

继电保护装置运行失效特性分析与状态检修策略

管益斌¹, 严国平¹, 陈久林², 黄浩声², 曹海欧¹, 邓洁清³

(1.江苏省电力公司, 江苏 南京 210024; 2.江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

3.江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211102)

摘 要:文中通过对某地区电网历年继电保护运行情况的统计分析,论证了在目前微机保护可靠性、灵活性大幅提高的情况下,实行常规的定期检修已不适应电网发展的需要,并通过故障实例的剖析,进一步证明了实行继电保护状态检修的必要性,最后对继电保护状态检修工作进行了详细的介绍和总结展望。

关键词:微机保护; 运行失效特性; 状态检修

中图分类号: TM774

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2013)02-0001-03

随着微机在继电保护及自动装置的广泛应用,继电保护的可靠性、定值整定的灵活性大大提高,依据传统的《继电保护及电网安全自动装置规程》来维护二次设备,已无法满足目前日益发展的电网运行、检修的要求,同时一次设备状态检修的推广、线路不停电检修技术的应用,因检修设备而导致的停电时间将越来越短,这对二次设备检修提出了新的要求。因此,二次设备在检修体制、检修方法及检验项目、确定检修周期等方面需要改变,以适应电力发展的需要。

1 保护运行故障率分析

保护设备由许多部件构成,在收集大量的有关设备连续运行时间与检修时间数据后,通过数理统计方法,拟合出典型故障率浴盆曲线^[1],如图 1 所示。

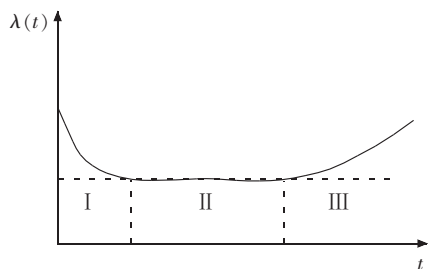


图 1 故障率曲线

图 1 中, $\lambda(t)$ 是指设备在 $[0,t]$ 时间内不发生故障的条件下,下一个单位时间发生故障的概率,即设备在 t 时刻的故障率。I, II, III是指时间段,其中 I 指早期故障期; II 指偶然故障期; III 指损耗故障期。

(1) 早期故障期。曲线呈下降趋势,故障率 $\lambda(t)$ 随着时间 t 的增加而降低。造成设备在初期故障率较高的原因,主要是由于设计上的疏忽、生产工艺质量不佳、某些零部件质量差以及安装不当等。经过技术改进、缺陷排除后,故障率便逐渐下降,设备质量进入稳定期。这一时期所对应的实际生产过程为保护出

厂、基建与质保期这段时期,可以认为,经过出厂试验、现场基建调试和首次校验等多次试验调校,设备渡过了早期故障期,进入偶然故障期。

(2) 偶然故障期。此时的曲线近似为一直线,故障率 $\lambda(t)$ 随着时间 t 的增加变化不大,近似一个常数。故障原因主要是一些随机的偶然因素引起的。在这一时期,由于设备的质量相对比较稳定,若采用定期维修制,频繁检修更换设备零部件,不仅浪费部分部件的使用寿命,造成不必要的经济损失,而且并非急需的定期校验,由于可能存在安措不到位的情况,有使保护误动的风险,反而使得保护运行可靠性降低。因此,针对这一偶然故障期,新的保护装置故障消除方法—状态检修工作应运而生,通过对设备状态进行监视,预测其可靠程度,排除造成故障的偶然因素,从而提高设备的使用寿命^[1]。

(3) 损耗故障期。这时期的曲线呈增长趋势,故障率 $\lambda(t)$ 随着时间 t 的增加而增加,故障的原因大多是由于许多零部件已经磨损或老化,使设备故障逐渐增多。此期间的故障可称为损耗性故障,发生的多少与设备工作时间有关。因此,宜采用预防维修方法,更换部分已老化及损坏部件,以此降低设备故障率的发生。从某地区电网二次设备运行分析报告(2008~2011 年)的保护故障率统计中,如表 1 所示,完全符合上文所提及的保护故障率与运行时间的关系(浴盆曲线)。一年以内的装置,由于经过出厂调试、基建调试及验收整改,其故障率维持在低位,但由于设备新投运,设备还需经受正式运行环境的考验,再加上设备运行管理经验等相对生疏,所以故障率并未处于最低位;在 1 至 5 年的装置,由于在首次校验中,将质保期内发生的缺陷及时进行了处理,再加上运行管理经验已相对丰富,因此故障率几乎维持在最低位;而 5 至 10 年的装置,由于这时候有些零部件开始老化,比如电源插件,故障率略微有些增加;最后,10 年以上的装置,由于有许多零部件开

始老化,故障率开始急剧上升。因此,根据保护故障率特点,采取如下检修策略是合适的:加强基建调试与验收的管理,将引起保护缺陷风险前移,力争无缺陷投运;加强首次校验,将投运以来的缺陷及时处理;在1至10年内进行状态检修,10年以上设备加强监视,采用预防维修法。

表 1 2008~2011 年的保护故障率统计

年份	1 年以内	1 至 5 年	5 至 10 年	10 年以上
2008	1.03	0.49	6.01	29.82
2009	1.00	0.37	3.62	16.00
2010	1.00	1.18	3.17	5.4
2011	1.24	0.97	4.00	11.09

2 常见继电保护设备缺陷统计分析

根据某地区电网二次设备运行分析报告(2008~2011年)对220 kV及以上微机保护装置缺陷进行了统计分析,缺陷性质分为危急、严重和一般,缺陷类型主要有:电源模块故障、主板 CPU 故障、软件故障、交流插件故障、开入/开出故障等。历年缺陷统计数据如表2所示。从统计数据来看,电源模块、主板 CPU、软件、交流插件及开入/开出插件等装置内部紧急缺陷已占总缺陷次数的一半以上,而此类故障,多因内部原器件老化而产生,在以往定期校验按常规的试验方法并不能发现此类问题。

电源模块发生故障的主要原因是工作温度过高而导致电容元件失效或损坏,以及器件质量的问题而引起的抗电磁干扰性能差,运行中主要表现为输出功率不足及稳定性差,直流纹波系数过高等。常规的校验只做逆变电源的80%的额定电压是否启动,无法监视电源内部元器件的变化情况。需加强巡视,对电源温度进行监测,积极研究电源输出电压纹波幅度、负载波动率及温度的在线监测方法,积极研究电源状态评估策略。

主板 CPU 发生故障的主要原因有多个方面,包括 CPU 芯片长期处于高温运行环境,现场电磁干扰,调

试过程中防静电措施不完善,以及板卡自身的硬件设计缺陷等。常规的校验只校验定值及逻辑,对主板 CPU 插件并无特别的校验手段,应加强对装置巡视,及时监视异常信号,做到快速故障定位,及时上报。

交流插件、开入/开出插件涉及保护装置对采样值与开关量处理,关系到保护装置功能的正确性和完整性,造成交流插件故障的主要原因是由于交流端子间的绝缘被破坏造成装置的二次电流回路发生异常,开入/开出插件的故障则多见于硬接点质量不良造成的黏连。常规的校验虽然有绝缘测试一项,但其周期为2年或3年,在此期间,绝缘的老化无法得到有效监视。下面以几起故障具体说明。

(1) 某变电站主变第一套保护无故障跳闸,检查发现交流电流插件电流接线端子绝缘损毁,端子间已经烧黑,致使主变110 kV侧电流C相与公共绕组A相短接,在区外故障时,电流回路流过大的零序电流,110 kV侧电流C相与公共绕组A相电流相位都发生了改变,从而出现了差流,当差流超过整定值时,保护动作出口。查看定期校验报告,校验时绝缘正常。

(2) 某变电站一主变保护在正常运行中突然无故障跳闸,检查发现装置定值自行改变,导致主变参数改变,破坏各侧平衡,产生了差流,而差流又大于速断值(速断定值也变小)致使失去制动而误动作,后经检查为CPU故障。对于CPU,常规试验无针对性监测方法,且此种故障多为突发性,需实时监测才能有效预防。

(3) 某线路保护区外故障时误动,经检查发现是因为故障电流造成一侧电流互感器(TA)饱和,致使二次电流发生畸变,而另一侧TA传变正常,产生差流使得线路保护误动,此因装置程序版本问题,常规试验无法检验,只有动模试验才可检测。因此,对于装置内部缺陷预防,一是加强设备选型,选用质量优良、运行可靠的产品,二是加强设备状态巡视,完善二次设备状态在线检测,随着微机化、智能化的发展,越来越多的保护运行数据可以通过在线检测获取,为保护状态检修评价提供了实时可靠的数据。

表 2 历年装置缺陷统计

年份	类型	电源模块	主板 CPU	软件	交流插件	开入/开出	通讯装置及通道	人机对话	通信模块	其他	总计
2008	次数/次	61	41	18	14	4	30	22	23	30	243
	占比/%	25.1	16.8	7.4	5.8	1.6	12.3	9.1	9.5	12.4	100
2009	次数/次	20	23	5	16	14	61	6	8	37	190
	占比/%	10.5	12.1	2.6	8.4	7.4	32.1	3.2	4.2	19.5	100
2010	次数/次	41	47	8	5	3	49	22	10	4	189
	占比/%	21.7	24.9	4.2	2.6	1.6	25.9	11.6	5.3	2.1	100
2011	次数/次	88	33	10	8	22	57	36	10	71	335
	占比/%	36.3	9.9	3.0	2.4	6.6	17.0	10.7	3.0	21.1	100

3 继电保护状态检修介绍

继电保护状态检修工作基本流程包括:设备信息收集、设备状态评价、检修策略、检修计划、检修实施等环节。

依据状态检修管理规定,运行人员与检修人员分别按一定周期进行继电保护设备的状态巡视,巡视项目包括运行环境温度、装置采样、装置差流(差动保护)、开入量、通道状况(线路保护)等信息,再将巡视结果输入继电保护状态检修专家系统^[3]。

专家系统从检测信息、随机失效、相对品质、技术改进 4 个部分进行状态评价^[4]。检测信息是指可以直接观测到或通过仪器检测到的设备缺陷或异常,即运行与巡视人员巡视信息;随机失效是指装置可能存在的故障概率,保护装置长时间运行而没有进行有效地校验时,则认为保护装置的故障概率在随时间增加,时间越长其评价指数越低,该信息从 PMS 台账中取得,由专家系统自动计算;相对品质通过统计数据反应是否存在品质相对较差的设备,通过 3 个方面的数据来评估:

- (1) 同类产品老化失效率;
- (2) 技术支持的程度;
- (3) 本类型设备相对其他厂家同类设备故障率。

同样,该信息从 PMS 台账中取得,由专家系统自动计算;技术改进反应当前运行的保护装置是否得到了应有的改进或完善,系统存在的不足或缺陷,若没有进行相应的改进或完善,则需要相应扣分,该信息由检修巡视及 PMS 缺陷信息共同提供。

专家系统综合检测信息、随机失效、相对品质、技术改进 4 个部分的分数,评出最终保护状态:正常、注意或者异常,并根据评价结果给出检修策略,根据基准周期延长或缩短检修周期。

4 结束语

保护运行失效特性,使得对继电保护传统检修模式进行改进已势在必行,另外,保护微机化、智能化的发展,为深入开展继电保护状态检修提供了可能,通过二次在线检测系统、D5000 二次在线监视分析系统及继电保护统计分析系统等外部系统,获取保护实时运行信息,使得数据来源更加丰富多样,也使得最终的保护状态评价更加及时与科学。因此,本文认为在设备选型、基建调试、验收阶段,仍应严格按照继电保护全过程管理过程规定进行相关工作,把风险前移,做到零缺陷投运;在首次校验阶段,针对设备投运以来发生的问题,进行全面的消缺;而在设备进入运行稳定期后,则可实行状态检修,使继电保护设备真正做到“应修必修,修必修好”,避免误修、漏修事件,从而提高设备的利用率与可靠性,节约公司的人力、物力,提高电网安全 and 经济效益。

参考文献:

- [1] 王睿琛,薛安成,毕天姝,等.继电保护装置时变失效率估算及其区域性差异分析[J].电力系统自动化,2012,36(5):11-15,23.
- [2] 吴雪峰,邱海,吕赢想.继电保护设备状态检修的探讨[J].浙江电力,2011,30(5):51-54.
- [3] 高翔.继电保护状态检修应用技术[M].北京:电力出版社,2008.
- [4] 赵晓明,吴建伟.电力系统继电保护定期校验问题综述及其展望[J].浙江电力,2011,30(11):1-5.

作者简介:

管益斌(1974),男,江苏盐城人,高级工程师,从事继电保护工作;
严国平(1965),男,江苏常州人,高级工程师,从事继电保护工作;
陈久林(1970),男,江苏高邮人,高级工程师,从事继电保护工作;
黄浩声(1979),男,浙江温岭人,工程师,从事继电保护工作;
曹海欧(1979),男,江苏盐城人,高级工程师,从事继电保护工作;
邓洁清(1978),男,江苏淮安人,高级工程师,从事继电保护工作。

The Discussion of Failure Characteristic and Condition Based Maintenance for Protection Relay

GUAN Yi-bin¹, YAN Guo-ping¹, CHEN Jiu-lin², HUANG Hao-sheng², CAO Hai-ou¹, DENG Jie-qing³

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China; 2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China; 3. Jiangsu Electrical Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China)

Abstract: The statistical analysis for the running condition of protection relays over the years in a Power Grid is carried out in this paper. It is demonstrated that the routine preventive maintenance has not adapted to the need of power grid development under the condition of significant improvement on reliability and flexibility of the microcomputer protection. More, with some practical fault example, the necessity of condition based maintenance is proved. Finally, it is introduced the works about condition based maintenance of protection relay.

Key words: micro-computer protection; failure characteristics of protection relay operating; condition based maintenance

一种大规模智能电能表全自动检定系统设计

黄奇峰, 蔡奇新, 刘建

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:针对即将建设的江苏省年检800万只智能电能表超大规模全自动检定系统工程建设需要,介绍了一种主要由自动化仓储、AGV搬运、机器人挂表、检测装置检测等环节组成,适合超大规模系统建设要求的电能表全自动检定系统的工艺流程、控制系统软件架构和通信规约设计原则,重点讨论了检定任务自动化执行过程,包括检定任务自动化执行过程设计思路,检定任务自动化执行过程设计及其改进方法,不同设计方法的优缺点分析等,探讨电能表自动化检定的新方法、新思路。

关键词:电能表检定;超大规模;工艺流程;控制系统架构;检定任务自动执行

中图分类号:TH873.7

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)02-0004-03

目前已经建设的电能表全自动检定系统大都属于试验性质,规模较小^[1-3]。根据江苏省年检800万只智能电能表的需要,正在建设的超大规模智能电能表全自动检定系统,其规划的仓储、搬运规模和每天检定的计量器具数量都将是国内最大,且没有可以完全照搬的成熟经验和方案,迫切需要研究适合如此大规模的电能表全自动检定建设方法。

1 系统总体设计

1.1 工艺流程设计

一种高效的系统组建方案如图1所示。

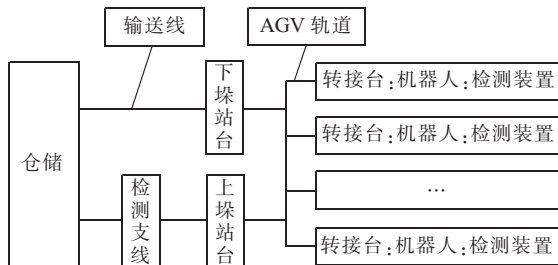


图1 系统组成

完整的一次电能表检测过程。

(1) 检定出库:仓储中的电能表整垛经输送线输送到下垛站台;

(2) 待检表搬运:AGV将电能表垛从下垛站台搬运到转接台;

(3) 机器人挂表:机器人取转接台上的电能表,自动分解电能表垛,扫描识别电能表并将其挂在检测装置上(简称挂表);

(4) 检测装置检测:挂表结束,检测装置自动执行耐压试验、功能和误差检测;

(5) 机器人下表:检测结束,机器人将电能表摘下,装箱、组垛,放回转接台(简称下表);

(6) 已检表搬运:AGV将转接台上检测过的电能表垛搬运到上垛站台;

(7) 检测支线:上垛站台的电能表垛经输送线输送,基于流水线模式,完成拆垛、拆箱、外观检查、分拣、封印、组箱、组垛等操作;

(8) 检定入库:合格的电能表整垛由输送线送回库房。

基于效率和成本的平衡考虑,每个检测装置固定对应若干个转接台,一台机器人负责多个检测装置的挂、下表。

1.2 控制系统软件架构

根据SOA的软件架构原则,控制系统软件的架构设计如图2所示。

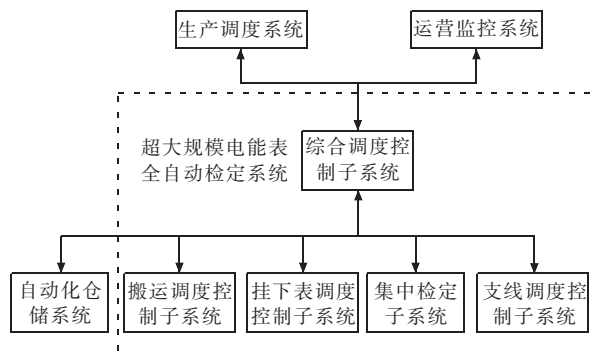


图2 软件架构

图2中,生产调度系统是系统的上级生产管理系统,向系统下发检定任务;运营监控系统集中监控系统的运行。

综合调度控制子系统:系统调度控制和通信的中心,主要功能包括接收和管理检定任务;协调自动化仓储系统、设备与装置调度控制系统,调度、控制检定任务的执行;管理系统间的通信,中转系统间的通信信息;监测设备与装置工况及检定任务执行情况,进行故障调度等。

自动化仓储系统:电能表立体库管理系统,与系统的主要交互是接收和执行检定出库、入库任务。

搬运调度控制子系统:调度、控制 AGV 完成电能表的搬运,主要功能包括集中管理、监控 AGV 及其运行;接收和管理搬运任务;调度、控制 AGV 执行搬运任务等。

挂下表调度控制子系统:调度、控制机器人完成电能表的挂表和下表,主要功能包括集中管理、监控机器人及其运行;接收和管理挂下表任务;调度、控制机器人执行挂表和下表任务等。

集中检定子系统:调度、控制检测装置完成检测,主要功能包括集中管理和监控检测装置及其运行;接收和管理检测任务;调度、控制检测装置执行检测任务;集中管理检定结果等。

支线调度控制子系统:调度、控制检测支线完成外观检查、分拣、封印等操作,监控装置运行工况,向综合调度控制子系统上传检测结果。

1.3 通信规约设计原则

由于相互关联的系统较多,通信规约设计既要考虑简化实现和维护,同时也要考虑到后期系统出现功能变化需要扩展或修改接口时,接口变化影响的范围最小。本文所有设备或装置调度控制子系统仅与综合调度控制子系统通信,通过在综合调度控制子系统配置信息的转发通道实现各个系统的信息互通,简化系统之间的通信,方便开发和管理。接口通信基于 Web Service 协议,基于 XML 格式组织内容,方便接口的后续调整。

2 检定任务自动执行过程探讨

2.1 设计思路

由于检定生产作业需要根据江苏省用表需求不断作出调整,系统投运后应支持灵活的检定任务安排。另外,考虑到节能、高效等系统建设要求,灵活的检定任务调度策略应满足下列调度需要。全自动检定:在没有人工参与的情况下,系统正常运行时应能调度多个类型不同规格计量设备的检定任务同时执行。

优先级调度:支持紧急的检定任务优先执行,随机到达的不同优先级检定任务能并行执行。

随机调度:支持手工设定特定的检定任务在特定的某些检测装置上执行检测,且不影响其他检定任务的调度执行。

故障调度:出现部分装置或设备故障时,正常运行的装置或设备的任务调度不受影响。

时间最优:特定任务量下,完成这些检定任务所用时间最短。

检测装置利用率最优:检测装置的检测时间与检

测装置的总运行时间比值最大。

设备与装置整体利用率最优:设备与装置执行检定任务所用的时间与总运行时间的比值最大。

自适应调度:系统能自动根据当前检定任务量的大小,启动、调度、控制合理数量设备或装置,按调度人员设定的目标,完成检定任务。

2.2 检定任务自动化执行过程设计

通过各个系统协调、配合,能满足上述主要调度设计要求的一种检定任务自动化执行过程如下。

2.2.1 综合调度控制子系统

(1) 维护资源信息同步:与设备和装置调度控制子系统交互,维护所有设备和装置状态数据同步。当监测到设备或装置出现异常信息时,触发故障调度。

(2) 生成待检表缓存位:扫描正常状态的检测装置,如果存在能为该检测装置挂、下表的能正常运行的机器人,且根据转接台的使用规则有一个能为该检测装置存放待检表的转接台,且经过该转接台的 AGV 导航环路可以正常使用,则该检测装置对应的这个转接台就是一个待检表缓存位。

(3) 生成待检表缓存位优先级队列:根据经过待检表缓存位对应转接台的 AGV 环路长度和站台到该转接台的距离生成待检表缓存位优先级队列。较短 AGV 环路上距离站台较远的转接台对应的待检表缓存位有较高优先级。待检表缓存位根据其对应检测装置可以检测的电能表类型、规格划分为不同队列。

(4) 任务接收与核查:接收到检定任务后,判断任务是否可以执行,向调度人员反馈可执行情况信息。

(5) 任务优先级调度:检定任务根据紧急程度分为 3 个优先级。通过查询仓储系统,找到了检定任务对应的所有垛信息,将检定任务分解为这些垛的检定任务——垛任务。垛任务使用与检定任务同样的优先级。所有相同类型、规格的电能表垛任务排入一个优先级队列。系统调度时候,高优先级的垛任务优先出队列,对应电能表类型、规格的高优先级待检表缓存位出队列,根据该垛任务和待检表缓存位信息生成各个系统的任务。

(6) 各个系统任务的生成与下发:各个系统的任务包括检定出库任务、搬运任务、挂表任务、检测任务、下表任务、入库任务等。根据垛任务及要表请求信息,综合调度控制子系统一次生成所有上述任务,并将其发给对应的具体执行系统。

(7) 故障调度:建立故障调度列表,预置不同故障类型调度处理器。当有故障发生时,系统通知对应类型的处理器执行预置的故障调度处理方法。

2.2.2 搬运调度控制子系统

搬运任务分站台到转接台、转接台到转接台、转接

台到站台等。搬运调度控制子系统监测所有搬运任务的搬运起点,当发现有下列站台或起点转接台不为空,则查找对应电能表垛的搬运任务。如果核对垛信息相符,则将该任务放入可执行搬运任务队列,等待调度AGV执行。

2.2.3 挂下表调度控制子系统

挂下表调度控制子系统监测所有挂、下表任务对应的机器人、转接台。如果检测装置处于空闲状态且关联的转接台上有待检表垛,系统查找该垛对应的挂表任务,核对垛信息无误后,将该挂表任务加入到为该检测装置执行挂表机器人的可执行任务列表。下表同理操作。

系统为每个机器人维护一个可执行任务列表,存储该机器人对应的具备执行条件的任务。机器人执行任务时按检测装置的排列顺序从起始位置向固定方向移动执行所有可执行任务,直至最大位置,然后反向继续顺序执行。为了提高效率,每次执行完下表任务后,立即查找、执行该检测装置的挂表任务。

2.2.4 集中检定子系统

集中检定子系统监测挂表任务执行情况。当监测到有挂表任务执行结束,系统调度对应的检测装置立即执行检测。

2.3 一种改进设计

上述设计中,调度时让靠近站台的检测装置优先获得检定任务,较多的AGV搬运任务在较短的AGV导航环路上执行,提高了AGV的搬运效率。但是,当需要启动较多检测装置执行检测时,由于AGV由近及远顺序向转接台搬运电能表垛,会导致较远位置的检测装置分配到任务的时间较晚,从而可能导致任务执行时间延长。一种改进调度过程如下:

(1) 将待检表缓存位优先级队列按从该位置取表的机器人进行拆分。

(2) 系统根据机器人到站台的平均距离维护一个

有序的机器人列表。

(3) 由近及远循环为机器人分配优先出队列的垛任务,每次循环每个机器人分配一个垛任务。

(4) 每个机器人对应的高优先级待检表缓存位优先分配垛任务。

(5) 其他过程不变。

2.4 不同设计方法的讨论与分析

当检定任务量较小,不需要启动全部检测装置就能完成任务时,由于使用改进后的调度方法会启动更多设备和装置,AGV需要将电能表垛运到更远的转接台,从而造成一定的设备和装置利用率下降。但当任务量很大时,改进后的调度方法提高了不同环节设备运行的并行度,节省任务的执行时间,优势明显。

3 结束语

本文针对超大规模的电能表全自动检定系统的建设需求,介绍了一种系统软、硬件设计方案,所介绍的内容已通过仿真验证,为研究和建设超大规模智能电能表全自动检定系统提供了一个新的可供借鉴的参考方案。

参考文献:

- [1] 张燕,黄金娟.电能表智能化检定流水线系统的研究与应用[J].电测与仪表,2009(12):74-77.
- [2] 高利明,陈卓娅,张裕晓,等.一种智能化全自动流水线电能表检定系统[J].河南电力,2011(4):38-41.
- [3] 侯兴哲,常涛.AGV技术在电能计量中心的应用[J].电测与仪表,2007(11):29-35.

作者简介:

黄奇峰(1968),男,江苏东台人,高级工程师,从事电力计量管理工作;

蔡奇新(1978),男,福建莆田人,高级工程师,从事标准量传和自动化检定线建设与管理;

刘建(1981),男,河南信阳人,工程师,从事电力计量工作。

The Design of Super Large-scale Smart Meter Automatic Verification

HUANG Qi-feng, CAI Qi-xin, LIU Jian

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: According to the requirement of constructing super large-scale smart meter automatic verification system by which 8,000,000 smart meters will be verified yearly in Jiangsu province, the construction, software and key design of a smart meter automatic verification system is introduced in this paper. This system is mainly composed of automatic warehouse, AGV, robot, verifying attachment, suitable for constructing super large-scale system. The design of verification task scheduler process is discussed in this paper, including the requirement of the design, two verification task scheduler methods meeting the requirement and a simple scene comparison suitable for the two methods. This paper tries to find a new way of smart meter automatic verification.

Key words: super large-scale automatic system; smart meter verification; software architecture; key design; verification task scheduler

全光纤电流互感器现场运行误差特性研究

秦 冉¹,王倩倩²,杨世海¹,徐志峥³,周 贇²

(1.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏 南京 211103;2.东南大学,江苏 南京 210096;
3.无锡供电公司,江苏 无锡 214101)

摘 要:为分析全光纤电流互感器(FOCT)的误差特性,建立了 FOCT 在线测试系统,采集 FOCT 现场运行数据,并与标准电流互感器所测数据进行对比,分析 FOCT 比差、角差随一次侧电流变化的误差特性。结果表明 FOCT 角差能够达到 0.2S 级测量精度,而比差却远不能满足精度要求。

关键词:全光纤电流互感器;比差;角差;误差特性

中图分类号:TM63

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)02-0007-03

近年来,随着变电站自动化和网络通信技术的飞速发展,特别是 IEC 61850 标准体系的颁布和推行,传统的变电站已逐步向智能化变电站过渡。电子式互感器作为智能化变电站的基础和重要组成部分,其发展和应用受到了广泛的关注。其中,全光纤电流互感器(FOCT)以其先进的技术优势成为新型电流互感器发展和应用的主流^[1-3]。但是在运行环境变化时,FOCT 仍然存在稳定性和可靠性的问题。

1 FOCT 测试系统

文献[1-4]详细介绍了 FOCT 的原理。FOCT 在线测试系统框图如图 1 所示。

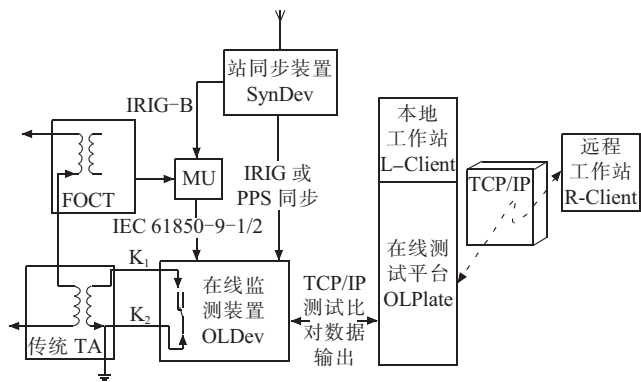


图 1 FOCT 在线测试系统框图

该测试系统是福建亿榕信息有限公司在 DST100 电子式互感器校验仪和 OMS 在线测试系统的技术基础上,优化设计了采集装置和系统方案,使该系统专注于光学互感器角差、比差等反映其现场运行状态特征量的计算和采集,以及该类信息的收集、汇总、存储和远程推送等功能应用;用户可通过远端/现场的客户端,配置系统和获取目标误差数据。传统电磁式电流互感器和被测 FOCT 准确级均为 0.2S。在线测试系统装置所采用的 FOCT 主要技术参数如表 1 所示。

表 1 FOCT 主要技术参数

FOCT 型号	额定电压 /kV	额定电流 /A	准确级	测量额定二次输出
NAE-GL220G-N2	220	2 500	0.2S	2D41

FOCT 在线测试系统原理如图 2 所示。

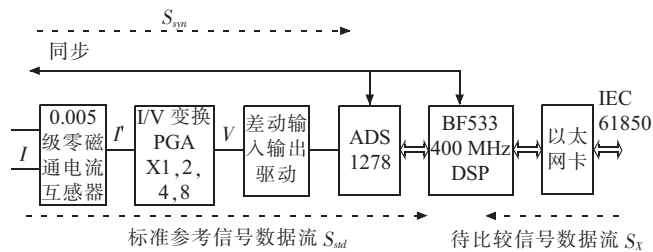


图 2 FOCT 在线测试系统原理图

FOCT 误差在线测试装置主要由 6 个模块,共 2 条信号采集支路构成。

1.1 模块功能

- (1) 0.005 级零磁通高精度电流互感器模块:将传统电磁式电流互感器的二次电流 I 转换为采样所需的小电流信号 I' ;
- (2) 具备可编程增益电路的电流/电压转换模块:将小电流信号 I' 调理成合适的电压信号 V ;
- (3) 差分输入输出的驱动模块:抑制信号的共模误差;
- (4) ADS1278 模块:电压模拟信号的采集;
- (5) BF533 DSP 模块:系统管理和应用计算等;
- (6) 以太网卡模块:IEC 61850 SMV 数据报文的接收。

1.2 采样数据的同步

- (1) 外同步:站级外同步装置为本测试装置(和待测 FOCT/MU)提供了同步信号(秒脉冲/IRIG-B 码),确保被测信号和标准信号的秒同步采集;同时,本测试装置的 AD 采样率根据合并单元的采样率设置,确保被

检信号和标准信号每帧同步,同时也便于准确快速地计算和分析。

(2) 内同步:为获取同步采样值序列,该装置不使用在数据源同步获取数据的方法,而是采用异步采集、同步计算的方式,通过延迟补偿、线性插值等算法,在同步节点计算得出连续的“同步采样值”。

本测试装置主要完成光学电流互感器误差测试系统相关测试参数的在线采集、FOCT 的角差/比差计算、本地存储和上报。同时具备测试的角差/比差越限时报警,并记录和上报该时刻的两路比较信号。本文采集了2012年6月至10月之间共72天的比差、角差及一次侧电流数据,采样周期为1s。本文采用传统电磁式电流互感器的准确级为0.2S级,与FOCT的准确级相同,由文献[5,6]分析可知,不可避免会产生测量误差。以下所涉及数据分析均忽略传统电磁式电流互感器测量产生的误差。

2 FOCT 误差特性分析

2.1 比差和角差

根据 IEC 6004-8 标准,比差定义为标准互感器二次侧输出电流的幅值为 A_1 ,FOCT 二次侧输出电流的幅值为 A_2 ,比差 F 的表达式为^[7]:

$$F = \frac{A_2 - A_1}{A_1} \times 100\% \quad (1)$$

角差的定义为标准互感器二次侧输出电流的角度为 α_1 ,FOCT 二次侧输出电流的幅值为 α_2 ,比差 Q 的表达式为:

$$Q = 60(\alpha_2 - \alpha_1) \quad (2)$$

其中,相位误差的单位是角度(°)。0.2S 级电流互感器在 1%,5%,20%,100%和 120%额定电流下的误差限值如表 2 所示。

表 2 0.2S 级电流互感器的误差限值

准确级	额定电流 / %	比值误差 / %	相位误差 / (°)
0.2S	1	0.75	30
	5	0.35	15
	20	0.2	10
	100	0.2	10
	120	0.2	10

2.2 数据分析

由于此次是工程应用下的实地测量,工程方考虑到该地区以后的发展等因素,为仪器留了足够多的裕量,所以 FOCT 不能在额定点附近运行。数据采集的过程中仅涉及到互感器额定电流 30% 以下的的数据。对额定电流 5%,10%,15%,20%,25% (即 125 A,250 A,375 A,500 A,625 A)附近 $\pm 1A$ 范围内的测量数据进行

提取分析,并计算比差、角差的均值和方差,并将比差和角差的均值作为实际的比差和角差,结果如下。

(1) 72 日总数据分析结果如表 3 所示。

表 3 总数据结果

精度	0.2S				
电流	5%	10%	15%	20%	25%
比差限值	0.35	—	—	0.2	—
实际比差	0.847	0.837	0.742	0.672	0.633
角差限值	15	—	—	10	—
实际角差	10.0	10.0	9.5	9.8	9.9

注:“—”表示国标没有作出具体规定,但此处标准比差限制范围为 0.2~0.35,标准角差限制范围为 10~15,下同。

由表 3 可知,实际比差与标准比差限制值相差较大,不能满足电流互感器 0.2S 级要求;而角差可以满足 0.2S 级要求。数据分析如图 3 所示。

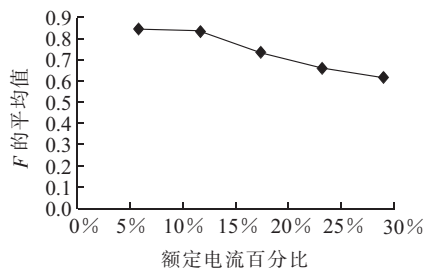


图 3 F 平均值-额定电流百分比

由图 3 可知,随着测量电流的逐渐增大,比差 F 的平均值逐渐变小。由此可以得出:在允许测量范围内,一次侧电流越大,FOCT 受到的干扰程度越小,测量精度越高。 F 方差-额定电流百分比如图 4 所示。

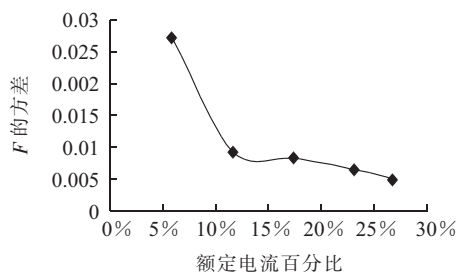


图 4 F 方差-额定电流百分比

图 4 中,随着测量电流的逐渐增大,比差 F 的方差逐渐变小,并且从 5% 到 10% 一段变化趋势十分明显。可以得出如下结论:一次侧电流越大,FOCT 测量稳定性越高,且当一次侧电流值超过额定电流的 10% 时,FOCT 的测量精度较之前有显著改善。 Q 平均值-额定电流百分比如图 5 所示。

由图 5 可知,角差 Q 并无明显规律,仅呈现波动下降的趋势,但是由于角差的范围已满足 0.2S 级的测量精度,所以角差的波动对 FOCT 性能的测量精度并无影响。 Q 方差-额定电流百分比如图 6 所示。

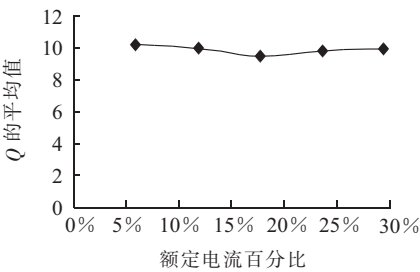


图 5 Q 平均值-额定电流百分比

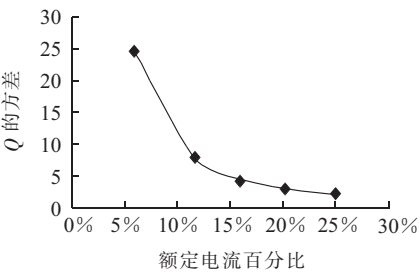


图 6 Q 方差-额定电流百分比

由图 6 可知, Q 的方差随着一次侧电流的增大而减小并趋于稳定。由此进一步说明 FOCT 在允许测量范围内, 一次侧电流越大, 测量越精确。

(2) 对不同月份测量数据结果进行分析。不同月份用电量存在明显的差别, 即一次侧电流大小不同, 因此, 有必要对 6 月至 10 月不同月份采集的数据分别进行分析计算。6 月至 10 月的数据结果如表 4—8 所示。

表 4 6 月数据结果

精度		0.2S				
电 流	5%	10%	15%	20%	25%	
比差限值	0.35	—	—	0.2	—	
实际比差	0.780	0.791	无	无	无	
角差限值	15	—	—	10	—	
实际角差	10.0	8.8	无	无	无	

注: “无”表示该月不存在该有关数据, 下同。

表 5 7 月数据结果

精度		0.2S				
电 流	5%	10%	15%	20%	25%	
比差限值	0.35	—	—	0.2	—	
实际比差	无	0.809	0.741	0.647	0.595	
角差限值	15	—	—	10	—	
实际角差	无	9.9	9.6	10.0	9.7	

表 6 8 月数据结果

精度		0.2S			
电 流	5%	10%	15%	20%	25%
比差限值	0.35	—	—	0.2	—
实际比差	无	0.820	0.736	0.661	0.649
角差限值	15	—	—	10	—
实际角差	无	9.7	9.4	9.7	10.1

表 7 9 月数据结果

精度		0.2S				
电 流	5%	10%	15%	20%	25%	
比差限值	0.35	—	—	0.2	—	
实际比差	0.839	0.849	0.797	0.724	无	
角差限值	15	—	—	10	—	
实际角差	10.5	10.3	9.5	9.8	无	

表 8 10 月数据结果

精度		0.2S				
电 流	5%	10%	15%	20%	25%	
比差限值	0.35	—	—	0.2	—	
实际比差	0.892	0.901	无	无	无	
角差限值	15	—	—	10	—	
实际角差	9.7	8.6	无	无	无	

由表 4—8 可知, 实际测量到的角差除个别超出标准角差限制, 其他均满足 0.2S 级电流互感器的要求。由于测量到的电流仅限制在 30% 范围以内, 不能连续变化, 不能排除当月其他原因对测量精度的影响。而实际比差远超出标准比差限制, 达到标准比差的 2 倍以上, 远不能满足 0.2S 级电流互感器的要求。

此外, 研究中对数据进行了回归拟合方程的分析, 建立比差 / 角差和一次侧电流的非线性回归拟合方程, 进而对比差和角差进行补偿。现场 FOCT 与 SF₆ 气体绝缘金属封闭开关设备 (GIS) 配套封装, 基本不受外界气温的变化, 所以本文不考虑气温的变化对 FOCT 误差特性的影响。由于测量条件的局限性, 暂且不能对 FOCT 的误差特性进行全面的分析。但是, 国内对 FOCT 运行现场的数据采集与误差分析尚缺乏大量相关实践数据, 本文科学评估 FOCT 运行误差特性, 可以为相关应用分析提供关键技术支持和第一手资料。

3 结束语

FOCT 比差随一次侧电流的变化具有规律性, 即在允许测量范围内, 一次侧电流越大, 比差 F 的平均值越小, 测量精度越高; 角差 Q 随一次侧电流的变化并无明显规律。综上所述, FOCT 在现场运行中, 角差能够满足 0.2S 级的测量精度, 而比差远不能满足精度要求。数据测量过程中不可避免存在误差, 比如所选传统电磁式电流互感器引入的误差、软件设计和有限字长效应引入的误差、A/D 转换器的转换精度引入的误差、零磁通高精度电流互感器引入的误差及数据采集和转换过程中引入的误差等。在后续工作中, 研究人员会对此做深入的分析。在今后相关的研究分析中, 希望能够扩大一次侧电流的测量范围, 考虑到温度、振动等因素的影响, 以便对 FOCT 特性进行更深入和全面的研究。

江苏省燃煤电厂脱硫石膏排放利用状况及综合利用对策

刘 涛¹, 朱 林¹, 薛建明¹, 周 迁²

(1. 国电科学技术研究院, 江苏 南京 210031; 2. 江苏省环保产业协会, 江苏 南京 210036)

摘 要:介绍了江苏省燃煤电厂脱硫石膏排放、利用现状,分析了全省燃煤电厂脱硫石膏排放的特点、利用途径以及存在的主要问题,根据“十二五”对江苏省电力行业脱硫石膏排放状况进行了预测,并结合约束条件提出了脱硫石膏综合利用的对策。

关键词:脱硫石膏;现状;预测;对策

中图分类号:X773

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2013)02-0010-05

脱硫石膏是湿法石灰石-石膏烟气脱硫的主要副产品。随着江苏省在“十一五”期间二氧化硫减排工作的不断深入,全省 300 MW 等级以上火电机组已经全部安装了高效的脱硫设施,随之而来的是二氧化硫由大气污染固化成脱硫石膏固体废弃物,其产生量在“十一五”期间大幅增加。从“十五”末的约 60 万 t 迅速增加到“十一五”末的 415 万 t,年平均增幅达 110%。妥善解决脱硫石膏的处置和利用问题,不仅能产生良好的环境效益,而且能创造可观的经济效益和社会效益。对于脱硫石膏处理,国家相关部门分别在 2010 年 7 月和 2011 年 2 月相继出台《中国资源综合利用技术政策大纲》和《工业和信息化部关于工业副产物石膏综合利用的指导意见》,规定鼓励引导工业副产物石膏综合利用向多途径、大规模、高附加值综合利用方向发展。

1 “十一五”末燃煤电厂脱硫石膏排放状况

2010 年末,江苏省单机容量 300 MW 以上煤电机组装机容量为 4 503.4 万 kW,约占同期火电装机总容量的 85.2%^[1]。35 家单机 300 MW 以上燃煤电厂 2010 年末共产生脱硫石膏 380.1 万 t/a,综合利用量 376.4 万 t/a,贮存量及倾倒量为 3.7 万 t/a,主要排放情况如表 1 所示。从统计情况分析看全省电网近八成煤电装机为单机 30 万 kW 以上的清洁高效燃煤发电机组,较 2008 年全省污染普查工业源脱硫石膏排放数据^[2]相比,脱硫石膏产生总量继续快速增长,脱硫石膏的综合利用率稳步提高,高于全国平均水平^[1],但利用深度和广度并没发生质的变化。表 1 为全部工业源脱硫石膏排放量统计值,其数据为单机 300 MW 以上机组燃煤电厂脱硫石膏排放量统计值。

1.1 区域分析

截止 2010 年底,江苏省年产脱硫石膏 10 万 t 以

表 1 江苏省 2010 年电力工业源脱硫石膏排放量

年份	2008 年 江苏省	2010 年 江苏省	2010 年 全国
电力行业石膏 产生量 / 万 t	212.81	380.12	5 230
脱硫石膏综合 利用率 / %	93.3	98.9	69.0
脱硫石膏贮存 及倾倒量 / 万 t	7.15	3.7	—

上的电厂有 20 座,相当于省内有 20 个脱硫石膏集中产出处。全省 13 个主要行政区域产生脱硫石膏量差异较大,详细情况如表 2 所示。单机为 300 MW 以下燃煤电厂未在统计之列。

表 2 江苏省 2010 年电力工业源脱硫石膏排放量
区域分布情况

地区	脱硫石膏产生量		脱硫石膏利用量		2008 年脱硫 石膏排放量 统计 / 万 t	增幅 / %
	数量 / 万 t	占比 / %	数量 / 万 t	利用 率 / %		
苏州	94.6	24.9	94.6	100.0	68.0	39.1
无锡	51.1	13.4	49.3	96.5	31.1	64.3
徐州	45.5	12.0	44.71	98.3	20.4	123.0
南通	38.5	10.1	38.5	100.0	10.0	285.0
镇江	34.5	9.1	34.1	98.8	25.0	38.0
南京	34.1	9.0	34.1	100.0	8.5	301.2
扬州	32.0	8.4	31.3	97.8	17.9	78.8
泰州	20.5	5.4	20.5	100.0	9.1	125.3
淮安	19.3	5.1	19.3	100.0	12.0	60.8
常州	10.0	2.6	10.0	100.0	7.3	37.0
连云港	0.0	0.0	0.0	0.0	6.9	—
盐城	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6	—
宿迁	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	—

电力行业脱硫石膏区域产生量呈现 U 型,即位于东南位置的苏州无锡和位于西北方向的徐州都是电力石膏排放大户,随着“十一五”末期南京周边煤电装机

容量快速提高,南京周围地区的脱硫石膏排放量也在快速上升。产生这种情况最主要原因还是取决于工业发电及用电情况,全省电力行业脱硫石膏产生量最大地区是苏州,产生脱硫石膏 94.57 万 t,占总产生量的 24.9%。其次是工业大市无锡和徐州,脱硫石膏产生量分别为 51.1 万 t 和 45.5 万 t,分别占总产生量的 13.4%和 12.0%。南通、镇江和南京分列 4、5、6 位。盐城、宿迁因该地区燃煤电厂的单台装机容量都小于 20 万 kW,发电及供热规模较小未纳入统计。

1.2 燃煤硫分及度电石膏产量

江苏省燃煤电厂平均燃煤硫分及度电石膏产生量情况如图 1、图 2 所示,全省电厂燃煤硫分在 0.67%~1.22%之间波动,全省燃煤大机组平均燃煤硫分为 0.81%。全省燃煤电厂度电石膏产量在 12.7~18.3 g/(kW·h)之间波动,平均度电石膏产生量为 15.7 g/(kW·h),随着“十二五”后期 GB 13223—2011 标准实施使得新的大气二氧化硫限值提高,全省度电石膏产生量也相应会往上提高。度电石膏产量和燃煤硫分、机组能耗水平、脱硫效率密切相关,不具有绝对可比性,但从脱硫石膏生产和资源化利用的角度一定程度上可以得出区域脱硫石膏的大致产量和规模。

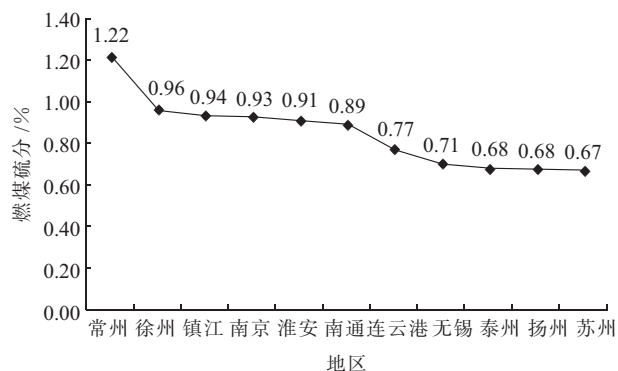


图1 江苏省2010年燃煤电厂平均硫分情况 (300 MW 以上机组)

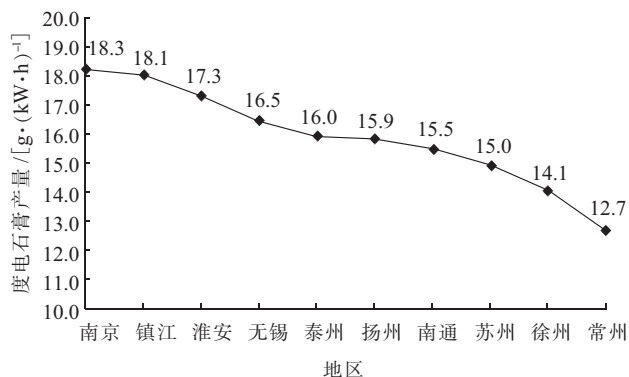


图2 江苏省2010年燃煤电厂度电石膏产生情况 (300 MW 以上机组)

1.3 脱硫石膏销售单价

江苏省单位脱硫石膏的经济价值较低,销售单价从 3 元/t 到 35 元/t 不等,销售单价如图 3 所示。价格

变动幅度及差异化较大,差异大的原因主要取决于三方面:一是取决于区域或者电厂生产量的情况,如果该地区脱硫石膏产量较高,供需失衡价格就会很低,比如苏州、镇江、徐州、南京地区,这些地区均有年产 10 万 t 以上的脱硫石膏的电厂,利用途径有限就会造成脱硫石膏价格较低;二是取决于企业周围是否有大型的水泥厂、石膏加工板厂及砌块厂,比如扬州、常州、泰州地区,因为有水泥厂以及纸面石膏厂在周边合理布局,其脱硫石膏的销售单价可以达到 20~30 元/t;三是取决于电厂自身规模及周边是否会形成脱硫石膏上下游产业链式发展带,比如淮安地区以及未来的连云港、宿迁地区,由于煤电机组没有连片建设,石膏产量和加工量都不足以形成规模,所以销售处理价格都不高。

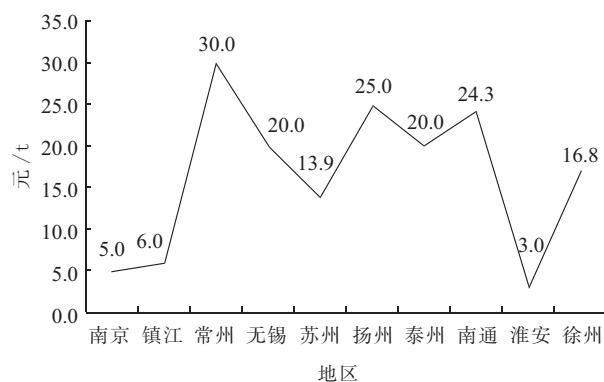


图3 江苏省2010年燃煤电厂区域脱硫石膏平均销售单价 (300 MW 以上机组)

1.4 脱硫石膏品质

抽样分析江苏省不同区域燃煤电厂生产的脱硫石膏理化特性,比对情况显示全省燃煤电厂脱硫石膏的品质差异较大,主要差异在于白度(指标值在 18 至 60 之间)、金属氧化物等微量元素含量 (MgO 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3) 及氯离子含量方面,部分电厂脱硫石膏化学组成情况如表 3 所示。

