

江苏电机工程

JIANGSU DIANJI GONGCHENG

第 33 卷 第 1 期(总第 153 期)

2014 年 1 月 28 日出版



目 次

专论与综述

- 含分布式风光电源的配电系统故障恢复策略
..... 范钧慧,徐楠,刘皓明(1)
锦—苏特高压直流对江苏电网变压器直流偏磁的影响
..... 吴鹏,田猛,陆云才,等(5)

故障诊断与检修策略

- 一起 110 kV 电缆终端特殊部位发热的分析处理
..... 王雨阳,王永强,王浩(9)
一起地铁供电系统停电事故的分析及对策
..... 魏巍,严伟,沈全荣,等(11)

电网技术

- 基于遗传算法的有源电力滤波器直流母线电压控制
..... 韩学栋,王海华(14)
双重化配置线路保护的重合闸功能运行分析
..... 宋亮亮,汪萍,袁宇波,等(18)
基于内点法和离散粒子群算法的输电网参数辨识 ... 周寅飞(22)
基于辨识模型的变压器故障诊断方法研究
..... 王峰,王春宁(26)
面向电网削峰的商业楼宇空调负荷调控实证研究
..... 叶剑斌,黄堃,刘琼,等(30)
基于 PCS-985B 的发电机定子接地保护应用及整定
..... 张伟伟,徐静,张婷昉(35)
智能继电保护测试仪程序在线升级技术研究
..... 王治国,于哲,王言国,等(38)
便携式保护在智能电网设备投运中的应用
..... 姚亮,陈琦,邹磊(42)

《江苏电机工程》 编辑委员会

顾 问	张凤祥	郑健超	严陆光
	单业才	黄其励	薛禹胜
	张 龙	陈 刚	
主 任 委 员 沈国荣			
副主任委员 鞠 平 王海林 李 群			
副 主 任 委员 鞠 平 王海林 李 群			
副 主 任 委员 鞠 平 王海林 李 群			
委 员	袁晓辉	黄学良	李晓慧
	张兴华	吴军基	张官元
	王作民	费益军	陈云仑
	莫建益	薛一如	叶 辉
主 编 薛一如			

江苏省一级期刊

中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊

中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊

中国期刊全文数据库全文收录期刊

中文科技期刊数据库收录期刊

《CAJ - CD 规范》执行优秀期刊

(双月刊)

闭锁逻辑解析在电脑钥匙软件设计中的应用	任金华(45)
基于缓存的补采策略在智能用电系统中应用	陶晓峰,陈方周(48)
760 kN 绝缘子双联耐张串金具研究	陈 宁,黄海俊,王圣博(50)
低压灭磁开关触头发热分析及处理	高 雷,肖立军(54)
中低压母线电弧光保护设计与应用	牛洪海,严 伟,王 杰(56)
特高压淮南 - 上海输变电工程新施工技术的应用	鲁俊荣,宋念达,宋 丹,等(60)
开闭所开关柜排列方式对配网运行检修的影响	沈 忱(63)

发电技术

江苏省火力发电机组二氧化碳排放量估算	孙栓柱,代家元(65)
某 600 MW 机组配煤掺烧试验与分析	陈孝武,葛 伟,张 军(68)
脱硫废水处理装置运行现状及优化建议	祝业青,傅高健,顾兴俊(72)
某 1000 MW 机组一次风机变频后存在问题及解决方法	赵恒斌,马剑宇(76)
3×35%静调轴流引风机在 1000 MW 机组中的应用	崔国华,朱广忠,何俊松(79)

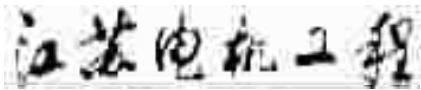
科普园地

能源互联网的发展现状	沈 洲,周建华,袁晓冬,等(81)
------------	-------------------

信息 (29, 71)

下期要目 (78)

广告索引 (34)



主管单位:江苏省电力公司
主办单位:江苏省电力公司
江苏省电机工程学会
编辑出版:《江苏电机工程》编辑部
地址:南京市江宁区帕威尔路 1 号
邮政编码:211103
电 话:(025)86558772(主编)
(025)86556860(编辑)
(025)86558020(编务)
(025)86558020(广告)
网 内:954296903, 954296927
传 真:(025)86558020
电子信箱:jsdj@chinajournal.net.cn(电网系统外)
jee@js.sgcc.com.cn(电网系统内)
创刊时间:1982 年
发行范围:公 开
国内发行:南京邮政局
邮发代号:28-305
国内定价:16.00 元
订 阅:全国各地邮政局(所)
印 刷:南京电力印刷厂
广告经营许可证号:3200004000534
中国标准连续出版物号:ISSN 1009-0665
CN 32-1541/TM

封面简介:

江苏华电戚墅堰发电有限公司位于常州市东部,地处经济发达的华东和江苏电网的负荷中心,南邻京杭大运河,北靠沪宁铁路,现有装机 1220MW,是华东电网骨干调峰电源之一,承担着向苏、锡、常电网供电的任务,现隶属于五大发电集团之一的中国华电集团公司。

公司的前身是始建于 1921 年的震华电厂,1924 年开创中国农村电力灌溉之先河,1937 年全厂发电总容量达 17.1MW,被称为“沪宁铁路的动力心脏”,1947 年投产我国电力发展史上第一座列车发电设备,1957 年企业大胆改革奖励制度被毛泽东主席称赞为“创举”。

近年来,公司借助国家“西气东输”和“川气东输”工程的实施,分别在 2005 年、2011 年投产了 4 台天然气发电(供热)机组,完成了从传统燃煤电厂向高效、清洁城市环保电站的转型。公司先后获得“全国五一劳动奖状”,“全国电力行业优秀企业”,中国华电集团公司“五星级发电企业”、“文明单位标兵”、“先进基层党组织”等荣誉。

CONTENTS

Thesis and Summary

Fault Recovery Strategy for Distribution Systems with Distributed Wind-Solar Generating System	FAN Junhui, XU Nan, LIU Haoming (1)
Impacts of Jin – Su HVDC Project on Transformer DC Magnetic Bias in Jiangsu Power Grid	WU Peng, TIAN Meng, LU yuncai,et al.(5)

Faults Diagnosis and Maintenance Strategy of Power Apparatus

Analysis on Terminal Overheat of a 110 kV Cable	WANG Yuyang, WANG Yongqiang, WANG Hao(9)
Analysis and Countermeasures of a Metro System Power Failure	WEI Wei, YAN Wei, SHEN Quanrong,et al.(11)

Electric Network Technology

DC Bus Voltage Control for Active Power Filter Based on Genetic Algorithm	HAN Xuedong, WANG Haihua(14)
Analysis on Reclosing Function Operation of Double Configured Line Protection Devices	SONG Liangliang, WANG Ping, YUAN Yubo,et al.(18)
A Hybrid Strategy Based on Interior Point Method and DPSO for Electricity Transmission Network Parameter Estimation	ZHOU Yinfei(22)
Research on Transformer Fault Detection Based on Identification Model	WANG Feng, WANG Chunning(26)
Empirical Study on Air-conditioning Load Regulation of Commercial Building for Power Grid Peak Clipping	YE Jianbin, HUANG Kun, LIU Qiong,et al.(30)
Application and Setting of Stator Ground Fault Protection Based on PCS-985B	ZHANGg Weiwei, XU Jing, ZHANG Tingfang (35)
Research on Online Upgrade Technology of Smart Relay Tester Program	WANG Zhiguo, YU Zhe, WANG Yanguo,et al.(38)
Application of Portable Protection for New Device Commission in Smart Power Grid	YAO Liang, CHEN Qi, ZOU Lei(42)
Application of Lockout Logic Analysis in Computer Key Software Designing	REN Jinhua(45)
Application of Cache Based Data Supplement Acquisition Strategy in Smart Electricity Consumption Acquisition System	TAO Xiaofeng, CHEN Fangzhou(48)
Research on the Fittings for Double Strain Insulator-strings of 760 kN	CHEN Ning, HUANG Haijun, WANG Shengbo(50)
Analysis and Recommendation on Contact Overheat of Low-voltage Field Discharge Switch	GAO Lei, XIAO Lijun(54)
Design and Application of Arc Protection for LV/MV Busbar	NIU Honghai, YAN Wei, WANG Jie(56)
Application of New Constructive Technology in the Ultra-high Voltage Huainan-Shanghai Power Transmission and Transformation Project	LU Junrong, SONG Nianda, SONG Dan,et al. (60)
The Impact of Switchgear's Arrangement in Switch Station on the Operation and Maintenance of Distribution Network	SHEN Chen(63)

Generation Technology

Research on the Estimation of Jiangsu Thermal Power Plant Carbon Dioxide Emissions	SUN Shuanzhu, DAI Jiayuan(65)
Experimental Study on Coal Blending Combustion of 600 MW Coal-fired Boiler	CHEN Xiaowu, GE Wei, ZHANG Jun(68)
Operation Condition and Optimization Measures of Treatment Equipment for Desulfurization Waste Water	ZHU Yeqing, FU Gaojian, GU Xingjun(72)
Issues Associated with Performing Frequency Conversion on Primary Air Fan in 1000 MW Power Unit	ZHAO Hengbin, MA Jianyu(76)
Application of 3×35% Static Blade Adjustable Axial Flow Induced Draft Fan in 1000 MW Power Unit	CUI Guohua, ZHU Guangzhong, HE Junsong(79)

Popular Science Field

Development and Suggestion of the Energy-Internet	SHEN Zhou, ZHOU Jianhua, YUAN Xiaodong,et al.(81)
---	---

Jiangsu Electrical Engineering(Bimonthly)

Competent Authorities Jiangsu Electric Power Company

Sponsor Jiangsu Electric Power Company

Jiangsu Society of Electrical Engineering

Editor and Publisher Editorial Department of Jiangsu Electrical Engineering

Address No.1 Power Road, Jiangning District, Nanjing, China

E-mail jsdj@chinajournal.net.cn(网外)

jee@js.sgcc.com.cn(网内)

Tel (025)86558772, 86558020

Fax (025)86558020

Publication Number ISSN 1009-0665

Post Code 211103

含分布式风光电源的配电系统故障恢复策略

范钧慧¹, 徐楠¹, 刘皓明²

(1.上海市电力公司检修公司,上海 200063; 2.河海大学能源与电气学院,江苏 南京 211100)

摘 要:具有随机性的风力发电和光伏发电接入配电系统对配电系统的故障恢复有很大的影响。建立了风电场异步电机的稳态模型,将异步风力发电机中的滑差修正量引入到雅克比矩阵中,计算得到含风电场的潮流分布,引入随机潮流分析风电和光伏发电对配电系统故障恢复的影响,建立以系统损耗的期望值最小和开关次数最少为指标的多目标配电系统故障恢复模型,利用基于带精英策略的非支配排序单亲遗传算法求解多目标问题,并通过 IEEE 33 节点配电系统进行仿真,研究结果说明模型的合理性以及方法的有效性。

关键词:配电系统;故障恢复;风电;光伏;随机潮流

中图分类号:TM912

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2014)01-0001-04

近年来,随着用户对配电系统供电可靠性和电能质量要求的提高,以及包括风力发电、光伏发电、燃气轮机、燃料电池、蓄电池等分布式电源技术不断发展,分布式电源在配电系统中的容量逐渐增加。分布式电源是在满足现有配电系统运行的基础上设计的小型发电系统,其具有安装灵活、供电方便、低污染等优点。由于分布式电源接在用户侧附近,可直接向用户提供电能,减少了电能在传输过程中的损耗,系统经济性大大提高,并可以提高系统的可靠性^[1-4]。分布式电源与大电网的结合降低了能耗,提高了供电系统可靠性和灵活性,是 21 世纪电力工业的发展方向^[5-7]。

分布式电源种类较多,特点各异,它们对配电系统的影响有很大差异。分布式电源中有可以人为控制出力的微型燃气轮机和燃料电池,也包含出力与外界自然因素有关的风力发电和光伏发电。对于有功出力与外界自然环境有关的风力发电和光伏发电,由于存在随机性,当系统故障发生后应将这类分布式电源与电网切离,在恢复过程中不利用该类分布式电源形成孤岛,并且恢复过程中需要考虑随机因素的影响。分布式电源特性使传统配电系统故障恢复^[8-11]不再适用,为了保证含分布式电源的配电系统故障后快速地恢复供电,需要在分析分布式电源对配电系统影响的基础上,深入研究含分布式电源配电系统的故障恢复。针对有功出力与外界环境因素相关性比较大的分布式电源,给出了一种含分布式风光电源的配电系统故障恢复策略,并进行算例验证。

1 分布式电源概率模型

1.1 风电概率模型

1.1.1 风速概率模型

采用 Weibull 分布来表示风速的分布情况。

Weibull 分布是一种单峰两参数的分布函数簇,其概率密度函数可以表达为:

$$f(v)=\frac{k}{c}\times(\frac{v}{c})^{k-1}\times\exp[-(\frac{v}{c})^k] \quad (1)$$

式中: v 为风速; c 和 k 分别表示 Weibull 分布的 2 个参数, c 为尺度参数,反映该地区的平均风速, k 为形状参数,反映风速的分布特点。

1.1.2 风力机模型

风能通过叶片转化的机械功率可以表示为:

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

式中: ρ 为空气密度; R 为风力机叶片半径; v 为风速; C_p 为风力机的风能利用系数,是表征风力机效率的重要参数,根据贝茨理论其最大值可以达到 16/27。其中风能利用系数与尖速比(TSR)有关, TSR 计算公式如下所示:

$$TSR=\frac{\omega R}{v} \quad (3)$$

式中: ω 为风轮在风速为 v 时的旋转角速度(rad/s); R 为风轮机的叶片半径。

1.1.3 发电机模型

文中考虑的风力发电机模型主要是异步风力发电机,异步发电机在超同步运行情况下以发电方式运行,此时发电机发出有功功率并从电网吸收无功功率。异步发电机等效模型如图 1 所示。

