中性点 TA 变比 2 倍的情况下,保护软件可以不做任何处理,仅需按照调整后的 TA 变比整定定值即可解决此问题。

该方案可以在现场调整中性点 TA 的变比或者中压侧开关 TA 的变比;按照调整后的 TA 变比整定零序方向过流定值;现场试验验证零序方向过流 I 段保护的定值精度;验证无问题后,保护装置可以投入运行;

中山供电局技术人员经充分考虑,决定采用方案 2。因该方案只需升级保护程序,工作量小,时间短,反措可操作性强,而且不影响设备如期投运。

3 结 语

该型号的主变压器保护在广东电网范围内应用较广,该缺陷的及时发现及消除对广东省电网的安全稳定有着非常重要的意义。

希望这里的研究及分析对全国同行在设计、验收及原理分析方面起到参考意义。

(收稿日期:2012-05-25)

汽轮机轴瓦垫铁改造方案研究与实现

韩兴全

(新疆天山电力股份有限公司玛纳斯发电分公司, 新疆 玛纳斯 832200)

摘要: 通过改造汽轮机轴瓦下部垫铁结构, 提出汽轮机转子找中心时只在轴瓦下部加、减垫片, 无需研刮垫铁。通过这种改造, 可以降低大修劳动强度, 缩短检修工期。

关键词: 轴瓦; 可倾垫铁; 硬度; 摆动

Abstract: Through the transformation of lower pad block structure of steam turbine bearing bush, it is pointed out that it only needs the increase and decrease of the shim block under the bearing bush during alignment of steam turbine rotor without scraping and grinding pad block. The proposed method can reduce the labor intensity when repairing and shorten the maintenance period.

Key words: bearing bush; tilting pad block; hardness; swinging

中图分类号: TK263 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2012)05-0092-03

0 前言

汽轮机在大修期间都需要调整转子中心, 这是一项繁重而细致的工作, 是通过加、减下瓦3块垫铁(也有2块或4~5块垫铁的轴瓦, 现讨论下部3块垫铁的轴瓦)与轴瓦之间的垫片完成, 见图1。加减垫片后垫铁与瓦枕接触面积减少, 为了达到75%以上面积, 就需重新研刮垫铁。对于1 000 MW机组汽轮机有4根转子、8只轴瓦, 大修期间调整汽轮机中心耗时耗力, 仅中心调整就需15 d^[1]。为了缩短转子调整中心工期, 现将下半瓦3块垫铁改成可倾垫铁, 见图2、图3、图4。进油口改成从轴瓦端面进油, 油管采用不锈钢丝编织软管。现从垫铁加工、垫铁研刮、垫铁调整3个阶段阐述如何改造、调整。

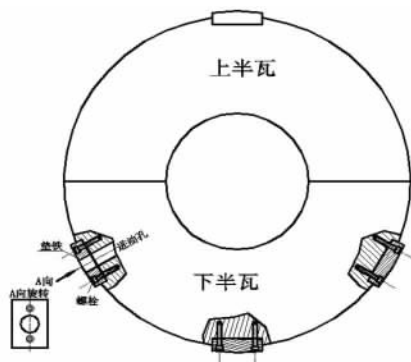


图1 工作原理图

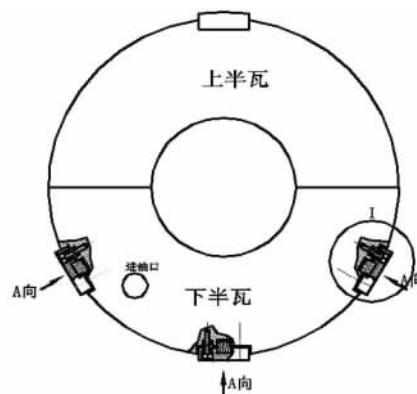


图2 改造示意图

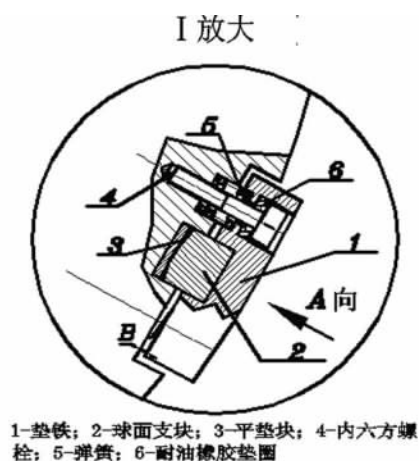


图3 局部详图

1 轴瓦加工

1.1 选材及试验

轴瓦和垫铁(件1)还是选用以往铸造轴瓦材质,对于球面支块(件2)和平垫块(件3)采用含有Mn的高硬度钢材制成,其具有较高的硬度和耐磨性^[2](如高速列车车轮用钢、轴承钢)。为了检验工件(件2)、(件3)耐压和耐冲击性,进行了耐压试验和冲击试验。耐压试验:将其放在压力机上做耐压试验,压力大小根据1 000 MW机组低压转子重量作为参考。冲击试验:用打铁气锤作冲击试验(做试验时工件上部垫一块钢材,使工件不被直接敲打)。耐压试验时间为24 h,冲击试验时间为2 h。试验完后用千分尺测量两只工件厚度变化不大于0.02 mm为合格,否则需重新选取更硬钢材。耐油橡胶垫圈(件6)采用氟橡胶。