脱硫石膏品质除了和电厂除尘器设施运行维护好坏密切相关,也和脱硫设施的运行好坏相关。从数据分析看,电厂脱硫设施运行好坏不一,有的电厂抽样石膏中未反应完全的碳酸钙含量非常高,硫酸钙含量不足,氯离子浓度偏高,这些指标均会影响脱硫石膏的品质。脱硫系统运行控制主要指标及相关因素会直接影响到成品石膏的最终质量,其主要因素包括石灰石品质、浆液 pH 值、石膏排出时间、氧化风量、杂质含量^[3]。

烟气脱硫石膏标准 (JC/T 2074—2011) 已经于 2012 年 7 月 1 日开始实施,脱硫石膏将分为 3 个等级,虽然标准中对碳酸钙含量不作要求,但对二水石膏含量以及外在水、氧化镁、氯离子都做了规定,按现有状况看,脱硫石膏如需综合利用,省内部分电厂需要强化其脱硫设施的运行控制指标。从脱硫石膏资源化利用角度看,同时还需要扭转电厂经营销售观念,燃煤电

表 3 江苏省部分电厂脱硫石膏化学组成情况 %

地区	外在水	CaO ₄ ·2H ₂ O	CaCO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Cl ⁻
无锡利港	10.6	91.1	3.98	3.6	0.6	0.07	0.18	0.009 4
徐州徐唐	13.5	90.8	6.25	1.4	0.9	0.20	0	0.000 5
苏州望亭	9.4	94.3	2.71	1.2	0.9	0.10	0.24	0.070 0
扬州二发	10.0	95.2	2.12	1.1	0.8	0.10	0.4	0.000 6
镇江谏壁	11.5	93.4	3.46	2.2	0.2	0.45	0.12	0.012 0
国华徐州	10.3	90.6	4.95	2.8	0.3	0.10	1.0	0.010 0
华能南京	11.2	94.7	1.11	2.2	1.0	0.08	0.2	0.007 0
苏州太仓	11.8	83.9	12.24	3.1	0.3	0.20	0.04	0.002 9
苏州常熟	10.5	92.3	4.56	1.8	0.4	0.30	0.2	0.010 0
华能南通	13.8	88.4	7.25	2.9	0.4	0.26	0.26	0.003 0

厂是在生产一种标准化的工业产品而不是处理固体废物。加强脱硫系统指标运行管理是对脱硫石膏生成品质控制的重要一环，也是脱硫石膏后续综合利用的重要基础。

1.5 主要利用途径

2010 年江苏省电力行业脱硫石膏综合利用率达到 98.9%，脱硫石膏主要利用途径有建筑石膏板材、工业用水泥缓凝剂、铺路及其他三大类，如表 4 所示。

表 4 脱硫石膏主要利用途径

利用方式	利用量 / 万 t	占比 / %
建筑石膏板材、石膏砌块	194.5	51.7
工业用水泥缓凝剂	98.03	26.1
铺路、农业土壤改良及其他	83.72	22.3

2010 年，江苏水泥产量为 1.56 亿 t，占全国总产量 8.4%，列全国第一，若水泥缓凝剂用量占到水泥产量的 1%~2%，即可利用脱硫石膏 150~300 万 t。从统计看，脱硫石膏在工业水泥生产中用量还大有潜力可挖。目前利用不足的原因主要在脱硫石膏含水率太高，造成水泥下料不畅；其次是石膏品质不稳定，对水泥凝结时间影响比较大，这为水泥厂控制水泥质量造成一定障碍。

2010 年江苏省纸面石膏板产量约为 1.4 亿 m²，人均使用 1.8 m²，不足欧美国家的三分之一，如图 4 所示。目前美国纸面石膏板人均消费量为 10.5 m²、欧洲

为 6.5 m²、韩国为 5.4 m²、日本为 4.7 m²，我国则为 1.3 m²，均低于上述发达国家水平，石膏板材具有材质轻便、加工能耗低的优良特性，江苏省脱硫石膏加工成石膏板材综合利用仍有具有巨大的发展潜力^[4,5]。

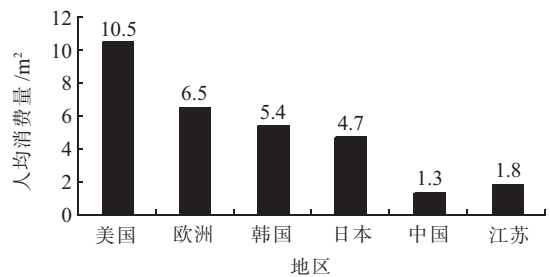


图 4 纸面石膏板人均消费量(2010 年)

此外，由于江苏省只有苏北及沿海地方有农业盐碱地^[6]，受规模和交通环境的限值，脱硫石膏用于农业土壤盐碱地改良工作还是较少。而筑路回填的经济附加值则较低，并没有完全实现脱硫石膏的资源化策略。

1.6 贮存状况

大机组产生的脱硫石膏贮存量为年均 3.74 万 t。主要贮存方式为灰场堆放和渣场堆放，贮存量分别为 3.42 万 t 和 0.32 万 t，分别占总贮存量的 91.4% 和 8.6%。采用半干法脱硫工艺电厂、及锅炉为循环流化床锅炉的脱硫剂及脱硫副产物因与灰渣相混，只能送往渣场堆放。半干法脱硫工艺从稳定性、脱硫效率及产物综合利用角度看已不适合江苏省节能减排及国家强制排放标准的要求。

2 存在问题

2.1 技术层面

脱硫石膏品质差异大，省内电煤的来源不稳定，除尘器效率不高，导致脱硫石膏品质不稳定；脱硫石膏有时在纯度、含水率、氯离子含量等一些技术指标上的变动，导致不能满足使用水泥及建材行业的要求，降低了脱硫石膏高附加值综合利用率。

2.2 市场需求层面

省内对脱硫石膏综合利用基础性、前瞻性技术研发投入不足，多数企业研发能力较弱，技术装备落后，缺少研发投入的积极性。作为电力生产企业，对脱硫石膏综合利用的下游产品——“石膏建材”的市场情况不熟悉，没有完整的销售网络与销售途径，在如今建材产品竞争日趋激烈的环境下，产品销售是基层电厂面临的一项重大问题。电厂实施脱硫石膏综合利用产业化时，同样还面临生产工艺、生产产品与生产成本的矛盾：生产常规产品（如水泥缓凝剂、纸面石膏板），投资少，生产成本低，需求量大，但产品附加值低，且不具备竞争力。生产高端产品（石膏墙体、高品质的粉刷石膏），投资高，产品附加值高，产品需求量少（目前情

况),且产品需求的预见性不明确。

2.3 政策指导层面

江苏省内出台的专门针对脱硫石膏综合利用的专项政策较少,现有经济、技术政策向脱硫石膏产业的倾斜力度不够,主要体现在税收、法规及标准方面。相关部门对企业的经营引导、技术支持和信息服务落后。企业在获取信息、技术、市场等方面处于弱势,亟需搭建信息交流、技术服务平台。

3 “十二五”状况预测

按照江苏省“十二五”规划纲要,预计到2015年江苏省发电装机容量达到1.1亿kW左右,其中,火电装机8800万kW。煤电机组将会超过8000万kW。根据“十二五”国家对节能减排工作的进一步要求,预计到2015年省内煤电机组100%配套脱硫装置,按照统计中各地市加权平均燃煤硫份保持稳定,大机组度电石膏产生情况稳定预测,全省电力工业源脱硫石膏年产量将达到800万t以上(其中300MW以上煤电机组脱硫石膏排放量约为770万t),其测算公式:

$$M_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n M_1(i)_{300 \text{ MW 以上机组}} + \sum_{i=1}^n M_2(i)_{300 \text{ MW 以下机组}} \quad (1)$$

$$M_1(i) = P_i \times t_i \times \theta_i \times \alpha_i \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$M_2(i) = Q_i \times S_i \times 1.7 \times (1 - \eta_i) \times 2.7 \times 10^4 \quad (3)$$

式(1—3)中: $M_{\text{总}}$ 为预测期内全省脱硫石膏总放量, t; $M_1(i)$ 为预测期内全省电力行业单机大于300MW机组脱硫石膏排放量, t; $M_2(i)$ 为预测期内全省电力行业单机小于300MW机组脱硫石膏排放量, t; P_i 为一个电厂燃煤机组装机总容量, kW; t_i 为一个电厂全年平均发电小时数, h; θ_i 为一个电厂度电石膏产量, g/(kW·h); α_i 为应对新标石膏增量系数; Q_i 为锅炉燃煤消耗量, t; S_i 为燃煤平均硫分; η_i 为脱硫装置平均脱硫效率。

脱硫石膏产量如图5所示。

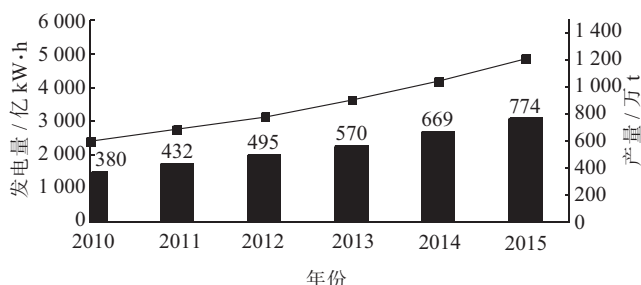


图5 “十二五”江苏省脱硫石膏产量预测

按此增速,如将全省脱硫石膏堆放贮存量控制在较小规模,保证95%以上脱硫石膏都能有效综合利用就需按表5所示的几种途径合理规划,提前布局,并积极

进行水泥厂、石膏建材厂配套技术改造工作,到“十二五”末全省脱硫石膏理论利用量可达825万t。

表5 “十二五”脱硫石膏主要利用途径

利用途径	利用量/万t	备注
水泥缓凝剂	450	按70%的水泥需石膏缓凝剂、石膏使用量为水泥产量的4%、2015年预计水泥产量计算
纸面石膏板	165	按建材行业2015年石膏板产量需求计算
粉刷石膏	95	按每年新增建筑面积近1亿m ² ,10%脱硫石膏制粉刷石膏替代水泥砂浆计算
石膏砌砖/块	60	按每年新增建筑面积近1亿m ² ,5%脱硫石膏制作石膏砌块计算
自流平石膏	25	按每年新增建筑面积近1亿m ² ,10%的地面采用自流平石膏做找平层计算
其他	30	用于盐碱地土壤改良、筑路、化工用品等

4 结束语

按江苏省内现有脱硫石膏综合利用情况,“十二五”石膏综合利用难度将会继续加大。如需要继续保持较高比例的脱硫石膏综合利用率,还需要在以下几个方面着手。

(1) 推动脱硫石膏资源化综合利用的创新研究工作,加快推进水泥缓凝剂用脱硫石膏的技改工作,加大对科研企业的支持,加快具有高强度的适应性好的石膏建材制品的研发工作。

(2) 建设脱硫石膏综合利用示范基地,培育专业化规模化企业,大力推动建筑石膏采用脱硫石膏的工作,“十二五”全省脱硫石膏作为建材石膏板材和石膏砌块发展空间和潜力较大,2011~2015年新型建筑材料工业固体废弃物综合利用量年均增长5%,预计2015年国内纸面石膏板需求量将达30亿m²,江苏的纸面石膏产量将会突破3亿m²,脱硫石膏的综合利用大有可为。继续加大水泥中石膏缓凝剂的添加,推动脱硫石膏替代天然石膏的技改工作。做好重点地区脱硫石膏综合资源化利用的示范工程,这些地区主要包括苏州、无锡、徐州、南京等,在这些地区占全省电力脱硫石膏的排放量的六至七成,且又有工业生产源,又有消费市场,容易形成产业化群体。

(3) 推进完善省内财政激励政策,健全税收支持政策,强化金融支持力度。出台相关综合利用政策(包括针对性鼓励及惩罚政策)。

建立电厂脱硫石膏综合利用资源化评价体系,从脱硫石膏纯度、脱硫石膏白度、单位脱硫石膏的经济效益、单位脱硫石膏的加工附加值、单位脱硫石膏资源化

利用能耗水平等细化的量化指标来评价脱硫石膏制造和利用企业,做到均衡发展和统筹兼顾。督促燃煤电厂加强对脱硫装置运行的管理。燃煤电厂应提高脱硫装置的运行可靠性,强化脱硫装置的运行调整,确保稳定脱硫石膏品质,为脱硫石膏综合利用创造良好的条件。

参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [2] 刘宁锴. 江苏省污染源普查工业源脱硫石膏产生、处置、利用状况分析[J]. 价值工程, 2009(2): 186-187.
- [3] 刘 涛, 薛建明, 王晓明, 等. 湿法烟气脱硫石膏资源化深度利用[J]. 中国电力, 2009, 42(8): 65-69.
- [4] 曹志强. 利用脱硫石膏生产纸面石膏板的工艺技术[J]. 粉煤灰, 2009(4): 41-42.

- [5] ISHIKAWA Y, WU C N, YAJIMA N. Current State and Future Prospect of CCPs Utilization Technology in Japan [R], 济南: 第七届水泥与混凝土国际会议, 2010.
- [6] 耿春女, 钱 华, 李小平, 等. 脱硫石膏农业利用研究进展与展望[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 07(12): 15-19.

作者简介:

- 刘 涛(1979), 男, 江西南昌人, 工程师, 从事火电厂脱硫、脱硝技术及循环经济产业化研究开发工作;
- 朱 林(1964), 男, 上海人, 高级工程师, 从事火电厂噪声、固废综合利用技术及循环经济产业化研究开发工作;
- 薛建明(1964), 男, 江苏姜堰人, 研究员级高级工程师, 从事火电厂脱硫脱硝、脱汞及资源化利用技术产业化研究管理工作;
- 周 迁(1948), 男, 江苏南通人, 研究员级高级工程师, 从事工业环境保护产业化管理研究工作。

FGD Gypsum Emissions of Coal-fired Power Plants in Jiangsu Province and Comprehensive Utilization Countermeasures

LIU Tao¹, ZHU Lin¹, XUE Jian-ming¹, ZHOU Qian²

(1. GuoDian Science and Technology Research Institute, Nanjing 210031, China;

2. Jiangsu Environmental Protection Industry Association, Nanjing 210036, China)

Abstract: This paper introduces the emissions as well as the utilization condition of FGD gypsum of coal-fired power plants in Jiangsu Province. The emission characteristics, utilization approaches and the main problems of the FGD gypsum in coal-fired power plants are analyzed. Prediction of the FGD gypsum emissions of power industry in Jiangsu province during the "12th Five-year Period" is also made. Finally, considering the effects of various constraints, measures aiming to fully utilize the FGD gypsum are also proposed.

Key words: FGD gypsum; situation; prediction; countermeasures

(上接第9页)

参考文献:

- [1] 王政平, 康 崇, 张雪原, 等. 全光纤光学电流互感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(3): 36-39.
- [2] 刘延冰, 李红斌, 叶国雄, 等. 电子式互感器原理、技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] 王 巍, 张志鑫, 杨仪松. 全光纤式光学电流互感器技术及工程应用[J]. 供用电, 2009, 26(1): 46-48.
- [4] 陈文中, 林 一, 周 健. 数字化变电站全光纤电流互感器准确度校验[J]. 华东电力, 2009, 37(12): 2022-2024.
- [5] 郭 伟, 张红超, 于朝辉. 电子式互感器模拟输出校准系统[J].

电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 49-51.

- [6] 尚秋峰. 光电电流互感器测试与校验方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 77-81.

作者简介:

- 秦 冉(1985), 男, 江苏常州人, 助理工程师, 从事关口计量工作;
- 王倩倩(1988), 女, 山东济宁人, 研究生在读, 电气工程专业;
- 杨世海(1976), 男, 安徽淮北人, 高级工程师, 从事计量管理工作;
- 徐志峥(1976), 男, 江苏无锡人, 工程师, 从事计量管理工作;
- 周 赣(1978), 男, 江苏镇江人, 讲师, 研究方向为电机与电器。

Research on Field Operation Error Character of Fiber Optical Current Transformer

QIN Ran¹, WANG Qian-qian², YANG Shi-hai¹, XU Zhi-zheng³, ZHOU Gan²

(1. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2 Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214101, China)

Abstract: To analyze fiber optical current transformer (FOCT) error characteristics, the FOCT online test system is established. The system gathers error data of FOCT and compares it with the error data of the standard transformer. It analyzes the error characteristics with the current changing. The result shows that the phase error of FOCT is able to reach 0.2S measurement accuracy, and ratio error can't reach the same accuracy totally.

Key words: fiber optical current transformer; ratio error; phase error; error characteristics

500 kV 自耦变单相短路电流的限制效果分析

许彦,赵立飞,童伟

(国网北京经济技术研究院徐州勘测设计中心,江苏 徐州 221000)

摘要:针对由于大量使用自耦变压器而导致的 500 kV 变电站的 220 kV 母线单相短路电流大于三相短路电流的情况,结合江苏电网的连云港北(临海)500 kV 变电站,利用电力系统分析综合程序软件(PSASP),详细分析了主变中性点串接小电抗对于 500 kV 变电站 220 kV 母线短路水平的限制作用,提出选取小电抗参数的建议,并对主变中性点的绝缘配合问题进行了探讨。

关键词:短路电流;500 kV 自耦变;中心点;小电抗;绝缘配合

中图分类号:TM711

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)02-0015-03

近年来,随着电网的迅速发展,电源、电网规模的不断扩大,网架结构越来越紧密,电网的短路电流水平日益提高^[1,2]。特别在 500 kV 系统中,由于大量采用自耦变压器,其中性点直接接地,大量接地点的增加造成 500 kV 变电站的 220 kV 侧母线单相短路电流更大^[3],这样给相关电气设备的选择等均带来了一系列的问题,如何限制母线的短路水平成为了一个亟待解决的问题^[4-6]。本文以江苏电网的连云港北(临海)500 kV 变电站为例,主要讨论如何对 500 kV 变电站的 220 kV 母线的短路电流进行限制,并结合仿真试验数据着重分析主变中性点进行串接小电抗对于主变 220 kV 母线短路电流的限制效果,以及由中性点经小电抗接地产生的中性点绝缘匹配问题,对小电抗参数提出了指导性建议。

1 问题的提出

由于江苏电网的密集度日益提高,系统短路容量也随之增长,目前苏北网由于徐连泰降压运行线路形成的 220 kV 联络,苏北五市的 500/220 kV 电磁环网运行,导致苏北地区的 500 kV 变电站的 220 kV 母线短路电流偏高。而且江苏电网的 500 kV 和 220 kV 主变多为自耦变,中性点接地的数目多,考虑到自耦变良好的经济效益,未来建设的主变将会以自耦变居多,而降压型自耦变压器的中压侧电抗常为 0 或接近于 0,所以 220 kV 母线单相接地短路电流常大于三相短路电流,目前国内 220 kV 断路器最高遮断容量为 50 kA。现国内外限制电网短路电流主要是优化网络结构和提高电网设备容量两个方面^[7]。

(1) 提高断路器的遮断容量随着短路电流水平的提高而提高断路器的遮断容量。

(2) 采用高阻抗变压器对降低 500 kV 变电所 220 kV 母线的短路电流有一定的效果。

(3) 电网分层分区运行将原电压等级的网络分成若干区,辐射形接入更高一级的电网,大容量电厂直接接入更高一级的电网中,原有电压等级电网的短路电流将随之降低。

(4) 变电站打开母线分段开关,使母线分列运行,有效降低短路电流水平。

(5) 加装变压器中性点小电抗接地对于限制短路电流的零序分量有明显的效果。

上述措施中,措施(1)与(2)投资较大;方案(3)是限制短路的根本措施,但需要开展相应工程并结合相关电网规划才能实现;方案(4)易出现 500 kV 主变输送能力下降的问题;而措施(5)施工便利,投资较小,特别对单相短路电流过大而三相短路电流相对较小的场合很有效^[8-10]。

2 中性点串接小电抗对短路电流的限制作用

2.1 中性点串接小电抗限制短路电流的原理

中性点经小电抗接地的自耦变压器的原理图,以及中性点经小电抗接地的自耦变压器零序等值电路图如图 1、图 2 所示。

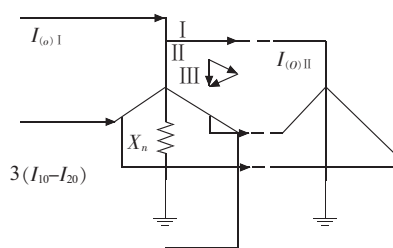


图 1 中性点经电抗接地的自耦变压器原理图

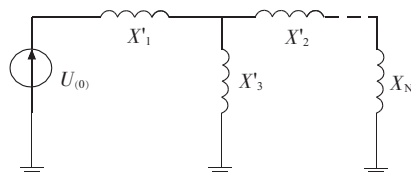


图 2 中性点经电抗接地的自耦变压器零序等值电路

图 1 中, I, II, III 分别表示变压器的高、中、低压侧 3 个绕组, 设 X_I, X_{II}, X_{III} 为变压器中性点直接接地时变压器高、中、低压侧的零序等值电抗, 中性点经小电抗接地后的变压器高、中、低压侧的零序等值电抗为如图 2 所示的 X'_I, X'_{II}, X'_{III} , 首先将自耦变压器低压侧绕组 III 开路, 设变压器高、中侧端点与中性点之间的电位差的有名值分别为 U_{IN} 和 U_{IIN} , 中性点电位为 U_N , 则当中性点直接接地时 $U_N=0$, 折算到高压侧和中压侧绕组端点间的电位差为 $U_{IN}-U_{IIN} \times U_{IN}/U_{IIN}$ 。因此, 折算到高压侧的等值零序电抗为^[11-13]:

$$X_{(I-II)} = (U_{IN} - U_{IIN} \times \frac{U_{IN}}{U_{IIN}}) / I_{(0)I} \quad (1)$$

当中性点经电抗接地时, 则折算到高压侧的等值零序电抗为:

$$X'_{I-II} = X_{I-II} + 3X_N (1 - U_{IN}/U_{IIN})^2 \quad (2)$$

将中压侧回路开路时, 折算到高压侧的高、低压侧之间零序电抗为:

$$X'_{I-III} = X_{I-III} + 3X_N \quad (3)$$

压侧绕组断开, 折算到高压侧的中、低压侧之间零序电抗为:

$$X'_{II-III} = X_{II-III} + 3X_N (U_{IN}/U_{IIN})^2 \quad (4)$$

按求三绕组变压器各绕组等值电抗的计算公式, 求得星形零序等值电路中折算到高压侧的各电抗为:

$$\begin{cases} X'_I = \frac{1}{2} (X'_{I-II} + X'_{I-III} - X'_{II-III}) = X_I + 3X_N (1-k) \\ X'_{II} = \frac{1}{2} (X'_{I-II} + X'_{II-III} - X'_{I-III}) = X_{II} + 3X_N (1-k)k \\ X'_{III} = \frac{1}{2} (X'_{I-III} + X'_{II-III} - X'_{I-II}) = X_{III} + 3X_N k \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: U_{IN} 和 U_{IIN} 分别为变压器高、中侧额定电压。

由式(5)分析可知, 当 $X_N=0$, 即变压器的中性点直接接地时, 其中压侧电抗经常为 0 或者接近为 0, 从而造成中压侧母线单相短路电流很大。当中性点经小电抗 X_N 接地后, 中压侧零序电抗增加的比例显著, 因此可以预测其对中压侧单相短路电流的限制效果会很明显。而由式(5)中第一式可知, 变压器中性点经小电抗接地后, 变压器的高压侧零序等值电抗有所减小, 可能会造成变压器高压侧母线对中性点提供的零序电流有所增加。根据电路原理, 中性点串接的小电抗 X_N 仅在电网发生单相接地短路, 中性点有零序电流通过的时候才会等值到零序网络中, 当中性点无零序电流通过时, 变压器零序等值阻抗等于其正序等值阻抗。所以 X'_I, X'_{II}, X'_{III} 为主变零序电抗, 而正序电抗仍是 X_I, X_{II}, X_{III} 。因此, 在主变中性点加装小电抗只增加零序等值电抗阻值, 不会改变正序等值电抗的大小, 从而对正

常运行时的网损无影响。

2.2 仿真试验

本文短路计算采用了中国电力科学研究院开发的《电力系统分析综合程序 7.0 版》中的短路计算程序包。计算不基于潮流方式, 发电机取 $E''=1 \angle 0^\circ$ (p.u.), 不计负荷影响^[14]。根据江苏电网 2015 年夏大方式下潮流数据计算的短路电流发现, 江苏网出现大量 500 kV 变电站的 220 kV 侧母线单相短路电流超过其三相短路电流的情况, 连云港北(临海)500 kV 变电站 220 kV 母线侧短路电流表如表 1 所示。

表 1 临海 500 kV 变电站 220 kV 母线侧短路电流表

故障形式	电抗器阻值/ Ω	0	4	8	12	14
三相短路	短路电流/kA	46.11	46.11	46.11	46.11	46.11
	短路电流/kA	52.40	47.75	46.86	46.31	46.10
单相短路	中性点电流/kA	3.66	3.18	3.12	3.08	3.07
	中性点电压/kV	0	12.72	24.96	36.96	42.98
两相接地	短路电流/kA	50.57	47.22	46.73	46.45	46.35
	中性点电流/kA	7.19	6.42	6.36	6.32	6.31
	中性点电压/kV	0	25.68	50.88	75.84	88.34

500 kV 自耦变压器中性点经小电抗接地, 对 500 kV 母线短路电流几乎无限制效果。这是因为 500 kV 母线短路电流主要来源于 500 kV 电网, 另一方面中性点经接小电抗接地后, 500 kV 侧零序等值电抗微弱减小造成的 500 kV 侧零序电流增长部分, 与 220 kV 侧零序电流的减小部分相抵消, 所以 500 kV 侧单相短路电流变化很小^[11]。根据中华人民共和国电力行业标准 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》有关规定^[15], “中性点经电抗器接地时, 其电抗值与变压器或高压并联电抗器的零序电抗之比小于等于 1/3” 临海变 4 台主变 $U_{KH-M}\%$ 均为 18% 左右, 其 1/3 阻值约为 15 Ω , 因此, 选择阻值为 8 Ω , 10 Ω , 12 Ω , 14 Ω 的小电抗分别进行短路计算和分析。由表 1 可见, 当 4 台主变, 500 kV 侧全部并列, 220 kV 侧两组并列, 临海变 4 台主变中性点均接入 14 Ω 的小电抗后, 临海变 220 kV 母线各种不平衡短路电流均可以控制在 47 kA 以内。但随着在 500 kV 自耦变压器中性点串接的小电抗阻值的增加, 其对 220 kV 侧母线单相短路电流的限制效果逐渐趋于饱和。连云港北(临海)变主变中性点按 5 Ω 级差串接小电抗试验的短路电流关系曲线如图 3 所示。当分别在各变电站的所有主变中性点串接 14 Ω 小电抗时, 临海变 220 kV 侧的单相短路电流和两相接地短路电流分别下降到 46.10 kA 和 46.35 kA, 分别减少 6.30 kA 和 4.22 kA, 下降率达到了 12.02% 和 8.34%, 且单相短路电流已低于其三相短路电流。

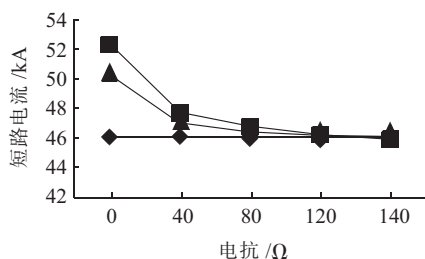


图3 中性点串接不同小电抗时 220 kV 单相短路电流曲线

2.3 变压器中性点经小电抗接地后的中性点绝缘配合

当变压器中性点经小电抗接地且发生单相接地短路时,变压器的中性点电压将会发生一定偏移。由于自耦变压器有一个公共线圈,高压侧和中压侧线圈公用一个中性点和接地阻抗,因此中性点的入地电流,应等于这两个自耦绕组零序电流之差的三倍。当自耦变压器的中性点经小电抗接地时,中性点的电位要受两个绕组的零序电流的影响,中性点电位取决于通过中性点的三倍零序电流与中性点串接小电抗阻值的乘积。根据中华人民共和国电力行业标准 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》有关规定,500 kV 主变若直接接地,其中性点短时工频耐受电压(有效值)约 85 kV;500 kV 主变若经小电抗接地,其中性点短时工频耐受电压(有效值)约 140 kV。当小电抗为 14 Ω 时,连云港北(临海)变 220 kV 母线单相短路时中性点电压偏移 42.98 kV,两相接地短路时中性点电压偏移 88.34 kV。为防止发生雷击时变压器中性点的过电压,可在中性点装设氧化锌避雷器。常用继电保护设备均可满足正确识别和可靠动作的要求。

3 结束语

(1) 对控制 500 kV 变电站的 220 kV 母线单相短路电流的方法,仅就降低 220 kV 母线单相短路电流而言,采用 500 kV 自耦变加装小电抗的措施是有效的。

(2) 随着在 500 kV 自耦变压器中性点串接的小电抗阻值的增加,220 kV 侧母线单相短路电流的限制

效果逐渐趋于饱和。

(3) 在具体工程设计中应考虑 500 kV 自耦变压器自身的中性点绝缘水平是否能够满足因变压器中性点经小电抗接地造成的中性点电压偏移。

参考文献:

- [1] 王非,李群炬.京津唐电网限制短路电流问题探讨[J].华北电力技术,2007(4):17-19.
- [2] 袁娟,刘文颖,董明齐,等.西北电网短路电流的限制措施[J].电网技术,2007,31(10):42-45.
- [3] 江林,王自强.500 kV 及 220 kV 自耦变压器对电网单相短路电流的影响[J].电力系统保护与控制,2008,36(18):108-116.
- [4] 张弘,甘德强.500 kV 变压器经小电抗接地的应用分析[J].电力建设,2009,29(11):38-40.
- [5] 杨雄平,李力,李扬絮,等.限制广东 500 kV 电网短路电流运行方案[J].电力系统自动化,2009,33(7):104-107.
- [6] 朱天游.500 kV 自耦变压器中性点经小电抗接地方式在电力系统中的应用[J].电网技术,1999,23(4):15-18.
- [7] 叶幼君,鲍爱霞,程云志.广东 500 kV 电网短路电流的控制[J].华东电网,2006,34(3):11-15.
- [8] 李琥,黄河,张谦.江苏电网限制单相接地短路电流措施的研究[J].江苏电机工程,2009,28(1):19-21.
- [9] 周坚,胡宏,庄侃沁,等.华东 500 kV 电网短路电流分析及其限制措施探讨[J].华东电力,2006,34(7):55-59.
- [10] 吴获.限制大电网的短路电流水平的措施的研究[D].杭州:浙江大学,2005.
- [11] 李光琦.电力系统暂态分析[M].三版.北京:中国电力出版社,2007.
- [12] 陈珩.电力系统稳态分析[M].三版.北京:中国电力出版社,2007.
- [13] 程云志,叶幼君.500 kV 自耦变压器中性点装设小电抗的应用研究[J].华东电力,2006,34(11):59-61.
- [14] 田华,王卿,朱峰.基于 PSASP 程序的短路电流计算结果分析比较探讨[J].电力系统保护与控制,2010,38(1):56-60.
- [15] DL/T 620—1997,交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].

作者简介:

许彦(1983),男,江苏徐州人,工程师,从事变电设计工作;
赵立飞(1981),男,江苏徐州人,工程师,从事变电设计工作;
童伟(1980),男,江苏徐州人,工程师,从事变电设计工作。

Research on the Effect of Single-phase Short Current Limiting of 500 kV Autotransformers

XU Yan, ZHAO Li-fei, TONG Wei

(State Power Economic Research Institute Xuzhou Survey & Design Center, Jiangsu Xuzhou 221000, China)

Abstract: Due to massive use of autotransformers, the single phase short circuit current of 220 kV buses is bigger than its three-phase one in 500 kV stations. According to north Lianyungang 500 kV stations of the Jiangsu grid, the effect of current limiting of adding low reactance at neutral point is analyzed by PSASP, proper reactance values are proposed in this paper. Also, the problem of neutral point of main-transformer insulation matching is studied as well.

Key words: short circuit current; 500 kV autotransformers; neutral point; low reactance; insulation coordination

通讯管理机与能量管理系统通信故障分析与处理

张 青^{1,2}, 刘涤尘²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 宿迁供电公司电力调控中心, 江苏 宿迁 223800)

摘 要:文中详细介绍了厂站通讯管理机与调度主站能量管理系统之间通信的逻辑结构以及 6 种典型的通信故障分析与处理案例。厂站通讯管理机与调度主站能量管理系统之间的通信极其重要,任何通信故障都将引起厂站工况退出,严重威胁电网的安全稳定运行。文中的案例来源于工作实践,系统地总结了厂站通讯管理机与调度主站能量管理系统之间的通信故障,具有较强的实用性,能够为快速有效地处理此类故障提供较好的参考,有利于增强保障电网安全稳定运行的能力。

关键词:通讯管理机; 能量管理系统; 厂站; 调度主站; 通信通道

中图分类号: TM76

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)02-0018-03

随着计算机网络技术、通信技术的发展与应用以及监控自动化水平的提高,变电站自动化设备不再是简单的远程终端单元(RTU)^[1],而是集成网络通信、信息处理技术的综合自动化系统。该系统采集变电站监控必需的模拟量数据、状态量信号,并上传至调度主站系统,同时调度主站通过该系统控制变电站,由此实现调度中心对变电站的遥测遥信遥控。厂站通讯管理机是变电站综合自动化系统的重要设备,厂站指放置通讯管理机的发电厂和变电站。通讯管理机具备 RTU 的功能,采集厂站中表征电力系统运行状态的模拟量和状态量,并发送到调度主站,同时执行调度主站的控制指令^[2]。能量管理系统是调度主站自动化系统,其接入主站调度数据网。通讯管理机接入变电站调度数据网,后者与主站调度数据网互联。由此,通讯管理机通过调度数据网与能量管理系统通信。在此通信过程中,任何一个环节出错,都会引起变电站工况退出,导致调度主站失去对变电站的监控,这有可能遗漏重要信号,延误故障处理,造成电网事故。因此,厂站通讯管理机与调度主站能量管理系统之间通信正常是至关重要的。习惯将厂站通讯管理机与调度主站能量管理系统通信简称为厂站与主站通信。

1 厂站与主站通信方式及其结构

宿迁市现有 500 kV 变电站 1 座、220 kV 变电站 13 座、110 kV 变电站 54 座、35 kV 变电站 49 座。厂站与主站之间的通信方式除了少部分 35 kV 和 110 kV 老变电站采用传统专线方式通信以外,其余变电站采用网络方式通信。变电站专线通信方式指通讯管理机与调度主站之间的一种实现数据采集、处理、控制、执行的方式,相比网络通信^[3],前者技术设备落后,逐渐被后者取代。本文厂站与主站通信方式专指网络方式

通信。变电站通讯管理机与调度主站之间网络通信结构图如图 1 所示。

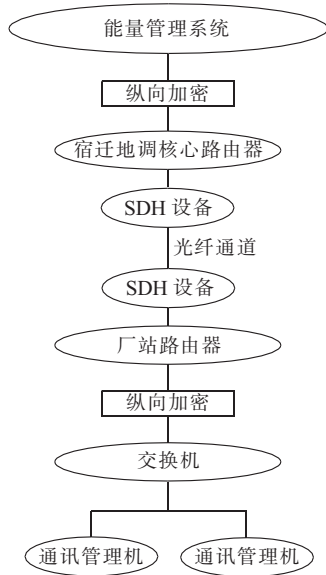


图 1 通讯管理机与主站通信的结构图

图 1 中清楚地反映了通信通道的各个环节,从厂站通讯管理机,经过交换机接到二次安全防护设备—纵向加密认证装置,连接至变电站路由器,通过各类通信设备、通信通道,将信号上传至宿迁调度主站核心路由器,再次经过二次安全防护设备—纵向加密认证装置,交给能量管理系统处理。一旦发生变电站工况退出故障,可以依据图 1 从主站侧查起,逐个环节地往变电站侧检查,直至查出故障点。在新建变电站投运之前,也可以用相同的方法逐级对通信通道进行调试。

2 厂站与主站通信故障案例分析

厂站与主站通信故障:(1) 通讯管理机故障;(2) 通信通道故障,包括厂站和主站通信设备、接口、接线故障;(3) 主站能量管理系统故障;(4) 厂站路由器、

路由器接口、2 M 线故障;(5) 主站路由器、路由器接口、2 M 线故障。

厂站与主站通信故障处理一般方法:(1) 重启通讯管理机;(2) 检查通信通道、通信设备及端口状态;(3) 检查主站能量管理系统运行状况;(4) 检查厂站路由器、路由器接口、2 M 接线的状态;(5) 检查主站路由器、路由器接口、2 M 接线的状态。

2.1 新建厂站与主站通信故障分析与处理

2.1.1 案例 1

在某新建变电站通信通道调试过程中,发现通讯管理机频繁投退。此为新建变电站,通信通道结构如图 2 所示。通过主站路由器 PING 不通变电站通讯管理机,那么根据图 2 所示通信通道结构以及其他相关设备,故障点可能在以下几个方面:(1) 宿迁调度核心路由器端口及其配置;(2) 主站侧 SDH 设备,以及数字配线架、2 M 线;(3) 光纤通道;(4) 变电站侧 SDH 设备、2 M 线;(5) 变电站路由器端口及其配置;(6) 变电站侧纵向加密硬件及其配置;(7) 通讯管理机本身硬件,以及 IP 地址配置。

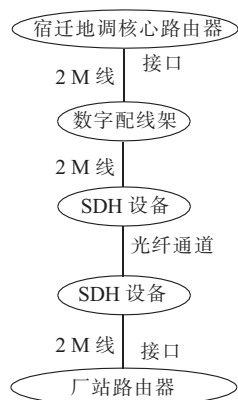


图 2 通信通道结构图

首先,通过检查变电站路由器和主站路由器之间通信状态是否正常来确认变电站与主站之间通信通道是否存在问题;然后检查主站能量管理系统和变电站通讯管理机的配置。

其处理过程:(1) 通过主站路由器 PING 变电站路由器,如果发现时通时断,就说明故障点位于通信通道;(2) 检查主站调度数据网,包括主站路由器、路由器端口、路由器配置;(3) 检查主站 SDH 设备,以及数字配线架跳线;(4) 检查变电站调度数据网,包括变电站路由器、路由器端口、路由器配置;(5) 检查变电站 SDH 设备,以及数字配线架跳线。

在主站路由器侧检查分配给变电站的端口,可以利用自环方法确定路由器端口是否存在问题。在主站 SDH 设备侧的数字配线架上自环,如果物理链路 serial1/1/1:0 current state:UP、协议 Line protocol current

state:DOWN,说明数字配线架跳线无误;如果物理链路和协议均为 DOWN,则要检查数字配线架以及跳线。同样,可以在变电站 SDH 设备侧的数字配线架上自环,若物理链路 UP,协议 DOWN,则说明数字配线架跳线没有问题。

在解除自环后,再次查看端口状态。如果物理链路和协议均为 DOWN,说明变电站和主站两侧的路由器成帧不对应。在主站或者变电站路由器端口执行“fe1 unframed”指令,端口物理链路和协议均 UP,但这并没有解决变电站路由器时通时断的问题。

变电站路由器时通时断说明通信通道质量不好,采用自环方法,并检查端口收发数据包数量以确定哪个环节的通信设备有误差。在检查端口之前,执行“<SQ_SQ_SR6608>reset counters int s1/1/1:0”指令,清除端口收发数据包计数,以便查看收发数据包数量对比。在主站 SDH 设备上自环,检查端口收发数据包情况,若收发数量一致,则说明主站通信设备没有问题。同理,在变电站 SDH 设备上自环,若发现收发数据包数量不一致,则说明变电站通信设备存在误差,引起了变电站路由器时通时断,造成了通讯管理机频繁投退。

2.1.2 案例 2

某县新建设变电站,在变电站与主站通信调试过程中,可以 PING 通通讯管理机,工况未退出,但是县调收不到通讯管理机上传的报文。在与变电站调试人员沟通后发现,虽然此变电站所属地区是县调,但是总是收到市调系统下发的召唤报文,却收不到县调系统下发的召唤报文。说明几个问题:(1) 通信管理机配置没有问题;(2) 市调系统不该下发召唤报文但是下发了,说明通讯管理机中配置了市调系统前置 IP 地址;(3) 收不到县调系统下发的召唤报文,要么是通讯管理机中没有配置县调系统前置 IP 地址,或者配错了;要么就是哪个环节阻止了通信管理机接收县调系统下发的召唤报文。

其处理过程:(1) 去掉市调系统前置 IP 地址;(2) 再次检查通讯管理机中配置的县调系统前置 IP 地址;(3) 检查变电站和主站的纵向加密配置,发现变电站侧纵向加密中,未将县调系统前置 IP 地址到变电站的策略添加进去。增加后,变电站通讯管理机能够接收到县调系统下发的召唤报文。

2.2 投运厂站与主站通信故障分析与处理

单个运行中厂站与主站通信故障原因多在厂站端,通讯管理机死机或者硬件故障,此种类型的故障所占比重很大;而如果出现多个厂站同时工况退出,原因则在通信通道上,或者主站系统前置机硬件故障、软件故障。

2.2.1 案例 1

最常见的是某个变电站单独的运行情况, 工况没有退出但是全部遥测数据不刷新, 或者部分数据不刷新; 更严重的, 则是工况退出。此类型的厂站与主站系统的通信故障, 一般就是通讯管理机故障, 或者部分数据不刷新有可能是测控故障。其处理过程: (1) 重启通讯管理机; (2) 检查测控装置。

2.2.2 案例 2

某几个变电站同时退出。由于这几个变电站在宿迁市区的西侧, 是相同方向, 所以初步判断是通信通道故障。从通信专业的网管机器上, 非常清楚地检查到故障所在点。其处理过程: (1) 根据变电站所在地理位置, 初步判断故障原因是通信通道故障; (2) 在通信网管机上发现, 在通往皂河变的通道告警, 与皂河变相连接的所有变电站都告警; (3) 检查出光缆被挖断。

2.2.3 案例 3

某县 3 个 110 kV 变电站及所有 35 kV 变电站数据不刷新, 并且同时工况退出。这些变电站的通讯管理机是可以 PING 通的, 所以问题出在主站系统前置机上。查看这些变电站的前置实时报文, 发现这些变电站都运行在泗阳能量管理系统前置 1 号机上。所以判断问题出在此前置 1 号机上。其处理过程: (1) 在宿迁市调能量管理系统前置机上 PING 这些变电站的通讯管理机, 可以 PING 通; (2) 在主站电能量管理系统的数据库中查看这些变电站的值班机器, 全部在泗阳能量管理系统前置 1 号机上; (3) 在宿迁市调电能量管理系统前置机上 PING 泗阳能量管理系统前置 1 号机上, 能 PING 通, 但是无法远程登录; (4) 将这些变电站的值班机器强制封锁在泗阳能量管理系统前置 2 号机上, 这些变电站的遥测、遥信数据刷新; (5) 将泗阳能

量管理系统前置 1 号机重启后, 将封锁解除, 数据刷新正常, 说明泗阳能量管理系统前置 1 号机死机, 导致前置采集进程死掉, 造成变电站工况退出; (6) 经 IBM 服务器专业维护人员检查, 泗阳能量管理系统前置 1 号机死机原因是服务器硬盘有坏道。

3 结束语

厂站与主站通信故障属于一类缺陷, 要求在 4 个小时内处理完毕。且留给值班人员分析解决故障的时间有限, 这就对自动化系统维护人员解决实际问题的能力提出了更高要求。本文立足调度主站自动化专业, 并从主站自动化专业、通信专业、厂站自动化专业三个角度, 详细介绍了厂站与主站通信故障分析与处理步骤, 为调度主站自动化维护人员解决通信故障提供了有益参考。通过改革创新不断加强完善通信通道的薄弱环节, 把通信通道建设成环状网络, 以提高通信通道的坚强性, 减少通信故障, 保证电网安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 张惠刚. 综合自动化原理与系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 张永健. 电网监控与调度自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 杨新民. 电力系统综合自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

作者简介:

张 青(1984), 女, 江苏赣榆人, 助理工程师, 从事网络通道调试、电能量管理系统维护工作;

刘涤尘(1953), 男, 湖北武汉人, 博士生导师, 从事电力自动监控、电力系统分析与控制、电力电子应用技术等方面的研究工作。

Fault Analysis and Processing of Communication Between Communication Management Workstation and Energy Management System

ZHANG Qing^{1,2}, LIU Di-chen¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Suqian Power Supply Company Power Dispatching and Control Center, Suqian 223800, China)

Abstract: This paper introduces logical structure of communication between communication management workstation of substation and energy management system of main dispatching station in detail, as well as six kinds of typical cases of communication fault analysis and processing. Communication between communication management workstation of substation and energy management system of main dispatching station is very important, in that any communication fault will cause substation exit, which is a serious threat to the safety and stability of power grids operation. The cases which come from practice systematically summarize the fault of communication between communication management workstation and energy management system. The cases have strong practicability, which are able to provide a good reference for quickly and efficiently handling such faults and to enhance the supporting ability for power grid security.