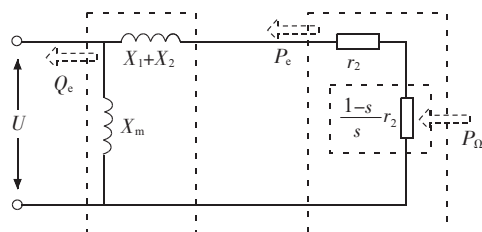


图 1 异步电机等效模型

其中: X_m 为励磁电抗; X_1 为发电机定子电抗; X_2 为发电

机转子电抗; r_2 为发电机的转子电阻; s 为滑差; P_e 为注入电网的有功功率; Q_e 为注入电网的无功功率; P_Ω 为输入转子的机械功率。从图1可以看出, P_Ω 不仅与异步电机的参数和发电机端电压有关,并且与 s 有关。根据能量守恒功率, P_Ω 与 P_m 应该相等,因此将 $\Delta P_{mec}=P_m-P_\Omega$ 作为不平衡量和滑差修正量引入到牛顿-拉夫逊法中,迭代过程中当 P_m 不等于 P_Ω 时,对 s 进行修正。

1.2 光伏发电的概率模型

1.2.1 光照强度的随机分布

在某一段时间内,太阳的光照强度可以近似认为是满足Beta分布的,其概率密度函数可以表示为^[8]:

$$f\left(\frac{r}{r_{\max}}\right)=\frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}\left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^{\alpha-1}\left(1-\frac{r}{r_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

式中: $r, r_{\max}$ 分别为实际光照强度和最大光照强度; α, β 为Beta分布的形状参数; Γ 为Gamma函数。

1.2.2 光伏系统输出功率的随机模型

在给定光照强度的情况下,光伏方阵总的输出功率 P_{PV} 可以通过下式计算得到^[9]:

$$P_{PV}=r \times A \times \eta \quad (5)$$

式中: η 为光伏系统的转换效率; r 为光照强度; A 为光伏系统的总面积。根据概率论与数理统计中随机变量的函数分布定理^[10],以及光照强度与光伏有功出力函数关系,利用随机变量的函数分布定理,可以得到光伏有功出力概率分布:

$$f(P_{PV})=\frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{P_{PV\max}\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}\left(\frac{P_{PV}}{P_{PV\max}}\right)^{\alpha-1}\left(1-\frac{P_{PV}}{P_{PV\max}}\right)^{\beta-1} \quad (6)$$

式中: $P_{PV\max}$ 为光伏发电的最大输出功率。为了简化计算,只考虑光伏发电的有功功率,忽略光伏发电中的无功功率。

2 随机潮流计算

为了准确反映风电以及光伏对配电系统故障恢复的影响,首先考虑含风电以及光伏的随机潮流计算,采用三点估计法和Gram-Charlier展开级数得到各节点电压、各条线路潮流的统计分布。

2.1 三点估计法

对每个随机变量 X_k 取3个估计点,记为 X_{k1}, X_{k2}, X_{k3} ,可以表示为:

$$X_{ki}=u_k+\xi_{ki}\sigma_k \quad i=1,2,3 \quad (7)$$

式中位置度量 ξ_{ki} 通过以下公式计算:

$$\begin{cases} \xi_{ki}=\frac{\lambda_{k3}}{2}+(-1)^{3-i}\sqrt{\lambda_{k4}-\frac{3\lambda_{k3}^2}{4}} & i=1,2 \\ \xi_{k3}=0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\lambda_{k3}, \lambda_{k4}$ 分别为随机变量 X_k 的偏度系数和峰度系数,计算公式为:

$$\begin{cases} \lambda_{k3}=\frac{E[(X_k-u_k)^3]}{(\sigma_k)^3} \\ \lambda_{k4}=\frac{E[(X_k-u_k)^4]}{(\sigma_k)^4} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $E[(X_k-u_k)^3], E[(X_k-u_k)^4]$ 分别为随机变量 X_k 的三阶和四阶中心矩。 X_{ki} 的概率集中度 p_{ki} 表达式为:

$$p_{ki}=\frac{(-1)^{3-i}}{[\xi_{ki}(\xi_{k1}-\xi_{k2})]} \quad i=1,2 \quad (10)$$

$$p_{k3}=\frac{1}{n}-p_{k1}-p_{k2}=\frac{1}{n}-\frac{1}{\lambda_{k4}-\lambda_{k3}^2} \quad (11)$$

利用已有的函数关系 $F=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$,计算出 F 在各个估计点的值 f ,并根据 p_{ki} 计算出 F 的 j ($j=1, 2, \dots, 5$)阶矩:

$$E(F^j)=\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^3 \{p_{ki} \times [f(u_1, u_2, \dots, X_{ki}, \dots, u_n)]^j\} \quad (12)$$

2.2 Gram-Charlier 展开级数

对于任意一个随机变量 X ,其期望值为 u ,标准差为 σ ,则其标准化随机变量 $\bar{X}$ 可以表示为:

$$\bar{X}=\frac{X-u}{\sigma} \quad (13)$$

记 $\bar{X}$ 密度函数以及分布函数分别为 $g(x)$ 和 $G(x)$,根据Gram-Charlier级数展开理论, $G(x)$ 和 $g(x)$ 可以表示成如下形式:

$$G(x)=\Phi(x)+\frac{C_1}{1!}\Phi'(x)+\frac{C_2}{2!}\Phi''(x)+\dots \quad (14)$$

$$g(x)=\varphi(x)+\frac{C_1}{1!}\varphi'(x)+\frac{C_2}{2!}\varphi''(x)+\dots \quad (15)$$

式中: $\Phi(x), \varphi(x)$ 分别为标准正态分布的累积分布函数和概率密度函数。系数 C_k 可以通过下式计算:

$$C_k=(-1)^k \int_{-\infty}^{+\infty} H_k(x)g(x)dx \quad k=1,2,3,\dots \quad (16)$$

式中: $H_k(x)$ 为 k 阶Hermite多项式。

3 含分布式风光电源的配电系统故障恢复

3.1 故障恢复目标函数

由于风电以及光伏的引入,原有配电系统的确定性潮流变为随机潮流,常规的确定性网络损耗作为经济性指标不再适用,文中采用系统的网络损耗期望值作为经济性指标。对于快速性指标,主要考虑恢复供电过程中的开关次数。建立的模型如下所示:

$$\min F_1=\sum_{i=1}^N E_i(P_{\text{loss}}) \quad (17)$$

$$\min F_2=\sum_{j \in A} S_j \quad (18)$$

式中: $\min F_1$ 为系统网络损耗的希望值最小; N 为线路支路数; $E_i(P_{\text{loss}})$ 为线路*i*的网损期望值,可以通过随机潮流计算得到; $\min F_2$ 为开关动作次数; A 为整个系统范围; j 为开关序号; S_j 为开关动作情况,当开关*j*由断开到闭合或由闭合到断开时, $S_j=1$,否则 $S_j=0$ 。

3.2 约束条件

(1) 潮流等式约束方程:

$$P_{Gi} + P_i + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (19)$$

$$Q_{Gi} + Q_i + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (20)$$

(2) 风电机机械功率与电磁功率守恒:

$$P_m = P_\Omega \quad (21)$$

(3) 线路容量约束:

$$S_i \leq S_{i \max} \quad (22)$$

其中: S_i 为线路*i*的容量; $S_{i \max}$ 为线路*i*的容量上限。

(4) 节点电压约束:

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad (23)$$

其中: $U_{i \min}$, $U_{i \max}$ 分别为节点*i*的电压下限和上限。

3.3 多目标的带精英策略的非支配排序单亲遗传算法的优化求解

3.3.1 带精英策略的非支配排序

对于多目标优化问题,由于多个目标之间往往存在冲突,要寻找一个解在所有目标上均为最优是非常困难甚至无解,因此多目标存在一个解集,这种解集为非支配解或 Pareto 最优解^[11,12]。多目标优化算法主要有 3 个性能评价指标:所求解要尽量接近 Pareto 最优解;所求解要均匀分布;求解过程中防止获得 Pareto 最优解丢失,其中 NSGA2 采用了快速非支配排序、个体拥挤度距离计算、精英策略使优化过程更加快速均匀地靠近 Pareto 最优解。

3.3.2 单亲遗传算法编码策略

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,将隐含存在的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,只要满足每个基因块中只有一个基因为 0,其余基因全为 1。

如果某个公共支路同时存在 2 个基因块中,还需要另外的判定规则:如果某一公共支路在 2 个基因块中编码同时 0,则此时的编码是不可行解。

4 算例分析

采用算例为 IEEE33 节点系统,假设在节点 23 和节点 13 处分别接有风电机以及光伏系统,如图 2 所示。

风电机和光伏系统相关参数如表 1 和表 2 所示。正常运行时,线路 8-14、7-20、11-21、17-32、24-28 断开。假设在时间 *t* 线路 7-8 发生永久性故障。

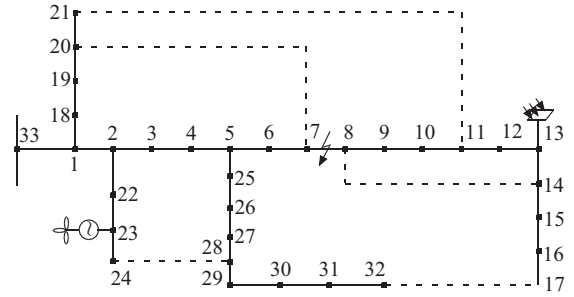


图 2 含风电及光伏的配电系统结构

表 1 风电机相关参数

参数	数值	参数	数值
空气密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.224 5	转子电抗 / Ω	0.149 1
叶轮半径 / m	24	转子电阻 / Ω	0.004 86
额定电压 / kV	0.69	励磁电抗 / Ω	2.205 9
额定功率 / kW	600	<i>k</i>	3.9
定子电抗 / Ω	0.050 7	<i>c</i>	10.7

表 2 光伏发电相关参数

参数	数值	参数	数值
光伏总面积 / m^2	10 000	α	1.732 1
光电转换效率	0.14	β	2.888 4
最大辐照度 / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	700		

Pareto 优化方案如表 3 所示,从算例分析结果可以看出,方案 3 网络损耗期望值最小,但其需要动作的开关数最多;方案 2 的开关动作次数最少,但是其网络损耗期望值最大;方案 1 的网络损耗期望值以及开关动作次数处于方案 2 和方案 3 之间。在实际故障恢复过程中,操作人员可以根据恢复过程中的侧重不同,选择相应的恢复方案。

表 3 Pareto 优化方案

方案	网络损耗期望值 / kW	开关次数	断开开关
1	117	3	5-6 8-14 17-32 24-28
2	123.8	1	8-14 17-32 24-28 17-20
3	115.2	5	5-6 8-14 31-32 24-28

蒙特卡洛仿真(MCS)是一种通过随机变量的数字模拟和统计分析求取相关问题的数值方法,其具有较高的精度。为了验证文中方法的精确度,对方案 1 分别采用 Gram Charlier 级数展开和 Monte Carlo 法得到状态变量的概率分布曲线进行了比较。异步发电机滑差 *s* 的概率分布曲线如图 3 所示,风电机中尖速比(*TSR*)

概率分布曲线如图 4 所示。对异步发电机来说,滑差是一个重要的状态变量,根据图 3,利用 MSC 和 Gram Charlier 级数展开得到的滑差概率分布基本相同,说明利用 Gram Charlier 级数展开可以准确表征异步风力发电机的稳态概率模型。

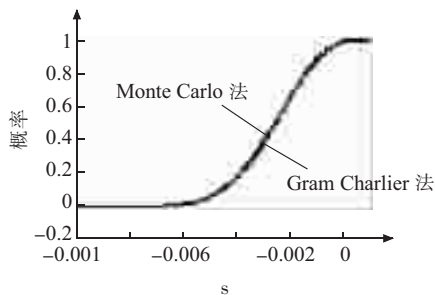


图 3 异步发电机滑差概率分布曲线图

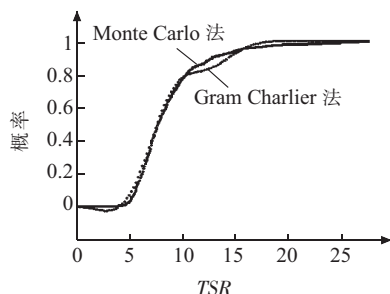


图 4 异步发电机尖速比概率分布曲线

网损的概率分布如图 5 所示,从图中可以看出, Gram Charlier 级数展开得到的线路网络损耗的概率分布与 MSC 得到的线路网损概率分布基本相同。

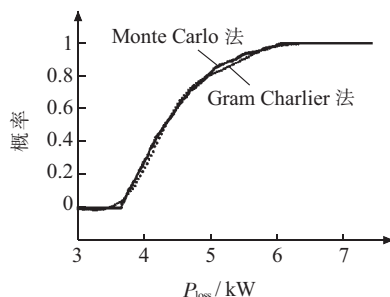


图 5 线路 22-23 损耗概率分布曲线

图 6 给出了接有异步风电机系统的节点电压幅值概率分布曲线。从图中可以看出,节点电压都满足精度要求,说明该模型以及算法的精确性。

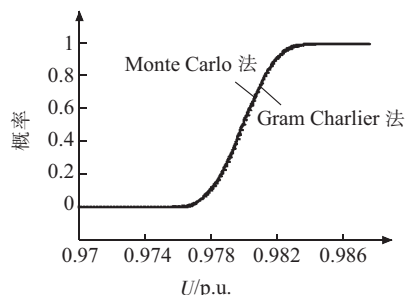


图 6 节点 23 电压幅值的概率分布曲线

5 结束语

首先建立了风电机等效模型和光伏发电系统的有功出力随机模型,考虑了风电机原动力与尖速比、滑差等参数之间的函数关系,在牛顿-拉夫逊法中,通过引入滑差修正量,相应地对雅克比矩阵进行修改,得到了含风电机的系统潮流计算。光伏系统等效为随机注入功率,然后利用两点法以及 Gram Charlier 展开级数计算含风力发电以及光伏发电的随机潮流。在分析了含风电和光伏分布式电源配电系统特点的基础上,建立了最小化网损期望值和开关操作次数的多目标模型,并利用考虑精英策略的非支配排序单亲遗传算法进行优化多目标问题。

参考文献:

- [1] DUGAN R C, Mc DERMOTT T E, BALLG J. Planning for Distributed Generation [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2001, 7(2): 80-88.
- [2] DUGAN R C, Mc DERMOTT T E. Distributed Generation [J]. Industry Application Magazine, 2002, 8(2): 19-25.
- [3] 梁有伟,胡志坚,陈允平. 分布式发电及在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71-75.
- [4] BARKER P P, De MELLO R W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems. I. Radial Distribution Systems [J]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 3(3): 1645-1656.
- [5] MITCHELL C. Value of Distributed Generation-policy Implications for the UK [C]//Proceeding of the 1998 IEE Colloquium on Economics of Embedded Generation, London, UK: IEE Stevenage, United Kingdom, 1998: 1-11.
- [6] DALY P A, MORRISON J. Understanding the Potential Benefits of Distributed Generation on Power Delivery Systems [C]//Rural Electric Power Conference, Little Rock, AR, US: Institute of Electrical and Electronics Engineers Tnc, 2001: 1-13.
- [7] 丁磊. 多微网配电系统的分层孤岛运行及保护控制[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [8] 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.
- [9] 李海峰, 张尧, 钱国基, 等. 配电网故障恢复重构算法研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 34-37.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 顾国华, 秦永刚. 基于随机规划理论的含异步风电机的配电网故障重构[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(2): 60-63.