图4 放大图

1.2 轴瓦垫铁加工

将球面支块(件2)、平垫块(件3)和弹簧(件5)取出,根据垫铁(见图4)平面大小制作厚度与B相同的垫片(见图5),将垫片(件7)放在轴瓦与垫铁之间,并在垫铁两侧卡入两只钢板(件8),然后将4个内六方螺栓(件4)上紧后垫铁就已固定(耐油橡胶垫圈不安装)。根据汽轮机瓦枕内径尺寸车削。球面支块(件2)球面需要精加工,表面粗糙度达0.8。

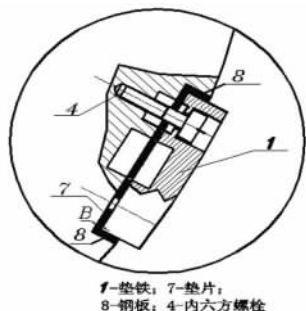


图5 垫铁加工示意图

2 垫铁研刮

现场安装期间,将汽轮机下半轴瓦按照图5装配进行研刮垫铁,当垫铁与瓦枕接触面积达75%以上,然后去除垫片(件7)侧板(件8),将球面支块(件2)、平垫块(件3)、弹簧(件5)和耐油橡胶垫圈(件6)装配成图3。然后调整4根内六方螺栓(件4)使垫铁与轴瓦四角数值B相同,垫铁安装完后耐油橡胶垫圈(件6)仍有一定变形,用手掌按垫铁一角,被按一角松手后可以恢复原状。

3 垫铁调整

将轴瓦下半放入瓦枕内,因垫铁(件1)与球面支块(件3)以球面为支点可以轻微摆动,从而调整垫铁(件1)的圆弧面与瓦枕完全接触。将汽轮机转子吊入轴瓦内并满缸转子找中心,根据转子中心偏差值计算各垫铁调整量。这时无需揭缸,将转子用行车吊起,翻出下瓦调整垫片,垫片需放在平垫块(件3)与轴瓦之间,调整完后翻入下瓦再次复查中心,一般调整2~3次中心即可合格。

4 结 语

轴瓦垫铁改造后需注意以下几点。

(1) 为了使轴瓦下部三块垫铁压力均匀,在转子没放入轴瓦前,用塞尺测量轴瓦底部垫铁与瓦枕须有0.03~0.05 mm间隙。

(2) 轴瓦上部垫铁不需改动,轴瓦紧力在改造前基础上增大0.02~0.05 mm。

(3) 调整垫片必须用不锈钢皮,不得用铜皮,垫片不得超过3张。

(4) 生产厂家提供不同厚度平垫块(件3),每种规格垫片厚度差0.5 mm,根据调整数据更换合适的平垫块(件3)。

(5) 生产厂家提供不同长度的弹簧(件5),每种规格长度相差3~5 mm,便于垫铁调整。弹簧钢丝直径 $\phi 2 \sim \phi 3$ mm范围,弹性系数K不得选取太大,防止耐油橡胶垫圈(件6)被压扁后弹簧还没被压到指定长度^[3]。

(6) 球面支块(件2)加工完后还需用球面磨床

研磨,磨完后的球面过渡圆滑。

(7) 内六方螺栓不得上得太紧,防止耐油橡胶垫圈(件6)被压得没有弹性,耐油橡胶垫圈(件6)在每次大修时需更换。

通过以上改造,可倾垫铁第一次研刮合格,以后大修就无需研刮垫铁,只调整内部垫片,从100~1 000 MW 汽轮机中心调整仅2天即可完成,机组提前发电,能够创造可观利润。

(上接第3页)

需要对每台服务器上的应用进行合理分布。人机界面只展示应用主节点上的数据,因此需给21个地调状态估计分配21个不同的应用。采用小应用的模式,每个状态估计小应用相当于状态估计大应用的一个映射,拥有同样的数据库结构,不同的小应用可布置在不同服务器上,因此可以满足21个状态估计计算的需求。各个小应用集成一套人机界面,通过切换应用来查看不同地调的SE计算结果数据。

4 结 语

推进调度技术支持系统的精细化运行管理工作,以系统状态估计遥测合格率运行指标为着手点监督考核系统运行情况,对有效提升调度一体化功能应用水平提供了基础保障。充分利用了CIM/E电网通用模型交互规范,在省地EMS系统异构条件下,在省调侧实现各地调系统电网数据的状态估计准实时计算,是对加强地调调度技术支持系统的运行管理的有益尝试,同时也为探索建立适应大运行调度一体化及调控一体化的系统运行指标考核体系,实现精益化运行管理与考核提供了可行方案。

参考文献

- [1] 于尔铿,相年德,王世纛,等. 电力系统状态估计[M]. 北京:水利电力出版社,1985.
- [2] 于尔铿,刘广一,周京阳. 能量管理系统(EMS)[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [3] IEC 61970-301 Energy Management System Application Program Interface (EMS-API): Part 301 Common Information Model(CIM) Base[S]. 2004.