Key words: communication management workstation; energy management system; substation; main dispatching station; communication channel

大型电动机转子串轴故障分析与处理实例

丁平,王江,潘毅
(国电谏壁发电厂,江苏镇江 212006)

摘要:文中介绍了国电谏壁发电厂 1 000 MW 机组吸风机在单电机试转过程中所发生的电机启动后转子严重向后串轴现象,阐述了采用诸多假设排除法寻求解决问题的思路,通过多次实践判明了原因并予以解决。且对今后在现场中所发生的设备缺陷、故障分析提供了分析解决的思路和方法。

关键词:1 000 MW 机组;吸风机电机;转子串轴

中图分类号:TM32

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)02-0021-03

国电谏壁发电厂 1 000 MW(14 号机组)吸风机 A、B 单电机试转过程中,发现电机启动瞬间转子向后串动,已不能正常试转。针对故障现象,与制造厂家一起进行分析,终于得出了造成转子后移原因的实质,并运用了切实可行办法予以解决。

设备名称:国电谏壁发电厂 1 000 MW(14 号机组)吸风机 A、B 电机;型号为 YKK1000-8;功率为 7 800 kW;电压等级为 6 kV,额定电流为 859 A;转速为 746 r/min;功率因数为 0.899;绝缘等级为 F 级;防护等级 IP54;上海电气集团上海电机有限公司制造。

1 假设与分析

(1) 假设对于单电机试转过程中转子后移的现象是因电机空载情况下定转子间的轴向磁力小于风扇旋转过程中形成的轴向推力引起。国电谏壁发电厂 1 000 MW(14 号机组)吸风机 A、B 电机,在现场单电机试转前的工况:电机转子与风机转子靠背轮没有对接,电机转子两侧采用滑动轴承,转子末端配有同轴离心式冷却风扇,电机本体顶部配有空冷器。当电机在旋转过程中,同轴离心式冷却风扇在电机尾部进风,并通过螺旋式风道向上进了电机顶部空冷器至电机前端出风。因此,电机转子由于风扇进风的反作用,始终有一个将转子轴向后移的引力。同时单电机试转属于空载状态下,电机按照出厂装配尺寸安装完成,单电机试转时,这样就形成了电机空载下的定转子间的旋转磁力和风扇轴向所形成的推力。

由于电机空载状态下电流约为 178 A,出厂堵转试验达 859 A。空载电流比额定电流相比要小许多,根据磁力矩公式 $M=C_m \Phi I \cos \theta$,电动机电磁力矩是由气隙主磁通与转子电流的有功分量相互作用而产生^[1]。因此,在电机空载情况下定转子间的旋转磁力较小,而电机的转速不变,其风扇轴向所形成的作用力却不变,就可能会出现电机定转子间的旋转磁力小

于风扇轴向所形成的作用力。而在重负载的工况下,电机定转子磁力矩将增大,稳住电机定转子的磁场中心是没有问题的。其风扇作用力对其转子轴向影响小。因此,电机处于空载状态其磁力未能克服风扇引力的影响,从而使电机转子发生后移的假设好象是能够成立的。可以将电机风叶拆除,将电机启动短暂运行实践一下,这样可以从根本上排除了风扇推力的作用。于是安排将电机转子根据出厂铭牌标注的转子轴伸 $L_z=100.5$ mm 调整后。启动电机试转,启动后转子旋转瞬间后移至 $L_z=83$ mm,且能稳住运行但轴径外侧有碰磨声。如图 1 所示。



图 1 启动后实测转子轴伸

停运后检查发现转子轴径与瓦座外侧有明显磨痕,且定转子铁心错位约有 15 mm。通过实践否定了电机试转过程中转子后移是由于风扇引力引起的假设。如图 2 所示。



图 2 启动后转子后轴前移磨痕

(2) 假设对于单电机试转过程中转子后移的现象是电机转轴水平度存在偏差,转子因自重力引起后移。电机转子本体净重约为 23 t,因使用滑动轴承,电机在静态工况下,施加人力转子即可轴向进行滑动,当电机转子两侧滑动轴承在油泵开启的工况下,转子滑轴与滑瓦由润滑油顶起,其间形成一层约 4~5 丝左右厚的油膜,那么如果电机转轴水平度不好,就有可能出现电机转子在自重力的作用下势必将向略低端偏移。因此,正鉴于此电机处于空载状态其磁力未能克服转子重力引起后移的假设好像是能够成立的。则安排对电机转轴水平度进行了复测,其复测发现电机前轴端比后轴端高出 12 丝(水平仪),折算为 $12 \div 3 = 4$ 丝/m,略高于 2 丝/m 的安装验收标准。

考虑到此电机容量大、转子自重大,也确实在谏壁发电厂属首次安装尚未有安装经验,即使符合安装验收标准,也不能完全排除转子自重大而因重力发生偏移的假设,况且复测也确实是电机前端略高于后端。于是将电机前端与后端重新调整水平,为了做一次验证,要求在水平基础上特意再将电机本体后端垫高 15 丝/m,折算为 $15 \div 3 = 5$ 丝/m,同时仍将电机转子轴伸磁中心根据出厂铭牌 $L_z = 100.5$ mm 调整好,不带风扇。重新启动电机试转,启动后转子旋转瞬间仍然后移至 $L_z = 83$ mm,且能稳住运行但后轴径外侧有碰磨声,制造厂家人员用木棒在电机后端顶推转轴,转轴不能推动。而电机停运后却能够很轻松地将转子推动并前移。通过实践再次否定了电机试转过程中转子因自重力引起后移的假设。

(3) 假设对于单电机试转过程中转子后移的现象是因转子轴伸 $L_z = 100.5$ mm 是电机在制造厂组装过程中而确定的尺寸,不是通过启动试转后而最终确定的尺寸。其实这个假设刚开始时就曾经提过,但因制造厂家提供的出厂试验报告中都有空载电流和堵转电流实测数据,也就是肯定在出厂前试转过后标注的磁中心尺寸。在制造厂家指导下对电机定转子气隙复测,2 台电机定转子气隙均匀。同时对转子两侧滑动轴承开瓦检查,对部位安装尺寸进行数据的复核,各数据如下:

① 吸风机电机 A 转子根据出厂铭牌标注的转子轴伸 $L_z = 100.5$ mm 调整后,定转子铁心处于理想对齐状态;并在此工况下测量轴与轴瓦的游隙尺寸。

联轴器端轴瓦游动间隙为外侧 18 mm;内侧 8 mm。后端轴瓦游动间隙为外侧 11 mm;内侧 19 mm。完全符合电机安装要求,如图 3、图 4 所示(单边游动间隙不小于 5 mm 的要求)。而当单电机试转后,转子却自动滑移到 $L_z = 83$ mm 的磁中心位置,形成定转子铁心端部约有 20 mm 的错位。联轴器端轴瓦游动间隙变为外侧 0.5 mm;内侧 25.5 mm。后端轴瓦游动间隙

变为外侧 28.5 mm;内侧 1.5 mm。反而不符合电机安装要求,也就证实了电机试转时发生轴颈与瓦座外侧碰磨是不可避免的。



图 3 轴瓦油封位置



图 4 后轴瓦游动气隙

② 吸风机电机(B)转子根据出厂铭牌标注:转子轴伸 $L_z = 97$ mm 调整后,定转子铁心处于完全对齐状态;并在此工况下测量了轴与轴瓦的游隙尺寸:

联轴器端轴瓦游动间隙为:外侧 16 mm;内侧 10 mm。后端轴瓦游动间隙为外侧 13 mm;内侧 17 mm。完全符合电机安装要求(单边游动间隙不小于 5 mm 的要求)。

当单电机试转后,转子却自动滑移到 $L_z = 84$ mm 的磁中心位置,形成定转子铁心端部约有 15 mm 的错位。联轴器端轴瓦游动间隙变为外侧 3 mm;内侧 23 mm。后端轴瓦游动间隙变为外侧 6 mm;内侧 4 mm。反而不符合电机安装要求。

通过对转子两侧滑动轴承开瓦后对各安装尺寸进行数据的复核,初步可以确定电机铭牌上标注尺寸的转子轴伸 L_z ,是电机在制造厂组装过程中确定的,不是通过电机试转后,最终依据试转结果确定尺寸的假设。如图 5、图 6 所示。

2 处理过程

(1) 理论上来说电机定转子铁心对齐了磁中心位置就确定了,但是由于电机在制造过程中铁心硅钢片压装有差异;铁心相对位置的金加工尺寸有差异;因

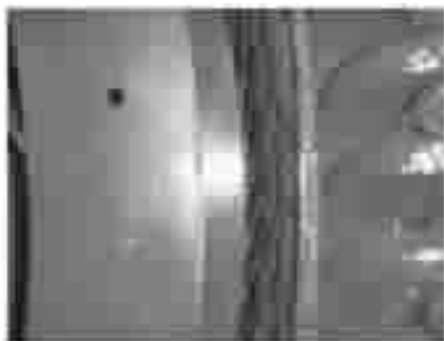


图5 定转子气隙



图6 定转子径向磁中心位置

此,在安装过程中虽将定转子铁心调整到理想的对齐状态,但由于上述制造工艺因素的存在,所以在确定电机铭牌标注的转子轴伸 L_z 时。出厂要求需要在电机试转平台上,使电机在绝对水平的工况下进行试转,并待停转后复测转子轴伸 L_z 数值,最终确定电机铭牌上轴伸 L_z 的标注尺寸。

(2) 通过和制造厂家不断分析与实践,出厂前的试转与现场试转存在的差异,最终确定第三个假设是正确的。首先,在制造厂内试车由于电机功率大,厂内电源容量不能做到完全工频试转,而是采用变频启动

方式,电压从0 V慢慢加至电机额定电压6 kV。在这个过程中磁场由弱到强,磁场拉力由小到大,由于转子重,启动时间相对较长,加至变频器容量所限(据在制造厂试转见证,当时确实存在变频器功率模块过流损坏的现象),同时也不能排除人为的因素。当电机尚未到额定电压和额定转速,电机定转子也尚未到磁中心位置就匆匆停转的可能。而在谏壁发电厂现场采用的是工频方式直接启动,瞬间过程中磁场达到了额定强度,可以在旋转瞬间将电机转子拉到实际的磁中心位置。因此,可以确定电机铭牌标注的转子轴伸 L_z 不是试转后的实际磁中心位置,而是在电机组装过程中定转子铁心人为调整的理想对齐状态。

3 结束语

根据现场工频试转的数据,最终由制造厂家确定吸风机电机A工号1110433的磁中心尺寸 L_z 调整至88 mm,吸风机电机B工号1110434的磁中心尺寸 L_z 调整至92 mm。重新更换2块电机铭牌,同时将2台电机前端盖返厂,并将其内侧平面分别车去6 mm。到厂后进行复装并分别在2台电机后端盖加垫6 mm垫片,使2台电机转子向非负荷侧轴向移动了6 mm。重新试转后一次成功,目前运行情况良好。

参考文献:

[1] 陈道舜. 电机学[M]. 北京:水利电力出版社,2006.

作者简介:

丁平(1970),男,江苏镇江人,高级工程师,从事检修与管理技术工作;

王江(1963),男,江苏镇江人,高级技师,从事电气检修与管理技术工作;

潘毅(1969),男,江苏镇江人,工程师,从事电气检修与管理技术工作。

Fault Analysis and Treatment Example of Rotor Axial Play About Large Induction Motors

DING Ping, WANG Jiang, PAN Yi

(Guodian Jianbi Power Plant, Zhenjiang 212006, China)

Abstract: This article introduces rotor backwards axial play phenomenon in the process of single-motor test run after motor starting in Guodian Jianbi Power Plant 1 000 MW unit suction fan, presenting using varieties of hypothesis exclusive methods to seek solutions to those problems. With repeated practice, the reasons are ascertained and problems get solved. This paper also provides analysis ideas and methods to equipment defects and fault analysis occurred in the future.

Key words: 1 000 MW unit; suction fan motor; rotor axial play

欢迎投稿 欢迎订阅

换流变保护改造分析及试验技术研究

张佳敏¹, 蒋琛², 李鹏¹, 袁宇波¹, 张剑¹

(1.江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏南京 211103; 2.江苏方天电力技术有限公司, 江苏南京 211102)

摘要:高压直流输电系统电压等级高、输电容量大, 保护装置不正确动作造成的直流闭锁对电网影响较大, 因此, 需对现有单一接点出口的换流变电量、非电量保护进行改造, 提高直流输电系统的稳定性。与常规交流变压器保护改造不同, 换流变保护多集成在极控制保护系统中, 改造将涉及到直流控保系统的改造, 需对直流控保软件和外部接线进行修改。文中对 500 kV 政平换流站换流变保护改造需要进行的装置调试和软件修改方法进行了分析, 给出了换流变电量、非电量保护改造试验方案。

关键词:换流变保护; 保护改造; 软件修改

中图分类号: TM77

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)02-0024-04

高压直流输电由于其技术和经济上的独特优势, 在我国远距离大容量输电和大区联网中得到广泛应用。高压直流输电的可靠性在一定程度上决定了区域电网的稳定性, 作为直流换流站的主要设备, 换流变压器的可靠运行尤为重要, 换流变保护应保证换流变压器的可靠运行^[1]。早期投运的部分换流站将换流变保护集成在直流控制保护系统中, 实行双重化配置, 两套保护同时运行, 任何一套保护动作均可出口。2003 年以来, 多个换流站由于换流变电量、非电量保护单一接点或元件故障导致直流闭锁, 因此换流变保护单系统直接出口是高压直流输电稳定运行的重大隐患。如政平换流站直流控保系统采用了 ABB 的 MACH2 (Modular Advanced Control HVDC and SVC 2nd edition) 系统, 换流变保护集成在 MACH2 系统中, 两套换流变保护分别在极控制保护 PCPA 和 PCPB 中配置, 其主保护均没有采用切换逻辑, 任一套保护动作均可出口。这种配置方式保证了换流变保护的灵敏性, 同时也增加了保护不正确动作的概率^[2-8]。

针对此项隐患, 政平换流站在 2012 年大修期间对换流变保护电量、非电量保护进行了改造, 将换流变保护从直流控保系统中独立出来, 每极增加两套独立的换流变电量保护装置(CTP)和一套非电量保护装置(NEP)。其中, 电量保护采用与常规交流保护相同的“启动+动作”逻辑, 非电量保护采用“三取二”逻辑。对应于此保护改造方式, 保护调试工作相应的分为 2 个部分: 换流变电量、非电量保护装置测试; 直流控保系统与换流变保护相关部分的软件修改。

1 换流变保护改造方式

换流变保护改造是对保护功能的实现方式进行改造, 将原先集成在直流控制保护系统中换流变保护

独立为与常规变压器保护相类似的换流变电量和非电量保护装置。因此, 有必要对换流变保护改造前后的保护实现方式进行比较, 并对直流控制保护系统中与换流变保护相关的软件修改内容及方式进行分析研究。

1.1 换流变电量保护改造前后保护实现方式

政平换流站原换流变保护按双套配置, 分别集成在直流控制保护系统 PCPA 与 PCPB 主机中, 其功能由 ABB 公司的图形化可编程软件 Hidraw 实现。通过 Hidraw 软件查看政平站 PCP 中保护逻辑, 可知每极的两套换流变保护功能配置相同, 差动保护为换流变的主保护, 其余为后备保护。改造前换流变电量保护集成在直流控保系统 PCPA 和 PCPB 中, 其中一套系统为“active”, 另一套为“standby”, 两套控保系统任意一套检测到换流变保护动作即出口。跳闸信号、控制信号和启动失灵信号均由 PCP 发出, 其信号流程图如图 1 所示。

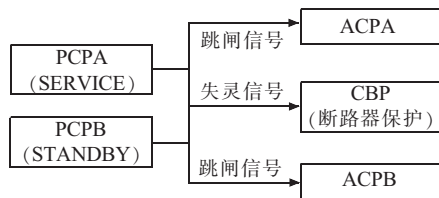


图 1 改造前换流变保护信号流程图

改造后换流变电量保护为 CTPA 和 CTPB 双套配置, 任意一套动作即出口, 与改造前相比其判断逻辑中增加了启动条件, 只有启动元件和动作元件均动作, 保护才会出口。Y、Z 闭锁和控制系统切换等控制命令通过直流场终端装置(DFT)发送到 PCP, 由 PCP 执行控制命令。其系统结构如图 2 所示。改造后, 换流变电量保护具备除换流变中性点偏移保护的所有保护功能, 换流变中性点偏移保护保留在 PCP 中。

1.2 换流变非电量保护改造前后保护实现方式

非电量保护保护功能没有变化, 只是将原来的单一接点出口改造为利用 3 付接点进行“三取二”逻辑判

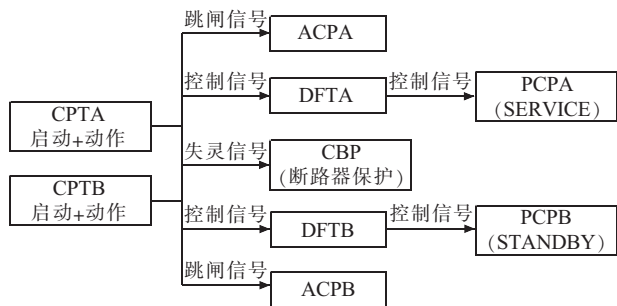


图2 改造后换流变保护信号流程图

断后再出口，原换流变和平波电抗器本体相关单接点继电器均更换为有3付接点的继电器。改造前非电量保护信号流程图如图3所示。

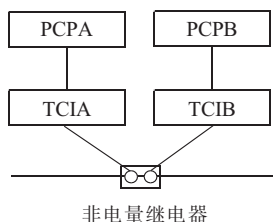


图3 改造前非电量保护信号流程图

由图3可见，每个换流变的非电量继电器有两付接点，分别送到PCPA和PCPB中，由于部分重要的继电器动作后不需要切换直接出口，假如非电量的1付接点误动作，就会导致PCP直接出口闭锁极。因此，政平站将换流变非电量继电器换成3付接点的继电器，同时在TCI和PCP之间增加1台非电量的“三取二”逻辑判断系统NEP，最终实现2付接点动作才出口，很好地避免了单一接点误动导致直流闭锁的风险。改造后的换流变非电量保护信号流程图如图4所示（以重瓦斯为例）。

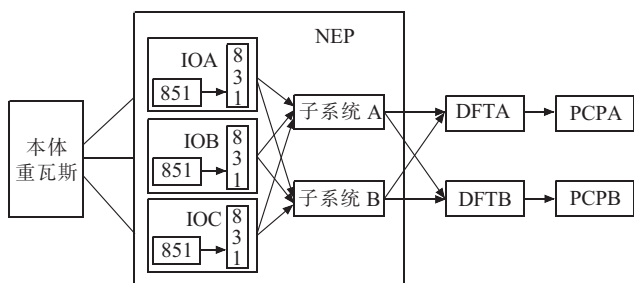


图4 换流变非电量保护改造后信号流程图

1.3 换流变保护改造软件修改方案

换流变保护改造除了增加独立装置外，还有原极控系统软件逻辑的修改，软件修改包括2个部分：(1) 增加与独立的换流变保护(CTP)接口程序；(2) 删除原换流变保护的功能逻辑。

CTP除了跳交流开关外，还发出Y闭锁、Z闭锁和请求切换的控制指令至PCP，由极控制保护系统来

实现相应的控制功能，因此需在DFT中增加RS851板卡，用于采集CTP发出的控制指令，转换后发送到PCP主机中。除了增加硬件，相应的还需在Hidraw程序中修改原PCP中与换流变保护相关的逻辑。换流变保护软件修改过程应按照以下流程进行：

(1) 对于保留在PCP中的换流变保护功能，保留其所需要的模拟量通道，其余的删除。如在PCP\MCI\COMM\TRANSF_PORT3.HGF页面中删除换流变绕组差动保护的所有模拟量输入链接，但是保留了换流变热过负荷保护需要的模拟量采样；

(2) 增加CTP,NEP动作开入和保护动作事件。如在MC1\COMM\DC_PORT_IN2.HGF页面中，增加换流变CTP保护动作后的相关闭锁信号和动作事件；

(3) 增加CTP,NEP开入到PCP中的Y闭锁、Z闭锁、请求切换动作跳闸矩阵，如在页面MC1\COMM\PAM_3.HGF中增加了CTP请求切换的跳闸矩阵；

(4) 对新增的相关总线通道进行监视及修改相关参数等。

2 换流变保护改造调试方案

改造后换流变故障判别的功能是由换流变保护装置实现的，在对PCP的Hidraw软件进行修改的同时，保护改造调试的另一项重要工作是CTP和NEP的调试，包括单体调试和整组测试。

2.1 CTP单体调试

政平站换流变电量保护装置采用了南瑞继保的PCS-977D，其基本原理与常规的变压器保护区别不大，以差动保护为主保护，过流保护、过电压保护、过激磁保护等作为后备保护。换流变保护配置了多种差动保护，包括换流变差动、阀侧绕组差动、网侧绕组差动、交流母线差动、交流母线及换流变差动。换流变差动保护调试的核心是差流计算和相关的电流折算方法。下面就换流变各种差动保护的差流计算和折算方法进行研究。以极I换流变电量保护A为例，换流变保护配置如图5所示。将CTPA差动保护所需用到的电流互感器(TA)二次绕组进行编号：1A1~12A1，根据设计图纸和PCS-977D说明书可得各差动保护的TA配置，如表1所示。

Y/D接法各参数如下：串内TA变比为4000/1；换流变网侧套管TA变比为2000/1；Y/Y接法(YY)换流变阀侧套管TA变比为3000/1；Y/D接法(YD)换流变阀侧套管TA变比为2000/1；单相换流变容量为283.7MW；网侧一次额定相电压为 $500/\sqrt{3}$ kV；YY换流变阀侧一次额定相电压为 $200.4/\sqrt{3}$ kV；YD换流变阀侧一次额定相电压为200.4 kV。据此计算换流变保护

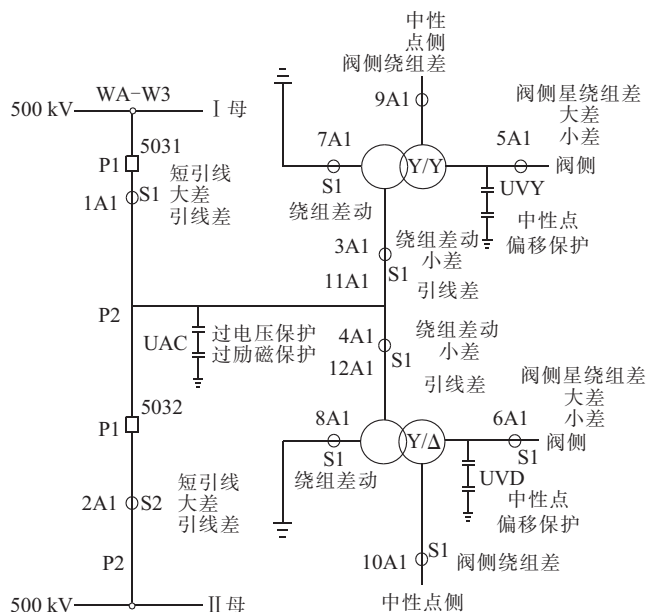


图 5 极 I 换流变电量保护 A 套所需 TA 与 TV 绕组

表 1 各保护差动 TA 配置

保护名称	TA 绕组二次电流
纵差保护 (交流母线及换流变差动)	1A1, 1A2, 1A5, 1A6
纵差保护 (YY 换流变差动)	1A3, 1A5
纵差保护 (YD 换流变差动)	1A4, 1A6
引线差动 (交流母线差动)	1A1, 1A2, 1A11, 1A12
交流星接绕组差动 (YY 换流变网侧绕组差动)	1A3, 1A7
交流角接绕组差动 (YD 换流变网侧绕组差动)	1A4, 1A8
阀星侧绕组差动 (YY 换流变阀侧绕组差动)	1A5, 1A9
阀角侧绕组差动 (YD 换流变阀侧绕组差动)	1A6, 1A10

中各种差动电流的平衡系数 (以交流母线及换流变差动保护为例)。交流母线及换流变差动保护范围包括交流进线和 YY、YD 换流变, 取用的是 5031、5032 开关 TA 和 YY、YD 换流变阀侧套管 TA, 计算网侧 TA 和 YY、YD 换流变阀侧的额定一次相电流:

$$I_{\text{网}} = 6 \times S_N / (U_N \times \sqrt{3}) = 6 \times 283.7 / (500 \times \sqrt{3}) = 1.9655 \text{ kA} \quad (1)$$

$$I_{\text{阀 Y}} = 6 \times S_N / (U_{YN} \times \sqrt{3}) = 6 \times 283.7 / (200.4 \times \sqrt{3}) = 4.904 \text{ kA} \quad (2)$$

$$I_{\text{阀 D}} = 6 \times S_N / (U_{DN} \times \sqrt{3}) = 6 \times 283.7 / (200.4 \times \sqrt{3}) \times \sqrt{3} = 2.8313 \text{ kA} \quad (3)$$

式(1—3)中: S_N 为单相换流变额定容量; U_N 为网侧线电压额定值; U_{YN} 为 YY 换流变阀侧线电压额定值; U_{DN} 为 YD 换流变阀侧线电压额定值。

根据各个 TA 变比可以换算得到二次额定电流分别为:

$$I'_{\text{网}} = 1.9655 \text{ kA} / 4000 = 0.4914 \text{ A}$$

$$I'_{\text{阀 Y}} = 4.904 \text{ kA} / 3000 = 1.6347 \text{ A}$$

$$I'_{\text{阀 D}} = 2.8313 \text{ kA} / 2000 = 1.4157 \text{ A}$$

按照 PCS-977D 差动保护原理, 各侧平衡系数是最大额定电流除以该侧额定电流, 即各侧都折算到额定电流最大侧进行计算。从而计算得到交流母线及换流变差动保护网侧平衡系数为 $K_{\text{网 ph}} = 3.3266$, $K_{\text{网 Yph}} = 1$, $K_{\text{网 Dph}} = 1.1547$ 。同理可以计算出其余差动保护各侧平衡系数。

换流变保护 PCS-977D 的差动保护动作特性如图 6 所示。对于不同的差动保护, 其采用的比率特性是不一样的。根据上述差动保护平衡系数计算方法和各侧流入保护的电流值可以算出其制动电流大小, 若差流大于对应制动门槛则保护动作出口。并对其动作边界进行测试, 测试结果表明换流变差动保护动作行为与说明书中差动保护动作特性一致。

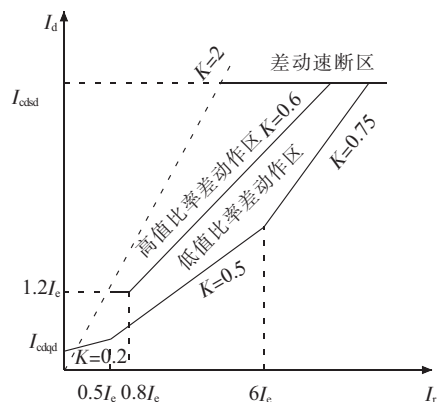


图 6 PCS-977D 换流变差动保护动作特性

2.2 换流变非电量保护 NEP 单体调试

政平站原非电量保护直接在 PCP 中进行逻辑判断和动作出口, 非电量继电器有 2 付接点输出, 将信号经 TCI 分别送到 PCPA 和 PCPB 中, 根据元件重要性, 部分继电器动作不需系统切换直接出口, 其余继电器动作经切换再逻辑判断出口。经改造后, 每个非电量继电器有 3 付接点, 其信号流如图 4 所示。改造后非电量保护屏由 3 块 IO 板卡和 2 块进行“三取二”逻辑判断的子系统组成, 每台换流变非电量继电器的 3 付接点分别送到 3 块 IO 板中, 每块 IO 板卡采集所有换流变非电量信号, 并将信号分别送至子系统 A 和子系统 B 中。任意两个接点动作, 子系统 A、B 均会动作, 极控制保护值班系统即会动作出口。非电量保护 (NEP) 的单体调试方法比较简单, 通过短接端子的方法验证“三取二”逻辑是否正确, 非电量保护主要调试包括: (1) 3

块 IO 板卡正常工作时,短接任意继电器的任意 2 个接点,保护动作出口;(2) 1 块 IO 板卡退出运行时,短接继电器的任意 1 个接点,保护动作出口。需要验证的换流变本体继电器包括瓦斯继电器、有载调压油流继电器 1、有载调压油流继电器 2、SF₆ 气体密度继电器 1、SF₆ 气体密度继电器 2。

2.3 换流变保护改造整组联动

换流变保护改造后,应进行整组传动对换流变保护功能、PCP 软件修改的正确性以及换流变保护到 PCP 的回路进行验证。整组传动的方法与常规交流保护类似,对于换流变电量保护,在其装置内部注入二次电流模拟不同换流变故障类型下保护动作行为。由于调试期间换流变处于极隔离状态,无法验证 PCP 收到闭锁信号后的动作行为,分系统调试阶段只能通过 Hibug 的方式检测 PCP 是否接收到闭锁信号,待双极系统调试时验证其闭锁行为的正确性。换流变非电量保护改造的整组传动方法与电量保护类似,通过在换流变就地按压继电器,模拟其动作的方式,检测 PCP 是否收到闭锁信号和交流开关是否动作跳开。

3 结束语

政平换流站原换流变电量、非电量保护均为单一接点出口,易造成不正确动作,需要对其进行改造。本文在完成换流变电量、非电量保护改造的基础上,对改造过程中独立换流变保护装置调试和控保系统软件修改方法进行了研究。独立的换流变保护与常规变电站变压器保护功能调试方法相似,但是要考虑与直流控保系统的接口问题;另外,原直流控保系统的软件需要进行相应地修改,且非常关键,本文对软件修改页面的

内容和修改的原因进行了阐述,便于更好地理解换流变保护改造方法。其中包含了换流变保护改造需要进行的各项试验项目,对其他换流站的换流变电量、非电量保护改造具有较好地借鉴作用。

参考文献:

- [1] 翁汉琨,林湘宁. 换流变压器差动保护异常动作行为分析及对策[J]. 中国电机工程学报,2009,29(31):87-94.
- [2] 刘洪涛. 新型直流输电的控制和保护策略研究[D]. 杭州:浙江大学,2003.
- [3] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [4] 陈曾田. 电力变压器保护[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [5] 中国南方电网超高压输电公司. 高压直流输电现场使用技术问答[M]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [6] 杨诗艳,徐政. 直流输电系统典型暂态响应特性分析[J]. 电工技术学报,2005,20(3):45-52.
- [7] 乔小敏,王增平,文俊. 高压直流输电中谐波对换流变压器差动保护的影响[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(10):111-114.
- [8] 邹晓峰. 变压器与换流变压器保护相关问题的研究[M]. 杭州:浙江大学,2010.

作者简介:

张佳敏(1986),男,江苏靖江人,工程师,从事电力系统继电保护、直流控制保护技术工作;
蒋琛(1981),男,江西鹰潭人,工程师,从事电力系统继电保护工作;
李鹏(1982),男,陕西西安人,工程师,从事电力系统继电保护、直流控制保护技术工作;
袁宇波(1975),男,江苏丹阳人,高级工程师,从事电力系统继电保护、直流控制保护技术工作;
张剑(1982),男,湖北嘉鱼人,工程师,从事电力系统继电保护工作。

Analysis of Converter Transformer Protection Reformation and Research of Testing Technology

ZHANG Jia-min¹, JIANG Chen², LI Peng¹, YUAN Yu-bo¹, ZHANG Jian¹

(1. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Jiangsu Frontier Electric Technologies Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: As the high voltage level and huge transmission capacity, the influence of DC block caused by incorrect action of protection equipment is great. The existing electric protection and non-electric protection of converter transformer has only one contact, in order to improve the stability of HVDC (high-voltage direct current), the protection of converter transformer should be reformed. Different with the AC transformer reformation, the converter transformer protection is integrated in the PPC (pole protection control) system; the reformation of converter transformer protection includes the modification of the DC control and protection program and external wiring. Based on the reformation of converter transformer protection of Zhengping converter station, this paper analyzed the debugging method of protection equipment and the modification method of the program, and gives the scheme for converter protection testing.

Key words: electric protection of converter transformer; protection reformation; the modification of program

换流变压器直流偏磁与饱和保护

文继锋, 张晓宇, 程 骁, 熊 蕙, 李海英, 陈松林
(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘 要:分析了换流变压器直流偏磁产生的主要原因,并总结了直流偏磁情况下换流变压器的励磁电流的电气特征以及直流偏磁导致换流变压器的损坏机理,在此基础上介绍了换流变压器饱和保护的原理,以及饱和保护的实现方法,并探讨了换流变压器过激磁保护工程应用中需要考虑的注意事项。

关键词:换流变压器;直流偏磁;电气特征;饱和保护;励磁电流峰值

中图分类号:TM772

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)02-0028-03

高压直流输电由于其特有的优点得到了越来越广泛的应用。且可以异步互联,不需考虑稳定问题;线路故障恢复能力较强;调节作用利于交流系统的稳定;减少互联交流系统的短路容量;超过一定距离建设投资更经济等。由于直流输电系统和交流输电系统具有不同的系统结构和运行方式,运行期间会导致直流电流流过换流变压器^[1],从而导致换流变压器出现直流偏磁现象^[2-8]。直流偏磁现象使得换流变压器铁心持续性的饱和,增多了变压器的空载损耗,铁心温升上升。当直流偏磁现象较为严重时,可能使得铁心在饱和期内的饱和度过深,漏磁通增加,造成结构件涡流损耗增加,甚至可能出现严重的局部过热情况,导致变压器热损毁;同时直流偏磁还会导致换流变压器运行噪声变大,寿命下降。基于以上原因,换流变压器保护一般需要配置饱和和保护^[9,10]。

1 换流变压器直流偏磁产生原因及电气特征

换流变压器产生直流偏磁现象存在多种可能的原因:

1.1 换流站及其附近地电位的变化

当直流系统在使用大地回线的情况下,如果两极不对称运行会有直流电流流入大地,例如双极不平衡运行,单极大地回线方式等,使地电位发生变化。这样,在整流站和逆变站之间以及附近,由于不同接地点的直流电位不一致,就造成不同变压器的接地点之间可能流过直流电流,从而使变压器产生直流偏磁,如图1所示。

1.2 触发角不平衡

理想情况下,同一阀的不同桥臂具有对称的触发角。此时,换流变压器单相绕组中的电流波形正、负半周电流幅值相等,导通时间相同,电流对时间的积分面积相等。但是在实际工程中,如果触发控制系统出

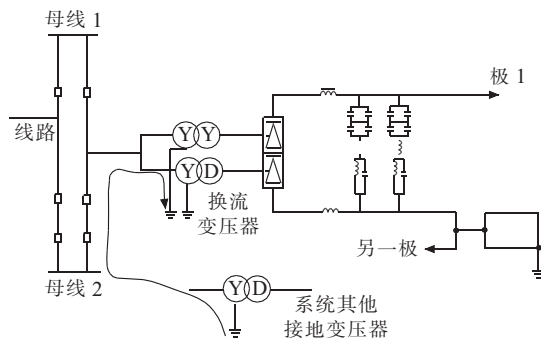


图1 直流电流流过换流变压器绕组示意图

现问题,可能导致桥臂的触发角失去对称性。此时正负半周电流导通时间长度不再相等。虽然电流的幅值相等,但正、负半周电流-时间面积已不再相等,对称轴相对原来的位置发生了偏移,出现了一个等效直流电流分量,相当于换流变阀侧绕组中流过了一个直流电流,从而使换流变压器产生直流偏磁现象。

1.3 直流输电线与交流输电线相邻

实际工程中,直流线路中流过的并不是理想的纯直流电流,由于各种原因,其中会含有一些稳态谐波电流。换流阀是循环导通和关断的,结果导致直流侧的谐波电流会以其他的频率形式在换流变各相网侧绕组中出现,其中有两类频率的谐波分量较强,即网侧基频及直流侧谐波频率的和与差。以直流侧的工频电流分量为例,会在换流变压器网侧绕组基波电流上分别叠加一个二次谐波电流和一个直流电流。

1.4 交流侧母线含有正序二次谐波电压

换流阀的循环导通与关断不仅会影响电流的波形,还会影响电压的波形。交流母线中的正序二次谐波电压经过换流阀的开关动作后,以工频电压的形式出现在了直流侧。此工频电压作用在直流侧的工频阻抗上,从而产生了工频电压,经过换流阀的开关动作以后,直流侧的这一基频电流就会以一个正序二次谐波电流和一个直流电流的形式出现在换流变压器的网侧绕组中。

1.5 直流偏磁的电气特征

根据以上分析可见,在特定的工作条件下,换流变压器的励磁电流中将出现稳态的等效直流分量,会导致励磁电流在一半周期内增大,在另外一半周期内减小。因此,变压器铁心在正负两个半周内饱和程度不一致,出现了偏磁现象,这就是换流变压器直流偏磁的根本原因。由于铁心的非线性,不能够认为换流变压器励磁电流中的直流分量和交流分量分别依照铁心磁化曲线各产生一个磁通,然后再将两者进行叠加。应该把直流电流和交流电流混合在一起来考虑换流变压器直流偏磁的电气特征,直流偏磁情况下换流变压器磁通和励磁电流的关系如图2所示。

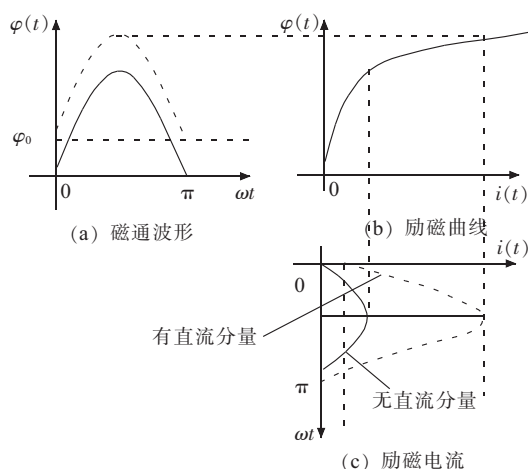


图2 换流变压器直流偏磁示意图

图2(a)为励磁电流波形,实线曲线为无直流偏磁情况下的励磁磁通,虚线曲线为含有直流偏磁情况下的励磁磁通;图2(b)为换流变压器的励磁曲线;图2(c)中,实线曲线为无直流偏磁情况下的励磁电流,而虚线曲线为含有直流偏磁情况下的励磁电流。从图2可以看出,在有直流偏磁的情况下,同方向的换流变压器励磁电流比没有直流偏磁情况下要大很多,同理,在反方向上,励磁电流将相对减小。最终,含有直流偏磁情况下的换流变压器励磁电流的波形出现了上半周波和下半周波不对称的情况。

直流偏磁现象使铁心出现周期性的饱和。这会使换流变压器的空载损耗上升,使铁心温升升高。严重情况下可能导致铁心在饱和期内的饱和度过深,就会增加漏磁通,造成结构件涡流损耗增加,甚至出现严重的局部过热现象,从而导致换流变压器热损毁或者寿命下降。正因为如此,需要配置相应的保护功能来防止直流偏磁导致换流变压器损坏的情况,这就是换流变压器的饱和保护。

2 换流变压器饱和保护

从以上分析可以看出,存在多种可能性导致换流

变压器出现直流偏磁现象,但是从国内外换流变压器保护的应用经验来看,换流变压器饱和保护主要是用来防止换流站地电位变化和触发不对称导致的换流变直流偏磁可能导致的换流变压器损坏的情况。

2.1 饱和保护的原理

从直流偏磁现象的本质来看,产生直流偏磁的直接原因是换流变压器励磁电流中出现的直流分量,如果可以直接测量此直流分量,实现换流变压器的饱和保护将会变得非常简单,但是实际工程应用中,目前还没有有效的方法可以直接测量变压器的励磁电流。且应用最为成熟的换流变压器饱和保护方法是使用变压器厂家提供的实测曲线为依据,通过两次工程等效变换来进行计算,目前国内投入实际运行的换流变压器饱和保护基本上都基于这个方法。

工程等效变换1。由第二节分析内容可知,直流偏磁情况下将导致换流变压器出现正负半个周波不对称的励磁电流,在Y轴的一侧,必然存在一个尖峰励磁电流,而且由于这种情况下,换流变压器处于稳态的磁饱和状态,励磁电流中包含有大量谐波分量,这样换流变压器的三相励磁电流实际上是非对称的,就可以认为在直流偏磁情况下,换流变压器中性点流过的零序电流的峰值,与换流变压器励磁电流的峰值是基本相当的。也就是说,可以用换流变压器中性点的零序电流峰值来代替换流变压器励磁电流峰值来进行饱和和保护逻辑运算。

工程等效变换2。另一方面,换流变压器生产厂家可以提供一个直流偏磁直流电流的大小和换流变压器励磁电流峰值的对应关系表,同时换流变压器生产厂家还可以提供一个励磁电流峰值与变压器可以运行时间的对应关系表(类似变压器过激磁曲线)。

通过以上2次工程等效变换,就将换流变压器饱和保护所需要的对应关系:直流偏磁电流大小-变压器允许运行时间的物理关系,拆分为两段映射关系。

(1) 直流电流大小-励磁电流峰值大小关系表,如图3所示。

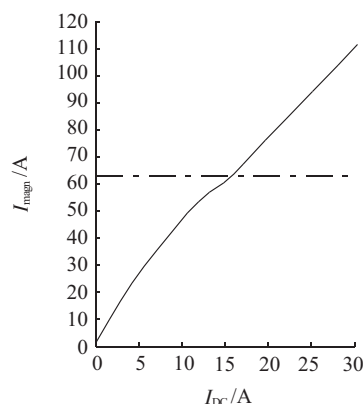


图3 直流电流-励磁电流对应关系

(2) 励磁电流峰值-变压器允许运行时间关系,如图4所示。

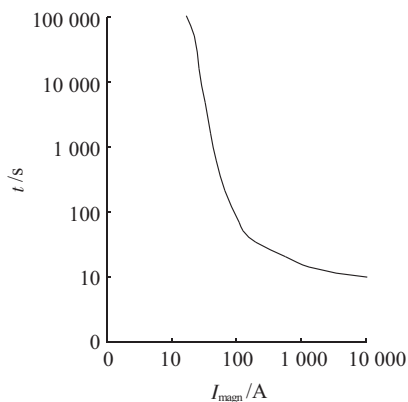


图4 励磁电流峰值-变压器允许运行时间

最终第一级转换关系可以通过定值整定的方式进行考虑,保护装置中只需要实现第二级转换关系:励磁电流峰值-变压器允许运行时间即可,其实现方法与变压器过激磁保护实现方法非常类似。

2.2 饱和和保护实现必须考虑的其他因素

虽然通过换流变压器中性点零序电流可以进行饱和保护的逻辑判断,但还需要排除其他的原因产生的零序电流可能导致误判情况,国内实际工程应用过程中,ABB和西门子换流变压器保护均发生过饱和保护误动作的情况。

(1) 换流变压器交流侧接地故障。目前,最为典型换流变压器接线方式为两台双绕组变压器并列运行的方式,其中Y/Y和Y/ Δ 变压器交流侧绕组中性点均接地运行,但是由于Y/Y变压器的零序阻抗接近于励磁阻抗,其阻抗值相当大,这样在单点接地故障的情况下,没有零序电流流过Y/Y变压器中性点,而是基本上所有的零序短路电流都流过Y/ Δ 变压器中性点,基于这个特点,ABB公司提供的饱和保护只采用Y/Y变压器中性点零序电流,而不采用Y/ Δ 变压器中性点零序电流。但是这种方法存在一定的局限性,在特定的故障情况下,同样会有工频零序短路电流流过Y/ Δ 变压器中性点,这种情况将导致饱和保护误判断。

(2) 变压器励磁涌流与和应涌流。在换流变压器空投过程中,由于铁心的饱和现象,导致Y/Y变压器中性点同样流过较大的零序电流,足以让饱和保护误动作,尤其是当一个极运行,空投另外一个极的情况下,变压器之间可能形成和应涌流的情况,从而导致Y/Y变压器中性点流过较大的零序电流,持续时间长达数分钟,这也是目前换流变压器饱和保护现场运行误动作的最主要原因,换流变压器空投励磁涌流波形如图5所示。

(3) 交流侧中性点安装直流电流互感器(TA)的

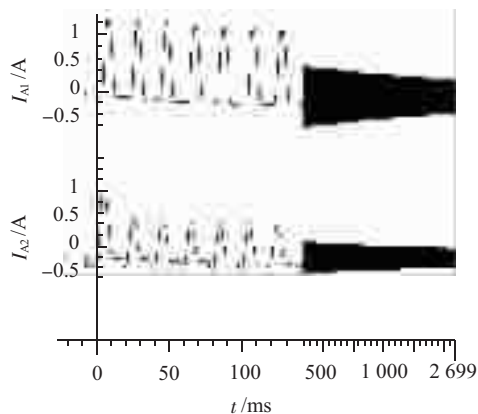


图5 空充换流变压器时和应涌流

应用。由于饱和保护反映最终是直流励磁电流的大小,如果可以直接测量换流变压器直流励磁电流的大小,饱和保护的实现将变得更加简单,但是目前缺乏直接测量换流变压器励磁电流的方式。另外一个变通的方式是在换流变压器的交流侧中性点安装直流TA直接采集直流电流,但是这种方式只能反映交流侧直流励磁电流的大小,对于阀侧产生的等效直流励磁电流无能为力。

通过对换流变压器直流偏磁特性和饱和保护的工况深入研究,采用基于以上技术要点设计的自适应判据的RCS-977和PCS-977系列换流变压器保护装置,在现场已经有超过8年的运行经验,至今从未出现过不正确动作情况。

3 结束语

本文分析了换流变压器直流偏磁现象的原因及其导致换流变损坏的机理,在此基础上介绍了防止直流偏磁导致换流变压器损坏的饱和保护的基本原理,并讨论了换流变压器交流侧故障、和应涌流、直流TA应用等换流变压器饱和保护实现中需要关注的问题。

参考文献:

- [1] 韩晓东,翟亚东.高压直流输电用换流变压器[J].高压电器,2002,38(3):5-6.
- [2] 王智勇.直流偏磁下新型换流变压器运行特性仿真研究[D].长沙:湖南大学,2010.
- [3] 杨松.大型换流变压器直流偏磁问题的研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2007.
- [4] 高敏华,冷勇.换流变压器中的两个直流分量[J].变压器,2002,39(6):15-18.
- [5] 李靖宇.换流变压器直流偏磁的试验研究[J].变压器,2005,42(9):25-27.
- [6] 李新年,蒋卫平,李涛.交直流线路同塔输电对换流变直流偏磁的影响[J].电力系统自动化,2011,35(11):87-92.
- [7] 马为民.换流变压器中直流偏磁电流的计算[J].高电压技术,2004,30(11):48-49.

变电站户外电气设备防火距离研究

李海烽

(江苏省电力设计院,江苏 南京 211102)

摘 要:变电站户外电气设备的防火距离影响着设备总体布置,在设备布置的安全性和经济性之间寻求平衡,是十分必要的。鉴于目前相关标准不统一的现状,结合对防火原理的深层次分析,对户外电气设备的防火要求进行分类研究,归纳出指导工程设计的优化措施,以更好地适应变电站“两型一化”的建设要求。

关键词:防火距离;防火指向性;户外电气设备

中图分类号: TM63

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)02-0031-04

近年来,电网建设深入贯彻了“资源节约型”的指导方针,取得了显著的经济效益和社会效益。以变电站建设为例,将主要电气设备进行紧凑型优化布置可以节约宝贵的土地资源,但布置优化仍需满足电气设备的安装、运行维护、检修及防火等要求。长期以来,防火一直是变电站安全运行的重要内容,因而成为电力工程设计不可忽视的环节。为确保变电站的消防安全,预防火灾或减少火灾危害,国家多年来陆续编制了指导变电站内防火设计的相关标准和规定,一定程度上规范了变电站内电气设备防火设计标准。

1 变电站防火设计的现状

目前电力行业执行的国家标准和行业规范中,变电站防火设计的主要依据是 GB 50229—2006《火力发电厂与变电站设计防火规范》(以下简称《防火规范》)和 GB 50016—2006《建筑设计防火规范》(以下简称《建筑防火》),其他工艺设计规范对于变电站防火也有相关规定。

在诸多规范中,对于建(构)筑物的防火要求是最为明确和统一的,主要包括对建(构)筑物火灾危险性和耐火等级的规定,从而按照耐火等级来确定防火间距。由于没有争议,目前在工程设计中该防火间距或相关措施的规定均能严格准确地执行。相对建(构)筑物而言,电气设备尤其是户外布置时的防火要求并不十分清晰,主要缘于各标准和规范的内容不尽统一,造成工程设计时不容易把握。以 35 kV 户外成套拼装式电容器为例,对于与相邻电容器、电气设备或构架的防火距离就没有统一规定,如果按照最为保守的数值(比如 10 m)来控制或者一律设置防火墙,将使得空间布置过大造成土地浪费,或者增加了不必要的防火墙建筑成本。可以看出,设计标准的不统一无法满足变电站“两型一化”建设要求,防火设计的标准必须进一步明确,更易于指导工程设计。

2 电气设备的防火原理分析

电气设备的防火主要针对带油设备,设备按照含油量来确定相应的防火标准,这是各标准和规范都明确的。即使在 GB 50016—2006《建筑设计防火规范》中,也可将带油电气设备归于丙类液体(闪点大于等于 60℃)贮罐类别。GB 50229—2006《防火规范》中,针对油浸变压器的防火机理有着十分详细的说明。

油浸变压器内部贮有大量绝缘油,其闪点在 135~150℃,与丙类液体贮罐相似,按照 GB 50016—2006《建筑设计防火规范》的规定,丙类液体贮罐之间的防火间距不应小于 $0.4D$ (D 为 2 个相邻贮罐中较大罐的直径)。可设想变压器长度为丙类液体贮罐的直径,通过对不同电压、不同容量的变压器之间的最小防火间距按 $0.4D$ 计算得出,考虑到油浸变压器的火灾危险性比丙类液体贮罐大,而且是变电站的核心设备,其重要性远大于丙类液体贮罐,所以规定防火间距应大于 $0.4D$ 。根据经验,变压器着火后,对地面的最大辐射强度是在与地面大致成 45° 的夹角范围内,要避开最大辐射温度,变压器之间的水平间距必须大于变压器的高度。因此,《防火规范》中将户外油浸变压器(含油量大于 2 500 kg)之间的防火间距按电压等级划分,如表 1 所示。

表 1 屋外油浸变压器之间的最小净距 m

电压等级	最小净距
35 kV 及以下	5
66 kV	6
110 kV	8
220 kV 及以上	10

另外,《防火规范》中 6.6.3 章节规定:“油量为 2 500 kg 及以上的变压器或电抗器与本回路油量为 600 kg 以上且 2 500 kg 以下的带油电气设备之间的防火间距不小于 5 m”。

3 电气设备的防火距离分析

综合前节变压器的防火机理,并结合变电站电气设备的运行要求,且设置设备防火距离主要基于设备含油量水平及相邻设备的重要性分类。

3.1 设备含油量水平。

一般来说,《防火规范》主要适用于含油量为 2 500 kg 及以上的电气设备的防火要求,也就是说变电站内电气设备具有的足够火灾危险性,即自身燃烧对于一定范围的辐射影响。由于设备含油量及外廓高度随着电压等级的提高而增大,因此不同电压等级的含油设备可以参照表 1 确定防火距离。另一方面,对于含油量为 2 500 kg 以下的电气设备防火不在《防火规范》规定范围,应参照《建筑防火》的丙类液体贮罐防火标准,采用不小于 $0.4D$ (D 为设备外廓长宽之和的一半数值,等效为罐体直径)的数值。

3.2 相邻设备的重要性分类

《防火规范》中 6.6.3 章节中,提出变压器与本回路 600~2 500 kg 的带油电气设备之间的防火间距可一律选择 5 m,从而不受变压器电压等级的限制。基于此,提出防火距离两端的相邻设备防火指向性的概念,以便进一步研究确定防火距离。防火指向性概念的提出,完全建立在相邻设备含油量和火灾危险影响性评估的基础上。比如同一间隔的含油设备之间,当含油量达到规范标准时,相对不重要的设备对重要设备的防火要求就是彼此防火距离的主要决定因素。

3.3 防火距离分析

典型的 500 kV 变压器及无功装置场地如图 1 所示^[1],主要包括主变压器、35 kV 配电装置、35 kV 并联电容器及电抗器等设备。各电气设备一般按照功能区域进行布置,满足相互之间必要的电气距离、安装、巡视、运维及检修的空间要求,在此基础上进行设备防火距离的综合分析。

(1) 不同主变压器(例如图 1 中 1 号、2 号变压器)之间的防火距离严格按照《防火规范》要求,500 kV 等级采用 10 m 控制^[2],紧凑布置时如图设置满足标准的防火隔墙。大容量 500 kV 变压器一般采用单相型式,根据《防火规范》要求,同组变压器单相之间防火距离同上^[2],紧凑布置时设置满足标准的防火隔墙。目前变电站的典型布置均满足该要求。

(2) 主变压器与其他主变回路的配电装置、电容器及电抗器等电气设备的防火距离设置原则与不同主变压器之间的要求相同。

(3) 主变压器和本回路 35 kV 配电装置之间防火距离。35 kV 配电装置中主要含油设备为互感器,单台设备含油量一般少于 600 kg,按照《防火规范》,主变压

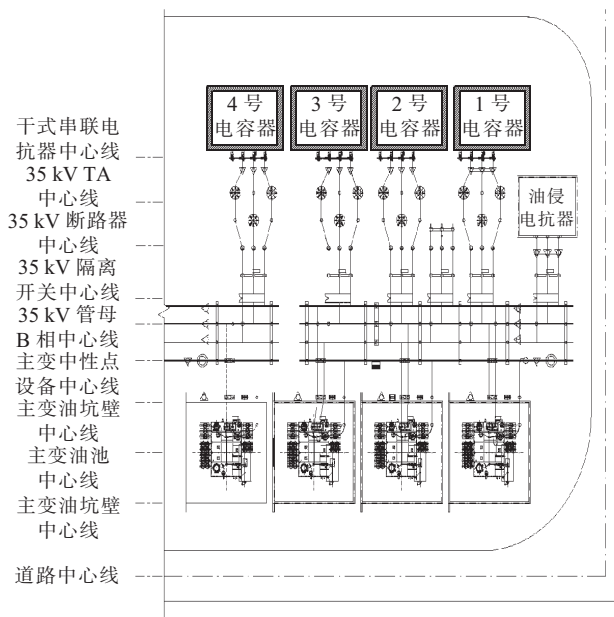


图 1 500 kV 变电站主变压器场地典型电气设备布置图

器对于由自身 35 kV 侧引接的配电装置电气设备没有规定防火要求^[2]。究其原因,是因为 35 kV 配电装置含油量小,火灾危险性及延伸性影响小,因此防火设置是单向的,考虑到 35 kV 配电装置不向外出线,本质上是辅助变压器发挥功能,重要性上不如变压器本身,按照防火指向性概念,可根据《建筑防火》的丙类液罐的规定确定防火距离不小于 $0.4D$ (D 值为主变压器外廓长宽之和的一半取值^[3])。

(4) 主变压器和本回路中性点设备之间防火距离。分析同(3),考虑到重要性的不同,按照防火指向性概念,规定防火距离不小于 $0.4D$ (D 值为主变压器外廓长宽之和的一半取值)。

(5) 主变压器和本回路装配式电容器之间防火距离。装配式电容器由许多含油小单元组成,每个单元的含油量不多(约 10 kg),虽然总体含油量较高,但和相同含油量的单体设备在火灾上还是不能相提并论。考虑重要性不同,按照防火指向性概念,可根据《建筑防火》规定防火距离不小于 $0.4D$ (D 值为尺寸较大的主变压器外廓长宽之和的一半取值^[3])。

(6) 主变压器和大容量集合式电容器、油浸式电抗器之间防火距离。大容量集合式电容器和油浸式电抗器的单体含油量一般都超过了 2 500 kg。按《防火规范》中同电压等级变压器确定,以 500 kV 为例,防火距离设置为 10 m。

(7) 35 kV 电容器之间防火距离。并联电容器属于变电站的无功补偿装置,考虑到电容器投切需要满足母线电压波动及系统无功和电压的调节要求,一般每台变压器的电容器分为若干组。同一主变下的电容器(比如图 1 中的 2 号、3 号电容器)实质是发挥了同

一种功能,只不过由于电网系统的技术要求而进行分组,其在变电站的重要性可不分开单独考虑。电容器主要应用型式包括装配式和大容量集合式类型。对于装配式或单体油量不超过 2 500 kg 的集合式电容器,由于单体油量不大,因此同一变压器下各组电容器之间可参照《建筑防火》的丙类液罐的规定即 $0.4D$ 。以变电站常规的 60 Mvar 电容器为例,电容器本体最大的等效 D 值为 7~8 m,因此同台变压器下不同电容器本体之间的防火距离控制在 $0.4D$ 即 3.5 m 以内^[3]。不同变压器下各组电容器之间参照《防火规范》中同电压等级变压器,以 35 kV 为例,防火距离设置为 5 m^[2]。对于大容量集合式,单体油量超过 2 500 kg 时,彼此之间防火距离参照《防火规范》中同电压等级变压器,以 35 kV 为例,不论分属同一主变还是不同主变,防火距离一律设置为 5 m,否则应设置防火隔墙^[2]。

(8) 35 kV 电容器与相邻配电装置之间防火距离。分析同(7)。

(9) 35 kV 油浸并联电抗器之间防火距离。考虑到含油量超过 2 500 kg,因此同主变或不同主变下的油浸并联电抗器之间,均可参照《防火规范》中同电压等级变压器的防火要求设置防火距离。以 35 kV 为例,电抗器本体之间防火距离应设置为 5 m,否则应设置防火隔墙^[2]。

(10) 35 kV 电容器和电抗器之间防火距离。如采用油浸式电抗器,则参考上述(9)选择防火距离;如采用干式空心电抗器,则参考上述(7)选择防火距离。

(11) 工程中其他情况都可在上述(1)~(10)条中选择参照执行。

上述分析结果汇总如表 2 所示。目前国网公司的变电站典型设计方案中,设备均按照表 2 要求布置,否则设置防火隔墙。

4 规程规范的检验

为进一步与工程建设现状相协调,应结合现有规程规范和工程实践,检验前述按照设备含油量水平和重要性分类来确定防火距离的设计思想。

(1) GB 50016—2006《建筑设计防火规范》。电气含油设备可归于丙类液体贮罐,规范中 4.2.2 条地上丙类液体贮罐之间的防火间距为 $0.4D$,前文分析及应用结果皆大于 $0.4D$,满足本规范要求^[3]。

(2) GB 50229—2006《火力发电厂与变电站设计防火规范》。规范中 11.1.4 规定了变电站内各建(构)筑物及设备的防火间距,其中对于可燃介质电容器与变压器和配电装置的防火间距规定为 10 m^[2],在实际工程执行中有较多争议,建议可按照本文研究成果进行区别规定。

(3) GB 50227—2008《并联电容器装置设计规范》。规范中 9.1.1 条要求执行 GB 50229 的相关规定,与第(2)条一致^[4]。

(4) DL/T 5352—2006《高压配电装置设计技术规程》。规程中 8.5.5 和 8.5.7 条中规定了屋外油浸变压器之间、油浸变压器和本回路含有设备的最小防火间距,前文分析结果能满足本规范要求^[5]。

(5) DL 5027—1993《电力设备典型消防规程》。规程中 7.3.2 条规定了屋外油浸变压器之间、油浸变压器和本回路含有设备的最小防火间距,前文分析结果能满足本规范要求^[6]。规程中 7.6.3 条规定,室外布置的电力电容器与高压电气设备需要保持 5 m 及以上的距离^[6],并没有考虑防火指向性,建议以本文分析结果对设备进行重要性分类来确定防火距离。

(6)《国家电网公司输变电工程通用设计》。以通用设计方案中 500 kV 变电站主变压器场地为例,设备

表 2 变电站内主要电气设备防火间距设计

电气设备名称	主变压器	电容器(单台油量超过 2 500 kg)	电容器(单台油量 2 500 kg 以下)	油浸电抗器	配电装置及其他设备
主变压器	按主变电压等级设置	按主变电压等级设置	同回路为 $0.4D$ (D 按主变取值); 不同回路按主变电压等级设置	按主变电压等级设置	同回路为 $0.4D$ (D 按主变取值); 不同主变回路按主变电压等级设置
电容器(单台油量超过 2 500 kg)	按主变电压等级设置	按同电压等级主变设置	按主变电压等级设置	按主变电压等级设置	按同电压等级主变设置
电容器(单台油量 2 500 kg 以下)	同回路为 $0.4D$ (D 按主变取值); 不同回路按主变电压等级设置	按主变电压等级设置	同回路为 $0.4D$ (D 按主变取值); 不同回路按主变电压等级设置	按主变电压等级设置	按同电压等级主变设置
油浸电抗器	按主变电压等级设置	按主变电压等级设置	按主变电压等级设置	按主变电压等级设置	按同电压等级主变设置
配电装置	同回路为 $0.4D$ (D 按主变取值); 不同主变回路按主变电压等级设置	按同电压等级主变设置	同主变下为 $0.4D$ (D 按主变取值); 不同主变按主变电压等级设置	按同电压等级主变设置	—

布置的防火距离及隔墙的设置原则,与电气设备的防火距离分析结果一致^[1]。

5 结束语

变电站的防火是一项系统工程,与电网的运行密不可分,必须依靠丰富的理论依据和运行经验作为支撑。但现有规程和标准的规定并不明确,在指导防火工程建设中易引发争议,因此有必要对于防火距离开展深层次研究,从而寻求安全性和经济性之间的更加合理的平衡,这也符合当前电网建设“两型一化”的指导思想。

参考文献:

- [1] 国家电网公司. 国家电网公司输变电工程通用设计 110(66)~500 kV 变电站分册(2011 年版)[M]. 北京:中国电力出版社, 2011.
- [2] GB 50229—2006,火力发电厂与变电站设计防火规范[S].
- [3] GB 50016—2006,建筑设计防火规范[S].
- [4] GB 50227—2008,并联电容器装置设计规范[S].
- [5] DL/T 5352—2006,高压配电装置设计技术规程[S].
- [6] DL 5027—1993,电力设备典型消防规程[S].