作者简介:

范钧慧(1975),男,江苏宜兴人,工程师,从事电力系统运行、电网建设方面的工作;

锦—苏特高压直流对江苏电网变压器直流偏磁的影响

吴 鹏¹, 田 猛², 陆云才¹, 陈铭明¹, 蔚 超¹, 吴益明¹

(1.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏 南京 211103;2.镇江市供电公司,江苏 镇江 212000)

摘 要:±800 kV 锦—苏特高压直流工程大功率双极不平衡调试期间,江苏电网建设了直流偏磁在线监测系统,开展了直流偏磁带电检测工作。对距苏州换流站接地极 100 km 内主要 500 kV 和 220 kV 主变开展直流偏磁测试,包括中性点直流电流、振动、噪声等,并研究其对江苏电网的影响。研究发现,该工程直流偏磁会造成附近主变振动加剧、噪声增加,但未见造成局部过热现象,对主变的安全运行影响较小。提出了对新投运主变出厂试验增加直流偏磁试验和加强直流偏磁在线监测跟踪的建议。

关键词:特高压直流;直流偏磁;双极不平衡;在线监测;带电检测

中图分类号:TM72

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2014)01-0005-04

高压及特高压直流输电在系统调试、检修或发生单极故障的情况下,采用单极大地回线的运行方式^[1-3]。单极大地回线运行时,巨大的直流电流经接地极流入大地,造成较大范围的地电位变化^[4-5]。两站地电位存在电位差,会在两站主变中性点流过直流电流,从而造成主变铁心磁密工作点偏移,主变出现噪声增大、振动加剧等现象,还可能引起漏磁过大而发生局部过热,并造成交流电网的谐波畸变增大等不利影响^[6-10]。目前,国内部分厂家只在技术协议中保证,在变压器 500 kV 绕组中性点接地回路中存在 4~10 A 直流偏磁电流下,变压器不会因直流偏磁作用产生振动而导致结构件松动,变压器铁心不存在局部过热现象^[11]。曾对 500 kV 斗山变 3 号主变(三相分体)进行过 1 A、2 A 直流偏磁试验,因变压器振动过大,未进行 4 A 直流偏磁试验,试验结果显示 2 A 未对变压器造成明显损伤^[12]。锦—苏±800 kV 特高压直流输电工程接地极位于苏州吴江地区,苏南地区负荷量重,枢纽变电站众多。为了评估特高压直流单极大地回线运行方式下直流偏磁对苏南交流电网枢纽变电站主变的影响,在特高压直流调试期间对苏南枢纽变电站主变进行了直流偏磁带电检测和在线监测,并对试验结果进行了分析。

1 锦—苏特高压直流系统基本情况

锦—苏±800 kV 特高压直流输电是国网公司继向上线后建设的又一特高压直流输电工程。该工程额定输送容量 7200 MW,最大连续输送容量 7600 MW,线路途经四川、云南、重庆、湖南、湖北、安徽、浙江、江苏八省市,全长约 2 100 km。±800 kV 苏州换流站是锦苏线在江苏的落脚点,总占地 16.6 hm²,换流变压器容量为(24+5)×339 MV·A,500 kV 出线 6 回。

苏州吴江地区附近 100 km 范围内共有 3 个换流站接地极:±800 kV 同里换流站接地极、±800 kV 奉贤换流站接地极、±500 kV 华新换流站接地极。±800 kV 苏州换流站位于江苏苏州 500 kV 吴江变电所西侧,属于松陵镇和平望镇管辖,同里接地极位于吴江市和浙江交界处桃源镇民益村,接地极线路约 37.5 km(与苏州换流站直线距离约 27 km);向家坝—上海±800 kV 特高压直流奉贤换流站接地极位于上海市金山区廊下镇西南部,六里塘以东,山塘河以北,朱平公路以西,距奉贤换流站 96 km;另外,在苏州接地极与奉贤接地极中间还有±500 kV 华新换流站接地极。

2 直流偏磁测试方法

为了更全面了解锦屏—苏南±800 kV 特高压直流对江苏电网运行的影响,结合系统调试计划,在苏州换流站接地极 100 km 半径范围内安装直流偏磁在线监测设备以及安排带电检测,在大功率调试期间实时检测变压器噪声、振动、中性点直流电流。

2.1 直流偏磁测试布点

为获得较为准确的直流分布情况,综合考虑苏州地区变电站众多、主变负荷重,距离特高压线路及接地极地理位置、太湖水域等因素,测试主变主要涵盖苏州大部分 500 kV 及吴江 220 kV 变电站、环太湖周围无锡 500 kV 变电站,具体测点如表 1。

2.2 直流偏磁在线监测系统

直流偏磁在线监测系统由直流偏磁在线监测终端和后台组成。监测终端包括直流电流传感器、数据采集单位、无线发射模块及相应的电源箱体等;系统后台包括无线接收单元、数据处理服务器、直流偏磁在线监测系统软件及其他附件等。直流电流传感器采用霍尔效应测试直流电流,安装在变压器中性点引下线上,通过屏蔽信号电缆将数据提供给采集单元,采集单元初步

表 1 主要测试布点

地区	变电站主变	距离 /km
苏州	500 kV 吴江变	21
	500 kV 玉山变	38
	500 kV 木渎变	50
	500 kV 车坊变	31
	500 kV 石牌变	53
	220 kV 慈云变	15
	220 kV 菀坪变	23
无锡	500 kV 梅里变	71

加工后将数据转化成特定文件发送给无线发射模块,无线发射模块采用商用移动网络传输数据文件给远端,远端无线接收后转交至后台直流偏磁在线监测系统服务器上,进入高级应用层。直流偏磁在线监测系统结构如图 1 所示。

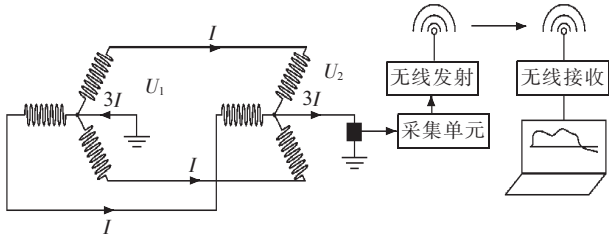


图 1 直流偏磁在线监测系统

为监测锦屏—苏南±800 kV 特高压直流输电工程对江苏电网主变的直流偏磁影响,在苏州地区和无锡地区 8 个 500 kV 变电站和 6 个 220 kV 变电站共装设 23 套直流偏磁在线监测终端。另外在 500 kV 吴江变 1 号主变、500 kV 木渎变 2 号主变和 500 kV 车坊变 3 号主变装设了 3 套振动和噪声在线监测装置,以辅助监测直流偏磁对主变的影响。

直流偏磁在线监测终端在变电站现场安装前后进行了测量精度和测量值校准。校准采用安捷伦标准电流源输出 1 A、2 A、4 A、8 A、16 A 直流电流,然后通过直流偏磁在线监测终端进行测量比对,测试精度小于 2%。

2.3 直流偏磁带电检测测试

在锦屏—苏南±800 kV 特高压直流输电工程调试期间,为防止直流偏磁在线监测系统个别终端通信问题中断或其他原因非正常状况造成测试失效,另外补充测试了未安装直流偏磁在线监测终端的主变中性点直流电流,在苏州和无锡地区布置 9 个变电站(吴江变、车坊变、木渎变、石牌变、玉山变、梅里变、惠泉变、菀坪变、苏州换流变)进行直流偏磁现场带电测试,采用仪器为特制直流钳 8 支,振动分析仪 2 台,NL 噪声测试仪 4 台。特制直流钳中直流传感器与 2.2 中所采用的直流传感器相同,测试精度小于 2%。振动分析仪

采用 IOtech 652U,采用加速度传感器和速度传感器两类传感器。

3 大功率双极不对称运行对江苏电网的影响

3.1 双极不平衡大功率调试

极 1 大功率调试时间为 2012 年 7 月 7 日 8:00 至 7 月 8 日 0:43,其中 12:58 达到满负荷运行,双极功率(1800+180) MW,入地电流 3930 A;16:58 达到 1.1 倍过负荷运行,双极功率(1980+180) MW,最大入地电流 4494 A。功率和电流曲线如图 2 所示。

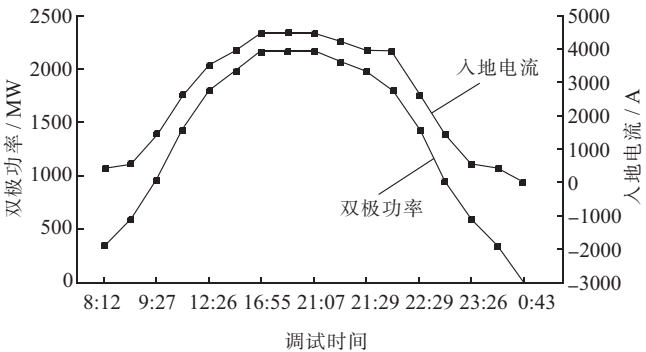


图 2 极 1 大功率调试曲线及接地极入地直流曲线

3.2 直流偏磁测试结果

在大地回线最大入地电流 4494 A 时,对苏州和无锡地区重要主变直流偏磁进行了测试,测试数据如表 2 所示。

表 2 苏州和无锡地区部分变电站主变直流偏磁测试结果

地区	变电站主变	中性点最大直流电流 /A	噪音增加值 /dB
苏州	500 kV 吴江变 1 号	2.80	8.4
	500 kV 吴江变 2 号	1.70	3.4
	500 kV 吴江变 3 号	2.95	9.7
	500 kV 吴江变 5 号	1.60	4.8
	500 kV 吴江变 6 号	1.80	4.1
	500 kV 玉山变 1 号	4.48	12.5
	500 kV 玉山变 4 号	4.34	12.0
	500 kV 车坊变 2 号	7.20	16.0
	500 kV 车坊变 3 号	3.80	10.0
	500 kV 石牌变 1 号	3.12	3.0
	500 kV 石牌变 2 号	3.50	3.0
	500 kV 石牌变 3 号	3.20	3.0
	220 kV 慈云变 1 号	3.05	/
	220 kV 慈云变 2 号	2.98	/
	220 kV 菀坪变 1 号	3.70	/
无锡	220 kV 菀坪变 2 号	4.05	/
	500 kV 梅里变 1 号	2.10	/
	500 kV 梅里变 2 号	1.95	/
	500 kV 梅里变 3 号	1.40	/

从表 2 可以看出, 锦苏直流系统大地回线运行方式下, 苏州换流站接地极入地电流最大为 4500 A, 苏州地区 500 kV 变电站主变均受直流偏磁影响, 中性点直流电流、振动和噪声均有明显增长, 另外变压器顶层油温也有 2~3 ℃ 的增长。

500 kV 吴江变 5 台主变中性点直流电流增长至 1.60~2.95 A, 3 号东芝产主变直流最大 2.95 A, 噪音比正常最大增加 3.4~9.7 dB, 振动加速度幅值增大 1 倍; 500 kV 玉山变主变中性点为直接接地方式, 1 号、4 号主变直流电流分别为 4.48 A, 4.34 A, 噪音比正常约增加 12.0 dB; 500 kV 车坊变 2 号主变为日本三菱产的壳式变压器, 最大直流为 7.2 A, 噪音增加 16.0 dB, 3 号主变最大直流 3.8 A, 噪音增加 10.0 dB, 振动增加 1.3 倍; 500 kV 石牌变 1 号、2 号、3 号变压器直流增加 3.12~3.50 A, 噪音增加 3.0 dB; 无锡地区 500 kV 主变受直流偏磁影响较轻, 梅里变、惠泉变、岷珠变主变中性点直流均在 2 A 以下。

另外, 苏州吴江地区 220 kV 慈云变、菀坪变主变受直流偏磁影响较大, 菀坪变、慈云变中性点直流增长至 3~4 A, 从地理位置看这 2 个站比较靠近苏州换流站接地极。其他吴江地区 220 kV 主变受直流偏磁影响均较小, 中性点直流均在 1.6 A 以下。

500 kV 吴江变 1 号主变外壳振动在苏州换流站双极不平衡大功率调试期间的变化情况如表 3 所示, 随着入地电流的增大, 主变中性点直流偏磁严重, 主变振动加剧。从直流偏磁状态下的 500 kV 吴江变 1 号主变振动频谱分析(如图 3 所示)可以看出, 直流偏磁造成变压器铁心偏饱和, 振动频率以高频为主。

表 3 500 kV 吴江变 1 号主变振动随调试的变化

时间	功率 /MW	入地电流 /A	中性点直流 /A	振动加速度 /g
8:25-9:21	420+180	577	0.4	0.40
9:28-12:00	780+180	1464	0.9	0.52
12:03-12:20	1260+180	2655	1.7	0.65
12:27-12:50	1620+180	3525	2.2	0.65
12:58-19:08	1800+180	3965	2.5	0.66
19:08-19:40	1980+180	4494	2.8	0.70