参考文献

- [1] 郭延秋. 汽轮机分册/大型火电机组检修实用技术丛书[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [2] 马艳,卜丽,孙长江. 汽轮机设备检修[M]. 北京:中国电力出版社,1997.
- [3] 常威武,霍如恒. 汽轮机本体检修实用技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.

(收稿日期:2012-04-01)

- [4] IEC 61970-452 Energy Management System Application Program Interface (EMS-API): Part 452 CIM Network Applications Model Exchange Specification, DR3[S]. 2006.
- [5] 谢善益,梁成辉,高新华. CIM/CIS互操作细则在多级电网调度中的应用[J]. 电力系统自动化,2009,33(1):103-107.
- [6] 潘毅,周京阳,李强,等. 基于公共信息模型的电力系统模型的拆分与合并[J]. 电力系统自动化,2003,27(15):45-48.
- [7] 孙宏斌,吴文传,张伯明,等. IEC 61970标准的扩展在调度控制中心集成化中的应用[J]. 电网技术,2005,29(16):21-25.
- [8] 许凯宁,程新功,刘新锋,等. 基于CIM设计的电力系统状态估计模型[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(24):124-127.
- [9] 兰华,李积捷. 电力系统状态估计算法的研究现状和展望[J]. 继电器,2007,35(10):78-82.
- [10] 李盟,秦立军,郭庆,等. 基于CIM模型的电网拓扑分析[J]. 电力科学与工程,2011,27(9):18-22.

作者简介:

伍凌云(1976),男,博士,研究方向为电力系统分析,现就职于四川省电力公司调度中心;

王民昆(1973),男,高级工程师,研究方向为电力调度自动化技术,现就职于四川省电力公司调度中心;

李强(1966),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统分析,现就职于中国电力科学院电力自动化所;

徐杰(1986),男,硕士研究生,工程师,研究方向为电力系统网络分析,现就职于中国电力科学院电力自动化所。

(收稿日期:2012-05-22)

国电大渡河瀑布沟水力发电总厂



国电大渡河瀑布沟水力发电总厂是国电大渡河流域水电开发有限公司新成立的发电总厂，是中国国电集团公司目前装机最大的水电站，位于四川省雅安市汉源县和凉山州甘洛县境内，主要负责管理大渡河中游瀑布沟、深溪沟两座大型水电站。规划主要送电区为成都、川西北和川南地区。总装机容量4 260 MW，目前瀑布沟、深溪沟均已全面投产。

其中，瀑布沟水电站是国家“十五”重点工程和西部大开发标志性工程，是四川省灾后重建中和本世纪以来投产的单机和总装机容量最大的水电站，同时也是大渡河中游的控制性水库，是一座以发电为主，兼有防洪、拦沙等综合效益的特大型水利水电枢纽工程。该电站装设6台混流式机组，单机容量600 MW，工程于2004年3月开工建设，2009年底首批两台机组发电，2010年12月6台机组全部投产。

深溪沟水电站位于瀑布沟下游14公里，为瀑布沟水电站的反调节电站。装设4台轴流转浆式机组，单机容量165 MW。工程于2006年4月开工建设，于2010年6月27日首台机组发电，2010年11月30日第二台机组发电，2011年5月30日第三台机组发电，6月29日4台机组全部投产。

国电大渡河瀑布沟水力发电总厂下设厂长办公室、党群办公室、财务管理处、人力资源处、生产技术处、安全监察处、运行维护处7个二级部门，现有职工168人。推行了“一厂两站”、“机电合一”、“运维合一”新型生产管理模式，确定了“和谐瀑布沟、数字瀑布沟、效益瀑布沟”的战略目标，建立了专业技术负责人专业决策、设备主人具体负责的技术管理体系，构建了以绩效为核心的人力资源管理体系，培育了一支政治素质好、技术业务精、作风形象好的大型水电机组生产管理人才队伍。目前，全厂干部员工正奋力拼搏、扎实工作，努力建设“综合经营型、节能环保型、安全和谐型”电厂，力争为中国国电集团公司以新能源引领企业转型、建设国内一流综合性电力集团目标做出新的更大的贡献。

成都市兴名源电器有限公司

城市因我而亮丽，诚信、专业、求实、创新



成都市兴名源电器有限公司专业生产0.5~35 kV电流、电压互感器，3~35 kV油浸式、干式组合互感器，高低压避雷器及绝缘配套件的厂家。是国家电网中标企业。

公司拥有一支技术精湛、工作经验丰富、责任心强的精英团队。公司先后构建了具有国际领先技术的环氧树脂浇注生产线、自动压力凝胶生产线、真空滤注油生产线，并配备了国内外先进的试验、检验仪器设备。

本公司产品全面通过电力工业设备电气质量检验测试中心（武高所）和机械工业第五（西安）计量测试中心站西安高压电器研究所（西高所）的各项检测项目。通过了ISO9001:2008标准体系认证，生产的产品专业、优质、安全、环保。

成都市兴名源电器有限公司