作者简介:

李海烽(1975),男,江苏南京人,高级工程师,从事变电电气设计技术管理工作。

Research on the Fireproof Distance of the Outdoor Electrical Equipment in Substation

LI Hai-feng

(Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

Abstract: The layout of the outdoor electrical equipment in substation is affected by the fireproof distance. It is extremely necessary for equipment layout to find a balance between the security and economy. But the relevant standard is not unified currently. To improve the situation, the fireproof requirement for outdoor equipment is studied by classification. Besides, to adapt to the requirement better for constructing the "Resource-saving, environment-friendly and industrialized substation", the optimization measures which can guide engineering design is also summarized.

Key words: fireproof distance; fireproof directivity; outdoor electrical equipment

(上接第 30 页)

- [8] 王智勇,罗隆福,许加株. 基于新型换流变压器偏磁特性仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(3): 325-329.
- [9] 肖燕彩,文继锋,袁 源,等. 超高压直流系统中的换流变压器保护[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 91-94.
- [10] 张 颖,邵能灵,徐 斌,等. 高压直流输电系统阀短路保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 97-102.

作者简介:

文继锋(1978),男,江西萍乡人,高级工程师,从事电力系统继电保护研究与开发工作;

- 张晓宇(1981),男,吉林吉林市人,工程师,从事电力系统继电保护研究与开发工作;
- 程 骁(1978),男,河南安阳人,工程师,从事电力系统继电保护研究与开发工作;
- 熊 蕙(1977),女,湖北武汉人,工程师,从事电力系统继电保护研究与开发工作;
- 李海英(1972),男,内蒙古赤峰人,研究员级高级工程师,从事直流输电及继电保护研究与开发工作;
- 陈松林(1970),男,安徽六安人,研究员级高级工程师,从事电力系统继电保护研究与开发工作。

DC Bias and Saturation Protection of Converter Transformer

WEN Ji-feng, ZHANG Xiao-yu, CHENG Xiao, XIONG Hui, LI Hai-ying, CHEN Song-lin
(Nanjing NARI-relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: This paper analyzes main causes of DC bias of converter transformer, and summarizes electrical characteristics of exciting current during DC bias of converter transformer and the mechanism of DC bias leading to damage of converter transformer. In addition, the principle of saturation protection of converter transformer and the implement method of the protection are introduced. Finally, points for attention in the engineering application of overexcitation protection of converter transformer are discussed.

Key words: converter transformer; DC bias; electrical characteristics; saturation protection; exciting current peak value

AGC/AVC 在光伏电站的应用

魏世贵, 刘 双

(南瑞集团南京中德保护控制系统有限公司, 江苏 南京 210061)

摘 要:针对太阳能资源本身具有随机性、间歇性、周期性以及波动性的特点,当大容量光伏发电系统与电网并网时对系统交换功率的控制以及对配网和高压输电网的电压质量均有一定影响,为保证电网的安全稳定运行及提高供电质量光伏电站中应配置功率控制系统(AGC/AVC)。文中介绍了在光伏电站中应用的一种 AGC/AVC 控制系统的结构、控制模式、控制策略并给出了控制流程图,该系统已在宁夏多个光伏电站中成功应用,并取得良好效果。

关键词:光伏电站;AGC;AVC;控制策略

中图分类号:TM615,TK51

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)02-0035-03

太阳能资源本身具有随机性、间歇性、周期性以及波动性的特点,以太阳能为能源的光伏电站的出力同样具有以上特点,随着光伏发电在电源中的比例不断增大,当大容量光伏发电系统与电网并网运行时会对系统断面交换功率的控制以及对短期负荷尤其是日发电计划的合理制定等带来较大困难,同时光伏电源的并网对配网和高压输电网的电压质量均有一定影响。我国太阳能光伏发电呈现出“大规模集中开发、中高压接入”与“分散开发、低电压就地接入”并举的发展特征^[1],当光伏发电在电网电源中的比例达到一定规模时,必须对光伏电站进行科学合理的调度运行控制。国家电网公司于 2011 年 5 月发布的《光伏电站接入电网技术规定》^[2]中规定:“大中型光伏电站应配置有功功率控制系统,具备有功功率调节能力。能够接收并自动执行调度部门发送的有功功率及有功功率变化的控制指令,确保有功功率及有功功率变化按照电力调度部门的要求运行。大中型光伏电站应配置无功电压控制系统,具备无功功率及电压控制能力。根据电力调度部门的指令,光伏电站自动调节其发出(吸收)的无功功率,控制光伏电站并网点电压在正常运行范围内”。

1 AGC/AVC 功能

自动发电控制(AGC)是并网发电厂发电机组在规定的出力调整范围内,跟踪电力调度下发的指令,按照一定调节速率实时调整发电出力,以满足电力系统频率和联络线功率控制要求。光伏电站中 AGC 接收来自调度或电站内的负荷需要并按照一定的调整策略分配给电站内的逆变器,实现整个光伏电站有功优化分配和调节,维持电站联络线的输送功率以及交换电能保持或接近规定值。

自动电压控制(AVC)光伏电站中,AVC 可接收

来自调度的母线电压和总无功的负荷设定以及电站内的母线电压和无功的设定,通过一定策略调节并网逆变器无功功率、无功补偿设备(SVG/SVC)的投入量或变电站升压变压器的变比进行电站的无功及电压调节使并网点电压在正常运行范围内。现阶段电站主要按无人或少人值班设计,因此 AGC/AVC 功能的设置,除需考虑到提高电网运行的质量还需适应电站无人值班或少人值守运行模式的要求。

2 系统结构

光伏电站功率控制系统由 AGC/AVC 控制器和操作员站组成,系统结构如图 1 所示。AGC/AVC 控制器是功率控制系统的核心设备,完成和站内逆变器、SVG/SVC 设备以及远动机的通信和数据采集,并实现 AGC/AVC 功能。操作员站以图形界面的方式直观对系统进行监视,不仅可以显示 AGC/AVC 控制器的调节状态(功能投入、运行状态、超出调节能力等),还可以实时显示站内逆变器、SVG/SVC 的实时信息及告警信息,以及通过操作员站对功率控制系统进行设定,使之按要求的方式运行。

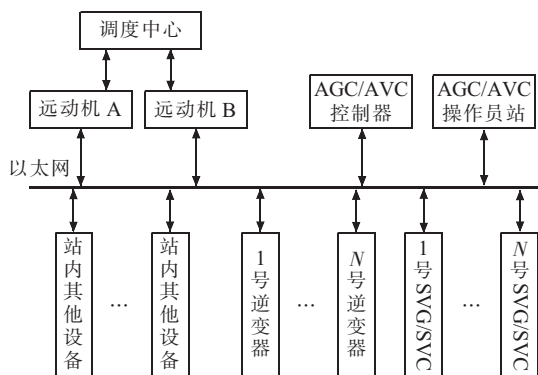


图 1 系统结构图

AGC/AVC 控制器和远动机 A、B(双机配置)接在同一以太网上,通过远动机向调度主站上送光伏电站

AGC/AVC 状态等实时信息;同时通过远动机接收调度主站的有功、无功控制和调节指令(如调度中心有独立通道分配给 AGC/AVC 控制系统则不需要通过远动机传送信息),最终实现有功、无功功率的可监测、可控制,达到电力系统并网技术要求。

3 控制模式

AGC/AVC 控制系统可工作于远方模式(即接收来自调度中心的总有功和总无功的负荷设定)和就地模式(通过电站内的操作员站进行总有功和无功设定),两者可通过站内切换开关进行控制权的切换。当功率控制系统与调度主站出现暂时性通信中断时,功率控制系统将自动切换至本地方式运行,根据调度预先设定的发电计划曲线、母线电压曲线进行调整。AGC/AVC 控制系统也可设定为在指导方式或自动方式下执行负荷的分配。指导方式为接收总有功和无功负荷设定,给出开、停机和负荷分配的建议,由运行人员根据实际情况决定是否执行;自动方式则完全按既定分配策略自动开、停机和负荷分配,不需运行人员干预。

AGC 有功负荷设定有 2 种方式:总有功方式和日负荷曲线方式。总有功方式可接收调度的设定和电站运行人员的设定(根据控制权),直接以数值方式设定全站总有功;日负荷曲线方式为调度预先给出下一个 24 h 的负荷曲线(实际为每 5 min 对负荷进行 1 次设定,一天共 288 个点),负荷曲线存储在 AGC/AVC 控制器数据库中,AGC 从中读取数据以决定某一时刻负荷的大小。

AVC 有 2 种控制模式:无功设定值控制模式和电压控制模式。无功设定方式接收来自调度和电站的无功设定,电压控制方式则根据设定的母线电压范围,折算为无功负荷后在成组控制的逆变器间、以及无功补偿装置间进行分配。在电压控制模式下,母线电压的设定值不仅可以接收调度的设定和电站运行人员设定,也可选择投入电压曲线模式,按照调度曲线中的电压设定值进行调节。为了防止频繁开、停机,系统设置了开、停机死区值,只有当总有功给定值大于当前逆变器可发最大容量,且差值大于开、停机死区,才会开机;当总有功给定值小于当前停掉一台逆变器的可发最大容量,且差值大于开、停机死区,才会停机。

4 控制策略

4.1 有功负荷分配策略

光伏电站功率控制系统有功负荷控制流程图如图 2 所示。

有功负荷分配策略为:电站根据调度要求将各台逆变器分别设置为单独运行逆变器或成组控制逆变

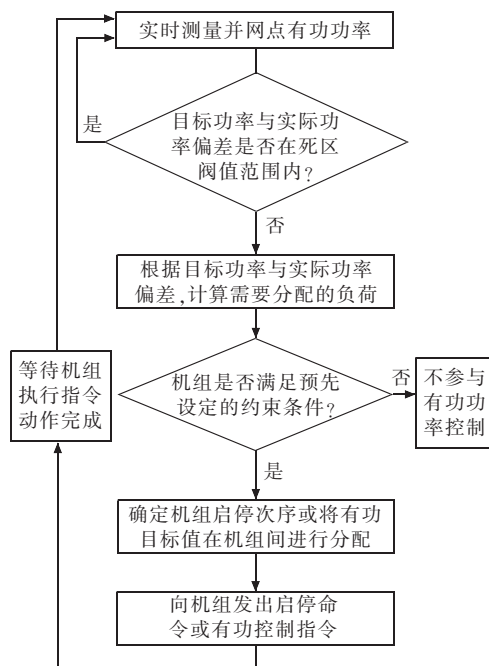


图 2 有功负荷控制流程图

器,接收来自调度的总有功,在运行的各台逆变器间进行负荷分配。分配方式为总有功减去单独运行逆变器所带功率,即在各成组控制逆变器间进行分配的总有功,可表示为:

$$P_{AGC} = P_{SET} - \overline{P_{AGC}} \quad (1)$$

式(1)中: P_{AGC} 为成组控制逆变器有功; P_{SET} 为全站总有功; $\overline{P_{AGC}}$ 为单独运行逆变器有功之和。

有功负荷在成组控制逆变器间采用与容量成比例的分配策略。分配到每台逆变器的有功负荷按下面的公式进行计算:

$$P_{iest} = P_{ACG} \times \frac{P_{imax}}{\sum_{i=1}^n P_{imax}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式(2)中: n 为逆变器台数; P_{imax} 为第*i*台逆变器在当前光照条件下最大出力; $\sum_{i=1}^n P_{imax}$ 为所有逆变器在当前光照条件下最大出力之和; P_{iest} 为分配到第*i*台逆变器的有功功率。

4.2 无功负荷分配策略

光伏电站功率控制系统无功电压控制流程图如图 3 所示。

具体分配策略如下:电压控制方式时,根据母线电压目标值,母线无功设定值计算公式为:

$$Q_{SET} = \frac{U_{target} \times (U_{target} - U_{mea})}{X} + \frac{(Q_{mea} \times U_{target})}{U_{mea}} \quad (3)$$

式(3)中: Q_{SET} 为母线无功设定值; U_{target} 为母线电压目标值; Q_{mea} 为母线无功实测值; U_{mea} 为母线电压实测值; X 为系统阻抗。

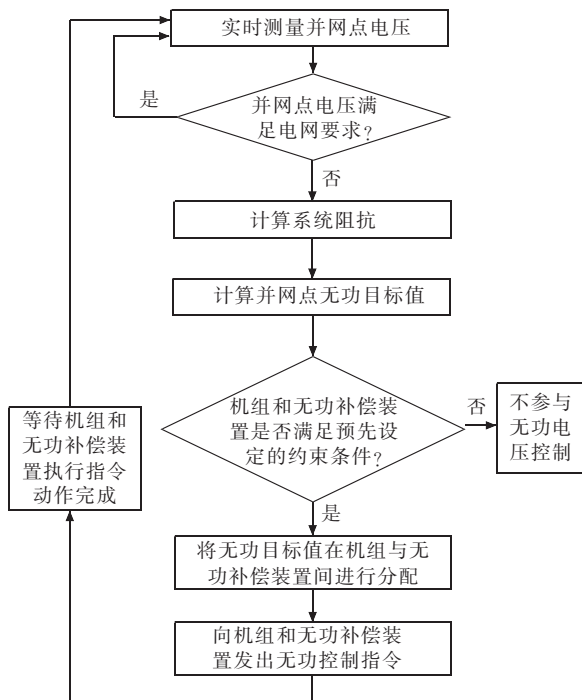


图3 无功电压控制流程图

在系统第一次运行时,系统阻抗可以通过外部输入来获取设定值;当设定值超出系统规定的限值时,系统自动选取系统阻抗上限,作为计算的阻抗值;当系统调节一定次数后,系统根据获取的系统信息和数据,可以通过自学习的方法预测出参与下次运算的系统阻抗值。AVC在各成组控制逆变器间、以及无功补偿装置间进行分配的总无功,可表示为:

$$Q_{AVC} = Q_{SET} - \overline{Q_{AVC}} \quad (4)$$

式(4)中: Q_{AVC} 为成组控制逆变器、无功补偿装置无功; $\overline{Q_{AVC}}$ 为单独运行逆变器、无功补偿装置无功之和。

AVC以优先调节逆变器,其次调节无功补偿装置的原则调节站内无功资源。

无功负荷分配在并网逆变器间、以及无功补偿装置间采用相似调整裕度的策略。当无功设定值增加时,调节无功功率的大小根据各控制逆变器(无功补偿装置)的无功裕度大小进行分配。各个参与控制的逆变器(无功补偿装置)分配的无功大小为:

$$Q_{iset} = \frac{Q_{imax} - Q_i}{\sum_{i=1}^n (Q_{imax} - Q_i)} \times Q_{AVC} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

当无功设定值减少时,调节无功功率的大小根据各控制逆变器(无功补偿装置)的无功裕度大小进行分配。各个参与控制的逆变器(无功补偿装置)分配的无功大小为:

$$Q_{iset} = \frac{Q_i - Q_{imin}}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{imin})} \times Q_{AVC} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式(5,6)中: n 为逆变器(无功补偿装置)台数; Q_{imax} , Q_{imin} , Q_i 分别为第 i 台逆变器(无功补偿装置)的无功上限、无功下限、实发无功; Q_{iset} 为分配到第 i 台逆变器(无功补偿装置)的无功功率。

如果某个控制逆变器(无功补偿装置)发出或吸收的无功已经达到上限、下限,计算时则排除无功越限的控制逆变器(无功补偿装置)^[3]。运用以上策略对逆变器及SVG/SVC进行调节和控制后的实际有功负荷控制曲线和电压控制曲线如图4、图5所示。

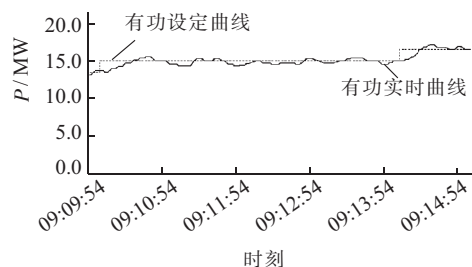


图4 有功曲线

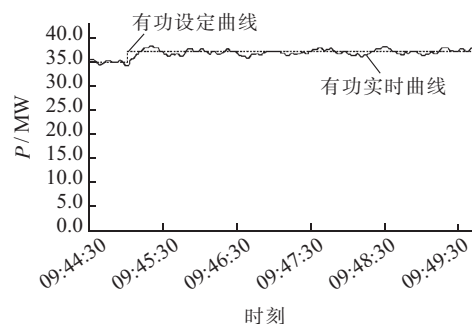


图5 电压曲线

5 结束语

通过对光伏电站内逆变器及无功补偿设备(SVG/SVC)按照既定的策略进行自动调节与控制可以较好地跟踪调度调节指令,能够实现较高的调节精度,能较好地解决光伏电站控制有功出力及无功调节能力普遍不足的问题。该AGC/AVC功率控制系统在宁夏多个光伏电站的成功应用,对保证中大型光伏电站并网后电网的安全稳定运行起到了积极作用。

参考文献:

- [1] 黄华,陈建华. 光伏并网运行无功控制技术报告[R]. 国网电力科学研究院, 2011.
- [2] Q/GDW 617—2011, 光伏电站接入电网技术规定[S].
- [3] 施佳峰,沈燕,耿多,等. 含光伏发电的电网无功电压协调控制技术[J]. 宁夏电力, 2012(5): 1-4, 44.

作者简介:

魏世贵(1983),男,四川仁寿人,工程师,从事电力系统自动化工作;
刘双(1977),男,辽宁台安人,工程师,从事电力系统自动化工作。

基于串联补偿的间谐波抑制技术研究

杨志新, 杨世海

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 随着非线性负荷的增多和电力电子技术在电网中的广泛应用, 近年来电网中出现大量的谐波和频谱分散的间谐波。间谐波除了具有谐波的危害之外, 还造成其他严重危害, 如引起电压波动和闪变等。目前国内对间谐波的研究还在性质分析和检测算法阶段, 还没有可靠有效的抑制措施。文中提出一种基于串联补偿的间谐波抑制技术, 并对电弧炉产生的电压波动和闪变抑制情况进行仿真分析, 证明其成为抑制间谐波的有效手段。首先介绍间谐波引起的电压波动特性, 然后介绍串联补偿原理及构成, 最后在 SIMULINK 环境下建立串联电压补偿器模型和电弧炉模型, 通过仿真验证串联电压补偿器对间谐波的抑制作用。

关键词: 串联补偿; 间谐波; 电弧炉; 电能质量

中图分类号: TM711

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)02-0038-05

间谐波是指一个周期电气量的正弦波分量, 其频率为基波频率的非整数次倍, 也就是说间谐波电压的频率介于工频和谐波频率之间, 它们可能是离散的频率, 也可能以连续频带的形式出现。当实际电压波形含有间谐波成分时, 由于间谐波的周期与基波分量的周期不是同步的, 电压波形的有效值和峰值会出现波动, 而不再是一个定值。当波动幅度较大并且该波动频率在人眼的觉察频率范围之内时, 人眼就会感觉到白炽灯的闪变现象。电压波动频率主要分布在 0~50 Hz 频带上, 其中在 8 Hz 频率左右的成分对仪器和生活生产带来很大的危害^[1-3]。

电弧炉作为电网典型的冲击性、非线性电力负载向配电网中注入大量间谐波而引起电网电压剧烈波动。本文通过对电弧炉模型的研究, 得到电弧炉工作的典型波形, 从而研究对间谐波的抑制措施。国标《电热设备电力装置设计规范》规定“电弧炉工作短路引起供电母线的电压波动值不超过 2.5%”。串联电压补偿器具有设备容量小、动态响应快等特点, 其良好的动态性能和容量上的相对优势使其成为目前治理动态电压问题与闪变问题中最经济有效的手段之一。当系统电压发生电压波动时, 串联电压补偿器的检测单元通过计算出基波分量, 然后与系统电压比较得到电压差, 送到控制单元, 经运算得到 PWM 脉冲控制逆变单元, 使其输出电压来补偿电压差, 达到抑制电压波动的效果^[4,5]。

1 间谐波特性分析

当基波信号上叠加间谐波时, 由于间谐波与基波频率不同步, 导致合成的信号呈现波动状态, 从而引起荧光灯闪变。含一个间谐波的电压信号为:

$$v(t) = V(\sin(2\pi f_1 t) + m \sin(2\pi f_{ih} t + \theta)) \quad (1)$$

式(1)中: V 为基波幅值; f_1 为基波频率; m 为间谐波相对幅值; f_{ih} 为间谐波频率; θ 为间谐波的初始相位。

令 $f_{ih} = hf_1 + \Delta f$, 其中 h 为间谐波频率临近的谐波次数, 并且近似认为当 $t = n/(4f_1)$, ($n=1, 3, 5 \dots$) 信号系统电压达到极值:

$$V_{peak} = V(1 + m \sin(\frac{n\pi\Delta f}{2f_1} + \frac{nh\pi}{2})) \approx V(1 \pm m) \quad (2)$$

则峰值电压波动为:

$$d_{max} = \frac{\Delta V}{V} = \frac{V_{max} - V_{min}}{V} = 2m \quad (3)$$

所以对于含有间谐波的电压来说, 峰值电压波动取决于电压所含间谐波的大小, 而与间谐波的频率无关。

2 串联补偿原理与结构

串联电压补偿器是一种串联在电网和负载之间通过向系统注入标准电压和系统电压的差值来补偿系统电压的波动的电力电子装置, 它相当于一个可以快速调节的电压源, 通过快速补偿特性为负载提供稳定正弦电压, 从而通过抑制电压波动来抑制间谐波^[6,7]。串联电压补偿器装置由五部分组成: 检测单元、控制单元、逆变单元、储能单元、滤波单元, 如图 1 所示。

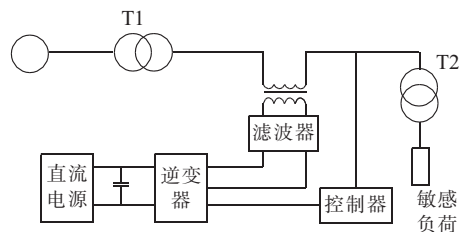


图 1 串联电压补偿器结构原理图

串联电压补偿器通过检测电源电压的基波分量, 然后和母线电压比较得到电压差, 通过控制单元运算得到

指令信号,对逆变器进行控制,产生需要的补偿电压;再经过滤波电路和变压器,叠加到负载电路中,从而确保负载电压的质量。

2.1 检测单元

根据电力系统电流、电压的特点,用傅里叶级数展开,即:

$$f(t) = \sum_{k=1}^M [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)] = \sum_{k=1}^M A_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (4)$$

式(4)中: $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$; $\varphi_k = \arctan(a_k/b_k)$ 。

对式(4)两边求导可得:

$$f'(t) = \sum_{k=1}^M A_k k\omega \cos(k\omega t + \varphi_k) \quad (5)$$

$$g(t) = f'(t)/\omega = \sum_{k=1}^M A_k k \cos(k\omega t + \varphi_k) \quad (6)$$

构成二维空间中的一个点 $[f(t), g(t)]$, 以二维空间中原点为圆心, 终点为 $[f(t), g(t)]$ 的向量 F 。现定义另外 2 个向量, 向量 $F_1 = (\sin\omega t, \cos\omega t)$ 与向量 $F_2 = (\sin(\omega t + \pi/2), \cos(\omega t + \pi/2)) = (\cos\omega t, -\sin\omega t)$ 。由于 ω 是已知的, 所以上述 2 个向量可以自己构造得到, 利用向量的点积, 可以得到:

$$\begin{aligned} F \cdot F_1 &= f(t)\sin\omega t + g(t)\cos\omega t = A_1 \cos\varphi_1 + \\ \sum_{k=2}^M A_k [\sin(k\omega t + \varphi_k)\sin\omega t + k\cos(k\omega t + \varphi_k)\cos\omega t] &= \\ A_1 \cos\varphi_1 + \tilde{P}_1 &= P_1 + \tilde{P}_1 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} F \cdot F_2 &= f(t)\cos\omega t - g(t)\sin\omega t = A_1 \cos\varphi_1 + \\ \sum_{k=2}^M A_k [\sin(k\omega t + \varphi_k)\cos\omega t + k\cos(k\omega t + \varphi_k)\sin\omega t] &= \\ A_1 \cos\varphi_1 + \tilde{P}_2 &= P_2 + \tilde{P}_2 \end{aligned} \quad (8)$$

由上面式(7)、式(8)可见, 向量 F 与 F_1 和 F_2 的点积中均含有直流分量与谐波分量。如果对点积结果进行低通滤波, 即可得到 P_1 和 P_2 , 如图 2 所示。因此可以得到信号 $f(t)$ 的基波分量, 即:

$$f_f(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) = \sqrt{P_1^2 + P_2^2} \sin[\omega t + \arctan(P_2/P_1)] \quad (9)$$

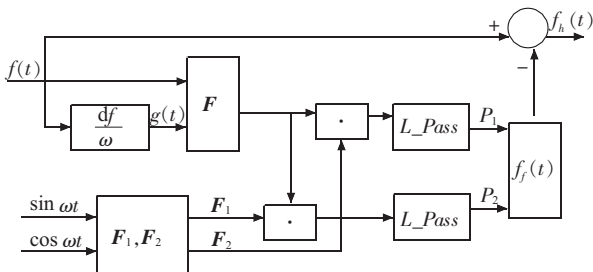


图2 单相谐波快速检测方法框图

2.2 逆变单元

逆变器为串联电压补偿器的核心单元, 它是基于全控器件的电压源型 PWM 逆变器, 通过逆变器对直流电压的逆变产生用于补偿系统电压波动的串联交流电压。为了研究串联电压补偿器的控制模型, 首先分析其数学模型, 从而得到控制的传递函数。这里采用三单相逆变器的单相系统进行分析, 单相逆变器模块功率部分的等效电路如图 3 所示。

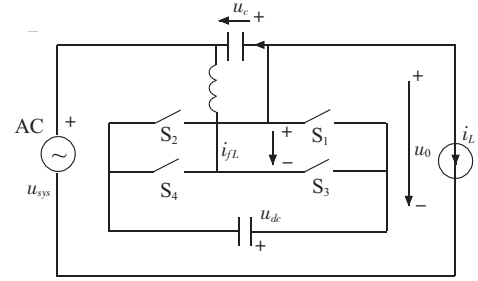


图3 单相串联逆变器功率电路

图 3 中, u_{sys} 为系统侧电压; u_c 为补偿电压; u_0 为用户侧电压; u_i 为逆变器输出电压; u_{dc} 为直流侧电压; i_{fc} 为滤波电容电流; i_{fL} 为滤波电感电流; i_L 为负载电流; L 为滤波电感; C 为滤波电容。

根据图 3 写出系统的状态方程:

$$i_L = i_{fL} - i_{fc} = i_{fL} - C \frac{du_c}{dt} \quad (10)$$

$$u_{sys} - L \frac{di_{fL}}{dt} + u_i = u_0 \quad (11)$$

逆变器的输出电压为直流侧电压的开关函数, 即:

$$u_i = S^* u_{dc} \quad (12)$$

假定逆变器开关只有 2 种状态, 即 S_1S_4 开通而 S_2S_3 关断, 或 S_1S_4 关断而 S_2S_3 开通, 则开关函数 S^* 与逆变器开关的开通和关断有如下关系, 即: $S^*=1$, 表示 S_1S_4 开通; $S^*=-1$, 表示 S_2S_3 开通。

将式(12)代入式(11)中可得:

$$u_{sys} - L \frac{di_{fL}}{dt} + S^* u_{dc} = u_0 \quad (13)$$

由式(13)可知, 式(13)表示的是不同取值情况下的 2 个状态方程, 当开关频率远远高于被调制的基波频率时, 可以采用一个开关周期内状态平均的方法, 用一个开关周期内两个状态持续时间的平均值取代 S^* , 记为 $\overline{S^*}$, 则状态方程可以改成下式, 即:

$$u_{sys} - L \frac{di_{fL}}{dt} + \overline{S^*} u_{dc} = u_0 \quad (14)$$

根据规则采样条件下 PWM 开关信号产生原理, 得:

$$\overline{S^*} = m \sin \omega_r t_d \quad (15)$$

则逆变器的输出电压可以写成:

$$u_i = m \sin \omega_{ri} \cdot u_{dc} \quad (16)$$

因此,单相串联逆变器的状态方程为:

$$\begin{aligned} \frac{du_c}{dt} &= \frac{1}{C} (i_{fL} - i_L) \\ \frac{du_c}{dt} &= \frac{1}{L} [u_{sys} + m \sin(\omega_r t_d) u_{dc} - u_0] \end{aligned} \quad (17)$$

将逆变器等效为一个增益 $k_m = u_{dc}$ 的线性环节,因此可以用 $u_i = k_m u_r$ 表示逆变器的输出和调制波的关系。根据单相串联逆变器的状态方程式,得到用传递函数表示的系统状态空间的模型框图,如图4所示。

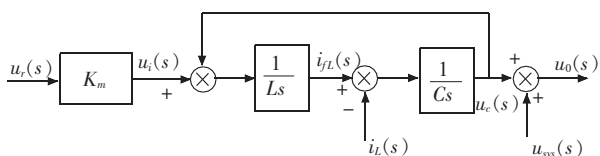


图4 系统传递函数模型

2.3 控制单元

2.3.1 前馈控制

前馈控制具有较快的响应速度,控制方法简单,因此在很多场合都采用这种控制方式。它的控制过程为通过对系统电压进行基波检测,检测后的基波分量电压减去系统电压,得到参考补偿电压,然后用 SPWM 方式产生逆变电路的驱动脉冲,逆变器向系统注入补偿电压,其框图如图5所示。

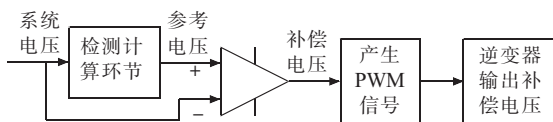


图5 串联电压补偿器控制原理框图

利用图5所示的传递函数框图,可以得到在这种控制方式下的传递函数:

$$u_0(s) = \frac{K_m}{1+LCs} u_r(s) + u_{sys}(s) - \frac{1}{1+LCs} i_L(s) \quad (18)$$

由式(18)可知,负荷侧输出电压 u_0 不仅仅与电压基准信号有关,还与滤波参数、负载电流以及系统侧输入电压有关。

2.3.2 输出电压反馈控制

为了获得更好的负载调节特性和稳定的输出电压,可以对输出电压进行直接控制。输出电压有效值反馈控制可以稳定输出电压有效值,但会使补偿器的响应速度变慢,导致补偿器的响应时间在一到几个周波以上,因此一旦系统电压发生动态跌落,补偿器将来不及快速补偿,从而影响敏感负荷工作。输出电压瞬时电压控制可以调节参考电压和输出电压瞬时值之差,因此可以大大提高输出电压的响应速度与动态性能^[8,9]。但仅仅采用电压瞬时控制的方式对于非线性负载的适

应性并不是很好,同时系统的稳定裕度不高,参数设计比较困难。为了减小负载电流的影响,这里引入具有电流瞬时值反馈的控制方法,采用电压瞬时值作为外环控制,确保负荷电压侧电压能够快速跟随参考电压,保证装置具有良好的响应速度;而将电流局部反馈控制作为内环控制,以提高补偿器对参数及负载的独立性,确保在各种负载工况下装置的稳定运行,如图6所示。

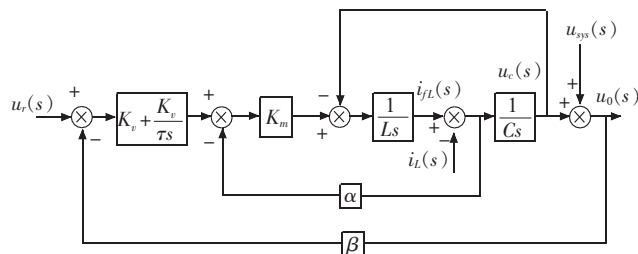


图6 双闭环控制系统框图

输出电压 u_0 和参考电压 u_r 之间的开环传递函数、闭环函数分别为:

$$G_{or}(s) = \frac{\beta K_m K_v (1 + \tau s)}{\tau s (LCs^2 + K_m C\alpha s + 1)} \quad (19)$$

$$G_{cr}(s) = \frac{K_m K_v \tau s + K_m K_v}{LC\tau s^3 + K_m C\alpha \tau s^2 + \tau s (1 + K_m K_v \beta) + K_m K_v \beta} \quad (20)$$

选择合适的参数从波特图可以看出系统具有较好的稳定裕度,并且在低频时输出电压可以跟踪参考电压,具有良好的低频特性。

负载电流 i_L 和输出电压 u_0 的传递函数:

$$G_{ci}(s) = \frac{-L\tau s^2}{LC\tau s^3 + K_m C\alpha \tau s^2 + \tau s (1 + K_m K_v \beta) + K_m K_v \beta} \quad (21)$$

$G_{ci}(s)$ 反映了输出电压受负载电流影响的情况。在装置损耗及器件开关频率允许情况下,选择高一些的开关频率有利于提高补偿器对负载的适应能力。

输出电压 u_0 与系统电压 u_{sys} 的闭环开环传递函数:

$$G_{csys}(s) = \frac{\tau s (LCs^2 + K_m C\alpha s + 1)}{LC\tau s^3 + K_m C\alpha \tau s^2 + \tau s (1 + K_m K_v \beta) + K_m K_v \beta} \quad (22)$$

从系统的单位阶跃响应可以看出,输出电压对于系统电压的阶跃变化具有很好的稳态响应,静态误差趋向于0。

2.4 滤波单元

如图7所示。为了使负荷输出侧输出电压中含有较低的谐波分量,首先要防止逆变器开关动作时的特征谐波叠加到负荷侧,同时也要防止特征谐波干扰系统电压,所以通常将滤波器的截止频率设计在远小于逆变器开关频率处,目的是消除特征谐波,即:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < \frac{f_{sw}}{K} \quad (23)$$

式(23)中: f_{sw} 为逆变器开关频率; K 为根据实际情况选取(通常 $K>10$)。

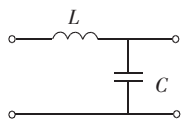


图7 滤波系统

滤波器参数设计步骤:(1) 确定开关频率;(2) 确定滤波器截止频率;(3) 根据负载电流的大小确定滤波电感参数;(4) 根据截止频率确定滤波电容参数^[10]。

3 仿真系统

一个典型的电弧炉供电系统如图8所示。ST为配电变压器, R_p 和 X_p 为配电变压器至电弧炉变压器FT之间传输线的电阻和电抗, R_c 和 X_c 是电弧炉变压器至电弧炉间的电阻和电抗。电弧炉的电阻为变化的属于非线性负荷,而且冶炼周期很长,在运行过程中,特别是在熔化初期(起弧、穿井、塌料阶段)变化剧烈,系统侧电压中将含有各种频率的间谐波,从而引起系统侧电压波动和闪变^[11]。

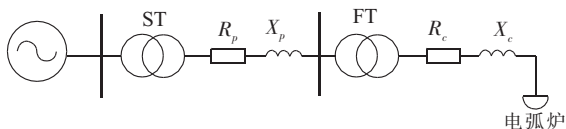


图8 电弧炉系统原理图

通过拟合电弧炉系统侧电压曲线,电阻时变性引起的8 Hz左右的电压闪变成为电弧炉对系统的最大危害,一个典型的电压曲线拟合图如图9所示。

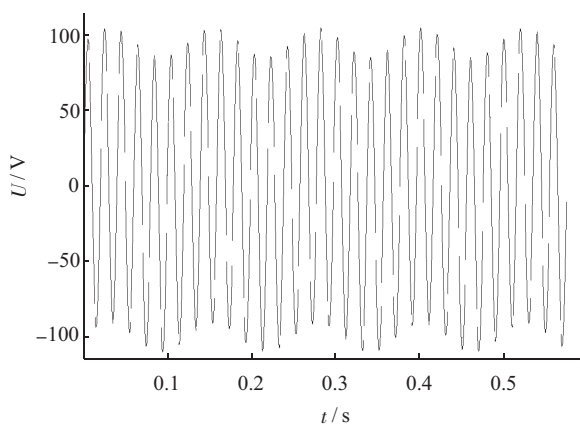


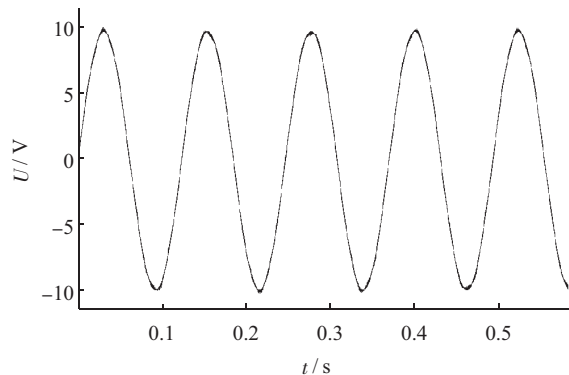
图9 原始电压波形图

经FFT分析,基波电压幅值100 V,频率为50 Hz,间谐波电压幅值10 V,频率为8 Hz,则最大电压波动:

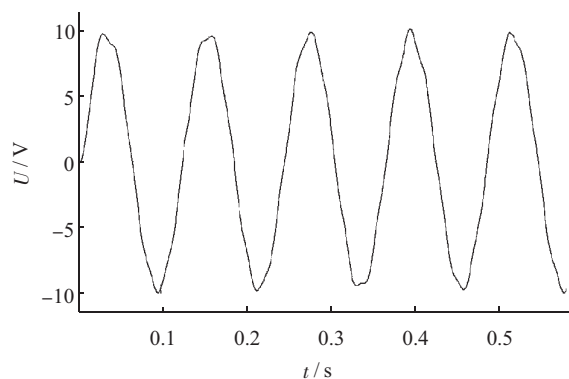
$$d_{\max} = \frac{u_{\max} - u_{\min}}{u} \times 100\% = \frac{110 - 90}{100} \times 100\% = 20\%$$

在SIMULINK环境下搭建仿真模型,在线路中串入串联电压补偿器。通过检测系统分析计算后得到原

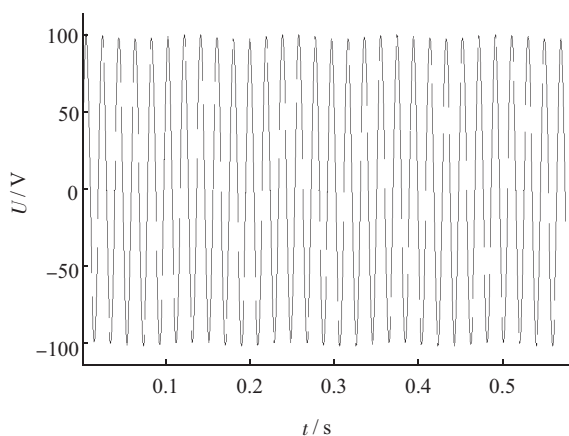
始电压的基波电压图如图10(a)所示。由于采用开环控制,逆变器输出的电压受50 Hz的基波的干扰,因此包含一定频率的基波电压。逆变器输出的补偿电压波形图如图10(b)所示;补偿后的电压波形图如图10(c)所示。



(a) 检测的基波电压波形图



(b) 补偿电压波形图



(c) 补偿后的系统电压图

图10 系统仿真波形图

投入串联电压补偿器之后,经FFT分析电压波形中存在50 Hz基波和8 Hz间谐波,但8 Hz的间谐波从10 V降到了1.2 V,则电压的最大波动为:

$$d_{\max} = \frac{u_{\max} - u_{\min}}{u} \times 100\% = \frac{101.2 - 98.8}{100} \times 100\% = 2.4\%$$

因此采用串联补偿的方式则很好抑制了间谐波,降低了电压波动,并达到国家标准,抑制了闪变。

4 结束语

(1) 基于间谐波的电压特性分析, 当基波电压叠加间谐波电压时, 电压呈现波动状态, 且引起荧光灯闪变, 峰值电压波动取决于间谐波电压大小, 与间谐波频率无关。

(2) 串联电压补偿装置控制单元引入前馈控制和输出电压反馈控制方法, 通过计算分析表明, 电压反馈作外环控制、电流反馈作内环控制的控制方法具有良好的响应速度和稳定性。

(3) 根据电弧炉与串联补偿装置仿真模拟, 将电压波动值从 20% 降到 2.4%, 有效地抑制了电弧炉产生的电压波动和闪变。

参考文献:

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 王育飞, 李东东, 贾宏新. 闪变仿真法在电弧炉供电系统中的应用[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2317-2321.
- [3] 周海兵, 雍 静. 间谐波电压作用下荧光灯的闪变研究[J]. 低压电器, 2009(2): 38-41.
- [4] 韩民晓, 尤 勇, 刘 昊. 线电压补偿型动态电压调节器 DVR 的

原理与实现[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 49-53.

- [5] 张 允, 胡晓磊, 邹云屏. 动态电压恢复器的负载电流直接控制策略[J]. 电力电子技术, 2009, 43(5): 5-6.
- [6] 任永峰, 安中全, 赵 喜. 采用小波变换和同相位补偿的不间断动态电压恢复器[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 757-762.
- [7] 王 晶, 徐爱亲, 翁国庆. 动态电压恢复器控制策略研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 145-151.
- [8] 周 晖, 齐智平. 动态电压恢复器检测方法和补偿策略综述[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 23-29.
- [9] 周雪松, 张智勇, 马幼捷. 动态电压恢复器双闭环控制策略的研究[J]. 电力电子技术, 2007, 41(6): 34-36.
- [10] 毕向阳, 朱 凌. 无源滤波器的设计及仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(5): 22-25.
- [11] 王育飞, 潘艳霞, 姜建国. 基于 MATLAB 的交流电弧炉随机模型与仿真[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 973-977.

作者简介:

杨志新(1968), 男, 江苏溧阳人, 高级工程师, 从事计量管理和研究工作;
杨世海(1976), 男, 安徽淮北人, 高级工程师, 从事计量管理和研究工作。

Research of Inter-harmonics Suppression Technology Based on Series Compensation

YANG Zhi-xin, YANG Shi-hai

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: With the increase of non-linear loads and widely usage of power electronic technology in power grid, there have been a large number of harmonics and spread spectrum inter-harmonics in the grid recently. Inter-harmonics have caused more serious hazards than harmonics, such as voltage fluctuation and flicker. Studies of inter-harmonic are still at the stage of characteristic analysis and detective algorithm, without reliable and effective suppression method. This article presents a harmonic suppression technology based on a series of compensation, conducting simulations to demonstrate its effectiveness to suppress the inter-harmonic. The characteristic of voltage fluctuation caused by harmonic is first introduced; then the principle and structure of series compensation are pointed out; finally, by modeling and simulation, series voltage compensator is proved effective to suppress inter-harmonics.

Key words: series compensation; inter-harmonic; electric arc furnace; power quality

(上接第 37 页)

Application of AGC/AVC in Photovoltaic Power Station

WEI Shi-gui, LIU Shuang

(Nanjing Sino-German Protection & Substation Control System Co.Ltd., Nanjing 210061, China)

Abstract: High-capacity photovoltaic power generation system connected with grid has some influences on the control of system power exchange and voltage quality in high-voltage power transmission grid. For the safety and stability of power system and improving the quality of power supply, AGC/AVC should be allocated in photovoltaic power station. This paper introduces the structure, control method, control strategy and control flowchart of AGC/AVC in photovoltaic power station. The system has been successfully used in photovoltaic power stations in Ningxia Province and achieves good results.