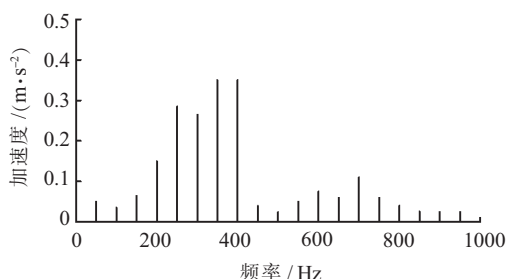


图 3 直流偏磁状态下 500 kV 吴江变 1 号主变振动频谱分析

苏州换流站双极不平衡大功率调试前后, 对所评估主变进行油色谱分析, 油色谱数据显示主变未因直流偏磁出现局部过热等异常现象。

4 结束语

华东地区是电力负荷集中的区域, 苏沪浙交界区域布置了苏州、奉贤、华新三座特高压直流换流站, 同样交流 500 kV 和 220 kV 电网也在该地区分布密集, 测试和监测换流站不平衡运行对该地区主变的直流偏磁影响对电网安全稳定运行具有较大意义。在特高压锦—苏直流工程最大不平衡功率运行情况下进行测试, 除车坊变 2 号主变外其他主变直流偏磁电流均小于 4 A, 换算到单相变压器小于 1.3 A, 远小于技术协议中规定主变单相耐受直流偏磁电流 4 A 的能力值, 且未发现主变因直流偏磁产生局部过热现象。

江苏境内 500 kV 主变大多选用中性点小电抗接地方式, 零序阻抗的增大虽对直流偏磁现象存在一定的抑制作用, 但是考虑到多座换流站存在同时不平衡运行的可能, 以及对未来运行环境恶劣的预估, 建议对新入网的 500 kV 主变技术协议应严格规定变压器耐受直流偏磁能力水平, 出厂试验应添加直流偏磁试验, 并加强直流偏磁的在线监测跟踪。

参考文献:

- [1] 蒯狄正, 万 达, 邹 云. 直流偏磁对变压器的影响[J]. 中国电力, 2004, 37(8): 41-43.
- [2] 蒯狄正, 万 达, 邹 云. 直流输电地中电流对电网设备影响的分析与处理[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 81-82.
- [3] 姚纛英. 大型电力变压器直流偏磁现象的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2002.
- [4] 陈青恒, 马宏彬, 何金良. 直流偏磁引起的 500 kV 电力变压器振动和噪声的现场测量与分析[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 93-96.
- [5] 蒯狄正, 万 达, 邹 云. 变压器中性点注入反向抗偏磁直流的应用分析[J]. 华电电力, 2005, 33(6): 21-23.
- [6] 苑 舜, 王天施. 电力变压器直流偏磁研究综述[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 83-87.
- [7] 钟连宏, 陆培均, 仇志成, 等. 直流感地极电流对中性点直接接地变压器影响[J]. 高电压技术, 2003, 29(8): 12-13.
- [8] 蒋跃强, 李红雷, 周行星, 等. 变压器直流偏磁的振动特性研究[J]. 华东电力, 2009, 37(1): 132-135.
- [9] 文继锋, 张晓宇, 程 骁, 等. 换流变压器直流偏磁与饱和保护[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(2): 28-30.
- [10] 吴 鹏, 陆云才, 陈铭明, 等. 江苏电网非晶合金变压器综合评估[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(3): 1-5.
- [11] 国家电网公司. 110(66) kV~500 kV 油浸式变压器(电抗器)管理规范[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 25-28.
- [12] 全国变压器标准化技术委员会. GB/T 1094.101—2008 电力变压器第 10.1 部分: 声级测定应用导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

作者简介:

吴 鹏(1983),男,河南西平人,博士,从事线圈类电力设备状态评估研究工;

田 猛(1982),男,河南开封人,工程师,从事高电压试验技术研究工作;

陆云才(1982),男,江苏南通人,工程师,从事线圈类电力设备状态

评估研究工作;

陈铭明(1986),男,江苏南通人,硕士,从事电能计量技术管理与电能质量研究工作;

蔚 超(1984),男,山东莱芜人,硕士,从事线圈类电力设备状态评估研究工作;

吴益明(1964),男,江苏镇江人,高级工程师,从事高电压技术和变压器类设备的研究工作。

Impacts of Jin – Su HVDC Project on Transformer DC Magnetic Bias in Jiangsu Power Grid

WU Peng¹, TIAN Meng², LU Yuncui¹, CHEN Mingming¹, WEI Chao¹, WU Yiming¹

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

2. Zhenjiang Power Supply Company, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: During the period of high-power bipolar power imbalance adjustment of the ± 800 kV Jinping-Suzhou HVDC project, an on-line monitoring system is constructed. The impacts, including neutral DC current, vibration, and audible noise, of DC magnetic bias on the 500 kV and 220 kV main transformers 100 km from Suzhou converter station grounding pole are studied. The field test found that DC magnetic bias increases vibration and audible noise, but no overheating happens and having little impact on main transformers' safe operation. Finally, several suggestions are provided that DC magnetic bias test should be implemented to transformers before coming to operation and on-line monitoring tracking of DC magnetic bias should be strengthened.

Key words: HVDC project; DC magnetic bias; bipolar imbalance; on-line monitoring; field test

(上接第4页)

徐 楠(1978),男,浙江宁波人,高级工程师,从事电力系统运行、电网建设、电力市场方面的研究;

刘皓明(1977),男,江苏东台人,副教授,从事智能配电网、微电网方向的研究工作。

Fault Recovery Strategy for Distribution Systems with Distributed Wind-Solar Generating System

FAN Junhui¹, XU Nan¹, LIU Haoming²

(1. Inspection & Maintenance Company, Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200063, China;

2. College of Energy and Electric Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Wind power and solar power with the stochastic characteristics have greater influences on fault recovery strategies of distribution system. This paper proposes fault recovery strategies for the distribution system considering the influences of wind and solar power. Firstly, a simplified steady-state equivalent model of an asynchronous generation is used to demonstrate the wind power generators, and the stochastic model of wind speed is adopted. The slip ratio is added into Jacobian matrix to calculate power flow of distribution system. The probabilistic output of solar power is considered as an injection power which is influenced by solar irradiance. Secondly, three-point estimate method is employed to solve probabilistic power flow of distribution systems. The recovery problem is presented as a multi-objective problem with the minimum mean of the system loss and the numbers of switch operation. Fast Elitist Non-Dominated Sorting Partheno-Genetic Algorithm is used to solve this multi-objective problem. A test system is used to show that the models and algorithms proposed are efficient.

Key words: distribution systems; fault recovery; wind power; solar power; probabilistic power flow

欢迎投稿 欢迎订阅

一起 110 kV 电缆终端特殊部位发热的分析处理

王雨阳, 王永强, 王 浩
(南京供电公司, 江苏 南京 210013)

摘 要:介绍了一起 110 kV 电缆终端构架撑杆螺栓发热缺陷。通过对电缆设备进行检查分析, 确认接地扁铁与接地网接触不良以及中间接头处护层接线连接错误是导致发热的主要原因, 并针对这一情况制定了相应的处理对策, 为今后类似问题的解决提供参考。

关键词:电缆终端; 构架撑杆螺栓; 发热

中图分类号:TM726.4

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)01-0009-02

随着社会经济的发展和城市美化建设的需要, 越来越多的高压电缆应用到输电线路中, 架空线-电缆混联线路^[1]的规模逐年增大, 南京城区 110 kV 电缆化率已达 40% 以上。随着电缆设备规模的不断加大, 电缆设备的故障率也在逐年攀升, 导致电缆设备故障的原因主要有产品生产质量问题、安装工艺不良、外力破坏等。文中主要介绍南京供电公司 2013 年红外测温中发现的一起 110 kV 电缆终端构架撑杆螺栓部位发热缺陷, 通过对发热部位的检查、分析, 最终确认缺陷产生的原因, 并提出了具体的处理措施。

1 设备概况

110 kV 莫虎 2 号线为架空线-电缆混联线路, 线路全长 4.567 km, 架空线长 1.727 km, 电缆长 2.84 km, 电缆共分两段, 如表 1 所示。莫愁变至 1 号塔段电缆工程分 2 次施工, 一次是 2002 年 9 月投运, 另一次是 220 kV 莫愁变电站改造, 将原莫愁变电缆延伸至新莫愁变 110 kV GIS 室, 新老电缆通过一组绝缘中间接头对接, 于 2011 年 5 月投运。

表 1 110 kV 莫虎 2 号线电缆设备明细

起始位置	电缆厂家	长度/km	投运日期
莫愁变—1 号塔	日本住友	0.19	2002-09-12
	山东阳谷	0.25	2011-05-30
12 号塔—上海路变	宝胜电缆	2.4	2001-01-10

注: 电缆型号均为 YJLW03-1×630。

2 发热情况

2013 年 1 月 10 日 20:50, 红外测温发现 110 kV 莫虎 2 号线 1 号塔电缆终端 B、C 相构架撑杆螺栓发热。现场测得 A、B、C 相构架撑杆螺栓温度分别为 2.5℃、25.74℃、32.02℃, A、C 相温差为 29.52℃, 相对温差达 92.2%。参照规范要求, 热点温度>90℃或

相对温差≥80%, 为严重缺陷^[2]。连续多天跟踪监测发现, 发热部位温度始终维持在这一水平。

3 原因分析

电缆构架属于电流致热型设备^[3], 发热是由于有电流做功, 分析该段电缆金属护层接地方式, 判断该部位产生电流有 3 种可能: (1) 莫愁变 GIS 终端侧电压护层保护器^[4]发生击穿, 导致电缆护层中的感应电流形成闭合回路; (2) 中间接头处存在接地点, 感应电流在中间接头至 1 号塔段通过回流线形成环流; (3) 中间接头至 1 号塔段电缆金属护套已经损坏, 存在接地点。

(1) 调度 OPEN-3000 系统显示, 1 月 10-18 日 110 kV 莫虎 2 号线最高荷载为 137.88 A, 远小于正常载流能力 725 A。线路运行状态良好, 未发生任何过载及过电压情况。检查莫愁变 GIS 终端侧电压护层保护器, 钳形电流表测得保护器进线同轴电缆内部三相电流均为零, 可以确定保护器工作状态良好, 未发生击穿, 排除因电压护层保护器发生击穿产生环流的可能。

(2) 检查发现, 1 号塔电缆终端 B、C 相构架撑杆螺栓锈蚀严重, 测得构架 A、B、C 三相接地电阻分别为 18.5Ω、0.7Ω、0.6Ω。在无特殊要求下, 110 kV 电缆终端接地电阻应不大于 1.0Ω, 故 A 相接地不合格。进一步检查发现, A 相接地扁铁与地下接地网连接明显松动、不牢固。钳形电流表测得尾管接地线内部 A、B、C 三相电流分别为 149.2 A、154.4 A、156.7 A。可以判定电缆护套中的感应电流已形成了环流。运行中电缆金属护套长期存在环流, 导致电缆发热, 不仅降低了线路的载流量, 还会加速电缆绝缘老化, 缩短电缆使用寿命。

(3) 测得中间接头处接地箱外壳接地线电流为 90 A, 说明此处有接地点, 打开接地箱后发现接地箱内 A、B、C 三相同轴电缆各自与铝排相接, 并通过横向铝排短接后经接地端子接地, 如图 1 所示。根据现场接地箱安装情况, 110 kV 莫虎 2 号线莫愁变至 1 号塔段电缆金属护层接地方式如图 2 所示。电缆金属护层中的感

应电压产生感应电流,在铝排互联后接地,感应电流通过回流线形成回路,产生了环流。



图 1 中间接头接地箱内铝排连接情况

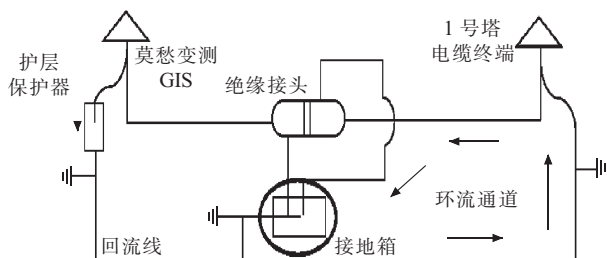


图 2 莫虎2号线电缆金属护层接地方式

如图 3 所示,在 A 相接地不良的情况下,A 相尾管接地线中的电流无法接地释放,沿站柱上行,向 B、C 相接地处流动,通过槽钢时,由于 B、C 相构架撑杆螺栓氧化锈蚀,电阻较大,从而产生明显的发热现象。

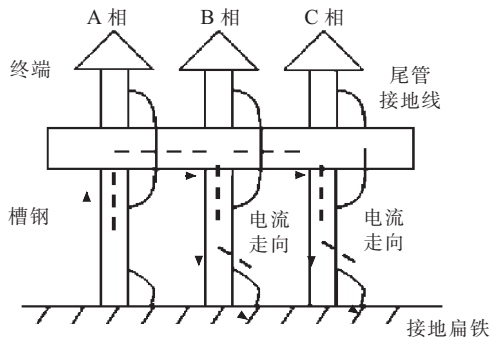


图 3 1 号塔电缆终端架构简图

4 整改措施

对于现场存在的问题,在保证供电可靠性的前提下,采取了以下针对性的措施:

(1) 对电缆构架及接地扁铁进行防锈、防腐处理,更换全部撑杆螺栓,涂刷防锈漆。

(2) 在电缆站柱底部横向加装一根扁铁,分别将 A、B、C 三相紧密连接在一起后与终端接地网紧密连接,以改善 A 相接地,如图 4 所示。

(3) 立即向调度申请线路停电处理,将原有的连接铝排拆除,按照设计要求重新安装,并用环氧泥将保护箱密封,防止水汽进入,如图 5 所示。

处理后再次对终端构架螺栓进行温度监测,并检查三相接地线内部电流,检测结果显示,通过改善接地

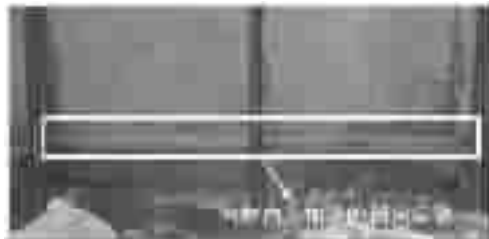


图 4 处理后的 1 号塔电缆终端接地系统

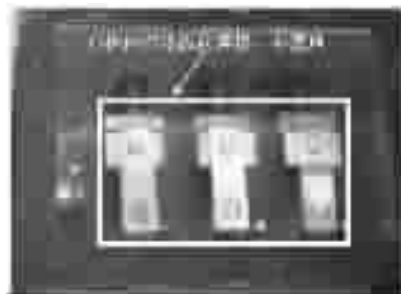


图 5 铝排改接后的接地箱内部

和重新搭接铝排,回流线内部的环流消失、螺栓节点处的温度下降到正常区间。

5 结束语

线路的设计、施工、运行工作是一项复杂、系统的工程,任一环节产生问题,都将对线路的安全运行产生重大影响。为保证电缆设备的安全稳定运行,今后要进一步做好以下几方面工作:(1) 监理、施工单位应该加强安装现场监督、管控,严格按照设计要求进行安装施工,杜绝安装质量问题的发生。(2) 设备运行管理单位在验收时,应该按照相关验收规程、规范,严把质量关,确保设备零缺陷投运。(3) 继续加大红外测温、在线监测等技术手段在运行工作中的应用,确保缺陷尽早发现,尽快消除,不断提高设备的健康运行水平。

参考文献:

- [1] 郑肇骥,王焜明. 高压电缆线路[M]. 北京:水利电力出版社,1983:202-214.
- [2] DL/T664—2008 带电设备红外诊断应用规范[S]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [3] 陈永辉,蔡葵,刘永军,等. 供电设备红外诊断技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006:19-21.
- [4] 王伟,等编著. 交联聚乙烯(XLPE)绝缘电力电缆技术基础[M]. 第3版. 西安:西北工业大学出版社,2011:3862-392.