Key words: photovoltaic power station; AGC; AVC; control strategy

地区电网运行方式辅助分析系统的研究和应用

吴 强^{1,2}, 殷 伟², 姜学宝²

(1.华北电力大学,北京 102206;2.苏州供电公司,江苏 苏州 215004)

摘 要:利用现有系统的图形、数据库、模型一体化信息,开发一个图形化的电网运行方式预安排平台。在此平台上,运行方式人员可以方便地从调度信息管理(OMS)系统获取停电申请单的相关信息,并根据停电申请单信息自动置位到该申请单对应的未来研究态,在此研究态下运行方式人员可以根据自己的思路进行电网运行方式预安排或者调用历史运行方式安排记录,确认后该平台软件可以自动调用安全校核专家算法进行客观评价分析和防误逻辑检查,从而确保电网运行方式安排的安全性和合理性,辅助运行方式人员的决策。

关键词:图库模一体化;运方安排;防误逻辑检查;安全校核

中图分类号: TM727

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)02-0043-04

随着调控一体化工作的推进,苏州五县(市)的 110 kV 电网的调控权由县(市)调调度管辖改为苏州地调调度管辖,从而导致日检修运方安排工作量增大至少 100%,而苏州地调负责日检修运方安排的人员没有增加。在日检修运方安排时,需要查阅大量的数据,很费时费力。通过运行本系统,可以明显提高了日检修运方安排工作效率,减轻日检修运方员工作强度,以适应大量增长的工作任务。系统通过运行历史总结经验形成一套安全校核体系,结合负荷情况,能够对日检修运方员的安排内容进行安全校核,客观的评价是否会造成越限、是否会造成 110 kV 变电站同电源供电等。特别是日检修运方员对新增的各县(市)的 110 kV 系统需要一个熟悉的过程,在此过程中,稍有疏忽就有可能出现不合理的运行方式,存在安全隐患,通过软件的校核功能,可以有效消除该隐患。通过本系统的应用,使运方安排工作从手工阶段过渡到图形化、智能化阶段,符合电网应用智能化的趋势。

1 系统方案及功能

1.1 系统的图形化管理功能

系统提供了登录管理、图形列表查找、链路显示等功能。

(1) 系统设计了日检修运方员登录界面,只有认证用户才能使用本系统。

(2) 系统提供变电站、联络图目录列示功能,可以从变电站、联络图目录界面上点击名称链接到对应的一次主接线图上。从变电站一次主接线图中也要提供快速链接到其他相关图形的功能。变电站目录界面提供按拼音字母查找功能、按输入查询的功能等。

(3) 系统提供方便、快捷的设备查找功能,可以通过输入以“全字匹配”或“包含”等方式方便地查找

到所要的目标,双击目标可以自动定位到该设备。同时,在各画面之间,通过关联的线路或者设备可以直接链接到相关的画面上,方便画面之间的切换。

(4) 系统提供供电支路的单独显示功能,通过双击或菜单方式,方便地显示某条线路供电的所有分支及联络情况,并经过裁剪和排版后自动在一屏上显示,并实现随着运行方式的变化而变化。系统提供复杂链路的简化显示功能,将相关的连接在一屏上显示,实现复杂线路的简化显示。

(5) 系统具备图形抓屏移动和放大等功能,将模拟图中变电站进行分类排列,方便调度员查找。

(6) 提供图形化年度运行方式和夏季运行方式管理的界面,在此界面上,运方员可以自由地进行运行方式置位,置位完成后,将确认的年度或夏季运行方式保存在数据库,日后可以切换或调用此运行方式。

1.2 电网运方安排及安全校核功能

(1) 运方置位操作功能。提供系统各种设备(包括开关、刀闸、线路等设备)的变位操作菜单,以便运方员根据自己的意图进行运行方式的置位。操作内容包括开关运行改为冷备用、热备用,开关热备用改为运行、冷备用,开关冷备用改为运行、热备用,拉开、合上刀闸,线路冷备用改为检修、线路检修改为冷备用等。

(2) 运方分析、校核功能。运方分析、校核功能通过校核算法来体现,对运方手工置位的运行方式通过该算法来分析,给出校核的结论。该算法需要总结运方员进行运行安排的工作经验,需要针对不同的运行方式、不同接线方式整理出影响运方安排合理性、合理性的若干要素,对这些要素进行分析研究后形成计算机算法^[1,2]。在运方员进行置位操作后,按照当前实时数据(汇总折算后的数据)进行安全校核。

是否有设备越限(主变、线路等),根据实时数据的汇总(统计最近一个月或其他实效内的最大负荷),结

合线路或主变的最高限额进行校核,看该运行方式下是否存在设备越限的情况(接近限额的80%也给出提醒)。是否会造成110 kV变电站(如某变电站1号、2号主变)同电源供电。若某110 kV变电站同电源供电,则可能会因为上级电源故障而造成全站失电,需要尽量避免。这也是本系统重点校核的内容。

(3) 运方安排数据的存储管理。存储每个设备的运方安排记录,在下次进行该设备运方安排时,可以调取,自动执行其运方调整步骤,并按照当前实时数据进行安全校核,实现历史记录的重复使用。

(4) 历史运方的调用和自动置位。存储已发生的运方安排,并可以检索并调用,对未来态已经存储的运方安排按照时间顺序自动置位,实现运方安排的连续性和预置功能。

(5) 年度运方的存储和调用管理。有些运方安排是建立在年度运方的基础上,而不是当前系统的实际运行方式,故系统提供了年度运方的存储和调用管理,提供图形化年度运行方式管理的界面,在此界面上,运方员可以自由地进行年度运行方式置位,置位完成后,自动将确认的年度运行方式保存在数据库。在需要查看年度运行方式时,通过按钮可以切换至年度运行方式显示模式,并可在此模式下进行相应运方安排工作。

(6) 夏季运方的存储和调用管理。同上述(5),提供夏季运方的存储和调用管理,以方便运方员查看夏季运行方式及开展相应的运方安排工作。

1.3 系统用户权限及数据库管理功能

(1) 用户和权限管理,包括用户及权限认证管理。

(2) 系统参数设置管理,包括电压等级颜色、系统备份参数设置等。

(3) 数据备份管理,实现数据库定时异地全备份功能,可以将系统数据库中的所有数据以文件方式备份至服务器之外的计算机上,可以设定时间,每天定时备份。提供备份数据的恢复工具,方便数据恢复^[1]。

(4) 数据统计查询等功能,提供多种统计数据的查询,如年度各主变或线路等最大负荷等(通过读取实时系统的参数来获得),为运方员或其他相关人员提供一些常用的查询统计功能^[1]。

2 系统设计方法

2.1 系统体系结构设计

2.1.1 硬件结构设计

系统硬件为运方员配置专用的工作站计算机,接入地调的调度防误操作系统所在的三区网络,运方安排工作生成的数据存储在地调防误操作系统的服务器中。为了保证数据工作的网络安全性,通过硬件防火墙为系统提供网络防护。硬件运行结构如图1所示。

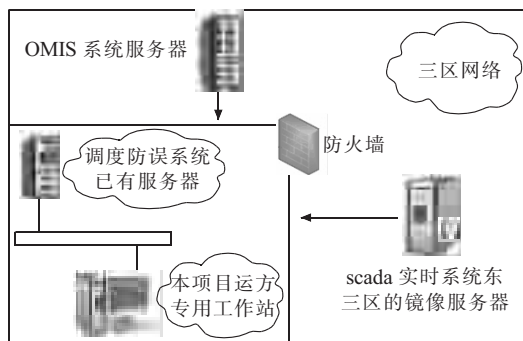


图1 系统硬件运行结构图

其中,运方工作站要求配置内存4 G以上、双CPU(2.0 G以上主频)、硬盘150 G以上、独立显卡(显存512 M及以上)。防火墙设备要求采用千兆网防火墙,要具有强大的病毒过滤功能,包括网页防毒、电子邮件防毒、文件传输防毒、病毒过滤日志等;提供URL访问控制、抗攻击设置、防火墙日志等防火墙功能;基于路由的SSL VPN,在通过IP层面的连接充分保障应用兼容的同时,还提供了细粒度的访问控制,保证用户的全网访问。

2.1.2 软件架构设计

系统软件主要包括“大运行”体系下地区电网运行方式辅助分析软件及2个接口程序(与OMS系统、与SCADA系统)。“大运行”体系下地区电网运行方式辅助分析软件通过读取地调已有的调度防误操作系统图模数据,为运方员提供一个图形化运方工作界面,与OMS系统接口实现从OMS系统读取申请单及运方批复内容的回写,与SCADA系统的接口实现从SCADA系统在三区的镜像服务器中读取准实时数据,用于显示和分析计算^[1]。系统软件架构如图2所示。

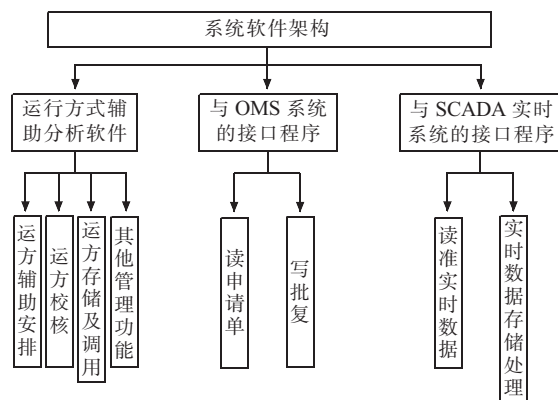


图2 系统软件架构图

2.2 关键技术设计和实现

2.2.1 逻辑校核专家算法的研发

该技术内容实现了运方安排内容的校核,考察运方安排是否满足当前防误模拟屏的防误逻辑,是否会引起设备过载等。主要校核的内容一是考察安排的内容是否满足调度倒闸操作规定;二是要保证在操作过

程中不能发生设备过载;三是对运方安排的设备最终状态进行验证^[2]。

同时,安全校核遵循的原则:(1)按方式调整的顺序先后自行逐行验证,不需要人工干预。(2)验证结论应与操作方法对应,停电操作要提供停电范围供核对。(3)合解环后经过合解环潮流分析估算和简单负荷电流计算,合理的调整方式,均不能发生设备越限。

安全校核算法设计思路:(1)在操作执行过程中,检查操作的正确性,即防误逻辑检查。按照调度倒闸操作规定,为各种操作设定不同的约束条件,当执行这些操作的时候,逐一验证操作是否满足这些约束条件。这些约束条件是依据网络拓扑自动生成的,不是维护的、指定的,是计算机按照接线方式分析的结果。(2)在操作执行后,检查操作结果的正确性。按照操作任务目的,来检查操作后的状态是否满足任务目的。包括是否会过载、合解环是否会出现得失电情况、是否有保电任务、操作执行后设备的最终状态是否正确等。(3)校核时自动取该运方安排开工时的时间断面进行防误逻辑检查,以保证能够验证在时间上存在重叠的多个运方计划安排之间是否存在影响。包含的内容一是其他已开运方是否影响到本次运方安排;二是本次运方安排是否对其他已开运方造成影响。

举例说明苏州运方安排时重点考虑的是否会造成变电站同电源供电的判别,该判别最为复杂,系统在设计时采用了四层逻辑分析。例如金山变1号主变检修,只剩2号主变在运行的时候,要检查2号主变供电范围内的所有110 kV变电站是否存在同电源供电的情况。例如:检查新升变的1号、2号主变是否都由金山2号主变供电的,假如是,要提出提醒,新升变1号、2号主变是金山变2号主变同一电源供电,运行方式不合理。其关键就是在运方安排后检查新升变的2台主变是由同一电源供电的。首先搜索到这2台主变供电的110 kV母线,假如是同一母线供的,且正好另一母线在检修(无电状态),则提示。假如不是同一母线,再向上追溯是否是某220 kV变电站的同一主变供电,假如是,而且该220 kV变电站的另一台主变在检修,则提示;假如不是同一主变供电,再向上追溯是否是某220 kV同一母线供电的,假如是,且该变电站的另一条220 kV母线在检修,则提示;假如不是220 kV同一母线供电,则再向上追溯,看是否是220 kV同一条线路供电的,假如是,且该变电站其他的220 kV线路正在检修,则提示。总共是4级搜索,220 kV线路以上就不再考察了。另外逻辑校核算法还判断运方安排是否满足调度防误逻辑,包括是否存在检修的情况、是否会造成保电用户失电等。

2.2.2 运方安排未来研究态的正确置位

该技术内容主要是为运方员提供方便、快捷的使用界面。这个界面是一个图形化的操作界面,图形数据取的是当天实时《防误型调度模拟屏管理系统》的断面,在此断面上,将前面已经生成的运方计划按照时间先后依次置位,形成最终图形界面,运方人员可以在此界面上再生成新的运方计划安排,按照停电时间插入到已有的运方计划安排中,也可以手工切换到任一已生成的运方计划安排的断面。

在任一时间断点来看,已经安排好的检修申请和还需要处理的检修申请的量都是很大的,靠运方人员记忆已处理的检修申请很难,在进行的运方安排时又必须兼顾已经安排好的检修申请,运方人员在处理互相有时间制约、互相有影响的检修申请时,必须要预先清楚的知道申请停电时间时的状态,传统的工作方式要做到预先知道很费力,只能靠运方人员的记忆和思考。而通过计算机来处理就很方便。在设计新的运方计划时,系统自动将时间断面切换到新的计划停电时间断面,将在此时间断面之前已处理的检修申请内容全部进行置位,从而给使用人员一个超前的图形化界面,使用人员这时候看到的运行方式就是将要设计的运方计划开始前的状态。

2.2.3 智能匹配技术的开发

主要是有两方面使用此技术,一是与调度自动化(SCADA)系统的接口,一是与调度管理(OMS)系统的接口。从SCADA系统或OMS系统读取的信息要通过设备名称与本系统进行匹配^[3]。例如:开关、线路等通过三方面要素进行匹配,变电站名称、编号、命名,只有这三点全部正确才能匹配上,本系统从OMS系统或文件中读取申请单后,使用文字智能识别技术对申请单上的内容进行智能识别,从而获得正确的停电设备名称、调度批准停电时间、是否检修操作和备注说明等信息。在软件正确识别后,点击“生成运方安排”按钮,即可以自动调用日检修运方安排生成模块,进入运方生成流程。

3 系统应用效果

3.1 系统图形化提高工作效率

随着调控一体化的推进,苏州五县(市)的110 kV部分的调控权将划归苏州地调,从而导致日检修安排工作量增大至少100%,而苏州地调前负责日检修和运方安排的人员没有增加。在日检修运方安排时,需要查阅大量的数据,很费时费力。通过本系统,能够明显地提高日检修运方安排工作效率,减轻运方员工作强度,以适应大量增长的工作任务(增加了苏州各县、市管辖的110 kV部分)。

例如某出线断路器检修。运方安排时若采用合解

环方式来进行,运方人员传统的做法是:(1) 根据现有图形资料,查看有几个可以合解环的点,平均通常需要花费 5~10 min。(2) 记下所有合解环点对侧的线路,平均通常需要花费 5~10 min。(3) 查看当前该断路器所带线路的负荷情况,1 min。(4) 查看所有可以合解环点对侧线路的负荷情况、额定值,必要时,还需要查看对侧线路所在系统主变的负荷情况,甚至要考虑线路、主变三天或七天内的负荷峰值。平均通常需要 10~60 min。(5) 最后分别来对可以合解环的路径进行分析哪个方案比较好(通常也会凭借经验判断),最终确定一个最佳方案。这一步若是仔细分析、计算,可能需要花上数小时。

所以综合以上几步的时间,对于支线较多的复杂线路,若用严肃、规范、可靠的态度去做,可能需要几个小时。即便是凭借经验,也需要核对很多资料,花费的时间也很多。然而,采用系统软件,从流程开始到最终运方安排方案的生成,最多只需要几分钟,甚至更少。且计算机处理的数据:(1) 在图形上查看可以合解环的路径,并进行手工模拟置位操作,平均不超过 1 min(通过相关链接显示功能,可以清晰地查看相关的连接清冷)。(2) 得出所有合解环点对侧的线路,平均不超过 1 s。(3) 获取当前该开关所带线路的负荷,通过接口程序去 OPEN3000 实时系统查询,不超过 1 s。(4) 获取所有可以合解环点对侧线路的负荷情况、额定值,以及对侧线路所在系统主变的负荷情况,不超过 1 s。(5) 对该合解环的路径方案进行防误和潮流分析验证,不超过 10 s。

软件总计算时间不会超过 2 min。因此,通过系统来验证合解环方案具有较高的效率,能够有效地提高运方安排的工作效率和安全性。

3.2 系统自动化提升日运方安排安全性

系统通过总结经验形成一套校核体系,结合负荷情况,能够对运方员的安排内容进行安全校核,客观的

评价是否会造成越限、是否会造成 110 kV 变电站同电源供电等。特别是运方员对新增的各县局的 110 kV 系统需要一个熟悉的过程,在此过程中,稍有疏忽就有可能出现不合理的运行方式,存在安全隐患,通过软件的校核功能,可以消除该隐患。

3.3 系统智能化提升调度管理水平

通过系统应用,使运方安排工作从手工阶段过渡到图形化、智能化阶段,符合电网应用智能化趋势^[3]。

4 结束语

该系统目前已经在江苏省电力公司苏州供电公司地调部门投入使用,为运方人员拟写的运行方式安排提供了一种客观的辅助分析和校核手段,改变了以往完全凭经验主观判断的状况,为保证电网的安全、稳定、经济、优质运行提供了科学的服务手段。今后,在此系统的基础上,还需进一步开发智能应用,使计算机能够按不同操作场所或按不同先后顺序,自动生成一套正确的、科学合理的日检修运方安排,实现运方调整的最优方案。这样既能确保运行方式安排科学合理,又能极大地减轻日检修运方人员的工作强度、提高工作效率,从而进一步提高电网安全运行水平。

参考文献:

- [1] 李于剑. Visual C++ 实践与提高(图形图像编程篇)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [2] 王世祯. 电网调度运行技术[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1997.
- [3] 王成山, 王守相, 郭力. 我国智能配电技术展望[J]. 南方电网技术, 2010, 04(1): 7-12.

作者简介:

- 吴强(1978),男,江苏吴江人,工程师,从事电网调度和生产运行管理工作;
- 殷伟(1971),男,江苏常熟人,高级工程师,从事电网调度运行管理工作;
- 姜学宝(1977),男,江苏东海人,高级工程师,从事电网调度运行技术工作。

Research on assisted analysis System of Regional Power Grid Operation Mode and Its Application

WU Qiang^{1,2}, YIN Wei², JIANG Xue-bao²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China)

Abstract: Taking advantage of the existing system graphics-database-model integration information, a graphical power grid operation mode preliminary arrangement platform is developed. On this platform, operation mode personnel can easily get relevant information about power cut application from operation information management system (OMS), and set to the corresponding future research state automatically according to the application information. In this study state, operation mode personnel can make preliminary arrangement for operation mode according to their own ideas or call history record of mode operation arrangement. After confirmation, the platform software can automatically call security check experts algorithm for objective evaluation analysis and make anti-misoperation logic check.

Key words: graphics-database-model integration; operation mode arrangement; anti-misoperation logical check; security correction

光学电流互感器实时误差分析系统的设计

陈铭明¹, 卢树峰¹, 包玉树², 梁 凯³, 王少华¹

(1.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏 南京 211103;2.江苏方天电力技术有限公司,江苏 南京 211102;
3.无锡供电公司,江苏 无锡 214101)

摘 要:光学电流互感器在江苏省智能变电站得到广泛应用,但投运后误差是否随着时间推移、电磁干扰、温度变化等因素大幅变化至今都没有相关实践数据。文中首先介绍了光学电流互感器的基本原理和存在问题,然后设计了误差比对装置的硬件构成和算法设计,最后通过江苏无锡西泾变的挂网运行,验证了比对分析系统的可行性。

关键词:光学电流互感器;误差;比对系统

中图分类号:TM452

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)02-0047-03

随着智能电网建设的深化推进,国网公司部署在多个省份开展智能化变电站的建设工作,光学电流互感器得到了广泛应用,对智能变电站的建设起到了引领和示范作用。各工程、科研相关机构对光学电流互感器投运后的误差运行状况密切关注,开展现场运行误差特性研究、为国网公司提供一线技术支持势在必行^[1]。为保证光学电流互感器的现场误差良好,在出厂前必须在规程规定的一次电流和二次负载下对光学电流互感器做误差测试,运抵现场安装后再对光学电流互感器做现场误差测试,消除安装环节、现场环境对误差的影响。但在现有的技术条件下,光学电流互感器投运后,对其误差特性缺少跟踪分析能力,导致对光学电流互感器长期运行下的计量特性无法作出准确的评估。相应评价目前尚属空白。

光学电流互感器在出厂前要经过误差测试,合格方允许供货。但由于光学电流互感器对温度、振动均敏感,在经过现场安装后再复测误差往往不再合格。特别是对于光学电流互感器与合并器供货商不同的情况,光学电流互感器在出厂前的误差测试是基于互感器本体,但现场安装后数字信号是基于合并器送出的数据集,即使互感器本体误差合格,经过合并器环节的数据处理、延时设定等环节后误差有不同程度的漂移。根据现场运行和计量测试的需要,对光学电流互感器的现场测试必须带合并器一同测试,实际测试数据表明,光学电流互感器现场组装完毕带合并器测试绝大部分甚至全部超差,需要现场调校,然后复测方能在 20%以上额定一次电流合格,对于轻载特别是 5%额定一次电流以下时,误差漂移、瞬变严重,甚至无法读取合理的数据。光学电流互感器投运后的误差是否会随着运行时间的变化而大幅度变化?特别是在实际运行时各种电磁干扰环境下光学电流互感器还能否稳定运行、误差是否始终合格?此类问题迄今尚

没有相关实践数据,因此对光学电流互感器现场运行误差特性进行在线实时比对分析对于全面研究光学电流互感器误差特性、光学电流互感器贸易结算性能评估和智能变电站计量装置配置方案优化均有重要意义。当前,电子式互感器因其在绝缘、通信传输、数据综合处理等方面的优势引起科研界与工程界的高度重视和广泛关注。误差比对分析装置由采样单元、同步单元、运算单元和传输单元组成,利用现场运行误差实时比对,实现光学电流互感器的现场运行误差数据存储及远程分析,为光学电流互感器的运行误差分析提供数据依据,实现光学电流互感器的实时监测现场运行误差,适用于同时具备光学和电磁式电流互感器的智能变电站。

1 光学电流互感器基本原理

常见的光学电流互感器工作原理主要为法拉第效应、逆压电效应和磁致伸缩效应,其中以 Faraday 效应为其工作原理的 F 光学电流互感器常采用偏振检测方法或利用 Faraday 效应的非互易性采用 Sagnac 干涉仪实现检测^[2,3]。由于 Faraday 效应具有非互易性。而光纤中的线性双折射具有互易性,二者之间这种差别使得采用 Sagnac 干涉仪实现电流传感成为很有吸引力的方案。Sagnac 干涉仪型 F 光学电流互感器又可分为环形结构和反射结构 2 种,其原理图如图 1、图 2 所示。其中,反射结构的光纤电流互感器具有优良的互易性和较强的抗外界环境干扰能力,是一个具有实用价值的光学电流互感器方案。

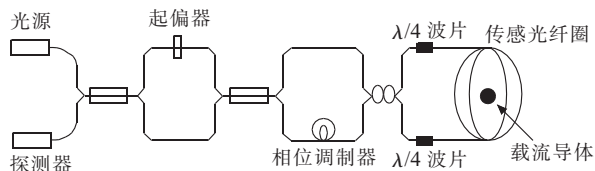


图 1 Sagnac 环形结构的 F 光学电流互感器原理图

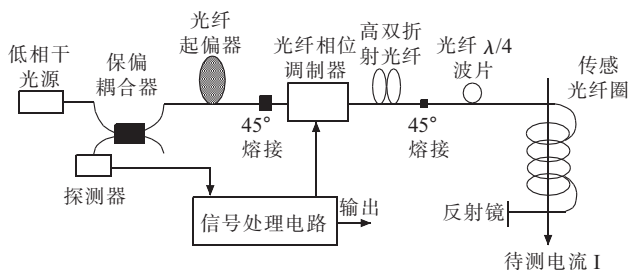


图2 Sagnac 反射结构的 F 光学电流互感器原理图

2 光学电流互感器存在问题

根据光学电流互感器的设计与制造工艺, 电流互感器的影响主要表现在置于户外的传感头的精度上。根据实际情况可分为下面两个温度源的影响: 一是缓慢变化的空间上均匀分布的环境温度; 二是变化复杂的空间上分布不均匀的温度。在均匀温度场中, 传感头中传播的光路径会因此发生变化, 进而使得光功率变化。对于这种影响可采用适当的数据处理方法来应对。在非均匀温度场中, 光学器件之间发生非均匀的热膨胀, 从而使之产生内应力, 引起附加温度应力双折射, 直接影响线偏振光的偏转角, 导致难以消除的测量误差^[4-6]。光学电流互感器实现的最大困难是其本身的光学系统折射效应会随环境因素变化而变化, 从而影响整个系统的精度和稳定性。其根本原因在于光纤的线性双折射效应对测量结果的影响; 降低系统灵敏度、可靠性和稳定性, 使测量结果与被测电流在光路内的位置有关等。归结 F 光学电流互感器在应用中应关注的问题如下:

(1) 使用寿命。寿命不仅和设计有关, 和材料元器件选择, 生产过程的工艺和质量控制也密切相关。

(2) 温度的影响。温度变化对光源、光纤光路、敏感环等带来影响。

(3) 长期运行稳定性。热老化、热循环、温度湿度循环、振动、热冲击、干热、湿热等。

(4) 小电流信号下的测量准确度。由于光学电流互感器通过光学检测来获取信号, 其中必定含有光学散粒噪声, 光学传感器的输出都会有噪声, 其衡量指标与使用信号的宽带有关。所以测试零电流也会有输出, 即噪声, 不过该噪声的均值为 0。目前可以测到 1 A 的电流。

3 误差比对系统的工作原理与结构

误差比对系统由采样单元、同步单元、运算单元和传输单元组成。采样单元, 用于光学电流互感器一次电流信号及电磁式电流互感器二次电流信号的采样; 同步单元, 用于采集到的光学电流互感器一次电流信号及电磁式电流互感器二次电流信号同步; 运算单元, 用

于计算光学电流互感器的一次电流信号和电磁式电流互感器的二次电流信号有效值、相位及频率, 并进行实时角差和比差计算, 得到实时比对误差数据; 传输单元, 用于将得到的实时误差数据与后台服务器进行数据交互^[7-9]。如图 3 所示。

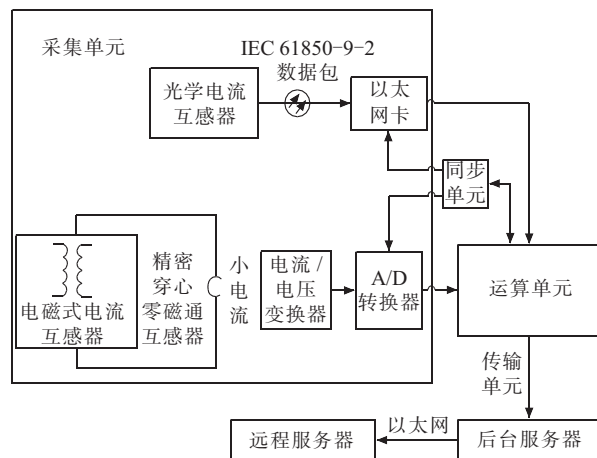


图3 光学电流互感器误差在线比对装置结构图

图 3 中采样单元包括精密穿心零磁通互感器, 用于将电磁式电流互感器 5 A 的二次电流转换成 10 mA 小电流信号; 电流 / 电压变换器, 用于小电流信号进行放大, 转换成电压信号; A/D 转换器采用 24 位的高精 A/D 转换器, 并以 4 kHz 的频率对电流 / 电压变换器输出的电压信号进行采样转换成数字信号, 供运算单元处理; 以太网卡, 用于光学电流互感器接收 IEC 61850-9-2 数据包, 并传输给运算单元处理, 所述精密穿心零磁通互感器的输入端与电磁式电流互感器的输出端相连接, 所述精密穿心零磁通互感器的输出端通过电流 / 电压变换器与 A/D 转换器的输入端相连接, 所述 A/D 转换器的输出端与运算单元相连接, 所述以太网卡的输入端与光学电流互感器的输出端相连接, 所述以太网卡的输出端与运算单元相连接, 所述以太网卡与 A/D 转换器设有同步单元。

同步单元在以太网卡接收 IEC 61850-9-2 数据包的同时记录 IEC 61850-9-2 数据包中 0 号包所对应的时标信息, 并输入给运算单元, 运算单元控制 A/D 转换器的采集频率, 实现同步采集, 运算单元还通过时标信息和 A/D 转换器的固有延迟时间进行同步的相位补偿。运算单元采用 DSP 处理器进行快速运算, 将电磁式电流互感器的二次电流的采样值进行快速傅里叶变换, 计算出有效值、相位及频率, 然后根据 IEC 61850-9-2 数据包中 0 号包所对应的时标信息和 24 Bit AD 的固有延迟时间, 补偿相位, 获得光学电流互感器与电磁式电流互感器的实时比对数据。传输单元采用 ARM 处理器, 将实时误差数据通过以太网与后台服务器进行数据交互。系统的硬件框图如图 4 所示。

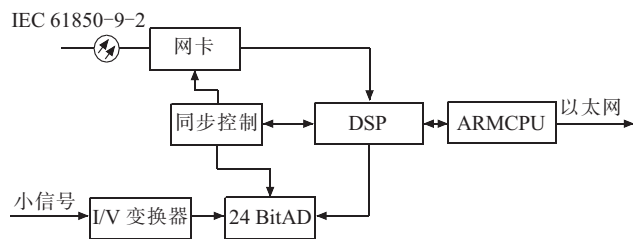


图4 比对系统硬件框图

4 比对算法

在线比对算法包括同步算法、误差比对算法和存储传输策略,其中同步是将光学电流互感器和电磁式电流互感器的电流信号进行同步控制,并传输给后续单元以便进行误差比对计算;误差比对是指通过数据处理单元模块进行幅值、频率、相位计算,并将两者进行比对得到实时比对误差;存储和传输策略是指大量比对误差数据本地存储和远程传输的控制策略。光学电流互感器比对系统算法控制流程如图5所示。

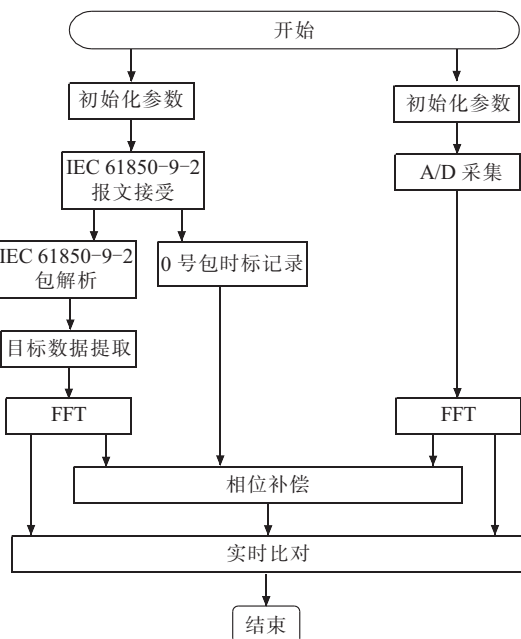


图5 光学电流互感器比对系统算法控制流程图

5 现场实施及效果

为保证挂网设备和电网设备的安全运行,现场安装设计方案采用传统电流互感器二次电流经精密电流互感器穿心两匝的方式获取二次模拟量电流信号,保证长期挂网运行的安全性,其原理如图6所示,为了验证电流环方式的准确性,比对装置的电流接口配置两套接插件,一套电流环式,一套回路接入式,在条件允许的情况下用短时间回路接入式的误差数据对电流环接入式的误差进行校核。

光学电流互感器实时误差分析装置挂网运行的4

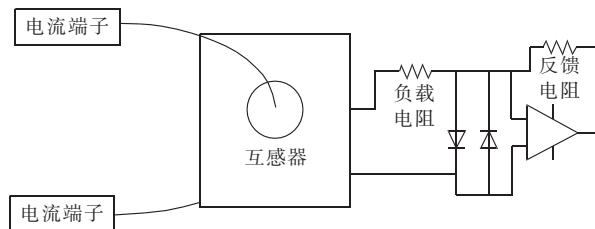


图6 现场挂网运行电流输入示意图

个月期间,运行安全,未发生任何设备、数据方面的问题,为光学电流互感器现场误差评估积累了大量的现场实时数据。

6 结束语

本文提出的光学电流互感器实时误差分析系统填补了国内光学互感器现场误差比对的空白。该方案通过实际研制已形成成品,并通过了误差校准测试以及电磁兼容测试,均符合挂网运行的技术条件。该装置并在无锡西泾变挂网运行4个多月时间,为光学电流互感器的运行误差分析提供数据依据,实现了光学电流互感器的实时监测现场运行误差,从而保证智能化变电站的电能量计的准确性和可靠性。

参考文献:

- [1] 王巍,张志鑫,杨仪松. 全光纤式光学电流互感器技术及工程应用[J]. 供用电技术, 2009, 26(1): 46-48.
- [2] 刘延冰,李红斌,叶国雄,等. 电子式互感器原理技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] 肖浩,刘博阳,湾世伟,等. 全光纤电流互感器的温度误差补偿技术[J]. 电力系统自动化, 2007, 35(21): 92-94.
- [4] 王夏霄,张春熹,张朝阳,等. 光纤电流互感器 $\lambda/4$ 波片温度特性及其影响研究[J]. 激光与红外, 2006, 36(7): 597-599.
- [5] 贾恺,姚寿铨. 光纤 $\lambda/4$ 波片的温度特性[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2009, 15(5): 457-460.
- [6] 王立辉,伍雪峰,孙健,等. 光纤电流互感器噪声特征及建模方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 62-66.
- [7] 陈文中,林一,周健. 数字化变电站全光纤电流互感器准确度校验[J]. 华东电力, 2009, 37(12): 2022-2024.
- [8] 刘晔,王采堂,苏彦民. 光学电流互感器线性双折射效应的补偿研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 1999(5): 25-27.
- [9] 童悦. 数字化输出的电子式电流互感器在线校验系统研制[J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1742-1746.

作者简介:

陈铭明(1986),男,江苏南通人,工程师,从事电能计量工作;
卢树峰(1972),男,山东高唐人,高级工程师,从事计量装置管理工作;
包玉树(1963),男,江苏徐州人,高级工程师,从事高压计量工作;
梁凯(1972),男,江苏无锡人,工程师,从事计量装置管理工作;
王少华(1980),男,江苏盐城人,工程师,从事关口计量装置检测工作。

居住区配电房智能运行系统的研究与实践

刘忠¹, 谢亮²

(1.扬州供电公司,江苏扬州 225001;2.江苏省电力公司,江苏南京 210024)

摘要:介绍了居住区配电房智能运行系统的研究解决方案和现场实践。通过研究确定配电房内各类设备基于 IEC 61850 标准的模型和新研制开发的支持 IEC 61850 协议的配电房智能信息终端,实现配电房信息的智能传输、处理,实现各类设备的即插即用、信息共享。通过开发面向全地区的配电房分布式智能运行平台,包括智能运行控制系统和智能运行辅助系统,解决了大量配电房无人值班的安全和经济运行问题,且社会经济效益显著。

关键词:智能运行系统;小区变;IEC 61850;智能信息终端

中图分类号:TM76

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)02-0050-04

目前各地供电部门对于大量存在的居住区配电房(以下简称小区变),全部采用无人值守、定期巡视的运行模式,基本上没有统一的远程监控管理。随着高层住宅的大量出现和居民生活水平的提高,对配电系统安全可靠供电的要求也越来越高。但供电部门往往难以及时发现小区变运行中出现的问题,当配电设备故障停电的时候,只有用户报故障后才能安排配电检修人员到现场查找故障点并排除故障,这个处理过程时间长,影响对客户的供电服务,是小区变运行维护部门比较烦恼的问题。如果能在设备故障停电发生时立即将告警信息发送到运行维护部门就可以大大加快故障处理的过程,降低故障造成的经济损失。同时,小区变一般会有2台以上的主变,每台主变的轻重载情况在不同时期和不同季节是不一样的。对大量小区变的经济运行问题,靠人工去监测和操作控制是不可能实现的任务。要运行好小区变,就需有符合现代管理体系要求的小区变智能监控系统。参考当前110 kV以上无人值班变电站的各类监控和辅助系统标准规范^[1],研发简单、可靠、智能化的居住区配电系统集成监控系统应该是可行的方法。

1 系统研发的目标和难点

首先研发符合 IEC 61850 协议的小区变内设备监控、消防、安防、视频监控、环境控制等系统的技术标准和信息传输协议;其次研发出集成有以上各类系统功能和具备信息分层分类管理功能的智能化小区变子站;最后开发出能与配电自动化系统集成的小区变一体化智能信息监控平台,对采集的信息数据进行筛选、分析,对出现的各类问题自动告警,实现居住区配电系统安全经济运行,保证供电电压质量。且需要解决的难点有:

(1) 解决小区变内各类信息的本地采集、处理和

存储,只将正常运行维护有用的信息上传至监控中心,减少各类信息上传量,保证千数量级的小区变在同时上传信息时满足实时监控的要求。

(2) 小区变内的智能信息监控终端功能在满足系统功能需求的前提下,装置要简单可靠,能通过远程控制,实现长期免维护运行。

(3) 提出基于 IEC 61850 协议的规范统一,满足系统功能要求并可扩展的小区变设备模型。

(4) 开发智能、实用、界面友好、主站和子站的功能能灵活配置的小区变运行监控平台。

2 解决方案介绍

2.1 信息采集传输

通过减少信息冗余,保证有用关键信息的及时上传,后台软件采用 JAVA 语言开发,构架为 C/S 方式,实现对视频、门禁、SCADA、安防等设备的数据采集,并满足数据的智能分析要求。针对小区变目前能够采集的数据进行梳理^[2],根据各类数据的作用进行分类,有运行负荷监控、故障原因分析、环境监视监测、工作提示、警示信息等;再确定需要主动上传的信息、被叫上传的信息、当地保留供查的信息等;同时对主动上传信息的重要程度进行分类,同样对被叫上传的信息和下发信息也进行分类;按重要性基本确定9类数据优先级,保证各类重要紧急数据的响应时间。系统设计中,在采集机中对任务按优先级管理,每个通讯信道都有一组优先级队列,通讯信道总是给予优先级高的任务优先执行且拥有更多的执行时间,优先级低的任务滞后执行且获得的执行时间较少。如表1所示。

2.2 智能信息监控终端

依据基本、必要的原则,确定智能信息监控终端功能的实现功能,尽量减少终端的元器件数量,加强集成度。实现智能测控功能;规约转换、信息转发功能;智能信息处理功能。智能终端负责小区变所有设备和智能

表 1 优先级定义 9 级

优先级	说明
1	最高级,用于执行一些紧急情况任务,如故障信息、警示信息
2	设备调试级,用于操作员对现场设备调试,如数据下发、状态查询
3	补采数据级,用于操作员对现场数据的补采
4	自动任务级,用于采集实时数据
5	自动任务级,用于采集曲线数据
6	自动任务级,用于采集事件数据
7	自动任务级,用于采集日、月数据
8	悠闲级,用于信道空闲时可以执行的任务,如查询电表时钟、状态等
9	空闲级,用于执行最低优先等级的任务

终端的接入,站控层通信采用以太网通信方式,站控层通信协议采用 MMS 规约,以满足智能电网所要求的符合 IEC 61850 的各种智能终端的接入;智能终端与主站的通信协议采用 IEC 870-5-104 协议,且满足多主站链接。

按设备就地安装原则出发,智能测控单元作为智能终端的一部分,可满足 10 kV 线路、主变高低压侧、0.4 kV 线路的保护测控功能,同时能够采集直流系统、火灾告警系统等小系统的电气量接入。智能测控单元可通过灵活的图形化组态功能实现用户所需要的四遥功能,用户可根据需求,自定义智能测控单元的配置,较之传统的测控装置更具智能化和灵活性。智能终端装置内程序以 RTDB(Real-time Database)实时数据库为核心,按规约生成任务,各任务间数据以数据库 RTDB 进行相关交互操作,通过共享内存传输四遥信息和其他信号,相关数据的操作通过 DataView 实现。RTDB 控制所有进程启停,RTDB 运行时,读取配置文件数据,生成相应的规约任务,并记下相应的程序句柄,当系统关闭时,RTDB 发出信号,使各进程结束。规约一般分为 3 种形式:(1) 上行类,与主站通信的规约,如 IEC 104,IEC 101;(2) 下行类,与二次设备通信的规约,如 MMS 客户端、IEC 103 客户端;(3) 上行/下行类(转发类),负责数据转发的规约,如虚终端等。智能终端装置内数据流程如图 1 所示。

2.3 系统的技术标准和信息传输协议

按照 IEC 61850 协议的规范^[3],定义小区变内各类设备符合 IEC 61850 协议规范的信息模型^[4],保证小区变内各类设备的即插即用和信息共享。首先收集配电生产运行、维护和管理等各类人员对小区变内设备的信息需求;确定各设备的自身运行信息、提供运行人员监控信息、提供检修人员维护信息、提供管理人员分析信息等四类信息;再经过合并,筛选出最小集进行定义。共制定了 18 类设备的信息模型,举例如下。

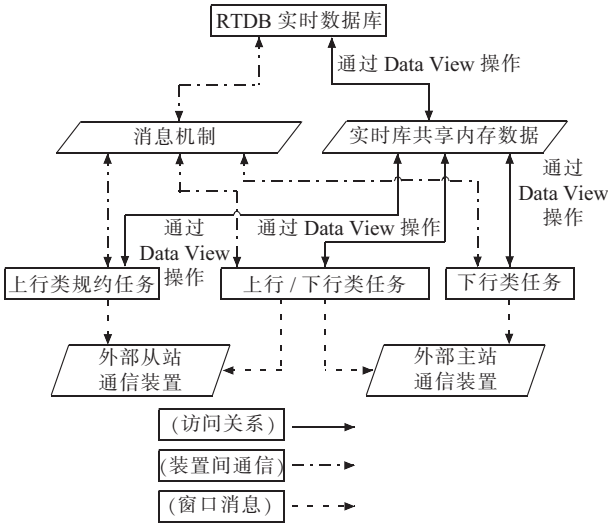


图 1 智能终端装置内数据流程

(1) DTU 完成小区变测控功能,测控 CID 文件模型如图 2 所示。

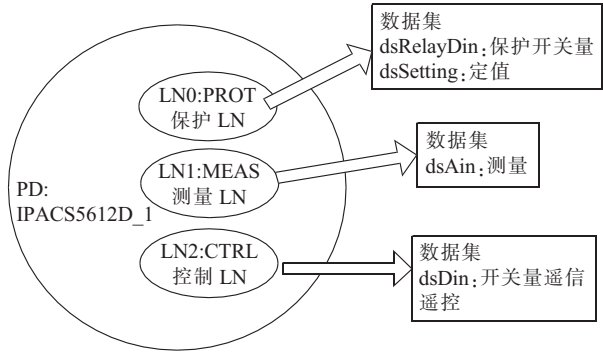


图 2 DTU 测控 CID 文件模型

物理设备(PD)名称为 IPACS5612D_1,其中包含 3 个逻辑设备(LD),分别为保护、测量、控制,整体实现功能(F)为小区变测控。数据信息具体如图 3 所示。

dsAin	dsDin
母线 U_a	DTU 远方状态
母线 U_b	检修状态
母线 U_c	线路 1_ 开关分位
母线 $3U_0$	线路 1_ 手车试验位置
线路 1_ I_a	线路 1_ 地刀分位
线路 1_ I_b	线路 1_ 保护动作
线路 1_ I_c	
线路 1_ P	
线路 1_ Q	
线路 1_ $\cos$	
.....	

图 3 DTU 测控数据信息

1 个 DTU 可以采集多条线路或其他设备数据量。以上数据信息的逻辑节点(LN)配置参考 DL/T 860-7.3、7.4 执行。

(2) 对于小区变内的各类辅助设备,设计定义辅助设备 CID 文件模型,如图 4 所示。

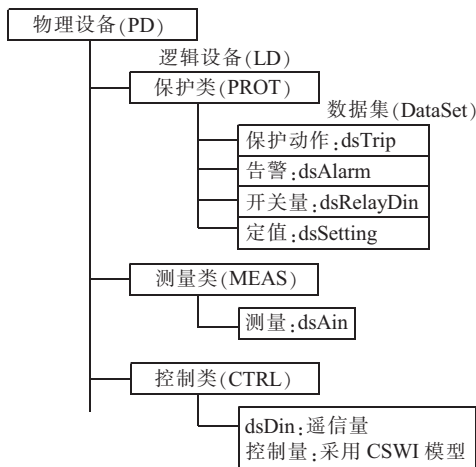


图 4 辅助设备 CID 文件模型

物理设备(PD)命名按各厂家定义,要求能说明设备用途和在小区变内设备编号,如 2 号主变温度采集设备可定义为“BYQ_TMP2”,2 号直流屏可定义为“ZLP2”。物理设备下逻辑设备(LD)分为三类:

① 保护类 LD,命名为 PROT,该 LD 下设置 4 个数据集:保护动作(dsTrip),告警(dsAlarm),开关量(dsRelayDin),定值(dsSetting)。具体引用数据按 DL/T 860-7 定义。

② 测量类 LD,逻辑节点引用数据按 DL/T 860-7 定义。

③ 控制类 LD,该 LD 下设置遥控节点,按 DL/T 860-5 规定采用 CSWI 命名。

2.4 智能实用的运行监控平台

大量的小区变需要同时监控,一个智能实用的运行监控系统平台才能解决这些问题。设计的监控平台分主站端和当地端两层。通过当地端系统就具备一定的功能,尽可能减少信息的上传,减少大量冗余信息上传和处理对主站性能的影响;通过分布式的功能实现模式,减少主站端出现问题时对大量小区变运行可靠性的影响。通过合理分配系统平台的处理能力,实现智能化的小区变运行控制系统和运行辅助系统功能。

(1) 智能运行控制系统的当地端主要通过 SCADA 系统实现电气设备的监视,监视高、低压设备的电压电流和变压器的负荷状况,监视变压器的油温等参数。正常数据保存在小区变内当地端的硬盘中,异常数据立即上传到主站端的监控平台。小区变的电气设备模型在主站端系统中建立、修改,再同步到当地端。系统智能控制策略和规则由主站端系统自动生成,定期同步到当地端系统中。智能运行控制系统的当地端系统能实现小区变内智能控制电容器投切、智能控制主变投退、合理调节潮流、自动控制电压,达到节能

降耗的目的,并具有自动故障隔离和恢复的功能。当地端系统只在各项操作完成后才将操作过程和结果上传主站端监控平台,通知监控人员。

(2) 智能运行辅助系统的当地端实现消防报警系统和环境温湿控制系统的功能,只将异常信息上报主站端的监控平台。而视频监控系统和门禁系统的功能主要由主站端来完成,通过视频监控和门禁管理实现小区变的安全保卫功能。

3 研发过程中遇到的问题及解决

3.1 设计部署中的问题及解决

电网中小区变数量远大于变电站数量,若采取技术成熟的集中式监控系统部署,将造成小区变主站系统采集处理的数据量是变电站的数倍甚至数十倍。以扬州供电公司现有的变电站集中式监控系统主站的服务器群及通信支撑设备的部署规模看来,要建成全扬州区域小区变的集中式监控系统且满足每月 10 个以上小区的增加量,主站系统建设规模预计是现有规模的 3~5 倍,投入太高,不具备推广价值。且如此庞大的主站规模势必对日后的二次系统运行维护带来压力。

为解决上述难点问题,考虑到小区变各类信息的重要程度是有分别的,选择对小区变采取集散式监控系统的部署方案。将主要的数据分析处理工作交由各小区变子站端分散处理完成,正常运行时仅向主站发送少量数据,在收到主站访问及调用命令时,子站再集中上送数据包;故障、异常或辅助系统调整运行方式时,子站系统主动上送电流、有功曲线、开关变位等异常信息到主站,便于监控人员分析掌控。实践后表明,目前小区变主站监控系统单台服务器配置,就可以满足对 5 000 个以上子站系统的管理。

3.2 现场应用发现的问题及解决

智能监控终端要求具有数据筛选、智能分析与计算、数据远传功能,且具有测控功能以满足消防、安防、环境温湿度接入功能。在装置初期设计节点,未考虑 4~20 mA 小信号接入,而在现场施工时,发现无法满足干变温度和环境温湿度的接入,因此重新更改了智能监控终端模拟量输入板设计。在工程施工中,“声光告警”、“LED 灯控制”、“布防信号灯控制”都通过智能监控终端直接开出控制,而这些设备的电源电压等级不尽相同,给设计上带来了麻烦,考虑到设备的批量化生产,此类设备的控制就通过智能监控终端配合外接继电器完成,从而确保设备的统一性。

3.3 IEC 61850 规约应用时发现的问题及解决

在实施过程中,发现有的二次设备虽然满足 IEC 61850 要求,站控层通信采用 MMS 规约,但对 MMS 规约的支持不尽完善,遥测报告控制块在连接断开的

情况下使能标记不能够复归,从而使智能监控终端再下一次使能请求时失败,因此要求相关的测控设备厂家对程序作修改,从而满足工程需要。在项目施工中,有些小系统设备如直流、干变温度等不能提供针对MMS规约的支持,因此对这些设备,智能监控终端对此进行协议扩充,使这些设备满足接入要求,项目组对这类设备进行了基于IEC 61850的数据建模,为今后类似设备的接入提供了支持依据。

4 结束语

系统的总体架构按照集中和分散模式设计,功能设计覆盖了居住区配电采集与应用的整个过程。建成了全国首个全IEC 61850标准化设备的一体化智能信息监控小区变和一套基于居住区配电系统典型的一体化智能信息监控平台,并成功投入应用,经半年多的运行证明,系统运行稳定可靠,达到了预期的建设目标。为居住区配电一体化管理模式创新进行了有益的探索。通过居住区配电房智能运行系统的研究和现场应用,解决了配电房内各类设备基于IEC 61850标准的模型建立问题,解决了信息的分层分类、智能传输和处理问题,实现各类设备的即插即用、信息共享。

随着相关技术的进步,可进一步提高一体化智能

监控终端的集成度和可靠性,提升终端信息采集、处理的智能化水平,实现装置自适应、自愈和免维护的运行目标。解决信息分区运行安全问题,实现小区营配信息的统一、高效传输。在推广应用过程中将不断完善系统主站和智能终端的功能配合和优化,增加小区变智能化安全、可靠、经济运行辅助功能,实现世界一流配电运行维护管理的新目标。

参考文献:

- [1] 王 灿,吴菲菲. IEC 61850 数字变电站综合自动化系统[J]. 华中电力,2011,24(1):6-10.
- [2] 韩国政,徐丙垠. 基于 IEC 61850 的高级配电自动化开放式通讯体系[J]. 电网技术,2011,35(4):183-186.
- [3] 韩国政,徐丙垠. 基于 IEC 61850 标准的智能配电终端建模[J]. 电力自动化设备,2011,31(2):104-107.
- [4] 罗四倍,黄润长,崔 琪,等. 基于 IEC61850 标准面向对象思想的 IED 建模[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(17):88-92,121.