作者简介:

王雨阳(1985),男,安徽含山人,助理工程师,从事电力电缆运行检修工作;

王永强(1978),男,河北石家庄人,工程师,从事电力电缆管理工作;

王浩(1980),男,江苏南京人,技师,从事电力电缆运行检修工作。

一起地铁供电系统停电事故的分析及对策

魏 巍, 严 伟, 沈全荣, 牛洪海
(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘 要:地铁供电系统中的母联闪络是一种具有一定隐蔽性的严重故障,会导致主变电所的停电和地铁线路的大面积停运。结合一起地铁供电系统停电事故,分析了母联闪络故障的产生机制和闪络故障时系统中零序过流保护大面积误动作的原因,并提出了改进措施。

关键词:零序电流保护;供电系统;母联闪络;接地方式;主变电所

中图分类号: U231 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-0665(2014)01-0011-03

2011 年某地铁线路发生了供电系统大面积停电事故,导致相关地铁线路停运近 2 h。该次事故的特点是供电系统中多个断路器同时跳闸,导致互为备用的两路地铁电源同时切除。这与以往地铁供电系统的停电事故截然不同^[1]。

1 保护动作情况

该次事故共发送 2 次保护动作,一次为 110 kV 电源的线路保护动作,另一次为 35 kV 系统部分断路器零序过流保护的同时跳闸。发生事故的地铁供电系统如图 1 所示。地铁主变压器采用 Yyn0 接线方式,高压侧经间隙接地,低压侧经 20 Ω 电阻接地。

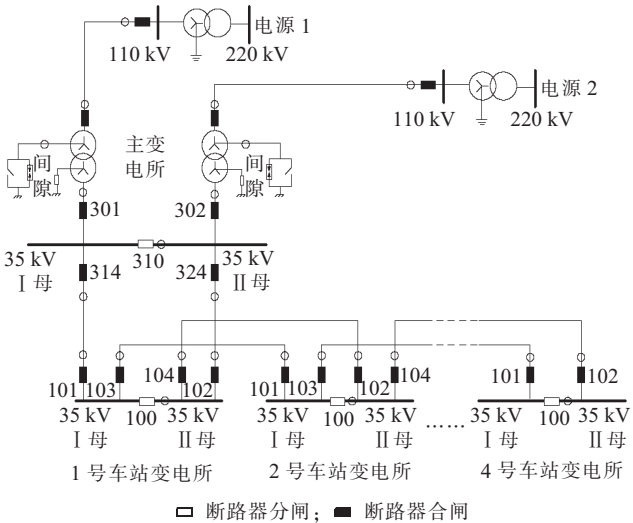


图 1 地铁供电系统结构

1.1 110 kV 线路保护动作情况

110 kV 电源 1 的保护装置首先跳闸。该线路保护装置的動作报告如图 2 所示。

故障后经过现场确认,以上故障信息与实际故障情况吻合。110 kV 线路 1 发生了 A 相永久性接地故障,110 kV 线路保护动作正确^[2]。

序号	动作相	动作相对时间	动作元件
01		00011 ms	零序过流 I 段
02		00016 ms	距离 I 段动作
03		01081 ms	重合闸动作
04		01202 ms	零序过流 I 段
05		01208 ms	距离加速
06		01211 ms	距离 I 段动作
故障测距结果			0008.8 km
故障相别			A
故障相电流值			036.32 A
故障零序电流			037.64 A

图 2 110 kV 线路保护故障信息

1.2 35 kV 系统保护动作情况

110 kV 线路发生接地故障并被切除后,图 1 中的 301、302、314、324 以及 1 号车站变电所 101 和 102 进线断路器同时跳闸。301 和 302 断路器作为主变低压侧断路器,跳闸后直接导致主变电所失电。301、302 等保护装置的動作报告相同,如图 3 所示。

起动绝对时间:	18:47:16.011
0 ms	总启动
945 ms	总启动返回
1000 ms	总启动
2502 ms	零序过流保护动作
2531 ms	发送总跳闸命令
故障相别	
故障相电流	0.616 A
零序电流值	0.591 A

图 3 301 等断路器保护故障信息

1.3 保护定值配合分析

相关装置零序过流保护定值如表 1 所示。现场定值整定中虽然实现了零序保护电流定值的级差配合,但时间定值却完全相同。这样整定定值的原因是由于地铁供电系统采用串行供电方式,且供电级数较多。而供电局强制要求 301、302 断路器的最大延时定值不超过 1.5 s,为了保证供电环串末端零序过流保护的逐级配合,被迫将上述 6 个断路器的延时定值整定为相同的 1.5 s。

该次故障中,零序电流达到了 0.591 A,大于表 1 中

表 1 零序过流保护整定值

断路器编号	零序电流定值/A	延时定值/s
301	0.52	1.5
302	0.52	1.5
314	0.37	1.5
324	0.37	1.5
1 号车站 101	0.37	1.5
1 号车站 102	0.37	1.5

所有保护装置的电流定值,因此出现了 6 个断路器同时跳闸的情况。

2 故障零序电流产生原因分析

301 和 302 断路器的零序电流波形如图 4 所示。301 和 302 断路器的零序电流大小相同,相位相差 180,表现出环流的特点。314 与 324 断路器、1 号车站变电所 101 与 102 断路器的故障零序电流也是大小相同,相位相差 180,同样具有环流的特点^[3]。可以初步推测:故障时零序电流从 301 一端流入,从 302 一端流出,零序电流回路贯穿了 301、302、314、324 以及 1 号车站变电所 101 和 102 断路器。

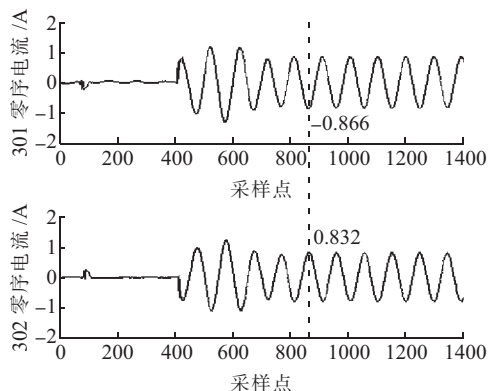


图 4 断路器 301 与 302 的零序电流波形

110 kV 电源线距离保护跳闸前后的故障波形如图 5 所示。 U_a 、 U_b 、 U_c 分别为主变电所 35 kV 侧 I 母的三相电压, I_0 为主变电所 301 断路器的零序电流。 T_1 时刻 110 kV 线路发生了 A 相接地故障,电压发生了一次畸变; T_2 时刻 110 kV 电源 1 断路器三相跳开,切除了 A 相的接地故障,电压波形再次发生了畸变。 T_2 时刻后,零序电流开始产生,直至 T_3 时刻达到稳态值。因此, T_2 时刻 110 kV 电源 1 的跳闸才是故障零序电流的直接触发因素^[4]。

由于地铁 35 kV 系统为单端电源系统,当 110 kV 电源 1 断路器完全跳开后, I 母 A、B、C 三相电压应全部为 0。但实际的录波数据如图 6 所示。 T_2 时刻 110 kV 电源 1 跳开后, C 相电压先降低后增加,特别是进入稳定期的 T_3 时刻后 C 相电压有效值稳定在 38 V 左右,

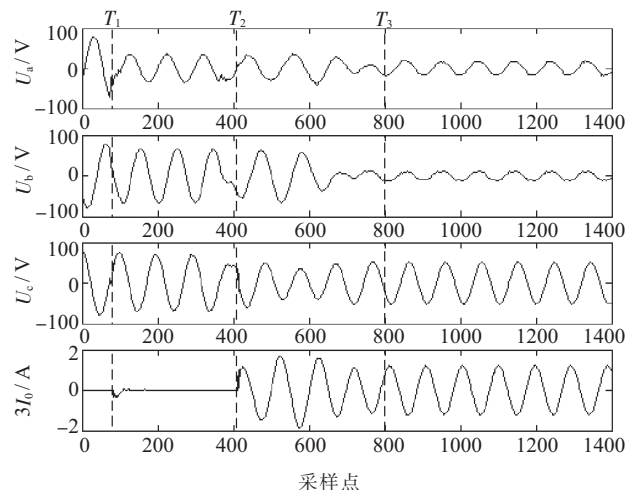


图 5 110 kV 电源 1 跳闸时的故障波形

A 相、B 相电压也没有降到 0,而是稳定在 10 V 左右。38 V 左右的电压二次值对应的一次值将高达 23 kV,因此可以断定 T_2 时刻后 I 母 C 相有高压电源串入^[5]。

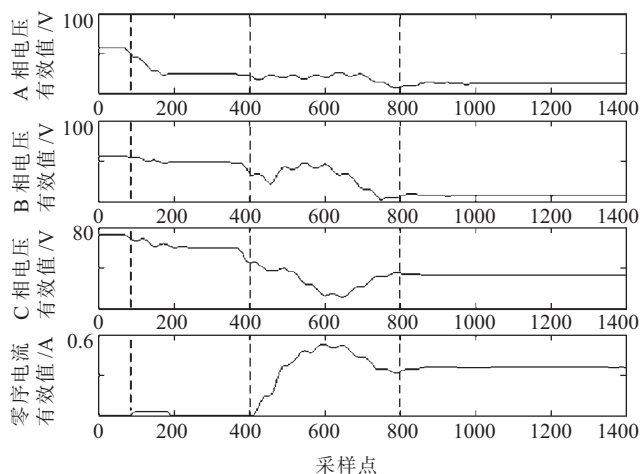


图 6 110 kV 电源 1 跳闸时的故障波形有效值

T_2 时刻 110 kV 电源 1 跳开后,地铁供电系统由电源 2 供电,结合之前对零序电流回路分析,可以得出:1 号车站变电所的母联断路器发生了 C 相闪络故障,电源 2 的 C 相电压通过闪络点串入了 I 母。故障过程为:1 号车站变电所的母联断路器首先出现了绝缘问题, T_2 时刻 110 kV 电源 1 跳开后,1 号车站变电所的 I 母 C 相电压迅速降低(与图 6 中 C 相电压有效值曲线相吻合),导致母联断路器 C 相两侧的电势差 ΔE 明显增加,当 ΔE 大于断路器残存的绝缘电压时断路器发生闪络。零序电流产生机制如图 7 所示。

由于地铁主变采用 Yyn0 接线方式,且低压侧采用 $20\ \Omega$ 电阻接地方式,母联闪络故障时,经过闪络故障点、2 台主变的 $20\ \Omega$ 接地电阻以及大地就形成了闪络故障的零序电流回路。故障发生后,作者与地铁公司电气检修人员对 1 号车站变电所的母联断路器进行了现场检查,检查结果为:母联真空断路器的 C 相真空

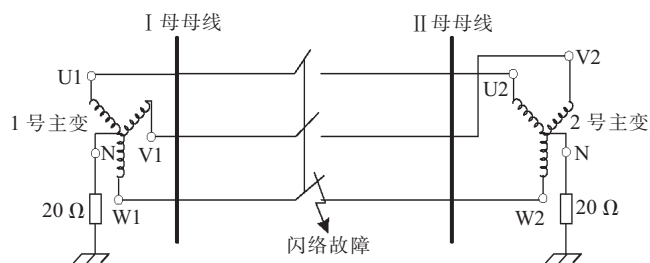


图7 零序电流产生机制

包漏气,绝缘能力降低,且断路器C相有明显烧损痕迹。进一步验证了以上分析。

3 改进措施

地铁供电系统母联闪络故障的危害性较大,为进一步提高地铁供电系统的安全运行能力,提出以下改进措施:(1)实现零序过流保护的时间级差配合。通过以上分析,零序保护延时定值相同大面积同时跳闸主要原因。如果能够实现上下级断路器间保护定值的时间级差配合,该次事故是完全可以避免的。但是考虑到地铁环网供电系统定值整定方面的实际困难,该方法的适用性会受到一定的影响。(2)配置专用地铁母联闪络保护装置。闪络保护装置利用零序电流和断路器位置信号为闪络判据^[6]。当闪络故障发生后快速隔离切除故障点,从而完全避免主变电所停运事故的发生。

4 结束语

地铁供电系统的母联断路器绝缘降低在系统正常

运行时具有一定的隐蔽性,一旦发生单路110 kV电源切除事件,母联闪络故障就有可能发生,并导致大面积的停电停运事故。结合对一起地铁供电系统停电事故,分析了母联闪络故障的产生原因和危害。最后提出了有针对性的改进升级措施,供同行技术人员参考。

参考文献:

- [1] 张建根. 广州地铁供电系统33 kV环网接线方式的思考[J]. 城市轨道交通研究, 2006, 9(7): 1-5.
- [2] 赵立峰, 李延强, 姚刚. 线路光纤纵差保护在北京地铁5号线的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2008, 11(4): 14-17.
- [3] 江文东. 10 kV小电阻接地系统零序过流定值的探讨[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(10): 79-81.
- [4] 鲍有理, 严芬. 几起主变保护动作原因分析[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(4): 9-11.
- [5] 刘静. 变电站事故跳闸信号的分析[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(4): 17-20.
- [6] 汤勇, 常胜, 赵志华, 等. 220 kV主变开关断口闪络保护设计探讨[J]. 继电器, 2003, 31(9): 45-48.