作者简介:

刘 忠(1968),男,江苏扬州人,高级工程师,研究方向为配电自动化、电力系统可靠性分析、智能配用电;

谢 亮(1972),男,江苏苏州人,高级工程师,从事配电专业管理工作。

Research and Practice of Intelligent Operating System for Distribution Room

LIU Zhong, XIE Liang

(1.Yangzhou Power Supply Company, Jiangsu Yangzhou 225001;

2.Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: This article describes the research of a residential area distribution room intelligent operating system solutions and on-site practice. The paper studies various types of equipment for the distribution room, to determine the standard model based on the IEC 61850 protocol, and new developed intelligent information terminal supporting the IEC 61850 protocol, achieving the goal of intelligent transmission and processing of information, plug-and-play of the various types of equipment and information sharing. Development of distributed intelligent operating platform of distribution room for the whole region, including intelligent operation control system and intelligent operation supporting system, solves the problem of safety and economic operation of a large number of unattended power distribution room, getting significant social and economic benefits.

Key words: intelligent operating system; distribution room; IEC 61850 protocol; intelligent information terminal

(上接第 49 页)

The Design of Optical Current TransformerReal-time Error Analysis System

CHEN Ming-ming¹, LU Shu-feng¹, BAO Yu-shu², LIANG Kai³, WANG Shao-hua¹

(1.Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103,China;2.Jiangsu Frontier Electric Technologies Co. Ltd, Nanjing 211102,China; 3.Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214101,China)

Abstract: Optical current transformer has been widely used in Jiangsu Province, but there is not related practical error data with the time going, electromagnetic interference and temperature change. This paper firstly introduces the basic principle of optical current transformer and existing problems, the hardware and algorithm of error comparison device. Then, the device has been installed in Xijing Substation of Jiangsu Province, and proved to be feasible.

Key words: optical current transformer; error; error comparison device

继电保护装置自动化测试系统的设计与实现

胡红兵,李丽君,韩民畴

(国电南瑞科技股份有限公司,江苏 南京 210061)

摘 要:文中介绍了继电保护装置自动化测试系统的设计与实现,其中包括测试系统的原理和结构、优势和特点、方案的分析及操作流程。经过实践验证,这个系统相对传统的继电保护测试系统具有提高工作效率、避免人为错误、减少人力成本等显著特点。

关键词:自动化测试系统;继电保护;测试报告

中图分类号:TM774

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)02-0054-03

继电保护设备是电力系统最重要的组成部分之一,随着微机型继电保护设备在电网中的普遍应用,对此类设备的系统测试、出厂测试、现场安装调试检验和定期检验,且已成为其运行和维护中比较频繁的一项重要任务^[1]。虽然目前各种测试仪及相关的配套软件已达到实用化的水平,但在测试过程中仍然需要人工频繁地设定各项具体试验参数,远没有达到自动化的水平。鉴于这些问题,并充分考虑到现有的软件技术、现场条件、测试仪技术、通信协议等诸方面因素,本文主要对继电保护测试系统自动化进行探索,并对实践结果进行分析。

1 自动测试系统的原理与架构

1.1 自动测试系统原理

传统的继电保护装置测试系统一般采用上位机对测试仪进行控制,通过测试仪与保护装置的互动来实现模拟测试,如图 1 所示。这种方法存在无法全自动进行,需要大量手动完成的工作,测试数据结果及故障报告等无法传送到 PC 机保存等诸多弊端。

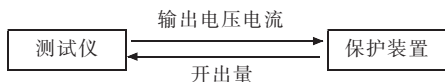


图 1 传统测试系统运行拓扑图

为了解决这些问题,新的自动化测试系统解决方案的运行拓扑如图 2 所示。

图 2 中增加了 PC 机与保护设备之间的数据通信,通过标准的通信协议实现控制保护设备进行信号复归、定值整定等操作,同时实时从保护设备获取到故障报告、扰动数据、定值传输数据的报文,在 PC 机中自动生成测试报告。新的自动测试系统将 PC 机和保护通信的相关功能集成到测试平台中,实现了数据共享,闭环测试。进而得出更全面更动态的数据,测试平台可以根据测试员要求自动生成完整的测试报告,

收稿日期:2012-10-11;修回日期:2012-12-01

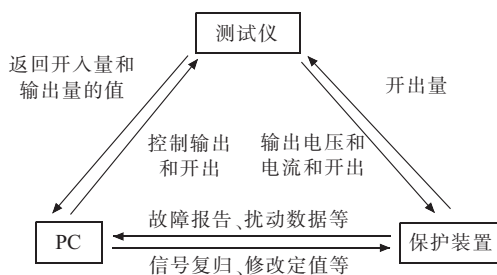


图 2 新型测试系统运行拓扑图

对每项测试内容给出合格或不合格的结论。

1.2 自动测试系统架构及功能设计

自动测试系统是一个复杂的系统,按照各自的功能不同,可将其分成不同的组件模块,同时从逻辑上依据数据的传递进行不同层面的切分,定义了基本框架和功能模块,如图 3 所示。

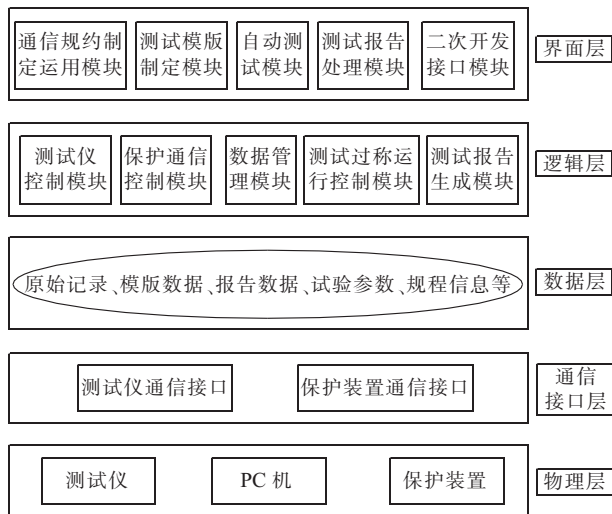


图 3 自动测试系统架构与功能模块划分

其中核心的部分为逻辑层,逻辑层中的每个模块都是按面向对象的程序设计思想对其功能进行封装,通过界面层的操作来调用,其结果返回给界面或是存入数据库中。

1.3 研究价值与实际意义分析

采用这种自动化测试技术的研究价值及实际意义

主要有以下几点:

(1) 提高工作效率。先进的测试技术和测试手段的应用,不断的使测试工作变得方便快捷,从而大大地提高了测试工作的效率。

(2) 避免在实际应用中的损失。新技术的应用,使得测试装置具有很强的综合分析能力和判断能力,几乎就是一个智能专家系统,因此极大地提高了测试工作可靠性。

(3) 自动测试技术让测试数据的获取、存储、运算、管理等实现了标准化、程控化、可共享化。

(4) 自动测试平台是由各个相对独立而又紧密联系的模块组成的,各模块被自动测试过程所用的功能仅是其中一部分,还有许多其他的附加功能可供平常测试和其他工作中使用。如规约分析、通信监视、自动填表、仿真模拟等^[2]。

2 自动测试方案分析

本文设计的这套测试方案是基于广州昂立保护试验仪器的基础上开发出来的。它结合了继电保护数据接口技术、继电保护测试仪接口技术;基于 XML 技术和 Word/WPS 程序控制接口,设计出描述自动测试过程和测试方法的文件格式;开发编辑平台编辑自动测试方案文件和标准报告格式文件(Word/WPS);开发自动测试执行平台;根据自动测试方案和标准报告格式文件执行现场测试,形成标准格式的测试报告。

2.1 系统结构

继电保护检验智能作业及管理系统由继电保护测试仪接口、继电保护测试功能数据接口、自动测试系统、测试方案编辑平台、规约通信引擎程序、规约模版编辑平台、生产管理系统接口等部分组成,系统层次结构图如图 4 所示。

图 4 中:(1) 硬件层,包括继电保护测试仪和保护装置;(2) 测试仪控制接口程序层;(3) 自动测试/闭环自动测试层,包括自动测试主程序和通讯规约引擎程序;(4) 二次开发平台层,包括保护测试方案编辑平台程序和保护通讯规约模版编辑平台程序;(5) 生产管理系统接口层,根据不同客户的生产管理系统,开发不同的接口程序,实现与生产管理系统的交互;(6) 保护测试功能标准数据接口。

2.2 优势和特色

本套方案对于工作中的继电保护测试任务来说,相比传统的方式有着显著的优势与特点。

(1) 标准化。继电保护自动测试系统采用平台化的设计思想,利用面向对象的抽象分析方法,为继电保护测试引入了全新的测试理念和软件技术。系统由测试仪硬件接口层、自动测试层、二次开发平台程序层 3

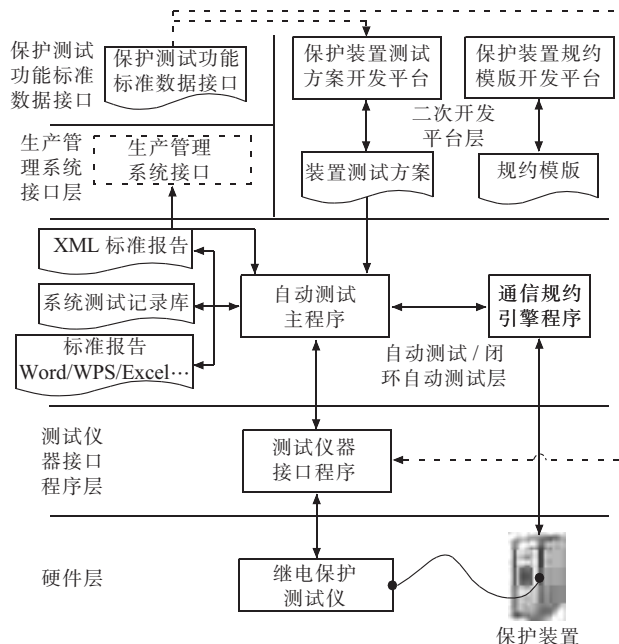


图 4 系统层次结构图

个层次,每个层次都有标准的数据接口和程序控制接口。系统建立了多个与测试相关的标准,包括程序接口标准和数据接口标准。在数据接口方面,系统采用 XML 技术格式,便于各种系统访问。

(2) 规约引擎技术。进行数据和控制命令的交互规则。各保护生产厂家设备的规约都不相同,如果要实现闭环自动测试,必须解决通信规约的问题,因此提出了规约引擎技术。规约引擎技术分析规约实现的共性,根据这些共性抽象出相应的软件接口,从而实现规约报文解析和制造、规约过程的控制、规约通信方式的配置等。

(3) 广义自动测试。将保护装置改为测控装置,只需要更换相关的接口部分,就能够使用本系统进行自动测试。此测试平台通过规约引擎配置通讯规约的相关内容可以和多种被测装置通信。而开放的标准的测试仪接口又可以和其他测试仪通信。故此平台还可以测试保护以外的装置,而且还可以在测试仪器这方面进行扩展,如将开入开出测试装置或模拟断路器装置也加入闭环中^[3]。

2.3 基于现有方案的操作流程

基于这套昂立测试系统的原理,实际使用中测试方案的制作及自动测试的相关流程如图 5、图 6 所示。

3 结束语

继电保护测试新技术的应用,不仅可以更加真实地模拟各种复杂的故障,更能准确地检验继电保护装置的运行情况以及动作特性,而且可以使测试过程更加的智能化,从而减少劳动强度和人为因素的干扰,缓解对高水平继电保护人员的需求,提高系统的可靠性

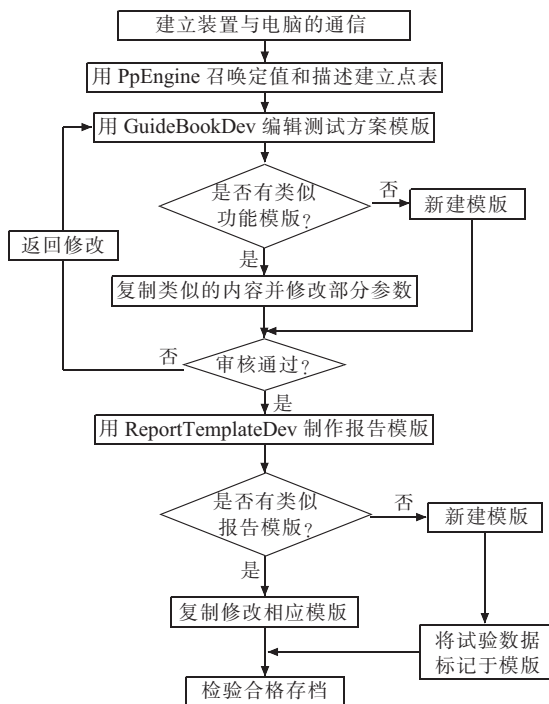


图 5 测试方案制作流程

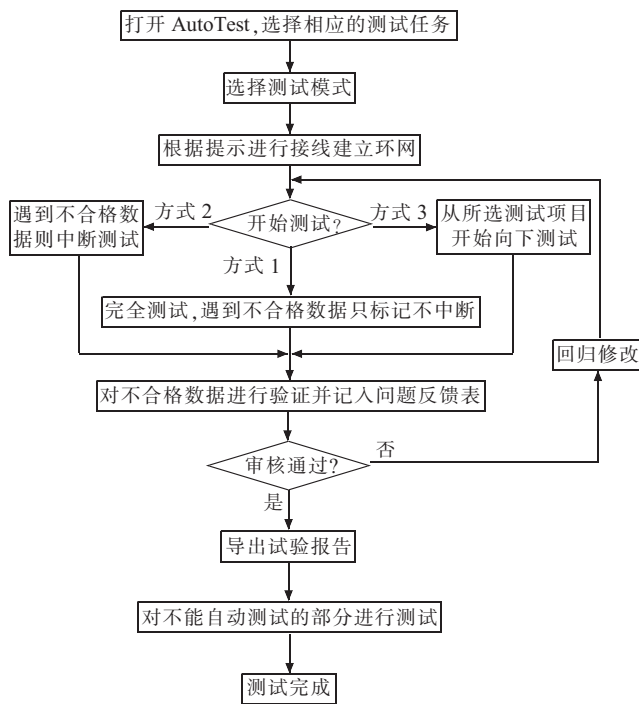


图 6 自动测试流程图

和测试人员的工作效率。本文提到的这种测试模式能更好地达到上述要求,具有极其重要的意义,值得进一步推广。

参考文献:

- [1] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
- [2] 刘军华. 现代检测技术与测试系统设计[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000.

- [3] 陈 皓. 新一代微机继电保护测试仪及基本性能[J]. 电力系统自动化设备,2002,22(5):61-63.

作者简介:

胡红兵(1974),男,湖北鄂州人,工程师,从事电力系统自动化工作;
李丽君(1981),女,内蒙古通辽人,助理工程师,从事电力系统自动化工作;
韩民畴(1986),男,江苏南京人,助理工程师,从事电力系统自动化工作。

Design and Implementation of a Replay Automated Test System

HU Hong-bing, LI Li-jun, HAN Min-chou

(NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210061, China)

Abstract: This article describes the design and implementation of relay test automation system, including the principle and structure of the test system, advantages and features, program analysis and operational processes. Proven, this system compared to the traditional relay test system has notable features, including improvement of efficiency, avoid of human error and reduce of labor costs.

Key words: automated test system; relay; test report

广 告 索 引

常州供电公司

思源电气股份有限公司

南瑞科技股份有限公司

《江苏电机工程》协办单位

封面

封二

前插 1

前插 2、3

《江苏电机工程》协办单位

宿迁电力设计院有限公司

2012 年度本刊十佳论文名单

远东电缆有限公司

前插 4

(黑白) 文前

封三

封底

氧化锌避雷器带电测试方法应用分析

王静君¹, 李文书², 杜积贵²

(1. 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 南京供电公司, 江苏 南京 210013)

摘 要:氧化锌避雷器(MOA)带电测试可分为参考电压信号法(补偿法)和不取参考电压信号法。依据对参考角度设定的不同方式,不取电压参考信号法又可分为角度提前设定、电流法设定和依据统计原理设定。通过现场测试,比较分析了不取参考电压信号法的不同角度设定方式测试结果的差别。总结其相关规律,且为试验人员今后更好地判断试验结果提供了参考。

关键词:氧化锌避雷器;带电测试;全电流;阻性电流

中图分类号:TM862

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)02-0057-03

金属氧化物避雷器(MOA),是电力系统中防止过电压的主要设备^[1],目前现场对 MOA 进行检测的方法主要有直流参考电压法(进口设备一般采用交流参考电压法)和交流泄漏电流法(包括全电流及阻性电流),检测方式有停电试验、在线监测和带电测试。停电试验是精度最高的测试方式,但较大地影响了系统的运行方式及供电可靠性,因此试验周期较长。在线监测无需停电就可实现对检测设备的状态,但目前只是在放电计数器内加装了简单的泄漏电流表,精度及灵敏度难以达到要求^[2]。介于停电试验与在线监测之间,带电测试兼有前两者的优点,并克服了前两者的缺点,在不停电方式下,即可检测 MOA 的全电流、阻性电流,且检测精度较高。因此对 MOA 进行带电测试是非常有必要的。

1 MOA 带电测试的原理

目前 MOA 带电检测方法的原理有:总泄漏电流法、阻性电流三次谐波法、补偿法、基波法、谐波分析法。但现场运用比较多、研究比较深入的是补偿法和基波法。按照现场测量取电压信号的不同方式,可以分为取电压互感器(TV)二次信号和不取 TV 二次信号 2 种方法。取参考电压信号基于的是补偿法原理,不取参考电压信号基于的是基波法原理^[3,4]。

1.1 参考电压信号法的测量原理

通过无线方式(有线方式)发送同步信号,电压隔离器把 TV 的二次信号经过 A/D 变换成数字信号,再经无线信道(有线信道)传输至仪器。仪器经过傅里叶变换,取出基波,然后用投影法计算出阻性电流基波峰值 $I_{r1p} = I_{x1p} \times \cos \varphi$,因基波数值稳定,故可采用 φ 和 I_{r1p} 均能直观衡量 MOA 性能。

由于 B 相对 A 相、C 相 MOV 的作用是对称的,使 A 相、C 相氧化锌避雷器阻性电流的相位差大于实

际值。假设 I_a 、 I_c 无干扰时相位相差 120° ,按相间干扰的对称性,以 B 相 φ 为准,A 相 φ 减小的数值基本等于 C 相 φ 增加的数值,如图 1 所示,由此可以计算相间干扰角度。

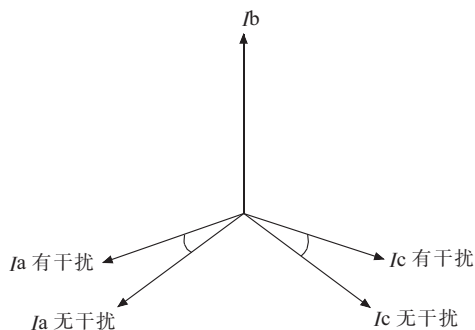


图 1 A 相和 C 相受 B 相影响的相间干扰

如果测量时考虑相间干扰,可对 A 相、C 相补偿角度,将该补偿角度“加”到 φ 中。该补偿法实际是对 A 相、C 相阻性电流进行了平均,也有可能掩盖问题。

1.2 不取参考电压信号法的测量原理

在无法获取电压互感器二次侧的信号或者其他某些特殊情况下,取参考电压信号的 MOA 带电测试仪就无法使用。在这种情况下,需要使用不取参考电压信号的 MOA 带电测试仪。按照对参考角度设定、计算的方式,可以分为 3 种:角度提前设定、电流法设定和依据统计原理审定角度。

(1) 角度提前设定。无参考电压时,先测量 A、B、C 三相的全电流 I_{xa} 、 I_{xb} 、 I_{xc} 。根据 A、B、C 三相 MOA 基本是平衡的原理,先假设 B 相一个角度(例如 80°),再测量出 φ_{ab} 、 φ_{cb} ,计算出 φ_a 、 φ_c ,计算出 A、B、C 三相的阻性电流。如果计算的三相阻性电流不平衡,再调整假设的 B 相角度,最终计算出三相的阻性电流。

(2) 依据统计原理设定角度。输入 B 相电流和电压的相位差值(默认为 83.5°),输入到仪器中的 B 相参考相位差值如果是现场实测的统计值,测试结果更准

确), 根据实测的 B 相电流相位推算得到 B 相的电压相位, 根据系统三相电压差 120° 的规律, 计算出 A 相和 C 相电压的相位, 从而计算出 A 相和 C 相的电流电压相位差值, 然后求取相应的一系列参量。对同一母线场的 MOA 测量输入的 B 相参考相位差值保持一致, 那么测试结果的历史趋势对比可以很好地反应 MOA 绝缘状况的变化。数据结果的判断方法是: 如果 A 相、C 相两相数据均不正常, 初步判断 B 相存在问题(基准错误); 如果 A 相、C 相某一相数据异常, 那就是数据异常的某相存在问题。

(3) 电流法设定。电流法只需要输入一个电流信号即可, 因此接线和测量十分简单。仪器取入 MOA 电流信号后, 对 MOA 电流信号进行快速傅立叶变换, 可以得出总泄漏电流 I_x 的一次基波峰值 I_{x1p} 。根据统计原理, 人为的在 I_c 方向产生一个与 I_c 相反电流矢量 I_{c1p}' 。通过软件处理改变 I_{c1p}' 的大小, 在 I_r 方向上总可以得到一个最小值, 这个最小值就是阻性电流的一次基波峰值, 如图 2 所示。此种方法从原理上, 也是假定角度。

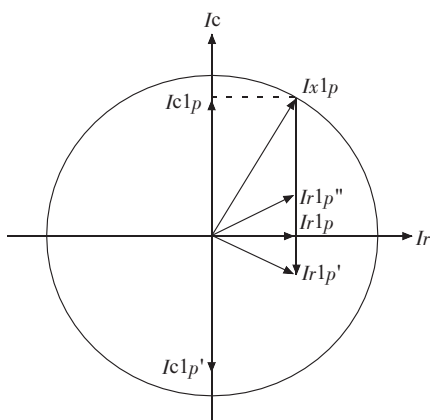


图 2 电流法原理示意图

电流法设定的原理与示波器法比较类似, 但是没有经过权威机构认证, 目前国内还存有争议, 这种方法只是一种测量 MOA 的辅助方法。

2 不同原理的现场实测比较

为了更好地对各种不同原理的 MOA 带电测试仪进行比较, 组织一些厂家的仪器分别在试验室停电环境下和变电站带电环境下进行测试。

2.1 角度提前设定的测试数据比较

仪器 A 是具有取电压信号和不取电压信号 2 种测量模式, 仪器 A 在试验室环境下对一节标准 MOA 进行的测试数据, 如表 1 所示, 其参考值 $I_x' = 0.778$ mA, $I_{x1p}' = 0.2$ mA。

表 1 中, 仪器 A 不取电压信号时, 采用的是角度提前设定的方法, $\Delta I_x / I_x' = (I_x - I_x') / I_x' \times 100\%$,

表 1 仪器 A 在试验环境下的测试数据

仪器	是否取电压信号	I_x /mA	I_{x1p} /mA	$\Delta I_x / \%$	$\Delta I_{x1p} / \%$
A	是	0.790	0.188	1.5	6.0
A	否	0.794	0.097	2.1	51.5

$\Delta I_{x1p} / I_{x1p}' = (I_{x1p} - I_{x1p}') / I_{x1p}' \times 100\%$ 。根据表 1 的数据, 对于同一台仪器 A, 在取电压信号的模式下, 全电流值 I_x 、阻性电流值 I_{x1p} 与参考值很接近, 误差很小。在不取电压信号的模式下, 全电流值与参考值的误差比较小, 但是阻性电流值与参考值的误差较大, 相对误差达 51.5%。这表明, 对于同一种仪器, 在同样的测试条件下, 采用取电压信号的模式, 全电流值、阻性电流值这两个测试数据的准确度都比较高; 若采用不取电压信号的模式, 全电流值的准确度也较高, 但阻性电流值与参考值相比要偏小, 准确度较差。

另外, 从仪器 A 的 2 种模式下的数据对比来看, 在不取电压信号的模式下测得的阻性电流值会比取电压信号下测得的数据偏大一些, 而阻性电流值 I_{x1p} 会偏小。这说明, 在无法取得电压信号或不取电压信号情况下, 若采用角度提前设定的方法对 MOA 进行带电检测, 所预设的角度与实际情况不太相符, 由此所测得的全电流值 I_x 与实际值相比要偏大, 而阻性电流值 I_{x1p} 要偏小, 且阻性电流值 I_{x1p} 的误差很大, 无法反映 MOA 的实际情况。对于采用预设角度的不取电压信号的测量方法, 还需要进一步的改进完善。

为了更好地比较不同测试模式下测试数据的准确性, 选取仪器 B、仪器 C 在试验变电站现场对 MOA 进行带电测试。仪器 B、仪器 C 在 2 种不同模式下的测试数据如表 2 所示, 其参考值 $I_x' = 0.568$ mA, $I_{x1p}' = 0.088$ mA。

表 2 2 台仪器在不同模式下的现场带电测试数据

仪器	是否取电压信号	I_x /mA	I_{x1p} /mA	$\Delta I_x / \%$	$\Delta I_{x1p} / \%$
B	是	0.568	0.086	0	-2.2
C	是	0.567	0.085	-0.2	-3.4
B	否	0.582	0.081	2.5	-8.0
C	否	0.569	0.077	0.2	-12.5

表 2 中, 仪器 B、仪器 C 在不取电压信号测试时, 采用的是角度提前设定的方法。根据表 2 的数据, 仪器 B、仪器 C 在取电压信号模式下测得的全电流值 I_x 和阻性电流值 I_{x1p} 基本一致。一般来说, 在取电压信号模式下测得的数据与实际值是比较接近的, 且这 2 个仪器测得的数据也基本一致, 可以认为试验变电站现场 MOA 带电测试的参考值就是这 2 台仪器在取电压

信号下测得的数据。从仪器 B、仪器 C 这 2 种模式下的数据对比可发现,在不取电压信号模式下,全电流值 I_x 偏大,阻性电流值 I_{x1p} 偏小。

结合表 1、表 2 的测试数据及分析,可以得出一个初步的结论:在不取电压信号模式下,若采用角度提前设定的方法,所测得的全电流值 I_x 比实际会略微偏大,阻性电流值 I_{x1p} 会偏小,而且在有些情况下, I_{x1p} 与参考值的误差还很大。

2.2 依据统计原理设定角度的测试数据比较

有些厂家在设计不取电压信号模式的测量时,采用的是依据统计原理设定角度的方法。2 台仪器采用此统计原理设定角度的现场测试数据如表 3 所示,其参考值 $I_x'=0.568\text{ mA}$, $I_{x1p}'=0.042\text{ mA}$ 。

表 3 2 台仪器在不同模式下的现场带电测试数据

仪器	是否取电压信号	I_x/mA	I_{x1p}/mA	$\Delta I_x/\%$	$\Delta I_{x1p}/\%$
D	是	0.566	0.042	-0.35	0
E	是	0.566	0.042	-0.35	0
D	否	0.566	0.049	-0.35	16.7
E	否	0.566	0.044	-0.35	4.8

表 3 中,仪器 D、仪器 E 测得的阻性电流值是有效值,非峰值。若以 2 台仪器在取电压信号下的测试值为参考值(一般情况下,取电压信号的测试值较为准确),从表 3 的测试数据可以知道,在不取电压信号下,依据统计原理设定角度测得的全电流值 I_x 与取电压信号下测得的全电流值 I_x 一致,阻性电流值(有效值 I_r)要偏大一些。

2.3 总结分析

在对 MOA 进行带电测试时,采用取电压信号的模式,全电流值 I_x 、阻性电流值 I_{x1p} 的测试数据准确度比较高。在不取电压信号的模式下,若采用角度提前

设定的方法,全电流值 I_x 的测试数据会比实际值偏大,阻性电流值 I_{x1p} 偏小;若采用按照统计原理设定角度的方法,全电流值 I_x 的值与实际值基本一致,阻性电流值(有效值 I_r)比实际值偏大一些。

因此,在对不取电压信号的测试数据进行分析时,必须按照不同的原理,进行相应测试数据误差的修正,以提高测试的准确性。具体的误差修正方法还需要根据不同的仪器进行进一步的分析研究。

3 结束语

通过此次对不取电压信号模式下 MOA 带电测试仪的现场试验,研究分析了不同模式下测试数据的误差,与取电压信号的模式相比,还存在较大的不足,需要今后进一步的改进完善。虽然不取电压信号还存在一些问题,但是对于一些无法取电压信号的场合,可以进行定性试验,这对检修人员掌握 MOA 的运行情况还是很有帮助的,且是今后的一个发展方向。

参考文献:

- [1] 张则景. 浅析氧化锌避雷器在线测试方法[J]. 电机电器, 2009, 28(22): 48-51.
- [2] 陈忠, 郭波, 蔡泽祥. 提高氧化锌避雷器现场带电测试精度的新措施[J]. 南方电网技术, 2010, 04(1): 95-98.
- [3] 李雪, 包玉树, 朱琦. 新型氧化锌避雷器带电测试仪校验方法探讨[J]. 江苏电机工程, 2009, 28(6): 63-65.
- [4] 高自伟, 张大为, 黄杰. 氧化锌避雷器带电检测方法及应用分析[J]. 黑龙江电力, 2008, 30(4): 295-300.

作者简介:

王静君(1980),男,江苏无锡人,工程师,从事高电压试验方面的工作;

李文书(1976),男,江苏涟水人,工程师,从事变电安全管理工作;

杜积贵(1973),男,江苏南京人,高级工,从事配电线路运行维护工作。

Applications and Analysis of Hot Line Detecting Methods for MOA

WANG Jing-jun¹, LI Wen-shu², DU Ji-gui²

(1. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing, 211103, China;

2. Nanjing Power Supply Company, Nanjing, 210013, China)

Abstract: According to whether the reference voltage signal, the hot line detecting methods for MOA can be divided into the method with a reference voltage signal (Compensation Act) and the method without a reference voltage signal. Based on the different ways to set the reference angle, the method without a reference voltage signal can be divided into the angle setting in advance, setting by the current and based on the statistical principle. Through field test, the article compares and analyses the disparities of the measuring results. By summarizing the related laws, this article could provide a reference for the testing personnel in the future to better judge the test results.

Key words: MOA; hot line detecting; total current; resistive current

基于随机规划理论的含异步风机的配电网故障重构

顾国华¹, 秦永刚²

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210061;

2. 新疆阿克苏市农一师电力公司输变电工区, 新疆维吾尔自治区 阿克苏 843000)

摘要: 基于风电的间歇性、随机性, 建立了异步风电机的注入功率模型。考虑到风速具有 Weibull 分布随机性, 将随机规划理论应用到含异步风电机的配电网故障恢复重构中, 建立基于机会约束规划的故障恢复重构问题目标函数; 然后将结合禁忌模因局部搜索的单亲遗传算法应用到模型优化求解中, 加快了优化问题的求解, 并以 IEEE33 系统算例验证了文中方法的有效性。

关键词: 配电网; 故障重构; 异步风机; 随机规划; 单亲遗传算法

中图分类号: TM71

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)02-0060-04

随着用户对供电可靠性的要求的提高, 研究如何在配电系统故障后正确快速地恢复供电, 提高电网供电可靠性, 具有重要意义。分布式电源(DG)的接入系统给传统配电系统潮流分布^[1]、暂态稳定性^[2]以及继电保护方式^[3]等带来很大影响, 其故障恢复与传统的单电源故障恢复有很大区别。对于传统配电系统的故障恢复方法已有较多研究, 例如专家系统方法^[4]、基于 Petri 网的方法^[5]、遗传算法^[6,7]、粒子群算法^[8]、禁忌搜索方法^[9]等, 但上述研究很少考虑配电系统中含异步风机等具有随机性和波动性功率输出的分布式电源接入情况。本文研究含分布式电源接入的配电网故障恢复问题, 以异步风机为例, 并假设在故障恢复时异步风机满足并网条件。由于风电机出力的随机性, 需将风电场出力看作随机变量, 利用随机规划理论中的机会约束规划来建立故障恢复模型, 并用结合禁忌模因局部搜索的单亲遗传算法来求解优化模型。

1 风机模型

1.1 风机输出有功功率

对风速的大量实测数据表明, 大部分时间里的风速都是比较平缓的, 风速在 0~25 m/s 之间发生的概率较高。根据前人研究表明年平均风速可以采用威布尔分布函数来描述^[10]。风电机的有功出力可以采用分段函数近似表示^[11]:

$$P_e = \begin{cases} 0 & v < v_{in}, v > v_{out} \\ \frac{v^3 - v_{in}^3}{v_r^3 - v_{in}^3} P_{rate} & v_{in} \leq v < v_{rate} \\ P_{rate} & v_{rate} \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: v_{in} , v_{rate} , v_{out} 分别为切入风速、额定风速和切出风速。

1.2 风机模型

异步风力发电机的等效电路如图 1 所示^[12]。

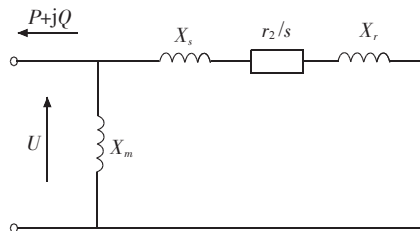


图 1 异步电机等效电路

图 1 中, X_s 为异步电机的定子电抗, X_r 为异步电机的转子电抗, X_m 为异步电机的励磁电抗, r_2 为异步电机转子电阻, s 为滑差, P 和 Q 分别为异步电机注入电网的有功和无功功率。实际注入电网的功率 P_e 、发电机吸收的无功 Q_e 以及滑差 s 计算公式如下:

$$P_e = -\frac{U^2 r_2 / s}{(r_2 / s)^2 + x_k^2} \quad (2)$$

$$s = -\frac{U^2 r_2 - \sqrt{U^4 r_2^2 - 4 P_e^2 x_k^2 r_2}}{2 P_e x_k^2} \quad (3)$$

$$Q_e = -\frac{r_2 + x_k (x_k + x_m) s^2}{r_2 x_m s} P_e \quad (4)$$

当异步风电机有功功率 P_e 确定时, 其吸收的无功与节点电压和滑差 s 的大小有关。在进行含异步风电机的潮流计算时必须考虑风电机组本身的特性: 异步发电机本身没有励磁装置, 它要靠电网提供无功功率建立磁场, 因此它没有电压调节能力, 则不能简单将风机节点视为 PQ 节点。

在进行含异步风机潮流计算时, 必须考虑风电机组的数学模型, 将其扩展到系统的功率方程中, 进行联立求解, 或者将系统功率方程和风电机组方程交替求解, 具体步骤如下^[13]:

(1) 已知风速,根据式(1)计算出异步电机有功出力 P_e ;

(2) 由 P_e 和风电接入点电压 U (初始取 $U=1$), 根据式(3)计算出滑差 s ;

(3) 由 P_e 和滑差 s 根据式(4)计算异步电机吸收无功功率 Q_e ;

(4) 将风机等效成 PQ(V) 节点,利用常规潮流进行计算,得到风电场接入点电压 U' ;

(5) 如 $U \neq U'$, 令 $U=0.5(U'+U)$, 返回步骤(2)继续执行,直到 2 次计算电压满足收敛条件 $|U-U'| < \varepsilon$ 。

2 基于随机规划理论的故障恢复模型

2.1 机会约束规划理论

在现实生活中,人们制定决策时常常会遇到不确定随机现象,用来描述随机现象的变量称为随机变量,含随机变量的数学优化问题称为随机规划问题。机会约束规划问题作为随机规划的一个重要分支,是由 Charnes 和 Cooper 首先提出来的,主要用来解决约束条件中含有随机变量的问题。对于含有随机变量的问题,考虑到所做决策在不利的情况下发生可能不满足约束条件情况,因此允许所做决策在一定程度上不满足约束条件,但是该决策应该使约束条件成立的概率不小于某一置信水平。带有随机变量的数学规划问题可以表示为^[14]:

$$\begin{aligned} \max \quad & f(X, \zeta) \\ \text{s.t.} \quad & g_i(X, \zeta) \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, p) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中: X 为决策向量; ζ 为一个随机向量; f 为目标函数; g_i 为约束条件。但是由于随机变量的存在,目标函数(5)是没有准确意义的。

对于式(5),一种有意义的表达形式是如下的机会约束规划模型:

$$\begin{aligned} \max \quad & E(f(X, \zeta)) \\ \text{s.t.} \quad & \Pr\{g_i(X, \zeta) \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, p)\} \geq \beta_i \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中: $E(f(X, \zeta))$ 为 $(f(X, \zeta))$ 中事件的期望值, $\Pr\{g_i(X, \zeta) \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, p)\}$ 为 $\{g_i(X, \zeta) \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, p)\}$ 中事件成立的概率,这是给定的约束条件成立的置信水平。

2.2 随机模拟技术

随机模拟又称为 Monte-Carlo 模拟,是一种实现随机系统抽样试验的技术,其技术是从给定的概率分布中抽取随机变量。估计事件发生概率:

$$\theta = \Pr\{g_i(X, \zeta) \leq 0, i=1, 2, \dots, p\} \quad (7)$$

式(7)中: ζ 为随机变量; $\varphi(\zeta)$ 为其分布函数; $g_i(\zeta)$ 为函数实值。

上述事件发生概率 θ , 从随机变量概率分布中随

机产生 N 个随机变量 $\zeta_i, i=1, 2, \dots, N$ 。假设 N 次中共有 N' 个随机变量满足约束条件,根据大数定律,可以估算 θ 的值为:

$$\theta = \frac{N'}{N} \quad (8)$$

2.3 目标函数

在传统的故障恢复研究的基础上,考虑异步风机的随机性,将随机规划理论应用到含异步风电机的配电网故障恢复研究中,建立的模型如下:

$$\min E(P_{loss}) \quad (9)$$

s.t.

$$P_{loss} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n G_{jk} U_j U_k (\theta_j - \theta_k) \quad (10)$$

$$P_i^{sp} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (11)$$

$$Q_i^{sp} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (12)$$

$$\Pr\{P_{\min}^L \leq P^L \leq P_{\max}^L\} \geq \beta_1 \quad (13)$$

$$\Pr\{Q_{\min}^L \leq Q^L \leq Q_{\max}^L\} \geq \beta_2 \quad (14)$$

$$\Pr\{U_{\min} \leq U \leq U_{\max}\} \geq \beta_3 \quad (15)$$

$$\Pr\{-\theta_{\max} \leq \theta \leq \theta_{\max}\} \geq \beta_3 \quad (16)$$

式(9)为网络损耗的期望值,式(10)为有功网损计算公式,式(11,12)是潮流等式约束,式(13,14)为线路有功无功概率约束条件,式(15,16)是电压幅值和相角概率约束。

2.4 约束条件的检验

以电压概率约束为例,对数学模型中的概率约束条件的处理采用下述方法:按照随机变量的分布函数随机生成规模为 N 的样本,这里是对于每种故障恢复方案生成风速样本 $v_1, v_2, \dots, v_N$,对于每一个样本分别进行潮流计算,检查是否满足约束条件,如果满足约束条件,计数器 $counter$ 加 1,在所有样本计算完以后判断 $counter/N \geq \beta_3$ 是否成立,如果成立说明满足概率条件约束。从理论上来说,如果样本数足够多,模拟的结果也就足够精确,但是随着样本数的增加,计算量也大大增加,所以样本数的数目要根据实际情况设定。

3 故障重构模型的求解

3.1 基于禁忌模因局部搜索的单亲遗传算法

由于配电系统是“闭环结构,开环运行”,在实际运行中存在潜在的未闭合的环形结构,实际运行中只要保证这些潜在的环形网中有一个开关打开就可以保证配电系统的正常运行要求,因此在优化的时候可以将对应的环网看成一个整体,对其进行相关操作以保证优化的过程中满足配电系统的基本运行要求。根据这

一特点,本文采用单亲遗传算法^[15]进行优化,考虑到遗传算法在最优值附近时搜索最优解效率降低,引入模因理论的局部搜索最优策略,使算法快速全局收敛,为了避免重复的潮流计算,在单亲遗传算法中加入禁忌搜索。

3.2 模型求解

(1) 基于环的染色体编码策略。系统中的开关只有 2 种状态,因此可以用二进制来编码,“0”代表开关断开,“1”代表开关闭合。编码时,利用配电网中“环”的结构特点,将隐含存在环中的支路编码放在同一个基因块中,为了保证得到的编码对应的配电网满足辐射状和无孤岛条件,需要满足每个基因块中仅有一个基因为“0”,其余基因全为“1”。如果某个公共支路同时存在于两个基因块中,还需要增加判定规则:若某一公共支路在两个基因块中编码同时为“0”,则此时的编码是不可行解。

(2) 选择操作。在每次得到的群体中,首先根据群体的适应度大小进行顺序排列,然后用适应度最好的 m 个个体替代适应度最差的 m 个个体。在基因移位和基因突变过程中采用父子竞争的选择机制,即如果子个体的适应度优于父个体,则用子代替代父代,否则保留父代个体淘汰子代个体。

(3) 移位操作。为了尽量保证染色体是可行解,移位操作是按照一定的概率选中一条染色体,然后把基因依次向后移一位,并把最后面的一个基因移到最前面的位置,其中移位的基因块的选择是随机的。

(4) 突变操作。以一定的概率选定基因块,然后在确定的基因块中随机选定一位基因将其取反,即将基因“1”变为“0”,基因“0”变为“1”,在突变之后会产生 2 个“0”或 2 个“1”,所以需要进行不可行解消除,若突变操作将“1”变为“0”,则将突变前为“0”的基因变为了“1”;若突变操作将“0”变为了“1”,则将其后相邻的基因变为“0”。

(5) 模因局部搜索。在模因算法中,局部搜索策略被称为模因,通过模因作用于原始个体,产生由局部搜索策略搜索到新个体,并构成模因池。当需要局部搜索时,按照一定的方法从模因池中选择相应的模因,作用于局部搜索的个体产生新个体。本文采用的是定向型模因,对于故障恢复问题,即模因池中的染色体由原始个体相邻两个开关开或闭组合构成的。随着模型规模的增大,模因池中的模因也快速增加,为了加快搜索速度,这里采用部分贪心法从模因池中选择模因作用于原始个体,当有一个模因作用于原始个体,使个体质量有所提高,就用该个体取代原始个体,不再进行搜索。

(6) 禁忌搜索。对于每一种恢复策略,需对产生的样本风速分别进行潮流计算,重复潮流计算使运算量

大大增加。为避免重复计算,引入禁忌搜索,即将搜索到的恢复方案和适应度加入到禁忌表中,在下次重新生成染色体时,首先对禁忌表进行搜索,如果该染色体已经在禁忌表中,直接从禁忌表中调用适应度函数,否则计算适应度并将染色体和适应度加到禁忌表中。

(7) 算法流程图如图 2 所示。

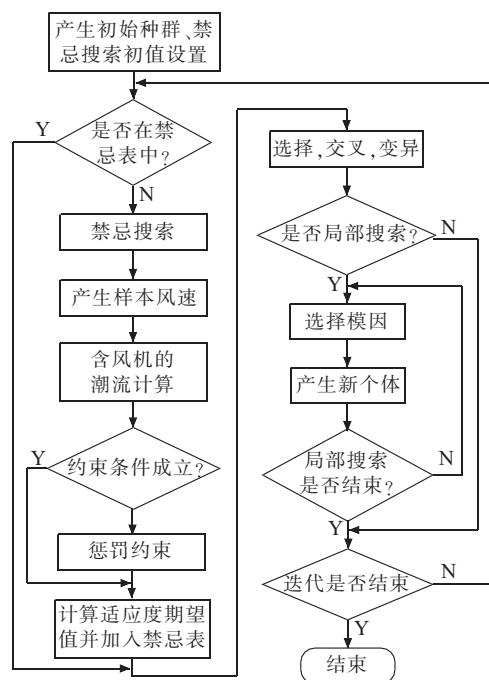


图 2 算法流程图

4 算例分析

本文采用 IEEE33 节点测试算例, 其网络结构如图 3 所示。

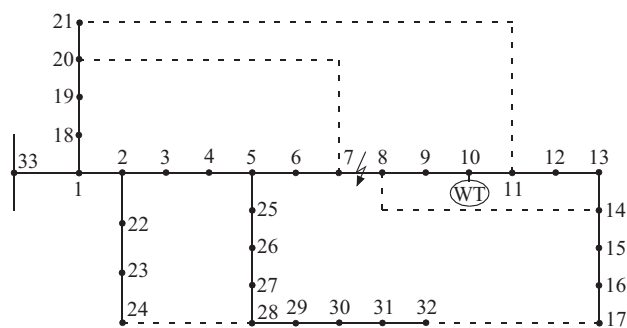


图 3 系统结构图

图 3 中实线为普通支路,虚线为联络开关支路,初始状态时,联络开关是打开的,节点 10 接入异步风电机。某时刻支路 7-8 发生故障退出运行,假设在故障后风机满足并网条件,采用本文研究模型对该故障情况进行故障恢复。风机参数和运行数据如表 1 所示。

无异步风机以及含异步风机时的故障恢复结果如表 2 所示。其中“恢复策略(打开开关)”表示将所有开关包括联络开关都合上的假设前提下,故障恢复策略

表1 风机参数与运行数据

参数	数值
X_m/Ω	2.447 9
X_r/Ω	0.152 9
X_s/Ω	0.056 2
r_2/Ω	0.02
$v_{in}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	5
$v_{out}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	20
$v_{cut}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	13.5
c	8.5
k	2

给出打开开关的集合。可以看出,故障恢复后,配电系统中接入异步风机比没有接入异步风机的情况系统网损偏小,说明在配电系统中接入分布式电源可以改变潮流分布,优化源荷分布配置,减少系统网损。

表2 故障恢复策略

风机接入点	故障支路	恢复策略 (打开开关)	网损期望 值/MW	迭代次 数/次
—	7-8	6-7	0.124 8	24
		13-14		
		24-28		
		31-32		
10	7-8	5-6	0.105 8	20
		13-14		
		24-28		
		31-32		

迭代过程中的最小适应度和平均适应度曲线如图4所示。

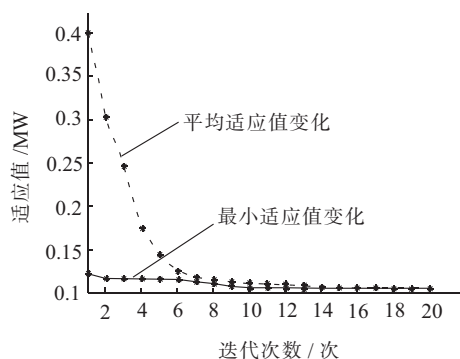


图4 风机在节点8时适应度曲线图

从曲线图可以看出,本文所应用的优化方法具有较好的收敛性。

5 结束语

本文计及了风电的随机性,将风机有功出力作为随机变量考虑,利用随机规划理论建立了含异步风机的配电网故障恢复重构,充分考虑了风电不确定给配

电网故障恢复带来的影响。通过研究发现,直接接入配电网的分布式电源,例如异步风机可有效地减少系统的网损值,使系统具有更好的经济性;在单亲遗传算法中采用基于模因的局部搜索和禁忌搜索,加强了算法搜索最优解的能力并且避免了大量的重复工作。

参考文献:

- [1] 代江,王韶,祝金锋. 含分布式电源的弱环配电网潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 37-41.
- [2] BARKER P P, De MELLO R W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power System, Part I: Radial Distribution Systems [C]. Proceedings of 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000.
- [3] 孙景钉,李永丽,李盛伟,等. 含分布式电源电网保护方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 81-84.
- [4] KRISCHEN S, VOLKMAN T L. Restoring Power System with an Expert System [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1991, 06(2): 558-564.
- [5] WU J S, LIU C C. A Petri net Algorithm for Scheduling of Generic Restoration Actions [J]. IEEE Trans. on Power System, 1977, 12(1): 69-76.
- [6] 梁勇,张焰,侯志俭. 遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(4): 29-34.
- [7] 唐斌,罗安,王击. 改进遗传算法的编码策略及其在配电网重构中的应用[J]. 继电器, 2004, 32(13): 35-39.
- [8] 余贻鑫,段刚. 基于最短路算法和遗传算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 42-49.
- [9] 盛四清,梁志瑞,张文勤,等. 基于遗传算法的地区电网停电恢复[J]. 电力系统自动化, 2011, 25(16): 53-55.
- [10] BOWDEN G J, BARKER P R, SHESTOPAL V O, et al. The Weibull Distribution Function and Wind Power Statistics [J]. Wind Engineering, 1983(7): 85-89.
- [11] 丁明,吴义纯,张立军. 风电场风速概率分布参数计算方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 107-110.
- [12] FEIJOO A E, CIDRAS J. Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 15(1): 110-115.
- [13] 吴俊玲,周双喜,孙建锋,等. 并网风力发电场的最大注入功率分析[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 28-32.
- [14] 刘宝碇,赵瑞清. 随机规划理论与模糊控制[M]. 北京:清华大学出版社, 1998.
- [15] 张利民,马强,李振坤,等. 基于禁忌克隆遗传算法的配电网故障恢复重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1): 60-64.

作者简介:

顾国华(1981),男,浙江杭州人,助理工程师,从事电力系统自动化方向的运行与管理工作;

秦永刚(1976),男,山东潍坊人,助理工程师,从事电力系统自动化方向的运行与管理工作。

用电信息采集系统中数据比对功能的实现及应用

钱立军¹, 李新家²

(1.江苏省电力公司, 江苏 南京 210024; 2.江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:电力用户用电信息采集系统是国家电网公司智能电网中全面建设的一个重要工程,系统每天接入的新用户数量巨大,采集系统需要有数据自动分析能力确认数据的正确性,降低人工调试工作,减少差错。文中提出将正在建设调试过程中的采集数据与营销系统电费结算的抄表数据进行比对的方法来判定采集数据是否正确,给出了实现原理与判定算法,并分析了常见的在终端安装调试过程中产生差异的原因,显著降低了采集终端接入调试工作量,提高了采集数据的正确率,对用电信息采集系统建设过程的质量管理有重大意义。

关键词:用电信息采集;数据比对;算法

中图分类号: TM73

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)02-0064-02

电力用户用电信息采集系统是国家电网公司智能电网中全面建设的一个重要工程,系统要求实现“全覆盖、全采集”的基本建设目标,系统建设要求实现覆盖全部电力用户,以江苏省电力公司为例,2010年上线运行500万低压用户,2011年上线运行800万用户,2012年再次投运运行800万用户,工程建设高峰期,每天需要投运5万用户。

按照工程调试流程,现场采集终端安装完成后,需要将本终端下所连接电能表及其通信参数反馈到主站,并由主站将配置参数下发给采集终端,主站试抄电表,并逐一与电能表上的示值进行核对。但由于集抄终端下电表数量大,不能像专变终端那样通过手机与主站通话报上来,且现场将同时安装许多终端,只能记录下来(可以由手持调试掌机来记录),作为施工记录交给主站调试人员,第二天下发到终端中,再到现场进行数据核对,这个过程需要2天才能完成。如果是载波集中器,则由于第一天载波的路由还没有完全建立,需要到第三天才能到现场核对数据。介于以上原因,在大规模的工程快速施工过程中,除非有抄不到的电表必须处理,否则第二天的数据调试核对工作基本上就给忽略了,且这样的忽略是无法监督到位的。这样的结果是采集系统数据采集到了,数据采集成功率也高了,但采集到的数据是否正确、是否和电表一致,即使和电表数据一致,和营销系统对照,其户表关系是否正确,有没有发生串户的现象,这些问题为下一步基本的抄表数据用于电费发行埋下了隐患,为系统最终能否实用埋下了隐患。

1 抄表数据的引入

用电信息采集系统工程现场终端的安装调试后试运行到系统正式验收移交运行是一个较长的时间

阶段,这个阶段至少3至5个月。在这个期间,采集数据没有被使用前,用户电费需要正常结算,即用于电费结算的抄表工作还在正常进行,没有因为采集系统的建设而停止。既然电费抄表班的人员按照原有的抄表流程已经抄收了电表的数据,而且这个数据是相当准确可信的,能否用它来检查采集系统的抄表数据是否准确呢,答案当然是肯定的。

虽然电费抄表班抄收用户电表数据并不确定是哪天,不同区间的用户抄表日期也不相同,但每个月肯定有一天曾抄收过电能表示值,且任何一只表的数据抄收时刻是可以明确的。而用电信息采集系统每天采集一次电能表日末冻结的电能示值,每个月必然有一次和电费人员对这块表的抄收是同一天。虽然不是同一时刻,但一天内这两个数据应该很接近,差值不应该过大。

2 数据比对与判别

将采集数据与营销抄表发行数据进行比对,如果偏差在理论值范围内,则认为采集系统数据采集正确,否则就需要核查问题。但是,当日的采集数据是日末冻结值,与当日的抄表数据在数据时刻上总是存在几个小时的差异,所以数据不可能完全一样,其差值应有多大。由于每一户的用电量不同,这个值很难界定。例如居民用户大致一个月用电300 kW·h,则这个差值应不超过10 kW·h;而一个低压商业户,一个月几万用电 kW·h,每天的电表走字超过1 000 kW·h。

采用的方法是将差值分出区间,对20 kW·h以上的区间要求进行核对。在采集系统中进行初步功能实现,以某个地市100万用户的采集数据,一个月的抄表数据比较结果有6万多户的数据需要核对。

若系统对差值最好能作出一些自动判别,首先是自动判别根据用户的合同容量计算出一天可能的用电量来进行辅助判别,这样的效果也比较明显,从系统检查

的效果看,将差值超过 20 kW·h 以上但在合同容量乘 12 h 范围内的用户数缩小了一半,再经过对采集数据的仔细观察,发现了一个非常简单且更为合理有效的规则。

人工抄表数据必然介于自动采集的抄表日前后两日末的冻结数据之间,否则这两个数据源必然至少有一个存在问题。

实际判别时采集系统提取 3 个数据: T_0 为营销抄表当日日初(昨日日末)电能示值; T_{+1} 为营销抄表当日日末电能示值; T_1 为营销抄表日之前一天的日初电能示值; Q 为营销抄见示值; Δq 为营销当期抄见电量 $\div CT \div 30$ (CT 是电表倍率)。

常规判断 $T_0 < Q < T_{+1}$ 。考虑到营销抄表常见手工录入或者抄表取整,实际采用 $T_0(\text{去尾}) \leq Q \leq T_{+1}(\text{进位取整})$ 。

由于采集系统也可能会采集失败而导致了某天数据缺失,所以将偏差一天电量单列作为单独的分类区间,许可的偏差为 ± 1 天电量 $|Q - T_0| \leq \Delta q$ 或者 $Q \geq T_1$ (去尾)。

考虑到部分新开户用户还未正常安排抄表,有采集值而抄表为 0,所以对小电能示值单列。

实际操作逻辑:

(1) 当 T_{+1} 有效,且 $T_{+1} < T_0 + 1\,000$ 时,判别是否正常抄表,如果 $T_0(\text{去尾}) \leq Q \leq T_{+1}$ 或者 $T_0(\text{去尾}) \leq Q \leq T_0(\text{进位取整})$,则判断为正常;

(2) 若不符合条件(1)后,判别是否是新装的电表。如果 $T_0 \leq 500 \& Q \leq 1$ 或者 $T_0 \leq 10 \& Q \leq 10$,则属于新装的电表;

(3) 判许可偏差,如果 $|Q - T_0| \leq \Delta q$ 则属于 ± 1 天电量的许可偏差值;

(4) 剩下的全部作为抄采比较不合格,按偏差区间进行分类,按照 $Q - T_0$ 差值区间值进行分类。

3 数据比对结果及偏差分析

根据系统设置的采集数据与电费抄表数据比对的规则,有 3% 左右的数据不符合比对要求,需要人工审查,逐一检查产生偏差的原因。

3.1 数据比对差异分类

系统将需要人工审查的数据按照差异值区间进行分类统计,让审核人员能有针对性地检查和处理问题。表 1 是统计一个地市 69.2 万个电表采集比对数据中不符合比对条件的电表示值,且按区间进行的统计和实际核查结果。

表 1 差异分类统计

比对偏差区间	差异电表数 / 个	占差错比 / %	电费抄表不正确 / 个	采集数据不正确 / 个
偏差 1 000 kW·h 以上	242	1.1	21	43
1 000~100 kW·h	330	1.6	21	54
100~50 kW·h	111	0.5	10	4
50~10 kW·h	351	1.7	9	2
10~0 kW·h	420	2.0	0	0
0~-10 kW·h	5 673	26.9	0	2
-10~-50 kW·h	9 972	47.2	8	1
-50~-100 kW·h	2 355	11.2	5	0
-100~-1 000 kW·h	1 666	7.9	21	7
总数	21 120	100.0	95	113

3.2 原因分析

根据现场核对的结果,2 万多电表中约 200 个电表确实存在数据差异。

(1) 电表通信口读取数据有误,受通信线路或其他电表干扰不能正确获取数据,需要更换电表。

(2) 智能电表反接线,采集系统采集数据和液晶显示不一致。

而绝大部分的差错情况是因为采集需要或故障处理,用户换表导致营销记录值与现场新换电表不同。部分用户特别是新装户估抄数据,集中体现在负偏差中。人工抄表中也有相当一部分抄表发生差错。

4 结束语

本文通过充分利用用电信息采集系统的自身特点,在主站设置了自动数据比对功能,对工程建设中的调试过程进行了简化,既提高了建设效率与速度,又提高了工程的建设质量。在采集系统工程中,还有许多地方需要我们从一开始就去用心设计,以提高系统建设标准,提高工作效率,减少人为差错,例如利用移动信号进行终端安装位置自动定位、终端自动搜索电表关系等等,这些也是工程建设和运行维护中非常重要的功能,需进一步研究和应用。

参考文献:

- [1] 国家电网公司. 营销业务应用标准化设计[R]. 2007.
- [2] 国家电网公司. 用电信息采集系统主站软件标准化设计[R]. 2009.

作者简介:

钱立军(1976),男,江苏无锡人,高级工程师,从事用电信息采集系统的建设管理工作;

李新家(1967),男,江苏泰兴人,高级工程师,从事电力自动控制工程和信息化应用系统设计开发工作。

(下转第 70 页)

基于同步发电机的分布式电源孤岛检测方法研究

陆以军, 侯梅毅

(广州供电局有限公司, 广东 广州 510620)

摘要: 相位偏移法是基于同步发电机的分布式电源进行孤岛检测常用方法之一, 文中详细介绍了相位偏移法的原理及算法, 针对传统相位偏移法存在的灵敏度和可靠性矛盾的问题, 给出一种基于同步发电机端电压相位偏移和频率变化的复合型孤岛检测方法, 并在 PSCAD/EMTDC 中对该方法进行了仿真验证, 结果表明该方法能在保证可靠性的前提下, 准确地检测出孤岛状态, 并缩小孤岛检测死区。

关键词: 分布式发电(DG); 孤岛检测; 相位偏移法; 频率变化

中图分类号: TM619

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)02-0066-05

近年来, 分布式发电(DG)以其清洁环保、经济高效、供电方式灵活等优势在世界各国快速发展。目前风力发电、太阳能发电、小水电以及利用工业废气发电等 DG 形式在我国已得到广泛重视与应用。可以预见, DG 与大电网相结合将会是未来电网的发展方向。然而, DG 在给人们带来各种效益的同时, 也给电网带来一定的技术挑战, 孤岛问题便是其中之一^[1,2]。所谓孤岛是指当电网因故障等某些偶然原因使得 DG 系统脱离主电网运行, 并形成由 DG 系统和周围的负载组成的一个自给供电子系统。该子系统虽然与电网隔离, 却有电能的产生、传输和消耗, 但脱离了电力部门的管理, 称之为孤岛。非计划孤岛运行会对电力设备及运行人员的人身安全造成危害, 并且供电质量得不到保证。因此, 并网系统必须具有很强的反孤岛检测功能。英国电力联合会颁布的 G59/1 规定对于长期并网运行且大于 150 kV·A 的 DG 都需配置反孤岛保护; IEEE 在 P1547 中规定非计划孤岛形成后反孤岛保护要将 DG 从系统中切除。这在一定程度上保证了电力系统的安全性, 却破坏了 DG 的正常运行, 损害了 DG 发电商的利益, 不利于 DG 技术的发展。因此, 近几年随着 DG 技术的发展, 提出了微网(Micro-grid)的概念。所谓微网是指由 DG、负载、储能装置、能量变换设施、控制系统等组成的一个小型配电网系统, 它既可以与公用电网并网运行, 也可以与公用电网分离后独立运行。DG 以微网的形式与系统相连, 在孤岛状态下可按计划向微网内的负荷供电, 但其运行的模式将改变, 因而也需要装设孤岛检测装置, 一旦形成孤岛运行需将其切换至孤岛运行模式, 这也是所谓的计划孤岛^[3,4]。总之, 无论 DG 以哪种方式运行, 都需要进行孤岛检测。

目前 DG 种类繁多, 根据所使用一次能源的类型可将 DG 可分为风力发电、太阳能发电、生物发电、地

热发电、小型水利发电、燃料电池发电、潮汐发电、燃气轮机发电等。由于 DG 采用的发电技术不同, 输出的电压类型也不同, 概括起来主要可分为 3 种类型: 工频交流量、直流量和高频交流量。不同类型的输出也决定了其并网方式以及孤岛检测方法的不同, 大致可分为三类^[3]: 第一种类型的 DG 一般可以直接并网, 如小型水电、部分风力发电。这类 DG 的孤岛检测常用无源法, 即根据孤岛发生时, DG 侧的电气参数的变化来判断孤岛是否发生。直接并网的同步发电机的孤岛检测多采用这一方法, 其中较为典型的是以频率变化为依据的各种检测方法。而直接并网的异步发电机由于脱离电网后无法独立运行, 其控制系统中包含失去电网的保护, 实质就是孤岛检测, 一般无需额外的孤岛检测装置。第二种类型需经逆变器并网, 典型的如光伏发电。这类 DG 的孤岛检测常用有源法, 即主动向系统注入特定的检测信号, 或者人为地调节发电机的工况, 然后通过监测由此引起的电气参数的变化来判断 DG 是否处于孤岛运行状态。第三种类型则需整流后再经逆变器并网, 如微型燃气轮机。这类 DG 的孤岛检测也常用有源法。本文着重探讨直接并网的同步发电机这一类型 DG 的孤岛检测方法。

1 同步发电机的孤岛检测方法

目前基于同步发电机的 DG 孤岛检测最为常用的 2 种方法是相位偏移法和频率变化率法, 本文重点探讨相位偏移法^[5-7]。

相位偏移法是通过测量 DG 机端电压相位角的变化来检测孤岛状态。安装有相位偏移检测装置的 DG 系统等值电路, DG 为同步发电机, 如图 1 所示。DG 并网运行时, 发电机的电动势与端电压的相位差为 δ , 相量图如图 2 (a)所示。如果由于故障等原因断路器 CB2 跳开形成孤岛, 负载 L 的功率完全由 DG 承担, 由于 DG 所带负载功率的突然增加(或减少), 流过发电机电抗

的电流增大(或减少),电动势与端电压的相位差随之增大(或减少),如图2(b)所示(图示为增大情况)。相应地,端电压将从孤岛前的跳变到一个新的值,其相位也随之改变。而在孤岛发生瞬间可认为电动势是不变的,则与之间的相位差即为的变化值。端电压的这种变化称之为相位偏移,相位偏移法就是根据这一特性来判断DG是否处于孤岛状态的。

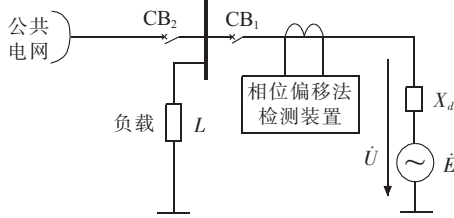


图1 装有孤岛检测装置的系统等值电路

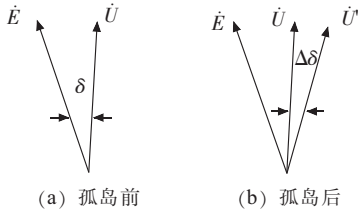


图2 孤岛前后发电机电动势与端电压相量图

2 相位偏移法的算法研究

相位偏移法的检测性能与相位偏移的算法密切相关。传统的相位偏移算法,算法简单、易于实现,但当孤岛瞬间功率不平衡程度较小时,很容易产生检测死区。降低检测门槛值能缩小检测死区,但同时也会增加误判的风险,存在灵敏性和可靠性的矛盾。鉴于此,本文给出了另外一种积分算法。当孤岛瞬间DG输出的有功功率与负载的功率不平衡程度较小时,由此产生的相位偏移量会很小,存在检测死区。这种情况下,如果能够计算出一段时间内相位偏移的累计值,这样即使很小的功率不平衡度,也能使相位偏移量超过阈值,从而很容易地检测出孤岛状态,提高孤岛检测的灵敏度^[8]。当孤岛发生时频率会发生变化,孤岛后一段时间内相位偏移的累积值为:

$$V\theta = 2\pi \int_{t_1}^{t_2} (f_{DG} - f_0) dt \quad (1)$$

式(1)中: f_{DG} 为孤岛后的频率; f_0 为孤岛前的频率,一般为系统的额定频率,故计算时可近似为 $f_0 = 50$ Hz。

由式(1)可知,当孤岛瞬间不平衡功率很小时,频率变化也很小,但若积分时间足够长(小于重合闸时间),即使很小的也会使相位角发生较大偏移,通过选取适当的门槛值便能很容易将孤岛检测出来。

通过前文对相位偏移特性和算法的分析,下面给出一种基于相位偏移的复合型孤岛检测方法,该方法

将孤岛发生时DG的频率变化与相位偏移相结合组成复合判据。

3 基于相位偏移法的复合型判据

由式(1)可知,相位偏移角由频率波动的大小和波动所持续的时间2个因素决定。而对于相同大小的相位偏移量,若频率变化所持续的时间不同,相应的频率变化情况也不尽相同,如图3所示。图中 t_1, t_2 及 t_1', t_2' 分别为两种不同情况下频率变化的起始及结束时刻, $\Delta\theta$ 为图中阴影部分的面积, $\Delta f_{\max}$ 为频率恢复时间内变化的最大值。可见对于相同的 $\Delta\theta$,相应的频率变化最大值是不同的。

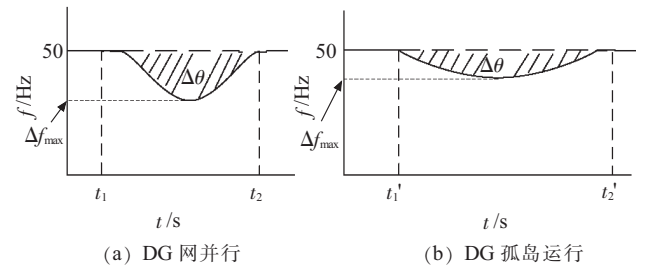


图3 相同相位偏移量情况下频率变化量区别

对于相位偏移法来说,比较难以区分的两种情况是孤岛状态下功率不平衡程度很小时所导致DG端电压的相位偏移以及DG正常并网运行时靠近DG端的较大负荷波动而导致DG端电压的相位偏移。对于前者,孤岛状态下DG有功输出基本与孤岛区域内负荷相当,DG端电压的相位偏移量会很小,可能会判断不出孤岛状态如图3(b)所示;而对于后者,较大的负荷波动也有可能导致DG端电压发生一定的相位偏移,可能会误判为孤岛状态,如图3(a)所示。假定上述两种情况下相位偏移大小相同,下面重点分析频率变化的情况。对于孤岛状态而言,由于DG自身的频率调节能力相对较弱,其频率调节持续的时间相对较长,相应的频率变化值较小。而对于近端负载波动情况,即使波动瞬间导致DG转速发生变化,但由于电网较强的抗扰能力,很快会将DG重新拖入同步,因此,DG频率变化的持续时间通常会很短,由图3(a)可知,若产生相同的相位偏移量,其所对应的频率变化量也较大。根据以上分析可知,当两者产生相同的相位偏移量时,相应的频率变化量是不同的。鉴于此,可以将频率变化值作为孤岛检测量,与相位偏移相结合组成复合判据用于孤岛检测。

复合型检测方法仍以检测相位偏移为主,设置2个门槛值 $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$,且 $\Delta\theta_1 > \Delta\theta_2$ 。为避免负荷波动导致的误判,可将 $\Delta\theta_1$ 选的相对较大,而 $\Delta\theta_2$ 是为减小检测死区而设置的。当相位偏移角 $\Delta\theta > \Delta\theta_1$ 时,直接判断为孤岛状态;而当最大检测时间内 $\Delta\theta < \Delta\theta_1$ 时,引入频

率变化阈值 Δf_{thr} , 只有同时满足 $\Delta\theta > \Delta\theta_2$ 且 $\Delta f_{max} < \Delta f_{thr}$, 判断为孤岛状态, 此时的 $\Delta\theta$ 为最大检测时间内的相位偏移累计值, Δf_{max} 为最大检测时间内频率变化的最大值。此外为了防止避免发电机启动、系统发生电压波动等情况下误判, 这里还设置了电压辅助判据, 而当电压低于某一阈值时即闭锁孤岛检测。综上所述, 可将孤岛检测的复合型判据归纳如下:

$$\begin{cases} \text{主判据 } \Delta\theta > \Delta\theta_1 \ \& \ U \geq U_{thr} \\ \text{辅助判据 } \Delta\theta > \Delta\theta_2 \ \& \ \Delta f < \Delta f_{thr} \ \& \ U \geq U_{thr} \end{cases} \quad (2)$$

该方法增加了辅助判据, 用于孤岛后不平衡有功功率变化不大的情况, 即利用主判据无法检测出的孤岛状况, 通过降低阈值、引入频率变化值来区分孤岛与非孤岛状态。 Δf_{thr} 的选取应大于上述临界情况下(主判据刚好无法检测出)孤岛时产生的频率变化最大值, 的选取与灵敏度要求有关, 选取的值越小灵敏度越高, 误判的几率也会相应增加。

4 复合型判据的仿真研究

为对判据进行验证, 在 PSCAD/EMTDC 环境下搭建如图 4 所示的仿真系统。其中 DG 为带有励磁调节和调速控制的同步发电机, 励磁系统采用 IEEE 的 AC8B 励磁模型, 发电机模型为 TUR1, 其调速系统采用 IEEE 的 EDH 模型。负载 L_1 接在近 DG 侧, 其类型设定为恒功率模型。以下仿真均假定 $t = 0.5$ s 时断路器 QF2 断开, DG 和负载 L_1 脱离公用电网组成一个孤岛系统或是在 $t = 0.5$ s 时投切负荷模拟系统负荷波动。且本文只给出了孤岛瞬间孤岛内总负荷大于机组出力的仿真结果和结论, 负荷波动则只给出了系统增加负荷的仿真结果与结论, 而通过对与这两种情况相反的情况进行仿真分析, 也可以得到同样的结论。

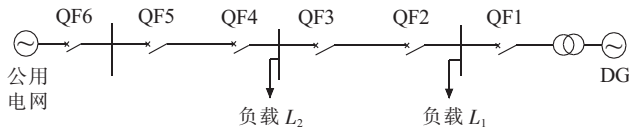


图 4 孤岛仿真系统

利用 PSCAD/EMTDC 的逻辑模块构建出复合判据的逻辑判断框图, 如图 5 所示。

4.1 主判据的仿真分析

采用图 4 所述的仿真系统, 这里将端电压相位偏移的最大检测时间设为 500 ms (小于重合闸时间), 为了避免负荷波动导致误判, 这里将主判据阈值设定的较大, 为 $\Delta\theta_1 = 50^\circ$ 。DG 并网运行时, 系统中负荷 L_1 总有功为 3.65 MW, DG 输出有功为 3 MW, 孤岛瞬间 DG 输出的有功功率则会由 3 MW 突变至 3.65 MW, 发电机端电压的频率变化、相位偏移以及孤岛状态检测情况如图 6 所示。

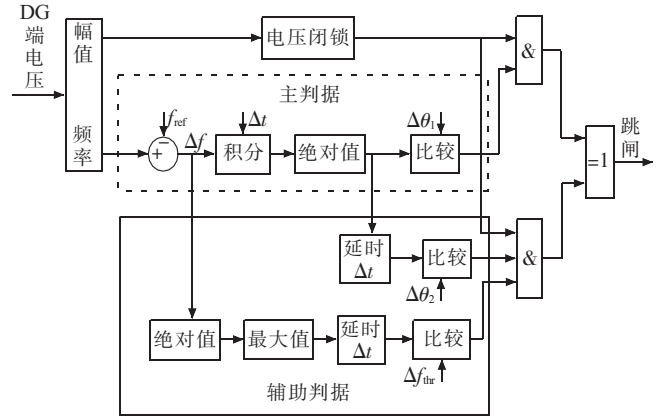
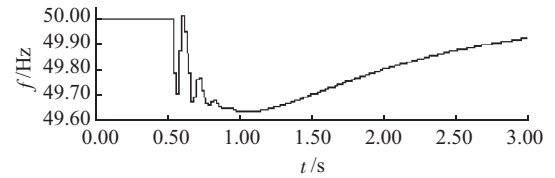
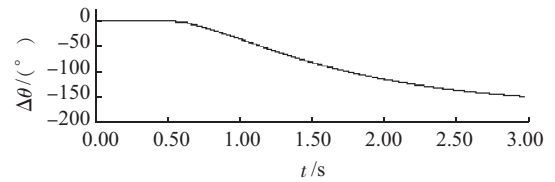


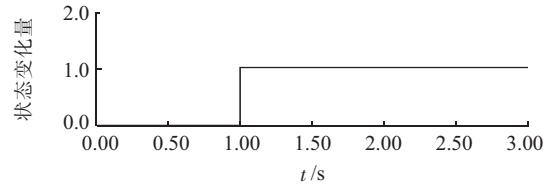
图 5 复合型孤岛检测方法逻辑判断框图



(a) 频率变化



(b) 相位偏移



(c) 孤岛状态检测情况

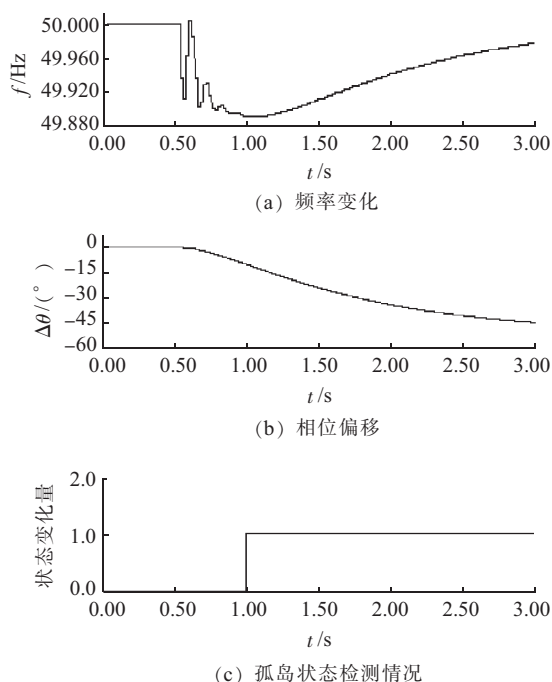
图 6 主判据临界点情况 ($\Delta P = 0.65$ MW)

由图 6(b)、图 6(c) 可以看出, 相位偏移角在孤岛检测最大允许时间 500 ms 时达到 50° , 若在此基础上继续减小有功功率的不平衡程度, 则主判据将不能检测出孤岛, 即主判据所能检测的临界不平衡功率为 $\Delta P = 0.65$ MW, 若不平衡功率大于 0.65 MW 时, 均可以正确判断出孤岛状态。此外, 由图 6(a) 可知, 此时频率变化最大值约为 0.4 Hz, 可以以此作为辅助判据的频率动作门限值。

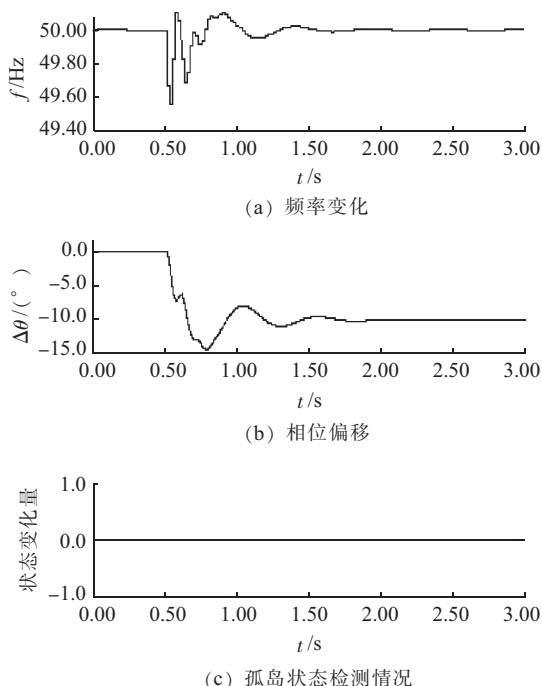
4.2 辅助判据的仿真分析

为进一步减小检测死区, 这里取 $\Delta\theta_2 = 15^\circ$, $\Delta f_{thr} = 0.4$ Hz。DG 并网运行时, 系统中负荷 L_1 有功为 3.18 MW, DG 输出有功为 3 MW。孤岛瞬间 DG 输出的有功功率由 3 MW 突变至 3.18 MW, 发电机端电压的频率变化和相位偏移如图 7 所示。

由图 7 可知, 相位偏移角在孤岛检测最大允许时间 500 ms 时达到 15° , 且频率变化的最大值小于 0.4

图7 辅助判据临界动作点情况($\Delta P=0.18$ MW)

Hz,即辅助判据所能检测的临界不平衡功率 $\Delta P=0.18$ MW。在主判据不能在规定时间内判出孤岛的情况下,辅助判据能正确判断出孤岛状态,缩小了检测死区。为验证辅助判据的可靠性,这里进行如下仿真。DG 并网运行时,当 $t=0.5$ s 时,在 DG 近端投入负荷 3.5 MW, DG 端电压频率变化及相位偏移如图 8 所示。

图8 辅助判据的可靠性验证($\Delta P=3.5$ MW)

由图 8 可知,在孤岛最大检测时间内,相位偏移的最大值达到 15° ,但由于 DG 频率变化的最大值大于 0.4 Hz,故不会发生误判。当负荷波动小于 3.5 MW 时,相位偏移的最大值也小于 15° ,亦不会误判;如果负

荷波动大于 3.5 MW,虽然 DG 端电压相位偏移角超过 15° ,但其频率变化的最大值也会大于 0.4 Hz,所以也不会发生误判。而上述这些情况,如果不引入频率作为辅助判据,则当负荷波动大于 3.5 MW 时,就会发生误判情况。由此可见辅助判据是十分可靠的。此外这里也可以看出,不能一味通过缩小辅助判据的大小来减小检测死区,因为小负荷波动很可能会导致相位偏移量大于,同时频率最大变化量又小于的情况出现,从而使得辅助判据误判。

综上所述,基于相位偏移和频率变化的复合型孤岛检测方法在保证可靠性的前提下,能有效检测出孤岛状态,缩小孤岛检测死区,提高孤岛检测灵敏度。

5 结束语

本文详细介绍了相位偏移法的原理及算法,针对传统相位偏移法存在的灵敏度和可靠性矛盾的问题,文中给出一种基于相位偏移和频率变化的复合型孤岛检测方法。该方法设置了主辅两个判据,在辅助判据中引入了频率变化作为辅助判断量,在保证可靠性的前提下,有效解决了功率不平衡程度较小时孤岛检测难的问题,缩小了孤岛检测死区。最后在 PSCAD/EMTDC 中对该复合判据进行了仿真分析和验证,结果表明:该方法在保证可靠性的前提下,能准确地检测出孤岛状态,缩小孤岛检测死区,提高孤岛检测灵敏度。

参考文献:

- [1] JENKINS N, ALLAN R, CROSSLEY P, et al. Embedded Generation [M]. London: IEE, 2000:1-19.
- [2] 丁明,王敏. 分布式发电技术[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7):31-36.
- [3] XU W, MAUCH K, MARTEL S. An Assessment of DG Islanding Detection Methods and Issues for Canada [R]. Ottawa, Canada: CETC, 2004:15-23.
- [4] KIM J E, HWANG J S. Islanding Detection Method of Distributed Generation Units Connected to Power Distribution System [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Power System Technology, December: 643-647.
- [5] FREITAS W, XU W, AFFONSO C M, HUANG Z. Comparative Analysis Between ROCOF and Vector Surge Relays for Distributed Generation Applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1315-1324.
- [6] ISHIBASHI A, IMAI M, OMATA K, et al. New Type of Islanding Detection System for Distributed Generation Based on Voltage Angle Difference Between Utility Network and Distributed Generation Site [C]. Eighth International Conference on Developments in Power System Protection, Amsterdam, Netherlands: IEE, 2004: 542-545.
- [7] FREITAS W, HUANG Z, XU W. A Practical Method for Assessing the Effectiveness of Vector Surge Relays for Distributed Generation Applications [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,

2005, 20(1): 57-63.

- [8] HOU M, GAO H, LU Y. A Composite Method for Islanding Detection Based on Vector Shift and Frequency Variation [C]. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2010, China.

作者简介:

陆以军(1986),男,安徽六安人,助理工程师,从事电力调度工作;
候梅毅(1963),男,广东梅州人,副教授,从事分布式发电方面的研究工作。

Research on Islanding Detection Method for DG Based on Synchronous Generator

LU Yi-jun, HOU Mei-yi

(Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510620, China)

Abstract: Phase shift is one of the common methods of islanding detection for distributed generation based on synchronous generator. The principle and algorithm of phase shift method are detailed in this paper. To solve the contradiction problem of reliability and sensitivity of conventional vector shift method, this paper presents a composite islanding detection method utilizing both angle change and frequency variation derived from synchronous generator terminal voltage. Simulations are performed using generic PSCAD/EMTDC. Results show that islanding state can be accurately detected and the non-detection zone can be effectively narrowed down by the composite method on the premise of reliability.

Key words: distributed generation (DG); islanding detection; phase shift method; frequency variation

(上接第 63 页)

Distribution System Fault Recovery Using Stochastic Programming Theory Including Asynchronous Wind Power Generation

GU Guo-hua¹, QIN Yong-gang²

(1. NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210061, China; 2. Power Transmission and Distribution Work Area, Nongyi Shi Electric Power Company, Akesu City, Xinjiang Uyghur Autonomous Region 843000, China)

Abstract: Due to the randomness and intermittence, a wind power injection power model is built using the wind speed as input. Considering the characteristic of Weibull wind speed distribution, stochastic programming theory is introduced into fault recovery of distribution network including asynchronous wind power generation. A Chance Constrained Programming (CCP) model is used to tackle such optimization. The Clonal Genetic Algorithm with Tabu Search and Memetic local search strategy is used to solve the problem, which could improve the search efficiency. The IEEE 33 buses system is taken as the test case to verify the proposed model and algorithm.

Key words: distribution system; fault recovery; asynchronous wind power generation; stochastic programming theory; clonal genetic algorithm

(上接第 65 页)

Power Usage Information Acquisition Data Accuracy Automatic Confirmation Technology and Its Application

QIAN Li-jun¹, LI Xin-jia²

(1. Jiangsu Electric Power Company, Jiangsu Nanjing 210024;

2. Jiangsu Frontier Electric Technologies Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The Power Usage Information Acquisition System is an important project of intelligence power grid construction of State Grid. The power usage information acquisition system install a huge number of new customers every day, automatic data analysis ability is required to confirm the correctness of the data, to reduce the artificial debugging and errors. This paper presents a method that contrasts the collecting date under construction debugging process with the marketing system electricity settlement meter reading data to determine the correctness of the collecting date. Principle and decision algorithm are given in this paper, as well as analysis of reasons for difference commonly occurred in terminal installation debugging process. This method significantly reduces the workload of terminal debugging and improves the accuracy of the data gathering, playing a great role in quality management of the power usage information acquisition system construction process.

Key words: power usage information acquisition; data comparison; algorithm

汽轮机通流部分结垢与热力参数变化的关系分析

杨 涛¹, 胥建群¹, 周克毅¹, 石永锋², 蒋伟莉¹, 王 毅³

(1. 东南大学能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 华电电力科学研究院, 浙江 杭州 310030; 3. 国信扬州第二发电厂, 江苏 扬州 225000)

摘 要: 汽轮机通流部分结垢会导致热力参数发生变化, 降低汽轮机运行的经济性和安全性。通过对热力参数的监测与利用, 可以对通流部分的结垢情况进行诊断。对不可压缩流动分析公式进行比较验证, 并应用该公式对某 630 MW 超临界机组通流部分进行诊断; 根据热力参数的变化对机组进行定性分析, 初步判断通流部分结垢; 利用当量通流面积诊断方法对通流部分进行定量计算, 判断出结垢的具体位置和程度; 诊断结果与停机揭缸情况吻合。

关键词: 超临界; 通流部分; 结垢; 当量通流面积

中图分类号: TK26

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)02-0071-04

随着我国火电机组向高参数大容量方向的发展, 尤其是大容量直流锅炉以及超(超)临界机组的投入运行, 对锅炉给水品质提出了更高的要求。由于直流锅炉没有汽包, 不能够采用常规的汽水分离、蒸汽清洗等锅内净化措施来控制蒸汽品质; 同时, 主蒸汽压力不断提高, 盐类在蒸汽中的溶解度增大, 进一步增加了锅炉除盐的难度。含盐蒸汽进入汽轮机做功后, 由于压力降低, 溶解在蒸汽中的盐类析出, 沉积在汽轮机通流部分中, 引起汽轮机通流部分结垢, 导致汽轮机通流部分热力参数发生变化, 降低汽轮机运行的经济性和安全性。因此需要对超临界机组的汽水品质进行监测, 并及时对通流部分结垢进行诊断。

近年来, 与热力参数相关的通流部分的故障, 如阀杆和叶片的断裂、汽流通道结垢及磨损等逐步受到重视^[1,2]。而在通流部分发生故障时, 最直接的反映是温度、压力、流量等热力过程参数的变化, 进而引起汽轮机相对内效率的变化。因此, 通过监测通流部分的热力参数来判断通流部分的运行情况, 可作为一种检查设备故障和缺陷的辅助诊断工具。再综合以热力参数变化值为基础的定量计算, 就可以分析通流部分的具体故障位置、程度和原因。为此, 针对某电厂运行性能的下降, 根据机组热力参数的变化, 进行定性分析和定量计算, 判断出通流部分结垢的具体位置和程度。分析通流部分结垢的可能原因及预防方法, 并提出在调节级后加装汽水品质测点为超临界机组提供检测途径。

1 对通流部分流动公式的分析

对汽轮机通流部分的诊断需要分析级组汽流通道内流动情况, 因此有必要首先对常用的蒸汽参数与

流量之间的关系式进行比较分析。

1.1 斯托多拉公式

斯托多拉根据试验结果得到流量与级组后压力呈椭圆曲线关系^[3], 经过化简得到的数学表达式为:

$$G = k_1 A \sqrt{\frac{p_0}{v_0} \left[1 - \left(\frac{p_z}{p_0} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

式(1)中: G 为通过级组的流量; p_0 和 p_z 分别为级组前、后蒸汽压力; v_0 为级组前蒸汽比容; A 为级组通流面积; k_1 为系数(变工况前后 k_1 值不变)。

在通流面积不变的情况下, 对于临界工况或者级组压比 p_z/p_0 小于一定值时, 流量可近似视为与级组前压力成比例。

1.2 理论推导公式

根据流量方程和能量方程, 经过理论推导^[4]可得通过级组的流量与蒸汽参数存在如下关系:

$$\begin{cases} G = k_2 A \sqrt{\frac{p_0}{v_0} \left[1 - \left(\frac{p_z}{p_0} \right)^n \right]} \\ n = 2 - \eta \frac{\kappa - 1}{\kappa} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: n 为多变指数; η 为级组效率; κ 为绝热指数; k_2 为系数(工况变化不大时 k_2 值近似不变)。

若根据实际情况, 取过热蒸汽 $\kappa=1.3$, 级组效率 $\eta=0.9$, 则式(2)中 $n \approx 1.8$ 。

1.3 不可压缩分析公式

对于某一级组, 根据连续性方程, 通过汽流通道的蒸汽流量可为^[4]:

$$G = \mu A \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left(\left(\frac{p_z}{p_0} \right)^{2/\kappa} - \left(\frac{p_z}{p_0} \right)^{(\kappa+1)/\kappa} \right) \frac{p_0}{v_0}} \quad (3)$$

式(3)中: μ 为流量系数。

由于可以将过热蒸汽看作理想气体, 根据其定熵过程, 有:

$$pv^{\kappa}=\text{const} \quad (4)$$

对上式进行微分,化简可得到:

$$\kappa=-(dp/p)(dv/v) \quad (5)$$

若将蒸汽视为不可压缩气体,即 $dv/v=0$,则 $\kappa \rightarrow \infty$ 。同时忽略流量系数的变化,式(3)即可化为不可压缩流量公式:

$$G=k_3 A \sqrt{\frac{p_0}{v_0} \left(1 - \frac{p_z}{p_0}\right)} \quad (6)$$

式(6)中: k_3 为系数(变工况前后 k_3 值不变)。

1.4 3 个分析公式的比较

式(1)、式(2)、式(6)均说明通过某一级组通流部分的流量仅与通流面积和蒸汽参数有关;3 个公式均可作为各级组通流部分的流动分析公式,通过监测蒸汽参数的变化对汽轮机各级组进行运行监测和通流部分分析诊断。

对式(1)、式(2)、式(6)的比较可以看出,3 个公式的区别在于系数 k 和级组压比的指数。其中,式(1)通过实验获得,是一个近似公式,压比的指数为 2;式(2)通过理论推导获得,压比的指数为 1.8;而式(6)通过将蒸汽看作不可压缩气体简化获得,压比的指数为 1。相比之下式(6)较为简单,但其计算精度还需要通过实例计算进行验证。

为此,选取了某 630 MW 机组大修刚刚结束时主汽阀阀位指令同为 86% 的 3 个工况(调节阀开启个数不变),且分别用式(1)、式(2)和式(6)计算调节级、高压缸第一级组及中压缸第一级组在不同工况下与工况 1 的流量差值百分比 ΔG ,得出了最大误差。针对所选工况,可忽略通流面积的变化。具体计算结果如表 1 所示。

通过不同工况下不同级组的流量差值百分比的计算可以看出,式(1)、式(2)、式(6)的计算结果接近,3 个公式间的最大误差小于 2%,这说明级组压比的指数项对公式的分析结果影响较小。因此,将蒸汽视为不可压缩对计算结果产生的误差较小,在实际应用中采

用不可压缩分析式(6)对变工况条件下各级组通流部分进行理论计算是可行的。当高压缸调节级和第一级组同时发生通流面积变化时,调节级后压力受到调节级和第一级组的一对相反影响;喷嘴调节时调门开度的变化也会对调节级压力产生影响。单独使用式(1)、式(2)和式(6)通过压比变化分析判断调节级通流结垢程度比较困难。对于喷嘴配汽机组,当考虑调门开度变化,在相同计算精度的前提下,形式较为简单的式(6)更便于现场的实际应用和定量分析,因此选用不可压缩公式作为本文分析汽轮机通流部分流动情况的基本关系式。

2 对机组的诊断

2.1 机组的基本情况

某型号为 N630-24.2/538/566 的超临界机组在某次大修后的 18 个月内再次出现出力下降、调节级后压力逐渐上升等现象。为具体分析各参数的变化趋势,选取主蒸汽流量同为 1 500 t/h 的工况绘制阀位指令、调节级后压力的变化曲线,如图 1 所示。选取阀位指令同为 86% 的工况绘制效率变化曲线,用于表现效率的相对变化趋势,如图 2 所示。

其中高压缸效率根据主蒸汽压力、温度和高压缸排汽压力、温度的测量值求得,第一级组效率根据调节级后压力、温度和一抽压力、温度的测量值求得。根据图 1 和图 2 可得到以下结果:在主蒸汽流量同为 1 500 t/h 情况下,高压缸效率下降将近 3 个百分点;调节级后压力逐步上升,上升约 5.07%;主汽阀阀位指令上升显著,在 18 个月内上升约 5.88%,说明为保证主蒸汽流量,需不断开大阀门;而监测时还发现主蒸汽压力随着阀门开度增大而逐渐下降,这使得对问题的分析更加复杂。

为进一步分析造成高压缸效率下降、调节级压力上升的原因,又对高压缸第一级组的效率进行监测,如图 2 所示。可以看出,大修后的 18 个月时间内,第一级

表 1 3 个分析公式计算流量差值百分比的对比

参数	调节级			高压缸第一级组			中压缸第一级组		
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 1	工况 2	工况 3	工况 1	工况 2	工况 3
p_0/MPa	21.951	19.413	24.176	14.217	12.473	15.508	3.449	3.033	3.753
p_z/MPa	14.217	12.473	15.508	5.638	4.975	6.150	1.852	1.630	2.018
$T_0/^{\circ}\text{C}$	538.341	539.915	538.737	481.104	482.175	477.774	564.588	562.796	562.245
斯托多拉公式计算 $\Delta G/\%$	—	-11.142	10.864	—	-12.426	9.324	—	-12.036	8.892
理论推导公式计算 $\Delta G/\%$	—	-11.116	10.903	—	-12.438	9.324	—	-12.039	8.887
不可压缩公式计算 $\Delta G/\%$	—	-11.003	11.073	—	-12.499	9.323	—	-12.056	8.864
最大相对误差 $/\%$	—	-1.252	1.924	—	0.589	-0.005	—	0.167	-0.320

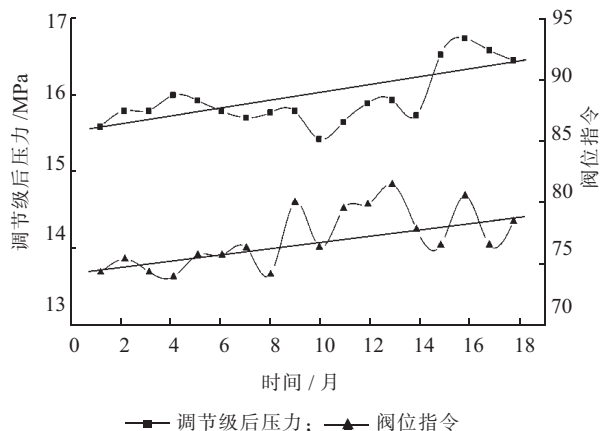


图1 大修后18个月内调节级后压力和阀位指令变化

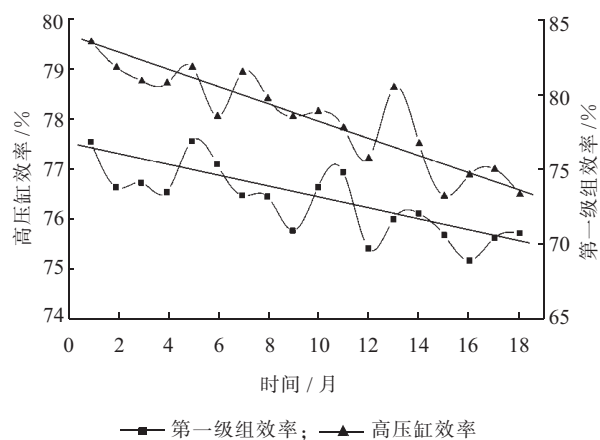


图2 大修后18个月内效率变化

组效率下降约6个百分点。此外,通过对监测数据的计算发现第一级组通流面积下降3.33%,而其他级组当量通流面积的计算结果平稳波动,未发现较为明显的变化。

2.2 定性分析

过监测段温度压力对相对内效率(包括各汽缸及各级组)和通流面积进行计算,并以此作为诊断依据,反映机组在一段时间内的运行状况。相对内效率是汽轮机的一个重要技术指标,它反映了汽轮机通流部分的完善程度,通过级组进出口压力、温度计算它的变化,能及时了解通流部分工作情况。而通流面积可以通过对监视段压力、温度的测量来监视汽轮机内部的通流情况,并以此为依据,判断汽轮机内出现的一些不正常现象,如叶片的断裂、通流部分的结垢等。对于该机组,大修后约18个月的时间内,第一级组效率和通流面积均明显下降,由此可以初步判断,高压缸第一级组可能存在结垢。

此外,对中低压缸各参数变化趋势的分析排除了中低压缸故障的可能性。高压缸第一级组结垢会造成调节级后压力升高(图1),流量减小。为保证一定的流量,需要不断开大主汽阀(图1);而阀门可能会在开启

过程中造成主汽流量过大,引起调节级压力升高更多。这样就要通过降低主汽压力维持主汽流量并缓解调节级压力过大,这也解释了监测参数时主汽压力随着主汽阀开度增加反而下降的现象。

这种依靠热力参数的定性分析具有分析简单、监测容易等优点,可用于初步判断,但仅从相对内效率和监视段压力来判断通流部分故障是不全面的,具体故障类型及原因还需结合理论计算进行进一步分析。

2.3 定量计算

通流部分的故障最终会引起通流面积的增大或减小,因此,应该选择能够反映汽轮机各级通流面积变化的物理量作为诊断的指标,即当量通流面积。由于前文已验证将蒸汽视为不可压缩对计算结果的影响在工程应用允许范围以内,因此,为量化结垢、腐蚀等对蒸汽流道造成的影响,由式(6)导出一个含当量通流面积项的不可压缩分析公式^[5,6]:

$$G=A_{1st}p_T(\sqrt{1/T_T})(\sqrt{1-p_{1st}/p_v}) \quad (7)$$

式(7)中: G 为主蒸汽流量; p_T 、 T_T 分别为主蒸汽压力和温度; A_{1st} 为调节级当量通流面积; p_{1st} 为第一级(这里指调节级)级后压力; p_v 为主汽门后(调节级前)压力。

根据上述公式可对本文中调节级通流部分进行分析,已知在主蒸汽流量同为1500 t/h工况下调节级后压力升高约5.07%(图1),主蒸汽压力下降,造成调节级前压力下降4.18%。可得具体计算结果如表2所示。

表2 各参数计算对比表

参数	投运初期	大修后18个月
汽机前压力 p_T /MPa	21.800	20.885
调节级前压力 p_v /MPa	21.500	20.600
第一级级后压力 p_{1st} /MPa	13.800	14.500
p_{1st}/p_v	0.642	0.704
$1-p_{1st}/p_v$	0.358	0.296
$\sqrt{1-p_{1st}/p_v}$	0.598	0.544
$\Delta\sqrt{1-p_{1st}/p_v}/\%$	—	-9.070

从表2中可以看出大修后的与投运初期相比下降9.07%,将该结果带入式(7)可得:

$$G=A_{1st}p_T(\sqrt{1/T_T})(\sqrt{1-p_{1st}/p_v}) \quad (8)$$

$$0=13.25\%\uparrow +4.18\%\downarrow +9.07\%\downarrow$$

通过上述计算可得,理论上调节级当量通流面积应增加13.25%。但是通过阀位指令上升曲线和对通流面积的监测可以得到的实际情况是:阀位指令上升5.88%对应调节级当量通流面积上升5.92%。说明实际当量通流面积比理论计算要小7.33%,证明调节级也存在结垢。调节级结垢造成调节级后压力下降,通过

上述分析可知调节级结垢将造成通流面积下降 7.33%, 带入式(7)可得:

$$G=A_{1st}p_T(\sqrt{1/T_T})(\sqrt{1-p_{1st}/p_v}) \quad (9)$$

$$0=7.33\%\uparrow +4.18\%\downarrow +11.51\%\downarrow$$

通过计算可以看出调节级结垢造成 $\sqrt{1-p_{1st}/p_v}$ 上升 11.51%, 对应 p_{1st} 下降 17.2%, 增大主汽阀阀门开度, 可以恢复 p_{1st} 至原值。相反, 第一级组结垢会使 p_{1st} 升高, 通过统计数据可知第一级组当量通流面积下降 3.33%, 忽略 1 级组压比的变化可得下式:

$$G_{2nd}=A_{2nd}p_T(\sqrt{1/T_{2nd}}) \quad (10)$$

$$0=3.33\%\downarrow +3.33\%\uparrow$$

式(10)中: G_{2nd} , T_{2nd} 分别为调节级后蒸汽流量和温度; A_{2nd} 为第一级组当量通流面积。

即第一级组当量通流面积下降 3.33%, 造成 p_{1st} 上升 3.33%, 而调节级后压力升高, 会减小调节级前后压差, 造成流量减小。为保证一定流量, 需继续增大阀门开度, 减小调节级后压力, 通常调节级后压力会比原值高, 所以最终调节级后压力是不断升高的。

通过以上分析可以看出, 对该机组的诊断结果为调节级和第一级组结垢; 它们会对调节级后压力形成相反的影响, 给故障诊断带来一定难度。

通过对级组进出口压力温度的监测计算各级组效率和通流面积, 定性分析机组通流部分的完善程度; 通过对主蒸汽流量保持不变时主蒸汽压力、温度、调节级压力及高压缸排汽压力的监测, 采用不可压缩分析公式来定量计算当量通流面积的变化, 并与调门开度变化时调节级通流面积理论计算值比较, 能够较为快速准确地分析调节级通流部分的运行状况, 便于现场的应用。

3 对诊断结果的分析

通过定性分析热力参数的变化可以初步判断出第一级组存在结垢, 但是未能有效地诊断出调节级动叶的结垢问题。这是因为第一级组结垢会抬高调节级后压力, 而调节级动叶结垢会造成调节级后压力下降、流量减小, 为保证流量一定就必须增大阀门开度, 但同时又会使得调节级后压力有所升高, 这就形成了一对相互抵消的作用力。

而结合当量通流面积模型进一步进行定量诊断, 则可分析出调节级亦存在结垢。机组大修后 18 个月再次揭缸, 发现调节级和高压缸第一级组则存在严重的“珊瑚礁”状结垢。这与诊断结果相吻合, 证明了上述基于热力参数变化进行通流部分结垢诊断的方法是可行的, 为机组优化运行和通流部分状态监测提供了

相应的理论依据。

4 结束语

(1) 汽轮机组热力参数对汽轮机通流部分故障的反应十分敏感, 它们能反映通流部分的内部状况, 与各种故障的类型和程度存在着确定的关系。

(2) 通过实例对比 3 个通流部分流动分析公式, 计算结果接近, 验证了在对汽流通道内流动情况的分析中, 将蒸汽视为不可压缩而得到的分析公式不仅形式简单, 应用限制条件较少, 且误差在允许范围, 可应用于工程实际。

(3) 调节级结垢和第一级组结垢会对调节级后压力形成相反影响, 给诊断带来一定难度。采用基于热力参数变化的理论计算可以定量诊断出通流部分结垢的具体位置及原因。说明可通过多个热力参数的变化规律来明确汽轮机通流部分的运行状况。

参考文献:

- [1] BEEBE R. Condition Monitoring of Steam Turbines by Performance Analysis[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2003, 09(2): 102-112.
- [2] GORDINSKY A A, PLOTCKIN E R, BENENSON E I. A New Approach to Statistic Processing of Steam Parameter Measurements in the Steam Turbine Path to Diagnose Its Condition[C]. Florida: Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference, July 23-26, 2000.
- [3] 康松, 杨建明, 胥建群. 汽轮机原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [4] 曹祖庆. 汽轮机变工况特性[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [5] KUBIAK J S, GARCIA A, URQUIZA G B. The Diagnosis of Turbine Component Degradation-case Histories[J]. Applied Thermal Engineering, 2002(22):1955-1963.
- [6] COTTON K C. Evaluating and Improving Steam Performance [M]. 1993, Cotton Fact Inc.