作者简介:

魏巍(1978),男,辽宁抚顺人,工程师,从事电气主设备保护的研究和开发;

严伟(1975),男,江苏南京人,高级工程师,从事电气主设备微机保护的研究、开发和管理工作的;

沈全荣(1965),男,江苏苏州人,研究员级高级工程师,从事电力系统继电保护的研究、开发和管理工作的;

牛洪海(1980),男,辽宁鞍山人,工程师,从事电气主设备保护的研究、开发和管理工作的。

Analysis and Countermeasures of a Metro System Power Failure

WEI Wei, YAN Wei, SHEN Quanrong, NIU Honghai

(Nanjing Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The flashover fault of bus tie breaker in metro power systems is of invisibility. It can cause power supply failure in main transformer station to lead whole line outage. Based on the analysis of a metro power system blackouts, the general mechanism of bus tie breaker flashover and the causes of zero sequence over-current relay protection malfunction are analyzed. At last, based on the analysis, three improvement suggestions are proposed.

Key words: zero sequence over-current relay; power supply system; bus tie breaker flashover fault; grounding method; main power station

(上接第10页)

Analysis on Terminal Overheat of a 110 kV Cable

WANG Yuyang, WANG Yongqiang, WANG Hao

(Nanjing power supply company, Nanjing 210013, China)

Abstract: A fault of overheat of a bolt of the strut at an 110 kV cable termination is introduced. A check and analysis of the cable machinery are implemented and it is found that bad contact between grounding flat iron and grounding grid and connection error in the induced sheath are the main causes of the overheat. Corresponding countermeasures for tackling this kind of fault are designed, which provides a reference for similar issues in the future.

Key words: cable termination; frame strut bolt; overheat

基于遗传算法的有源电力滤波器直流母线电压控制

韩学栋, 王海华

(江苏省电力设计院, 江苏 南京 211102)

摘要:随着电力电子装置的普遍应用,其非线性特征而引起的电网电压和电流畸变越来越引起人们的重视,有源电力滤波器(APF)是一种较好的谐波滤除装置,但存在直流侧电压不稳的问题。分析了影响APF直流侧电压稳定的几个因素,推导了电压源型有源电力滤波器的数学模型,结合遗传算法辅助优化计算了该系统中APF的PI调节系数, MATLAB/simulink 仿真验证了该方法的可行性,为遗传算法在PI整定方面的研究提供了借鉴。

关键词:遗传算法;有源电力滤波器;母线电压控制

中图分类号:TM713.8

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2014)01-0014-04

如今电力电子装置已遍布人们的生产生活中,但其自身所具有的非线性使得电网的电流和电压发生畸变,这些非线性设备的数量和容量的日益增大将对电网的正常运行以及电力设备的安全造成影响和危害。为抑制非线性设备谐波污染,出现了诸多解决谐波问题的方法,有源电力滤波器(APF)是其中一种较好的谐波抑制技术^[1-4]。对于APF来说,若直流侧电压产生较大的波动,会导致APF不能正常工作,并且还可能危及设备的可靠运行。因此,控制电路除了使APF的输出能快速准确跟踪指令电流变化之外,还需要使主电路直流侧电压保持稳定。遗传算法是模拟自然界遗传机制和生物进化论而成的一种并行随即搜索最优化方法^[5],文中将结合遗传算法实现APF中PI控制器调节系数的优化设计,以实现直流侧母线电压的稳定控制。

1 APF 原理及其数学模型

1.1 APF 的原理及特点

APF是一种动态抑制谐波和补偿无功的电力电子装置,能对不断变化的负载谐波电流进行实时补偿,其工作原理如图1所示。

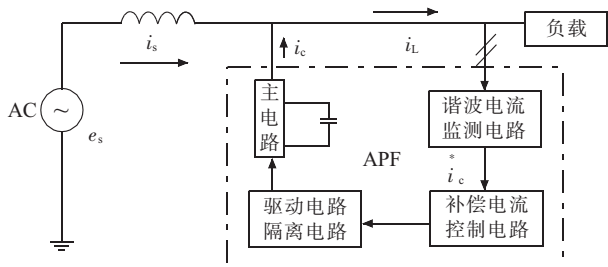


图1 APF 基本工作原理

当需要补偿负载所产生的谐波电流时,APF检测出补偿对象负载电流 i_L 的谐波分量,将其作为补偿电流的指令信号,由补偿电流发生电路产生的补偿电流

i_c 即与负载电流中的谐波分量 i_{Lh} 大小相等,也就是说,电源只向负载提供基波电流,而谐波电流由APF的补偿电流发生电路提供,从而使得交流电源电流 i_s 中只含基波,不含谐波,这样就达到了抑制电源电流中谐波的目的^[6-8]。

在理想情况下,APF输出的补偿电流中不含有基波有功分量,直流侧母线电压恒定不变,补偿装置功率平衡。但实际情况中,当开关器件功耗引起直流母线电压的降低、网侧电压畸变且负载不对称、谐振过电压通过逆变器及续流二极管向直流侧电容充电以及APF检测环节的延时等一系列因素都将引起补偿装置的功率不平衡^[9-11]。

1.2 APF 的数学模型

根据有功功率平衡原理确定补偿器的近似数学模型,对系统稳态和动态特性进行分析,并为下一节运用遗传算法确定PI参数提供被控对象的数学模型。

该数学模型的建立基于以下假设:

- (1) 只有电流的基波分量影响平均功率的平衡,而谐波分量不影响功率平衡;
- (2) 电网电压平衡且不包含谐波;
- (3) 逆变器输入端缓冲电感的电阻和电感,以及系统线路的电阻和电感采用集中参数 R, L 表示,所有损耗都集中在 R 上。

系统结构如图2所示。假设系统结构对称,在不考虑谐波的情况下,三相可简化为一相进行分析,以下对a相进行数学模型的推导,将a相电网电流写成向量的形式:

$$I_{sa} = I_{cp} + jI_{cq} + I_{lp} + jI_{Lq} \quad (1)$$

式中: I_{cp}, I_{lp} 分别为APF补偿电流中的有功电流有效值和负载有功电流有效值(A); I_{cq}, I_{Lq} 分别为APF补偿电流中的无功电流有效值和负载无功电流有效值(A)。

当负载一定时,由于无功功率仅在无源滤波器与负载之间进行交换,可以认为稳态时 $jI_{cq} = -jI_{Lq}$,所以电

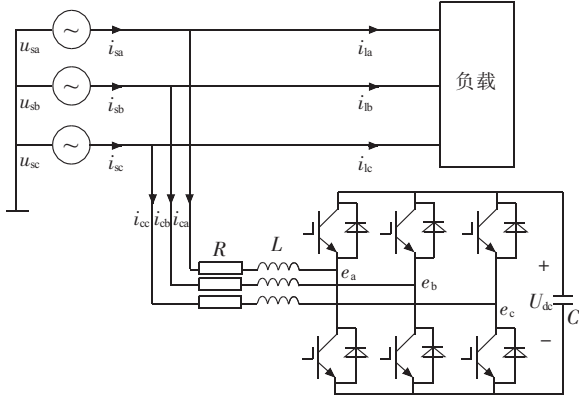


图2 系统结构

网电流为:

$$I_{sa} = I_{cp} + I_{Lq} \quad (2)$$

由上式可知,输入补偿之路的平均有功功率 P_c 可以表示为:

$$P_c = P_R + P_{ind} + P_{cap} \quad (3)$$

式中: P_R 为等效电阻 R 上损耗的功率; P_{ind} 为支路电感的储能功率; P_{cap} 直流侧电容储能功率。其中:

$$P_c = 3U_{cl} \cos \varphi_A = 3U_{cp} \quad (4)$$

$$P_R = 3(I_{cp}^2 + I_{cq}^2)R \quad (5)$$

$$P_{ind} = 3 \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} L (I_{cp}^2 + I_{cq}^2) \right] \quad (6)$$

$$P_{cap} = u_{dc} C \frac{d}{dt} u_{dc} \quad (7)$$

式中: u_{dc} 为直流侧电容电压。

当负载确定后,即 I_{Lq} 确定,由于 I_{Lq} 与 I_{cq} 大小相等,方向相反,所以 I_{cq} 为常数。此时,对 P_{ind} 的影响取决于 I_{cp} ,故式(6)可改写为:

$$P_{ind} = 3 \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L I_{cp}^2 \right) \quad (8)$$

由式(3—5)、(7)、(8)可得:

$$3 \left[U_{cp} - I_{cp}^2 R - I_{cq}^2 R - \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L I_{cp}^2 \right) \right] = u_{dc} C \frac{d}{dt} u_{dc} \quad (9)$$

式中 I_{cp} 和 u_{dc} 可改写成稳态值与变化量之和的形式:

$$\begin{cases} I_{cp} = I_{cp0} + \Delta I_{cp} \\ u_{dc} = U_{dc0} + \Delta u_{dc} \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)中,可得:

$$3 \left\{ U(I_{cp0} + \Delta I_{cp}) - (I_{cp0} + \Delta I_{cp})^2 R - I_{cq}^2 R - \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} L (I_{cp0} + \Delta I_{cp})^2 \right] \right\} = u_{dc} C \frac{d}{dt} (U_{dc0} + \Delta u_{dc}) \quad (11)$$

省略高阶项,整理得:

$$3(U_{cp0} + U \Delta I_{cp} - I_{cp0}^2 R - 2I_{cp0} R \Delta I_{cp} - I_{cq}^2 R - I_{cp0} L \frac{d}{dt} \Delta I_{cp}) = U_{dc0} C \frac{d}{dt} \Delta u_{dc} \quad (12)$$

由式(9)可以得到稳态方程:

$$3(U_{cp0} - I_{cp0}^2 R - I_{cq}^2 R) = 0 \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)可得 Δu_{dc} 与 ΔI_{cp} 之间有如下关系:

$$3(U \Delta I_{cp} - 2I_{cp0} R \Delta I_{cp} - I_{cp0} L \frac{d}{dt} \Delta I_{cp}) = U_{dc0} C \frac{d}{dt} \Delta u_{dc} \quad (14)$$

由式(14)得到频域下 APF 的传递函数:

$$G(s) = \frac{\Delta u_{dc}(s)}{\Delta I_{cp}(s)} = \frac{A}{s} - B \quad (15)$$

式中:

$$\begin{cases} A = \frac{3(U - 2RI_{cp0})}{CU_{dc0}} \\ B = \frac{3I_{cp0}L}{CU_{dc0}} \end{cases} \quad (16)$$

式(15)为 APF 的近似数学模型,由此模型可通过遗传算法确定系统的 PI 参数。

2 基于遗传算法的 PID 整定原理

遗传算法具有对参数编码进行操作、可多点并行操作、通过目标函数进行适配值的计算、寻优规则由概率决定等优点。

2.1 遗传算法的计算原理

遗传算法在操作时首先确定参数范围,再根据精度的要求,对其进行二进制编码。由此编码得到的字串为遗传算法可以操作的对象,同时,通过计算机随之产生初始种群,种群大小视计算的复杂程度而定。

计算过程中如果着重追求系统的动态性能,得到的参数可能使控制信号偏大,进而导致系统不稳定。鉴于适应函数与目标函数相关,在目标函数确定后,可直接将其作为适配函数进行参数寻优,以防止得到的参数造成系统不稳。

2.2 遗传算法的操作

首先通过适配函数求得适配值,进而求每个串对应的复制概率。复制概率与每代字串个数的乘积为该串在下一代中应复制的个数。复制概率大的在下一代中将有较多的后代,相反则被淘汰。其次进行单点交叉,交叉概率为 P_c ,最后以概率 P_m 进行变异。

初始种群通过复制、交叉及变异得到了新一代种群,该代种群经解码后代入适配函数,观察是否满足结束条件,若不满足,则重复以上操作直到满足为止。操作过程如图3所示。

利用上述遗传算法的操作过程实现 PI 调节系数 k_p, k_i 的最优解析。

2.3 APF 的传递函数

欲通过遗传算法进行 PI 参数的整定,需确定 APF 具体的传递函数。传递函数的形式如式(15)所示, A 与

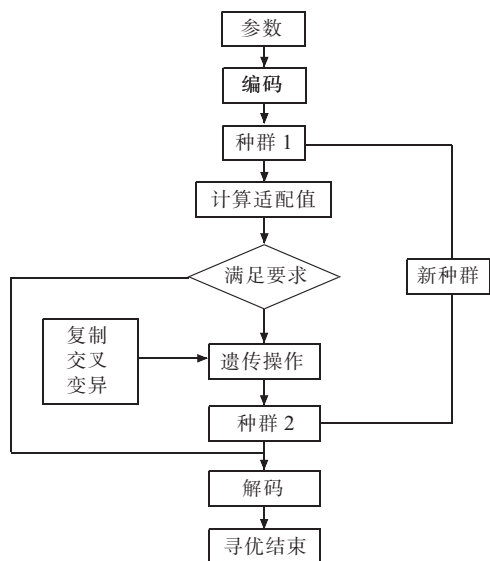


图3 遗传算法流程

B 的表达如式(16)所示。式(16)中:

- (1) U 为一相电压有效值,系统中 $U=220\text{ V}$;
- (2) R 为输出电路的等效电阻,系统中 $R=1\ \Omega$;
- (3) I_{cp0} 为 a 相补偿电流有功分量的稳定值分量,系统中 $I_{cp0}=1.27\text{ A}$;

- (4) C 为直流侧电容值,系统中 $C=700\ \mu\text{F}$;
- (5) U_{dc0} 为直流侧电压的稳定值分量,系统中 $U_{dc0}=1200\text{ V}$;

- (6) L 为 APF 输出电感,系统中 $L=3\text{ mH}$ 。

计算可得: $A=776.62$, $B=0.0163$ 。所以,APF 的传递函数为:

$$G(s)=\frac{776.62}{s}-0.0163 \quad (17)$$

采样时间为 1 ms ,输入指令为一阶跃信号。

3 仿真分析

为获取满意的过渡过程动态特性,采用误差绝对值时间积分性能指标作为参数选择的最小目标函数。为了防止控制量过大,在目标函数中加入控制输入的平方项。选用下式作为参数选取的最优目标:

$$J=\int_0^{\infty} (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t)) dt + w_3 t_u \quad (18)$$

式中: $e(t)$ 为系统误差; $u(t)$ 为控制器输出; t_u 为上升时间; w_1, w_2, w_3 为权值。为了避免超调,采用了惩罚功能,即一旦产生超调,将超调量作为最优指标的一项,此时最优指标为:

$$\text{if } e(t) < 0$$

$$J=\int_0^{\infty} (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t) + w_4 |e(t)|) dt + w_3 t_u \quad (19)$$

式中: w_4 为权值,且 $w_4 \gg w_1$ 。APF 的仿真系统如图 4 所示。

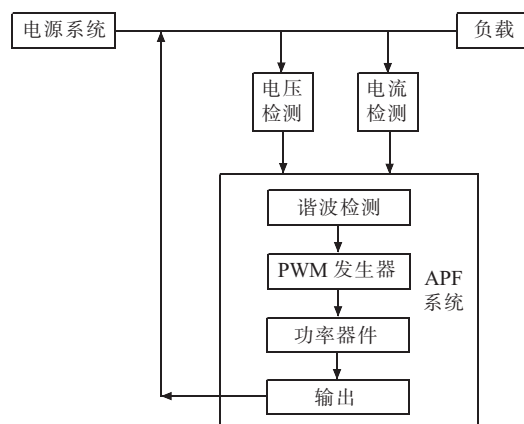


图4 有源滤波仿真系统

根据图 3 所示的遗传算法流程图以及式 (19),在 MATLAB 中进行编程。遗传算法中使用的样本个数定为 30,交叉概率和变异概率分别为 $P_c=0.9$, $P_m=0.033$ 。根据经验值,参数 k_p 的取值范围为 $[0,1]$, k_i 的取值范围为 $[0,1]$,取 $w_1=0.999$, $w_2=0.001$, $w_3=2.0$, $w_4=100$ 。采用实数编码方式,经过 100 代进化,获得的优化参数为: $k_p=0.061$, $k_i=0.053$ 。

性能指标 $J=219.7496$,代价函数的优化过程和采用整定后的 PI 控制阶跃响应如图 5、图 6 所示。

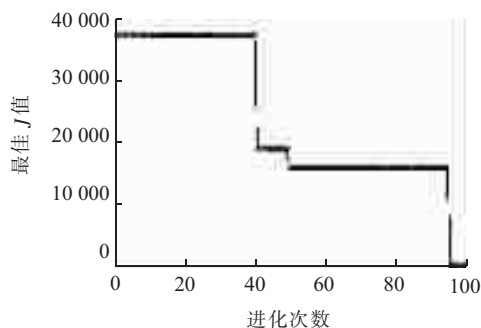
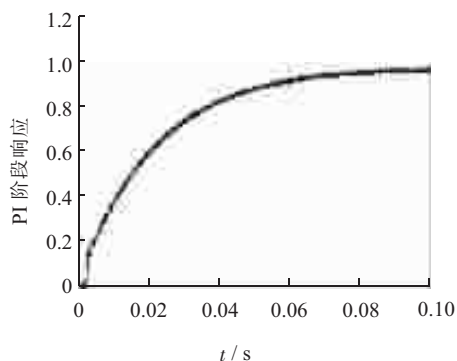
图5 代价函数 J 的优化曲线

图6 PI 的阶跃响应曲线

将经遗传算法计算出的 k_p, k_i 值代入到 APF 仿真系统模型中,对直流侧电压进行 PI 稳定控制,可得直流侧电压的仿真响应曲线,如图 7 所示。同时,针对相同的 APF 仿真系统模型,对其 PI 调节器参数进行传

统方式的调节,在经过多次修正更改 PI 值后,得出直流侧电压的仿真曲线,如图 8 所示。

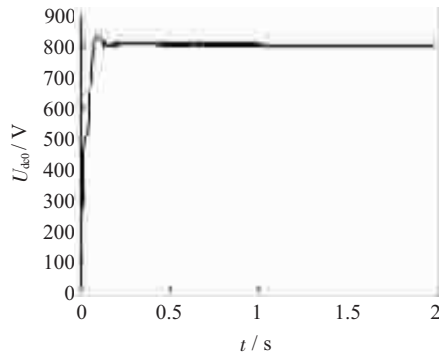


图 7 基于遗传算法的直流侧电压响应曲线

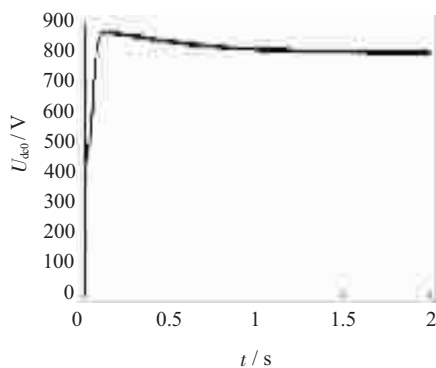


图 8 基于传统算法的直流侧电压响应曲线

由图 7 可知,其直流侧电压的响应曲线在 0.07 s 时达到预设电压值 800 V,超调量为 $25.5/800=3.2\%$,调节时间为 0.11 s,然后进入稳定状态,APF 直流侧电压稳定在 800 V。在传统 PI 调节的方式下,由图 8 可知,直流侧电压响应在 1.5 s 左右才达到预设电压值,且其超调量约为 8.4%,由此可知,基于遗传算法的仿真系统具有更好的动态性能,且在 PI 参数的整定时间上少于传统方法。

4 结束语

介绍了并联电压源型 APF 的工作原理,指出了影

响其直流侧电压稳定的几个因素,推导了电压源型有源电力滤波器的数学模型,介绍了遗传算法的原理并给出了遗传算法的操作流程图,在此基础上,以一个具有并联电压源型 APF 的系统为例,通过遗传算法优化计算出了该系统中 APF 的 PI 调节器的调节系数,通过 MATLAB/simulink 仿真得出了在优化后的 PI 调节参数下直流侧电压响应曲线,验证了该方法的合理性,为遗传算法在 PI 整定方面的研究提供了借鉴。

参考文献:

- [1] 钟山,杨晟,赵争鸣.有源电力滤波器技术与发展综述[J].变频器世界,2011(1):45-49.
- [2] 张汉梅.有源电力滤波器综述[J].装备应用与研究,2011(12):67-69.
- [3] 孙文华,陈龙,袁晓冬.冶金企业集中接入配网的谐波影响及对策分析[J].江苏电机工程,2013,32(3):46-49.
- [4] 彭海燕,王宏.有源电力滤波器的原理介绍及应用[J].华北电力技术,2010(1):35-37.
- [5] 刘金琨.先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M].北京:电子工业出版社,2006:130-157.
- [6] 杜太行,胡相彬,赵川,等.有源电力滤波器补偿电流控制与主电路参数设计[J].低压电器,2010(6):51-56.
- [7] 车蓉蓉,徐蓉.一种单相电路谐波及无功电流实时检测方法[J].江苏电机工程,2013,32(4):41-43.
- [8] 于晶荣,滕召胜,章兢,等.有源电力滤波器预测电流控制与稳定性分析[J].电工技术学报,2009,24(7):164-170.
- [9] 庄伟雄,何益宏.有源电力滤波器直流侧电压控制系统的仿真[J].系统仿真学报,2012,24(5):979-983.
- [10] 谢斌,戴珂,张树全,等.并联型有源电力滤波器直流侧电压优化控制[J].中国电机工程学报,2011,31(9):23-29.
- [11] 李智华,刘振,吕振彬.有源电力滤波器直流侧电压的模糊自适应控制[J].电源技术,2010,34(6):582-585.

作者简介:

韩学栋(1987),男,山东菏泽人,硕士,从事电力系统工程咨询规划设计工作;

王海华(1979),女,江苏南京人,高级工程师,从事电力系统工程咨询规划设计工作。

DC Bus Voltage Control for Active Power Filter Based on Genetic Algorithm

HAN Xuedong, WANG Haihua

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

Abstract: With widespread application of power electronic devices, distortion of grid voltage and current caused by its nonlinear characteristics is drawn increasing attention. Active power filter (APF) is an effective harmonic filtering device, but presences DC voltage instability problems. This paper points out the influence of its DC voltage stability on several factors and derives voltage sourcing APF mathematical model. The APF system's PI coefficients is optimized using genetic algorithm. The feasibility of the method is verified by MATLAB/Simulink simulation. This paper provides a reference for the application of genetic algorithm in PI tuning.

Key words: genetic algorithm; APF; DC bus voltage control

双重化配置线路保护的重合闸功能运行分析

宋亮亮¹, 汪萍², 袁宇波¹, 高磊¹

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

摘要:比较了高压线路保护采用标准化设计前后电网重合闸运行方式的差异,研究了2套不同厂家的线路保护重合闸功能同时投入时电网运行的可靠性。根据智能变电站内IED设备双套配置、独立运行的特点,提出了利用保护三跳接点实现双套智能终端间重合闸互相闭锁的工程应用方案。

关键词:标准化设计;双重化配置;重合闸功能;运行分析;智能变电站

中图分类号: TM762

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)01-0018-04

现代电网结构日益复杂,考虑超高压线路保护防拒动的要求,220 kV及以上线路一般采用2套不同原理的主后一体化保护装置,含线路重合闸功能。运行线路发生瞬时性故障保护动作或开关偷跳行为时,通常在开关跳开一定时间(在躲过熄弧和去游离时间的前提下,依据远方提供的满足系统稳定的最佳重合闸时间)后自动将开关合闸运行,以提高供电可靠性。目前一般电网系统侧重重合闸通常采用单相一次重合方式,即单相故障跳单相重合单相,相间故障不重合;对特殊运行方式或用户侧并网点,可采用三相一次重合闸方式,即单相故障跳三相重合三相,相间故障三跳不重合;根据部分地区电厂侧继电保护运行要求,并网线路电厂侧的重合闸功能一般停用。

继电保护系统对电网运行可靠性起到至关重要的作用,从加强主保护简化后备保护的角度出发,国网公司自2007年开始在超高压电网继电保护系统中开展执行标准化设计方案,从保护功能、原理、二次回路、定值等项目对继电保护装置进行统一^[1]。标准化配置的线路保护采用2套完全独立的判别和执行系统,取消了2套保护之间的重合闸相互启动和闭锁回路,正常运行时2套重合闸均投入运行,该运行方式引发了继电保护及调度运行人员对于下述问题的关注。(1) 线路发生单相永久接地故障时,2套保护装置的重合闸功能能否正确配合,从而确保开关不发生二次重合闸,减少对电网设备的冲击;(2) 当由于电网运行方式变化而需要启用或停用线路的重合闸功能时,2套线路保护该如何分别如何操作,从而提高供电可靠性;(3) 智能变电站继电保护装置及智能终端采用双重化配置方案,其与标准化设计(“六统一”)的常规保护单操作箱重合闸的设计、运行有何差别。

目前已有部分文献对双重化重合闸问题进行过研究,但多为对某一环节(例如某块压板的功能,现有的重合闸运行方式等)进行简单解释,缺乏较为系统

的理论分析和研究^[2-5]。因而上述的问题目前还没有得到系统的解释。文中将根据重合闸功能的原理,对“六统一”线路保护重合闸的配置和运行方式进行研究,制定智能变电站双套重合闸之间的优化配合策略,提高电网重合闸的运行水平。

1 传统重合闸配置方式

重合闸是一种因故障跳开后断路器按需要自动投入的自动装置,广泛应用于超高压电网中,对提高系统供电的可靠性,减少线路停电的次数,提高电力系统并列运行的稳定性有重要作用^[6]。

双母线接线形式的线路重合闸功能一般随线路保护配置。执行标准化设计之前,重合闸方式的变更通过重合闸切换把手执行,作为保护装置外部硬接点开入,不设置单独的重合闸停用压板。重合闸功能退出时需将切换把手置于“停用”位置,但装置重合闸退出并不代表线路重合闸退出,此时保护仍执行选相跳闸。要实现线路重合闸停用,需同时投入“沟三闭重”压板。当重合闸方式把手置于运行位置(单重、三重或综重)且定值中对应的重合闸投入控制字置“1”时,装置重合闸投入。典型的线路保护重合闸逻辑如图1所示。

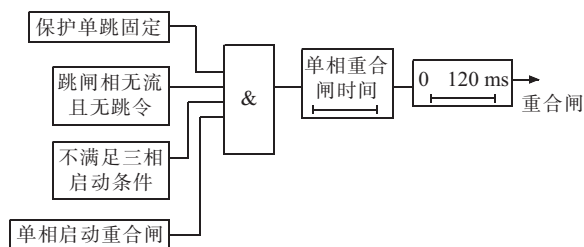


图1 典型单相重合闸逻辑

为简化运行,“六统一”前双重化配置的线路保护正常运行时仅投入一套重合闸,根据不同地区用户习惯,通常选与断路器保护共屏那套线路保护,将另一套保护屏的合闸出口压板取下。以配置RCS931+PSL603+PSL631的线路为例,正常方式下,启用