作者简介:

杨涛(1989), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向是火电机组性能分析;

胥建群(1959), 男, 安徽芜湖人, 教授, 从事电站性能分析、故障诊断、寿命预测、仿真建模和汽轮机运行特性的教学与科研工作;

周克毅(1955), 男, 江苏泰州人, 博士生导师, 从事大型火电机组系统特性、性能分析及其数学模型等方面的教学科研工作。

石永锋(1984), 男, 江苏泰州人, 工程师, 从事汽轮机组运行优化及改造工作;

蒋伟莉(1990), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究方向是火电机组性能分析;

王毅(1974), 男, 江苏扬州人, 工程师, 从事电厂运行及检修方面工作。

煤炭采样精密度核对试验方法的应用

吴锁贞

(江苏方天电力技术有限公司,江苏 南京 211102)

摘 要:针对国家标准 GB 475—2008《商品煤样人工采取方法》和 GB/T 19494—2004《煤炭机械化采样》中 3 种采样精密度核对试验方法,进行详细地研究分析,提出实际可操作性更强的 7 种试验方法,包括 1 种多份采样法和 6 种双份采样法,供煤炭客户在各种不同情况下选择应用,具有很强的实践指导意义。

关键词:采样单元;采样精密度;核对试验

中图分类号:TQ533

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)02-0075-04

煤炭是十分重要的电力燃料,是燃煤电站的粮食。通过对煤炭进行采样、制备和化验(简称“采制化”)获得其品质参数。煤炭贸易进入市场经济以来,其质量一直不太稳定,品质变异性较大,给煤炭的采制化工作带来很大挑战,特别是对煤炭的采样尤为明显。根据国家标准 GB 475—2008^[1]和 GB/T 19494—2004^[2]要求,要取得有代表性的煤样,基本要求是采样精密度符合要求和采样没有实质性偏倚。

1 制定采样方案

国家标准 GB 475—2008 中指出,在所有的采样、制样和化验方法中,误差总是存在的,同时用这样的方法得到的任一指定参数的试验结果也将偏离该参数的真值。由于不能确切了解“真值”,一个单个结果对“真值”的绝对偏倚是不可能测定的,而只能对该试验结果的精密度做一估算。对同一煤进行一系列测定所得结果间的彼此符合程度就是精密度,而这一系列测定结果的平均值对一可以接受的参比值的偏离程度就是偏倚。采样精密度与被采煤的变异性(初级子样方差、采样单元方差)、制样和化验方差、采样单元数、子样数和试样量有关。在试样量一定情况下,对于连续采样,其计算公式为:

$$P_L = 2\sqrt{\frac{V_L}{mn} + \frac{V_{PT}}{m}} \quad (1)$$

式(1)中: P_L 为批煤采样精密度,%; V_L 为初级子样方差,无量纲; V_{PT} 为制样和化验方差,无量纲; m 为采样单元数,个; n 为每个采样单元的子样数,个。

式(1)说明了采样精密度的影响因素。核对试验时,采样精密度是在确定一部分影响因素后通过标准差计算得到。两者在本质上是一样的。在制定采样方案时,获得采样精密度的方法是根据煤炭品种和干基灰分的大小确定,一般取干基灰分的十分之一,并规定其上下限,如人工采样时上限规定为 $\pm 2\%$ (干基灰

分),机械化采样时上限规定为 $\pm 1.6\%$ (干基灰分)。但必须指出,此时得到的精密度只是说明执行采样方案可能获得的预期精密度。实际的采样精密度必须通过采样精密度核对试验才能真正确认。国家标准 GB 475—2008 和 GB/T 19494—2004 中,关于采样精密度核对试验方法,介绍了 3 种方法,分别是双倍子样数双份采样法、例行子样数双份采样法和特定批煤的多份采样法。标准中主要讲述方法的概念和计算,没有对方法的适用情况、核对试验的操作要点,以及不同情况下的计算方法进行说明。下面对采样精密度核对试验的 7 种情况分别进行描述和分析。

1.1 问题的提出

某沿江南方电厂用海轮运输煤炭进厂,该海轮有 4 个仓共运输筛选煤 20 000 t,干基灰分 A_d 约为 25.00%~30.00%,煤炭标称最大粒度为 50 mm。请按 GB 475—2008 基本采样方案要求拟定采样方案(假定以一个仓为一个采样单元)。

1.2 制定采样方案

依据 GB 475—2008 中确定基本采样方案的要求,以及煤炭品种为筛选煤和干基灰分 A_d 约为 25.00%~30.00%,确定采样单元精密度 $P_{SL} = \pm 2\%$ (以 A_d 计),批煤精密度 $P_L = P_{SL}/2 = \pm 1\%$ 。

依题意,以 1 个仓为一个采样单元,将批煤平分为 4 个采样单元。每个采样单元子样数 $n = 60 \times \sqrt{\frac{2\,000 \div 4}{1\,000}} = 135$ 个。

最少子样量 $= 0.06 \times 50 = 3$ kg,最少总样量 $3 \times 135 = 405$ kg,符合总样量不少于 170 kg 的规定。

拟定采样方案为:将该批煤平分为 4 个采样单元,每个采样单元采取 135 个子样,平均每个子样质量 3 kg,取 4 个采样单元平均值为最终报出结果,预期批煤(20 000 t)采样精密度可达 $\pm 1\%$ (A_d)。且分 7 种情况阐述采样精密度核对试验方法。

2 采样精密度核对试验方法

2.1 特定批煤多份采样法

对该批煤进行 10 份采样法精密度核对。具体方法是,对该批煤依据以上基本采样方案,进行 10 份采样法,即将 $135 \times 4 = 540$ 个子样分别放入 10 个采样桶中,每个采样桶采到 54 个子样。再将 10 份试样分别制样和化验,其干基灰分 A_d 试验数据如表 1 所示。

表 1 特定批煤多份采样法试验数据

样号	1	2	3	4	5
$A_d/\%$	26.12	27.59	26.38	28.78	29.10
样号	6	7	8	9	10
$A_d/\%$	27.32	26.98	28.93	27.89	26.95

计算统计量:

$$s = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{j-1}} = 1.057$$

$$P_{SL} = 2s = 2.11$$

$$P_L = \frac{P_{SL}}{\sqrt{10}} = \frac{2.11}{\sqrt{10}} = 0.67$$

$$\text{精密度下限} = 0.70 \times 0.67 = 0.47$$

$$\text{精密度上限} = 1.75 \times 0.67 = 1.17$$

根据以上核对试验结果,在 95% 概率下,批煤最佳采样精密度为 $\pm 0.67\%$,且精密度落在 $(0.47\% \sim 1.17\%)$ 范围内。原预期采样精密度 P_0 为 $\pm 1\% (A_d)$,说明制定的采样方案能达到预期采样精密度的要求。

2.2 双倍子样数双份采样法 A

对该批煤采用双倍子样数双份采样法精密度进行核对。具体方法是,选择同以上情况一样的批煤 10 个批次,即 10 船 20 000 t 同种煤。对每一批(船)煤,依据以上基本采样方案,进行双倍子样数双份采样法,即将 $135 \times 4 \times 2 = 1\,080$ 个子样分别放入 2 个采样桶中,每个采样桶采到 540 个子样,依次进行 10 批煤试验,得到 10 对双份试样,分别制样和化验,其干基灰分 A_d 试验数据如表 2 所示。

表 2 双倍子样数双份采样法 A 试验数据

批号	$A_d/\%$		批号	$A_d/\%$	
	A	B		A	B
1	26.45	27.13	6	29.08	30.42
2	29.46	28.31	7	28.50	29.02
3	27.30	27.93	8	25.14	25.78
4	26.98	26.10	9	26.78	26.23
5	26.55	25.10	10	27.84	28.90

计算统计量:

$$P_i = 2s = 2\sqrt{\frac{\sum d_i^2}{2n}} = 2\sqrt{\frac{8.96}{20}} = 2\sqrt{0.448} = 1.34$$

$$P_L = P_i = 1.34$$

$$\text{精密度下限 } \alpha_L \times P_L = 0.70 \times 1.34 = 0.94$$

$$\text{精密度上限 } \alpha_U \times P_L = 1.75 \times 1.34 = 2.34$$

根据以上核对试验结果,在 95% 概率下,批煤最佳采样精密度为 $\pm 1.34\%$,且精密度落在 $(0.94\% \sim 2.34\%)$ 范围内。原预期采样精密度 P_0 为 $\pm 1\% (A_d)$,说明制定的采样方案能达到预期采样精密度的要求。

2.3 双倍子样数双份采样法 B

对该批煤采用双倍子样数双份采样法精密度进行核对。具体方法是,将该批煤分成 10 个采样单元。对每一采样单元,进行双倍子样数双份采样法,即将 $135 \times 4/10 \times 2 = 108$ 个子样分别放入 A/B 2 个采样桶中,每个采样桶采到 54 个子样,依次进行 10 个采样单元试验,得到 10 对双份试样,分别制样和化验,其干基灰分 A_d 试验数据如表 3 所示。

表 3 双倍子样数双份采样法 B 试验数据

批号	$A_d/\%$		批号	$A_d/\%$	
	A	B		A	B
1	26.45	27.13	6	29.08	30.42
2	29.46	28.31	7	28.50	29.02
3	27.30	27.93	8	25.14	25.78
4	26.98	26.10	9	26.78	26.23
5	26.55	25.10	10	27.84	28.90

计算统计量:

$$P_i = 2s = 2\sqrt{\frac{\sum d_i^2}{2n}} = 2\sqrt{\frac{8.96}{20}} = 2\sqrt{0.448} = 1.34$$

$$P_L = \frac{P_i}{\sqrt{10}} = 0.42$$

$$\text{精密度下限 } \alpha_L \times P_L = 0.70 \times 0.42 = 0.29$$

$$\text{精密度上限 } \alpha_U \times P_L = 1.75 \times 0.42 = 0.74$$

根据以上核对试验结果,在 95% 概率下,批煤最佳采样精密度为 $\pm 0.42\%$,且精密度落在 $(0.29\% \sim 0.74\%)$ 范围内。原预期采样精密度 P_0 为 $\pm 1\% (A_d)$,说明制定的采样方案优于预期采样精密度的要求。

2.4 双倍子样数双份采样法 C

对该批煤采用双倍子样数双份采样法精密度进行核对。具体方法是,选择同以上情况一样的采样单元 10 个,即再增加 6 个采样单元煤量。对每一采样单元,采用以上基本采样方案,进行双倍子样数双份采样法,即将 $135 \times 2 = 270$ 个子样分别放入 2 个采样桶中,每个采样桶采到 135 个子样,依次进行 10 个采样单元试验,得到 10 对双份试样,分别制样和化验,其干基灰分 A_d 试验数据如表 4 所示。

表 4 双份子样数双份采样法 C 试验数据

批号	$A_d/\%$		批号	$A_d/\%$	
	A	B		A	B
1	26.45	27.13	6	29.08	30.42
2	29.46	28.31	7	28.50	29.02
3	27.30	27.93	8	25.14	25.78
4	26.98	26.10	9	26.78	26.23
5	26.55	25.10	10	27.84	28.90

计算统计量:

$$P_i=2s=2\sqrt{\frac{\sum d_i^2}{2n}}=2\sqrt{\frac{8.96}{20}}=2\sqrt{0.448}=1.34$$

$$P_L=\frac{P_i}{\sqrt{4}}=\frac{1.34}{2}=0.67$$

$$\text{精密度下限 } \alpha_L \times P_L = 0.70 \times 0.67 = 0.47$$

$$\text{精密度上限 } \alpha_U \times P_L = 1.75 \times 0.67 = 1.17$$

根据以上核对试验结果,在 95% 概率下,批煤最佳采样精密度为 $\pm 0.67\%$,且精密度落在 $(0.47\% \sim 1.17\%)$ 范围内。原预期采样精密度 P_0 为 $\pm 1\% (A_d)$,说明制定的采样方案能达到预期采样精密度的要求。

2.5 例行子样数双份采样法 A

对该批煤采用例行子样数双份采样法精密度进行核对。具体方法是,选择同以上情况一样的批煤 10 个批次,即 10 船 20 000 t 同种煤。对每一批(船)煤,依据以上基本采样方案,进行例行子样数双份采样法,即将 $135 \times 4 = 540$ 个子样分别放入 2 个采样桶中,每个采样桶采到 270 个子样,依次进行 10 批煤试验,得到 10 对双份试样,分别制样和化验,其干基灰分 A_d 试验数据如表 5 所示。

表 5 例行子样数双份采样法 A 试验数据

批号	$A_d/\%$		批号	$A_d/\%$	
	A	B		A	B
1	26.45	27.13	6	29.08	30.42
2	29.46	28.31	7	28.50	29.02
3	27.30	27.93	8	25.14	25.78
4	26.98	26.10	9	26.78	26.23
5	26.55	25.10	10	27.84	28.90

计算统计量:

$$P_i=2s=2\sqrt{\frac{\sum d_i^2}{2n}}=2\sqrt{\frac{8.96}{20}}=2\sqrt{0.448}=1.34$$

$$P_L=\frac{P_i}{\sqrt{2}}=0.95$$

$$\text{精密度下限 } \alpha_L \times P_L = 0.70 \times 0.95 = 0.66$$

$$\text{精密度上限 } \alpha_U \times P_L = 1.75 \times 0.95 = 1.66$$

根据以上核对试验结果,在 95% 概率下,批煤最

佳采样精密度为 $\pm 0.95\%$,且精密度落在 $(0.66\% \sim 1.66\%)$ 范围内。原预期采样精密度 P_0 为 $\pm 1\% (A_d)$,说明制定的采样方案能达到预期采样精密度的要求。

2.6 例行子样数双份采样法 B

对该批煤采用例行子样数双份采样法精密度进行核对。具体方法是,将该批煤分成 10 个采样单元。对每一采样单元,进行例行子样数双份采样法,即将 $135 \times 4/10 = 54$ 个子样分别放入 A/B 2 个采样桶中,每个采样桶采到 27 个子样,依次进行 10 个采样单元试验,得到 10 对双份试样,分别制样和化验,其干基灰分 A_d 试验数据如表 6 所示。

表 6 例行子样数双份采样法 B 试验数据

批号	$A_d/\%$		批号	$A_d/\%$	
	A	B		A	B
1	26.45	27.13	6	29.08	30.42
2	29.46	28.31	7	28.50	29.02
3	27.30	27.93	8	25.14	25.78
4	26.98	26.10	9	26.78	26.23
5	26.55	25.10	10	27.84	28.90

计算统计量:

$$P_i=2s=2\sqrt{\frac{\sum d_i^2}{2n}}=2\sqrt{\frac{8.96}{20}}=2\sqrt{0.448}=1.34$$

$$P_L=\frac{P_i}{\sqrt{30}}=0.30$$

$$\text{精密度下限 } \alpha_L \times P_L = 0.70 \times 0.30 = 0.21$$

$$\text{精密度上限 } \alpha_U \times P_L = 1.75 \times 0.30 = 0.52$$

根据以上核对试验结果,在 95% 概率下,批煤最佳采样精密度为 $\pm 0.30\%$,且精密度落在 $(0.21\% \sim 0.52\%)$ 范围内。原预期采样精密度 P_0 为 $\pm 1\% (A_d)$,说明制定的采样方案优于预期采样精密度的要求。

2.7 例行子样数双份采样法 C

对该批煤采用例行子样数双份采样法精密度进行核对。具体方法是,选择同以上情况一样的采样单元 10 个,即再增加 6 个采样单元煤量。对每一采样单元,采用以上基本采样方案,进行例行子样数双份采样法,即将 135 个子样分别放入 2 个采样桶中(增加到 136 个),每个采样桶采到 $136/2 = 68$ 个子样,依次进行 10 个采样单元试验,得到 10 对双份试样,分别制样和化验,其干基灰分 A_d 试验数据如表 7 所示。

计算统计量:

$$P_i=2s=2\sqrt{\frac{\sum d_i^2}{2n}}=2\sqrt{\frac{8.96}{20}}=2\sqrt{0.448}=1.34$$

$$P_L=\frac{P_i}{\sqrt{8}}=0.47$$

$$\text{精密度下限 } \alpha_L \times P_L = 0.70 \times 0.47 = 0.33$$

表 7 例行子样数双份采样法 C 试验数据

批号	$A_d/\%$		批号	$A_d/\%$	
	A	B		A	B
1	26.45	27.13	6	29.08	30.42
2	29.46	28.31	7	28.50	29.02
3	27.30	27.93	8	25.14	25.78
4	26.98	26.10	9	26.78	26.23
5	26.55	25.10	10	27.84	28.90

精密度上限 $\alpha_U \times P_L = 1.75 \times 0.47 = 0.82$

根据以上核对试验结果,在 95% 概率下,批煤最佳采样精密度为 $\pm 0.47\%$,且精密度落在 $(0.33\% \sim 0.82\%)$ 范围内。原预期采样精密度 P_0 为 $\pm 1\%$ (A_d),说明制定的采样方案优于预期采样精密度的要求。

3 结束语

(1) 煤炭采样精密度核对试验中,要依据确定的

采样方案和预期精密度,再根据精密度核对试验方法的具体情况,如来煤批量、采样方法、可接受的核对试验工作量等,进行计算和核对评价,不能教条地按国标公式计算。否则会得到错误的结论。

(2) 核对的采样单元煤量和采样单元子样数越接近实际的采样方案,核对的结果可信度越高。7 种方法中,双倍子样数双份采样法 A 最准确,但需要的同种试验煤量也最大,耗用的试验时间也最长。双倍子样数双份采样法 C 最经济实用,建议电力用户采纳。

(3) 在同批煤同煤量的情况下,核对采样单元精密度时,要根据试样所包含的子样数确定。

参考文献:

- [1] GB 475—2008,商品煤样人工采取方法[S].
[2] GB/T 19494—2004,煤炭机械化采样[S].

作者简介:

吴锁贞(1968),男,江苏镇江人,高级工程师,从事煤炭质量检测与研究工作。

Application of Coal Sampling Precision Check Test Methods

WU Suo-zhen

(Jiangsu Frontier Electric Technology Co.Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The three kinds of sampling precision check test methods introduced in the national standards of GB 475—2008 entitled "Method for Manual Sampling of Commercial Coal" and GB/T 19494—2004 entitled "Mechanical Sampling of Coal" are analyzed in detail in this paper. Seven kinds of test methods including one replicate-sampling method and six double-sampling methods, which can be implemented more easily, are proposed. According to the practical situations, the customers can make different choices.

Key words: sampling unit; sampling precision; check test

(上接第 74 页)

Analysis on Relationship between Scaling and Variation of Thermal Parameters in Steam Turbine Flow Passage

YANG Tao¹, XU Jian-qun¹, ZHOU Ke-yi¹, SHI Yong-feng², JIANG Wei-li¹, WANG Yi³

(1. Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Huadian Electric Power Research Institute, Hangzhou 310030, China; 3. Guoxin Yangzhou No. 2 Power Generation Company, Yangzhou 225000, China)

Abstract: Scaling issues occurred in the steam turbine flow passage can lead to the variation of thermal parameters and thus influence the economy and safety of the steam turbines. Through monitoring and utilizing theses thermal parameters, analysis on scaling issues in the steam turbine flow passage is carried out. The equations for incompressible flow, which are verified firstly, are utilized in this paper to analyze the actual conditions of the flow passage of one 630 MW supercritical steam turbine. The scaling issues are preliminarily identified through qualitative analysis focusing on the variation of thermal parameters. Then, quantitative calculation employing the equivalent flow area diagnosis method is performed so as to figure out the location and the severity of the scaling issues. The analysis results are consistent with the inspection results obtained during the maintenance period of the steam turbine.

Key words: supercritical; flow passage; scaling; equivalent flow area

锅炉炉渣的深加工利用

刘富宏^{1,2}

(1.扬州大学,江苏 扬州 225003;2.扬州电力设备修造厂,江苏 扬州 225003)

摘要:随着国家对环境保护工作的重视和社会对电厂粉煤灰的综合利用,粉煤灰的深加工和综合利用取得了巨大的社会效益和经济效益,然而同样作为燃煤电厂废弃物的炉渣其价值并未得到充分开发。文中提供了一种炉渣深加工开发利用的方法,即将电厂湿排的炉渣进行烘干、磨细,使其粒度达到一定的国家标准,这样可扩大炉渣的使用范围,提高炉渣的综合利用率,最大限度地提高了炉渣的利用价值。

关键词:炉渣;烘干;磨细;综合利用

中图分类号:TM621.2

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2013)02-0079-03

近年来,随着我国经济的持续快速发展,用电量急剧上升,发电机组的容量不断增大,电力工业得到了迅猛的发展,目前我国电厂主要通过燃煤来发电,发电过程中除了会产生大量的粉煤灰外,还产生了大量的炉渣等副产品。伴随煤电企业的数量大幅增加,电厂累积的粉煤灰、炉渣等也越来越多,这些副产品如果得不到妥善处理就会污染周围环境。粉煤灰是从烟道中收集的粉尘颗粒,而炉渣则是燃煤在锅炉及其他设备燃烧后所排出的废渣,目前粉煤灰的价值已得到了充分开发,市场上粉煤灰供不应求。而相对于粉煤灰,大部分炉渣还没有进行综合有效地开发利用。经测定,煤渣的化学成分 SiO_2 为 40%~50%、 Al_2O_3 为 30%~35%、 Fe_2O_3 为 4%~20%、 CaO 为 1%~5%。其矿物组成主要有钙长石、石英、莫来石、磁铁矿和黄铁矿、大量含硅玻璃体 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)、和活性 SiO_2 、活性 Al_2O_3 等^[1]。因此,就其成分和矿物组成而言,炉渣并非是完全无用的废弃物,且目前该类废渣在我国分布很广,其利用量远没有排出量大。如何进行炉渣开发,变废为宝,实现炉渣的回收再利用,成了一个新的课题。

1 当前炉渣生产和利用现状

与粉煤灰处理的发展历程一样,以往粉煤灰一般采取水处理的方式,随着粉煤灰综合利用力度的加大,现在市场上大部分粉煤灰采取了干排方式。目前由于对炉渣的综合利用处于初级阶段,市场上大多数采用了湿排渣系统,只有部分新上的电厂设备采用了干排渣系统。随着国家对环境保护的要求越来越高,国家加大了对电力行业“节能减排”实施力度,减少生产用水量,在干出灰系统逐步替代了水出灰系统后,干排渣系统的设计运行逐渐被提上了日程,今后新上机组的渣系统基本上都会采用干排方式,有条件的话

电厂原来的湿排渣改干排渣系统也将是一大趋势。

(1) 湿排渣系统排渣流程。炉膛燃尽灰渣落入装在炉膛下部的注满水的渣斗,经水冷却后由捞渣机连续将渣排出,经碎渣机破碎后落入渣沟并输送至脱水仓,沥去部分水分,再用汽车装车外运进行综合利用,外运时含水量 30%~40%。此种系统以老电厂居多。

(2) 干排渣系统排渣流程。在干式排渣系统中,高温炉渣经过炉底排渣装置落到钢带输渣机的输送带上,随输送钢带低速移动。在锅炉负压作用下,通过钢带输渣机箱体外侧风门进入一定量的冷空气,使热炉渣在输送钢带上逐渐被冷空气冷却,冷空气将吸收炉渣余热与可燃物再次混合燃烧释放出热量,空气升温到 400~500℃ 返送入炉膛,用此种方式将炉渣的热量回收,从而减少锅炉的热量损失。被冷却后的低温炉渣进入随后的碎渣机,经碎渣机破碎后进入渣仓储存,通过卸料机构定期装车外运^[2]。

(3) 目前炉渣的利用现状。采用湿排渣的电厂直接将湿渣装车外运,而采用干排渣的厂家,因干渣外运时易形成扬尘,因而在外运时需进行喷水处理,含水量约在 30%。因此,无论目前电厂采用的是湿排渣还是干排渣方式,炉渣在装车外运时,都含有一定的水分,基本上作为高速公路的路基建筑材料或销售给建材厂生产炉渣砖、保温砖等。这些都没有对炉渣进行进一步的深加工,并没有完全开发出炉渣的价值,没有实现对炉渣真正的综合有效利用。

2 炉渣的深加工方案

本文论述的炉渣深加工方案包括炉渣的烘干和炉渣的磨细 2 个环节,炉渣在经过磨细前必须对炉渣进行脱水处理,使得炉渣由含水量 30%~40% 降到 5% 左右,炉渣的含水量过高可磨性不佳,不易出料造成堵塞;含水量低可磨性虽好但会增加烘干系统的压力,增加能耗降低出力。

2.1 炉渣的烘干

炉渣的烘干是针对电厂湿排渣系统而言的,目前大多数电厂采用的都是湿排渣系统,对这些渣料进行磨细前必须先进行烘干。烘干原理是采用天然气、柴油、煤炭等能源作为燃料加热空气,在空气达到 $600\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后使得空气流经烘干机,同时转动的烘干机对进入其内的炉渣粉料进行搅拌,这样被搅拌的炉渣和经过的热空气进行充分混合产生热交换,从而使得炉渣中的水分气化排出,最终达到炉渣脱水被烘干的目的。由于采用天然气作为能源需要布设管道,这对供应商有一定的局限性,柴油作为燃料的成本又太高,因此选用煤炭作为燃料来加热空气是比较经济的选择,煤加热烘干的工艺系统如图 1 所示。

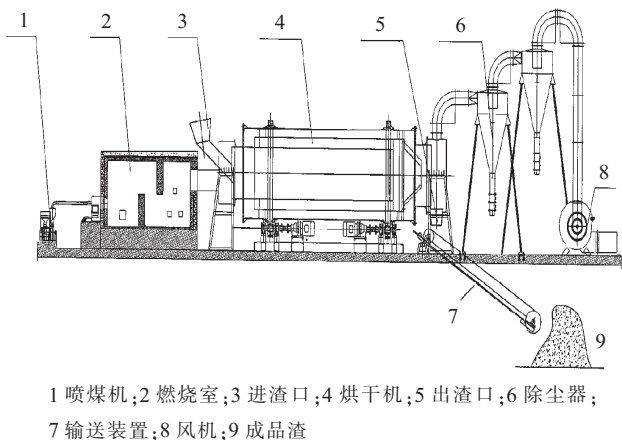


图 1 煤加热烘干系统工作示意图

采用煤炭作为能源的炉渣烘干系统的工作流程如图 2 所示。原煤通过碎煤机形成煤粉后,喷煤机将煤粉喷进燃烧室与空气混合燃烧,产生 $600\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热烟气,热烟气从烘干机的侧面进入烘干机,同时待烘干的湿炉渣从烘干机的上方通过给料机均匀进入烘干机。炉渣在转动的烘干机带动下不停地翻动、扬起、落下,与热烟气充分混合接触,进行热交换。炉渣中所含的水分在高温烟气的作用下汽化与炉渣分离,从而达到炉渣脱水烘干的目的。烘干后的干渣通过输送机进入成品渣仓,而含有粉尘、水蒸气的烟气则通过除尘器、风机最终排入大气。

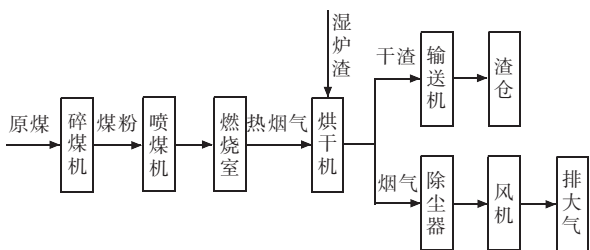


图 2 炉渣烘干工作流程图

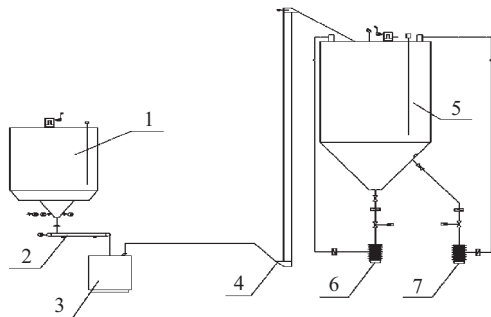
2.2 炉渣的磨细

炉渣的磨细系统设备主要包括原渣仓、给料机、磨

渣机、提升机、成品仓、卸料装置等,其中磨渣机是系统的关键设备,磨型可以采用钢球磨和立式磨,钢球磨作为磨细系统的早期设备由于存在效率低、能耗大、噪音大、占地面积大等缺点,在本磨细系统中推荐采用立式磨。立式磨的工作原理类似于电厂制粉系统的中速磨煤机,整机结构由主机、选粉机、管道装置、引风机、旋风集粉器、除尘器等组成。具有磨细、分选一体化的功能,设备的集成度较高,所需的安装场地较小,易于安装。同时设备在负压下运行,除尘器除尘效率高,降低了粉尘噪音对环境的污染。磨细系统运行流程如图 3 所示。其系统的工艺流程如图 4 所示。



图 3 炉渣磨细流程



1 渣仓;2 称重给料机;3 磨渣机;4 提升机;5 成品仓;6 卸料装置 1;7 卸料装置 2

图 4 炉渣磨细工艺图

图 4 中,炉底渣由渣仓 1 通过称重给料机 2 进入磨渣机 3 进行磨细加工,磨制后的细渣经过磨渣机自带的分选装置通过提升机 4 进入成品仓 5 暂存,之后通过卸料装置 6、7 排出作为二级灰或细灰销售。或者在成品仓底部加装输送仓泵,通过空压机气力输送至灰库与灰库内二级灰或细灰掺混销售。

3 炉底渣磨细经济效益分析

炉底渣作为湿渣外运综合利用的效益不是很高,且在水渣外运过程中,由于含水量较大,运渣车辆密封欠佳,对运渣道路造成了持续的污染,并且湿渣虽然含水但仍然无法避免形成扬尘造成环境污染。因此,将炉渣进行烘干磨细形成二级灰作为干灰细灰进行销售,不仅销售价格大幅上升,也将彻底解决二次排渣区域的污染问题,带来良好的经济效益和环保效益。

按照国家标准,细灰(一级灰)的细度是指 $45\text{ }\mu\text{m}$ 方孔筛筛余量不大于 12% 。二级灰要求 $45\text{ }\mu\text{m}$ 方孔筛筛余量不大于 25% ,粗灰(三级灰)要求 $45\text{ }\mu\text{m}$ 方孔筛筛余量不大于 45% 。在目前的炉渣市场上,炉渣经喷淋形成含水量 $30\%\sim 40\%$ 的湿渣后市场销售价格为 $5\sim 10$ 元/t(含水价),平均价格约 7 元/t;而炉渣磨细成二级

灰(品质介于粗、细灰之间)销售价格为旺季 100 元/t,淡季 70~80 元/t,考虑到淡、旺季价格浮动,年平均价格为 80~90 元/t。干渣磨细成细灰销售价格旺季 120 元/t,淡季 80~100 元/t,考虑到淡、旺季价格浮动,年平均价格为 100~110 元/t。烘干、磨细设备的运行成本如人工、电耗、设备折旧等按照 45 元/t 计算,则干渣磨细成二级灰时,每吨净收益可达 35~45 元/t;如果干渣磨细成细灰(一级灰)时,每吨净收益则可达 55~65 元/t。

以一台 600 MW 机组为例。每天机组的耗煤大约 6 000 t,以灰分 30%、渣占灰比例 10%计,一年的渣量为 $6\,000 \times 30\% \times 10\% \times 365 = 65\,700$ t。折合每小时渣量为 7.5 t(干渣)。

如果采用湿渣(含水量约 30%)外运销售,全年收益为(考虑到峰谷价格,取平均价 7 元/t 计算):

$$7 \text{ 元/t} \times 65\,700 \text{ t} / (1 - 30\%) = 65.7 \text{ 万元}$$

如果干渣磨细成二级灰外运销售,全年净收益为(按净收益 40 元/t 计算):

$$40 \text{ 元/t} \times 65\,700 \text{ t} = 262.8 \text{ 万元}$$

如果干渣磨细成细灰外运销售,全年净收益为(按净收益 60 元/t 计算):

$$60 \text{ 元/t} \times 65\,700 \text{ t} = 394.2 \text{ 万元}$$

由上可以看出,在炉底渣经过磨细成二级灰或细

灰后进行销售,收益分别是磨细前的 4 倍和 6 倍,收益在原单售炉底渣(湿渣)的基础上净增长 197.1 万元和 328.5 万元。经济效益极其显著。

4 结束语

综上所述,尽管目前炉渣已经得到了一定程度上的应用,如作为高速公路的路基等,但炉渣的这种应用仅仅停留在初级阶段,其附加值并不高。如果将煤渣进行深层次的加工,按上述工艺将炉渣烘干磨细变成二级灰或一级灰后,达到要求的炉渣灰可直接用于水泥、建筑用砖、墙体等材料的制作中,真正实现了电厂炉渣的变废为宝,对环境保护起到了积极的作用。同时烘干磨细后的炉渣价格也将成倍的上涨,大幅度提高了炉渣综合利用的经济效益。

参考文献:

- [1] 商晓峰,周晓平. 矿粉磨掺加煤渣的应用[J],水泥工程,2012(1):38,54.
- [2] 沙威,孙国通,刘新利,等. 火电厂干排渣系统特点及国产化应用[J]. 天津电力技术,2008(4):15-17.

作者简介:

刘富宏(1976),男,江苏高邮人,高级工程师,从事电厂辅机系统设计与调试工作。

Deep Processing and Utilization of Boiler Slag

LIU Fu-hong^{1,2}

(1. Yangzhou University, Yangzhou 225003, China;

2. Yangzhou Electric Power Equipment Manufacture Factory, Yangzhou 225003, China)

Abstract: Since the government paid more attention to the environmental protection, the further processing and comprehensive utilization of coal ash has made great social and economic benefits. However, as the waste of coal-fired power plants, boiler slag has not been fully utilized. This paper presents an approach to develop and use slag in deep processing. That is drying and grinding the wet slag from the plants until its ash granularity meets the national standard. In this way, the boiler slag will have a wider range of use, a higher comprehensive utilization rate and the most effective value in use.

Key words: boiler slag; drying; grinding; comprehensive utilization.

《江苏电机工程》编辑部电话号码变更启示

《江苏电机工程》编辑部电话号码已变更,新的电话号码如下:

主编 (025)86558772

编辑 (025)86556860

编务 (025)86558020

广告 (025)86558020

传真 (025)86558020

无线输电技术发展及应用

张翼

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:综述了无线输电技术在国内外的发展及研究现状,简述了无线输电技术的三大类技术,包括电磁感应方式、电磁耦合共振方式以及微波或激光方式。简要指出了无线输电技术的应用前景以及开展无线输电技术研究的重要意义。

关键词:无线输电;电磁感应;电磁耦合共振;微波;激光

中图分类号: TN92

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2013)02-0082-03

从2007年美国麻省理工学院成功完成无线电力传输实验开始,人类更加深刻地认识到了无线输电已不再是梦想。无线输电这项前沿技术被认为是今后电力科技的发展方向,必将带来人类生活和生产方式的重大变革,有着巨大的市场和发展前景。其中一个重要应用领域是电动汽车无线充电,短期内,静态无线充电技术有望应用于泊车自动充电。从长期来说,动态无线充电可以为电动汽车在行驶途中进行充电,使得电动汽车可以边行驶边充电。这将从根本上解决电动汽车充电难题,加速电动汽车普及。另外无线输电技术还有许多其他应用领域,如家用电器、工业机器人、医疗器械、航空航天、油田矿井、水下作业、无线传感器网络及RFID等方面。

1 国内外无线输电技术研究现状

1.1 国外研究现状

19世纪末被誉为“迎来电力时代的天才”的尼古拉·特斯拉,在电气与无线电技术方面做出了突出贡献,他也曾致力于研究无线传输信号及能量的可能性,早在1899年,特斯拉在纽约长岛建造了无线电能发射塔(沃登克里弗塔),设想利用地球本身和大气电离层为导体来实现大功率长距离的无线电能传输,该塔矗立在纽约长岛的特斯拉无线电力传输实验室内,塔高57 m,球形塔顶直径为21 m^[1]。特斯拉想用它来实现全球无线电力传输,可惜由于资金缺乏,这个塔最终并未建成。

2001年5月,国际无线电力传输技术会议在法属留尼汪岛召开期间,法国国家科学研究中心的皮格努莱特,利用微波无线传输电能点亮40 m外一个200 W的灯泡。其后,2003年在岛上建造的10 kW试验型微波输电装置,已开始以2.45 GHz频率向接近1 km的格朗巴桑村进行点对点无线供电^[2]。

2007年6月,美国麻省理工学院宣布利用电磁共振技术成功地点亮了一个离电源约2 m远的60 W

电灯泡,该研究小组在实验中使用了2个直径为60 cm的铜线圈,铜线半径为3 mm,通过调整发射频率使2个线圈在10.56±0.3 MHz产生共振,效率达到40%^[3]。该项技术的发布引起了世界范围内谐振耦合式无线输电装置的研发热潮。

2008年9月,北美电力研讨会发布的论文显示,美国内华达州雷电实验室的G.E.Leyh等继承了Tesla的衣钵,成功研制电场耦合谐振无线能量传输实验装置,利用2个空心变压器作为无线能量传输的发射与接收端,变压器与电极连接,成功地将800 W电力用无线的方式传输到5 m远的距离^[4]。在日本,“非接触充电”方式的巴士已于2008年2月在羽田机场、2009年10月在奈良分别进行了试行驶。供电线圈埋入充电台的混凝土中,汽车驶上充电台,将车载线圈对准供电线圈就能开始充电。充电方式采用了基于电磁感应的方式。

2012年,美国斯坦福大学首次提出了“驾驶充电”这一概念,为电动汽车充电提出了新的解决方案,这意味着电动汽车可以不必停下来充电而无限地跑下去。据项目组人员介绍,“当你到达目的地时,可能电池里的电比你出发时还要多。”,斯坦福大学正在设计的无线充电系统有望解决电动汽车接线充电的难题,其长期目标是开发出一种纯电动高速公路,能给行驶在路面上的汽车和货车无线充电,只要在路面下每隔几英尺埋一段金属线圈,就能利用磁场以无线方式传输大量电力。

1.2 国内研究现状

国内在无线输电技术方面研究还处于起步阶段,主要进行一些基础性研究工作,还未曾开展大规模的研究。哈尔滨工业大学朱春波教授采用直径50 cm螺旋铜线圈串接电容的方式构成谐振器,实现在0.7 m距离传输23 W的能量,在传输距离为55 cm时负载电压获得最大值,其最高传输效率接近50%。重庆大学自动化学院孙跃教授带领的课题组,攻克了无线电力传输的关键技术难题,建立了完整的理论体系,研制出的无线电能传输装置能够输出600 W到1 000 W的电能,

传输效率为 70%, 并且能够向多个用电设备同时供电, 即使用电设备频繁增加, 也不会影响其供电的稳定性。香港理工大学傅为农教授带领的课题组对感应耦合无线电能传输技术和磁谐振耦合无线电能传输技术进行了深入研究, 并对 2 种无线输电方式进行了比较。他们采用平面薄膜谐振器, 实验中, 在发射谐振器和接收谐振器相距 20 cm 时, 传输效率为 46%, 谐振频率为 5.5 MHz。华南理工大学张波教授带领的课题组从电路角度分析谐振耦合无线输电系统传输效率与距离、线圈尺寸等之间的关系, 设计制作了多种不同线圈参数的谐振耦合无线输电装置, 进行比较实验, 以实现系统优化目标, 设计频率跟踪系统, 解决了由于谐振效率失谐带来的传输效率低下问题。另外, 南京航空航天大学航天电源实验室也对电动汽车的无线能量传输技术的几种模式进行了研究。

2 无线输电技术简介

无线电力传输是一种无需通过插座和电线提供电能的技术。根据无线输电在空间不同的传输距离, 有 3 种基本的传输形式: 电磁感应短程传输、电磁耦合共振中程传输和微波激光远程传输。

2.1 电磁感应

利用电磁感应可以进行短程的电力传输, 其基本工作原理如图 1 所示, 发射线圈 L_1 和接收线圈 L_2 之间利用磁耦合来传递能量。根据电磁感应原理, 若在线圈 L_1 中通以交变电流, 该电流将在周围介质中产生一个交变磁场, 线圈 L_2 中将产生感应电动势, 可供电给外部用电设备。

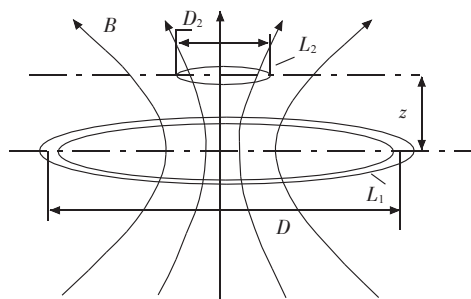


图 1 电磁耦合电力传输系统原理

最早使用电磁感应原理传输能量的是电动牙刷。由于经常和水接触, 直接充电比较危险, 所以电动牙刷一般使用的是感应式充电。发射线圈位于充电底座, 接收线圈在牙刷内部, 整个电路消耗的功率约 3 W。目前该技术可用于多种电子产品, 如对手机、相机、MP3 等进行无线充电, 由于充电垫产生的磁场很弱, 所以不会对附近的信用卡、录像带等利用磁性记录数据的物品造成不良影响。该解决方案提供商包括英国 Splash power、美国 wild Charge 等公司。这种接触式无线电力

传输方式的优点是制造成本较低、结构简单、技术可靠, 但是传输功率较小、传送距离短, 一般只适用于为小型便携式电子设备供电^[4]。

2.2 电磁耦合共振

基于电磁共振耦合原理的整个装置必须包含 2 个线圈, 每一个线圈都是一个自振系统。其中一个为发射装置, 与能量源相连, 它利用振荡器产生高频振荡电流, 通过发射线圈向外发射电磁波, 在周围形成了一个非辐射磁场, 即将电能转换成磁场; 当接收装置的固有频率与收到的电磁波频率相同时, 接收电路中产生的振荡电流最强, 完成磁场到电能的转换, 从而实现电能的高效传输。在日本, 2009 年 8 月长野日本无线也宣布开发出基于磁共振的送电系统, 如图 2 所示。当送电受电部之间的传输距离为 40 cm 时, 传输的效率达到了 95%。



图 2 基于磁共振的电力传输系统

在美国举行的 2010 年国际消费电子产品展 (CES) 上, 海尔展出了利用无线供电技术的高清电视, 该电视采用美国无线电力公司 (Witricity) 的电磁共振耦合技术, 电视的背面内置有约 1 英尺 (30.48 cm) 的线圈, 可在距离 1 m 之外的地方供应 100 W 的电力。可供电的距离取决于线圈的大小, 最远能以线圈直径的 3 至 5 倍距离供电。另外, Powercast, Fulton, Visteon 等公司也利用该技术为手机、MP3、汽车配件、体温表、助听器及人体植入仪器、电动汽车等厂商提供无线输电的解决方案^[5]。

2.3 微波/激光

理论上, 无线电波波长越短, 其定向性越好, 弥散越小, 所以, 可利用微波或激光形式来实现电能的远程传输, 这对于新能源的开发和利用, 解决未来能源短缺等问题也有着重要意义。因此, 许多国家都没有放弃这方面的研究。1968 年美国学者 Glaser 提出了无线传输空间利用太阳能的“Powerbeaming”的概念, 利用电磁波接收装置将太阳能转换成电能^[6]。1979 年, 美国航空航天局 NASA 和美国能源部联合提出太阳能计划, 建立“SPS 太阳能卫星基准系统”, SPS (Solar Power satellite) 是太阳能发电卫星, 处在地球约 36 000 km 的

静止轨道上,那里太阳的能量约为地球上的 1.4 倍。据预测,一个 SPS 所装载的太阳电池的直流输出功率为 10 GW,电池输出的电力通过振荡器转换成微波电力,从送电的天线向地球表面以微波(2.45 GHz)形式无线送电。地球上的接收天线由半波长的偶极天线、整流二极管、低通滤波器及旁路电容组成,可接收到 5 GW 的电力^[5]。

目前,SPS 的建设方法、天线的放射特性、微波发送装置的姿态控制、宇宙空间的微波传播特性、为确保故障时安全的保安系统等都是亟待解决的技术问题。日本拟于 2020 年建造试验型太空太阳能发电站 SPS2000,2050 年进入规模运行^[6]。

3 结束语

无线电力传输作为最前沿的电力传输技术,会给人们的生活带来巨大的便利,并将带来电力工业的创新和重大变革,具有广泛的应用前景。未来无线输电技术有望解决电动汽车充电难题,可以给一些难以架设线路或危险的地区供应电能,并且解决新能源电站的

电能输送问题。目前国内,无线输电研究还处于起步阶段,应该认清形势,总结国内外一些已取得的研究成果,在此基础上开展更为深入的研究工作。

参考文献:

- [1] 李 照. 无线电力传输技术的基本原理与应用前景[J]. 信息技术教学与研究,2011(57):148-150.
- [2] KARALIS A, JOANNOPOULOS J D, SOLJACIC M. Efficient Wireless Non-radiative Mid-range Energy Rransfer [J]. Annals of Physics, 2008, 03 (23):34-48.
- [3] LEYH G, KENNAN M. Efficient Wireless Transmission of Power Using Resonators with Coupled Electric Fields [J]. Power Symposium, 2008. NAPS '08. 40th North Amercian. 2008 September:1-4.
- [4] 曾 翔. 无线电力传输技术研究[J]. 硅谷,2010(10):82,162.
- [5] GLASER P E. Power From the Sun: Its Future [J]. Science, 1968 (62):857-861.
- [6] 松浦虔士. 电力传输工程[M]. 曹广益译. 北京:科学出版社, 2001.

作者简介:

张 翼(1981),男,天津市人,工程师,从事特高压电网、电网智能化、新能源并网的情报分析研究工作。

The Development and Application of Wireless Power Transmission Technology

ZHANG Yi

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The development and study status of wireless power transmission technology are summarized in this paper. Three main technologies of wireless power transmission, including electromagnetic induction method, electromagnetic resonant coupling method, and microwave or laser method, are described briefly. The prospect for application of wireless power transmission technology and the important role of the study of wireless power transmission technology is pointed out.

Key words: wireless power transmission; electromagnetic induction; electromagnetic resonant coupling; microwave; laser

下 期 要 目

- 某 660 MW 机组一次调频试验控制逻辑分析
- 电网主接线图自动生成与校核系统研究
- 江苏电网非晶合金变压器综合评估
- 基于 G 语言的智能变电站五防规则生成方法
- 电动汽车电池更换服务收费标准研究
- 基于区域策略寻优的地区电网 AVC 系统
- 基于无线通信技术的电缆温度实时监测系统
- PQDIF 和 IEC 61850 标准在电能质量数据传输中的应用
- 220/110 kV 混压四回路新型窄基四柱钢管塔的优化设计
- 励磁系统整流装置均流不佳问题解决方法
- 一起 220 kV 变压器局部放电试验异常情况分析