PSL603 重合闸, 停用 RCS931 重合闸 (出口压板退出), 同时取下 RCS931 保护屏“沟通三跳”压板。当线路发生单相接地故障时, PSL603 启动自身的重合闸计时, RCS931 动作跳闸的同时通过“启动另一套装置重合闸”硬压板启动 PSL603 的重合闸, 经 PSL603 保护判别满足条件后合闸出口。该方式保证了最终的重合闸命令由一套保护发出, 从根本上避免了开关出现二次重合闸的可能。2 套屏柜间重合闸相互联系回路如图 2 所示。

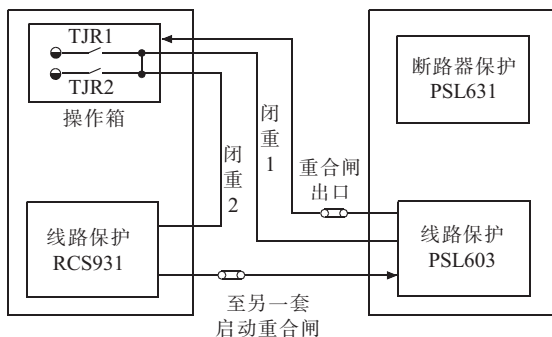


图2 非“六统一”线路保护重合闸配合关系

采用单套线路保护启用重合闸时, 其条件判别均由该线路保护执行, 不会出现由于 2 套保护配合不一致导致的二次重合问题。另外重合闸出口脉冲发出的同时即“放电”, 避免了同一套保护装置出现二次重合闸的可能性。

2 标准化设计重合闸配置

Q/GDW 161—2007^[1]明确了 220 kV 及以上线路保护双重化配置的原则, 规定了 2 套保护之间的交流采样及跳合闸回路完全独立, 取消了相互启动和闭锁回路。

“六统一”线路保护取消了重合闸切换把手和“沟通三跳”压板, 取消至第二套保护的重合闸启动回路, 每套保护增设了“停用重合闸”功能压板, 增加了“禁止重合闸”控制字。

正常运行时, 为统一运行原则, 2 套线路保护的重合闸功能和回路均投入, 当任一“停用重合闸”功能压板投入时, 任何故障情况下保护装置均三跳闭重。因此若仅停用某一装置重合闸, 则不能投入“停用重合闸”压板, 而应该将该装置重合闸出口压板解除, 让另一套保护重合闸可以正常工作。“六统一”线路重合闸功能配合关系如图 3 所示。

双套重合闸同时投入运行时, 两者之间的配合问题曾引起电网运行人员的普遍关注。例如线路发生永久性故障时, 2 套保护重合闸功能的差异是否会造成开关二次重合。下面将结合重合闸原理和二次回路的设计对该问题进行分析。

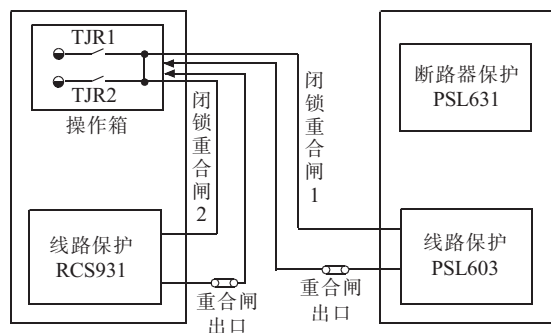


图3 “六统一”线路保护重合闸配合关系

(1) 目前国产微机保护装置的重合闸原理基本相同, 整组时间差异一般不超过 10 ms。操作箱继电器节点动作时间加上断路器本体合闸固有时间在 30~40 ms。由于断路器通常只有一个合闸线圈, 2 套保护的合闸回路经操作箱后并在一起去断路器本体机构, 因此 2 套线路保护重合闸的整组时间差在断路器行程过程中基本被湮灭, 对断路器本体来讲只能感受到一个合闸脉冲。若此时合于永久故障, 保护感受到的故障量特征满足, 保护全线加速动作将故障切除, 不会再出现二次重合的现象。典型重合闸放电逻辑如图 4 所示。

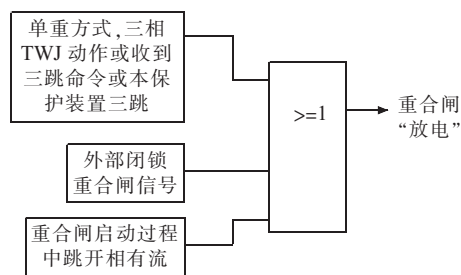


图4 重合闸放电逻辑

进口保护和国产保护之间的重合闸计时方式不同, 在双母线接线方式的线路配置中已很少使用。

(2) 非正常情况 (包括定值整定偏差、程序异常等) 下出现一套保护先合于故障时, 分析如下。假设第一套保护先重合, 第二套保护后合。

(a) 假设第一套保护重合闸先动作, 开关合于故障, 此时第二套保护会立即感受到故障电流, 如果此时第二套重合闸的计时没有结束, 则立即放电收回合闸命令, 开关不会二次重合。

(b) 假设第一套保护重合于故障的过程中, 开关仍处于合位, 此时第二套合闸命令已经发出, 在感受到故障电流的同时, 第二套保护立即收回重合闸命令, 转而三跳, 也不会出现二次重合闸的问题。

(c) 除了厂家在重合闸充放电逻辑中引入电流判据之外, 故障后若合闸命令不返回, 断路器操作回路中的防跳继电器会励磁, 切断合闸回路, 保证开关不会二次重合。

需要说明的是,在开关的分合分过程中,操作机构压力下降也减小了二次重合发生的概率。

3 试验分析

为测试并评估正常情况下“六统一”的 2 套保护重合闸脉冲信号不一致对开关动作行为的影响,结合保护校验工作,选取实际变电站某一条线路的 2 套线路保护进行测试。通过调整重合闸时间定值的方式来模拟 2 套重合闸系统的差异。2 套线路保护(PCS931GM,PSL603U)正常运行,线路单相接地故障,调整合闸后的负荷电流。

(1) 单相瞬时接地故障 AN,故障电流 $3 I_{zd}$ (I_{zd} 为差动电流整定值),持续时间 0.1 s,重合后无负荷电流。其保护动作结果见表 1。

表 1 单相瞬时故障保护动作结果			
序号	重合闸时间定值 /s		动作结果
	第一套	第二套	
1		0.71	双套重合
2		0.72	双套重合
3	0.70	0.73	双套重合
4		0.74	双套重合
5		0.75	双套重合
6	0.71		双套重合
7	0.72		双套重合
8	0.73	0.70	双套重合
9	0.74		双套重合
10	0.75		双套重合

试验结果显示,2 套保护装置执行自身的重合闸逻辑,不会相互影响。此时,即使第一套保护重合闸已经出口,开关合闸成功,也不会影响第二套保护的工作行为,即继续重合。

(2) 单相瞬时接地故障 AN,故障电流 $3 I_{zd}$,持续时间 0.1 s,重合后负荷电流为 $0.12 I_N$ (I_N 为线路额定电流)。其保护动作结果见表 2。

表 2 单相瞬时故障保护动作结果			
序号	重合闸时间定值 /s		动作结果
	第一套	第二套	
1		0.71	仅第一套重合
2		0.72	仅第一套重合
3	0.70	0.73	仅第一套重合
4		0.74	仅第一套重合
5		0.75	仅第一套重合
6	0.71		仅第二套重合
7	0.72		仅第二套重合
8	0.73	0.70	仅第二套重合
9	0.74		仅第二套重合
10	0.75		仅第二套重合

保护逻辑中通常对该电流设置门槛值(I_M) 作有流判据,电流小于该值时,第二套保护正常重合;大于该值时,第二套保护将立即放电,不会合闸出口。

(3) 单相永久接地故障 AN,故障电流 $3 I_{zd}$ 。其保护动作结果见表 3。

表 3 单相永久故障保护动作结果			
序号	重合闸时间 /s		动作结果
	第一套	第二套	
1		0.71	第一套重合出口,加速跳闸,第二套单跳转三跳
2	0.70	0.72	同上
3		0.73	同上
4		0.74	同上
5		0.75	同上
6	0.71		第二套重合出口,加速跳闸,第一套单跳转三跳
7	0.72	0.70	同上
8	0.73		同上
9	0.74		同上
10	0.75		同上

为避免开关位置延时对保护逻辑判断的影响,目前的线路保护普遍采用电流作为辅助判据,重合闸出口后启动合闸加速逻辑,若此时仍存在故障电流,且满足任一项动作条件时(差动、距离、过流等),保护加速跳开三相不再重合。另一套保护在等待重合闸时间的过程中,检测到故障电流也将直接动作跳开各相。

4 智能变电站重合闸功能说明

智能变电站线路保护重合闸配置原则与“六统一”相同,即正常运行时 2 套重合闸功能均投入使用^[7,8]。智能变电站重合闸启、停用方式与“六统一”线路保护相同,“停用重合闸”采用软压板方式投退。智能变电站采用智能终端实现传统的操作箱功能,且与保护装置一一对应,典型的配置方案如图 5 所示。

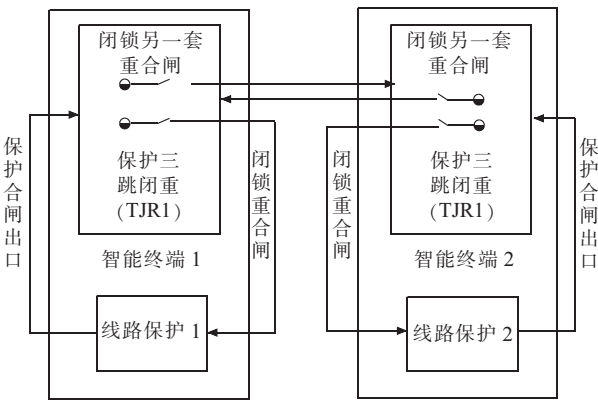


图 5 智能站双套线路保护重合闸配合关系

双重化配置的 AB 套线路保护和母线保护分别接收来自不同 TA 次级的电流采样,当故障发生在这 2 个次级之间时,即 1 套母差动作、2 套线路保护动作时,若线路采用三相一次重合闸方式,此时母差仅能闭锁一套线路保护的重合闸,而另一套线路保护的重合闸计时继续进行。为防止该情况下线路保护误合闸,需采用有效手段对动作后的线路保护进行合闸闭锁。为保证 2 套保护动作行为的一致性,目前工程中通过硬电缆将一套智能终端的闭重开出作为另一套的开入来实现。

根据上述分析,对涉及智能变电站重合闸的运行方式作进一步说明。

(1) 双重化配置的其中一套线路保护与智能终端之间发生链路断链,开关位置无效,该套保护装置延时放电,此时线路上发生任何故障,保护均三跳闭重。

(2) 双重化配置的其中一套线路保护装置故障需检修时,可投入该套线路保护检修压板,此时线路保护由于和智能终端检修状态不一致而不会出口,但不影响另一套线路保护重合闸和母线保护的正常运行。

(3) 双重化配置的其中一套智能终端需检修时,可投入该套智能终端检修压板,此时与该套智能终端相关的线路保护、母线保护、开关保护跳本开关均不能动作出口^[9]。

(4) 根据电网运行要求,线路重合闸功能一般随纵联保护运行,当线路有纵联保护在时,两套重合闸可同时投入运行;当纵联保护退出时,停用线路重合闸。现场应根据调度要求正确投退“停用重合闸”压板。

5 结束语

比较了高压电网现有重合闸配置方案,对“六统一”前后重合闸功能差异和运行方式区别进行了分析,研究了双重化的重合闸同时投入运行对电网可靠性的

影响,并结合实验进行验证。实验结果显示:“六统一”后,正常情况下双重化的重合闸同时投入运行不会造成开关二次重合的问题,并且有助于提高供电可靠性。同时研究了智能变电站双套智能终端之间的重合闸闭锁方式,其相关结论具有工程应用指导意义。

参考文献:

- [1] 国家电网公司. Q/GDW 161—2007 线路保护及辅助装置标准化设计规范[S]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [2] 高国庆. 双套重合闸并列投用的可行方案[J]. 继电器,2002,30(7):56-58.
- [3] 郭雷,苏延武,赵慧君. RCS 系列 220 kV 线路保护“至重合闸”压板功能解析[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(5):137-142.
- [4] 黄海坤,陈文娟,曹德发. 关于 220 kV 线路两套重合闸可并用的分析[J]. 电工技术,2009(10):13-14.
- [5] 陈新宇. RCS-931A 与 PSL603G 双重保护重合闸的实现与配合[J]. 机电信息,2010(18):27-28.
- [6] 国家电力调度通信中心. 继电保护培训教材[M]. 北京:中国电力出版社,2009:57.
- [7] 国家电网公司. Q/GDW 750-2012 智能变电站运行管理规范[S]. 北京:中国电力出版社,2012.
- [8] 金言,段振坤,范华. 智能变电站线路保护重合闸配合问题的解决方案[J]. 华北电力技术,2012,68-70.
- [9] 朱江,董余凡,李晔. “六统一”设计下的双母线方式断路器失灵保护运行分析[J]. 江苏电机工程,2012,31(6):71-74.

作者简介:

宋亮亮(1985),男,江苏南通人,工程师,从事电力系统继电保护及智能变电站相关技术的研究工作;

汪萍(1962),女,江苏镇江人,高级工程师,从事大电网继电保护研究与整定工作;

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理论与分析工作;

高磊(1982),男,山东青岛人,工程师,从事电力系统继电保护及智能变电站相关技术的研究工作。

Analysis on Reclosing Function Operation of Double Configured Line Protection Devices

SONG Liangliang¹, WANG Ping², YUAN Yubo¹, GAO Lei¹

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

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

Abstract: This paper compares the difference of line reclosing operation modes of before and after the standardized design is used in relay protection. The reliability of power grid with two sets of reclosing device from different manufacturers putting into operation at the same time is studied. Considering doubly-equipped and independently-operated characteristic of IEDs in smart substation, this paper introduces an engineering application of using permanent triple node to realize intelligent terminal reclosing function.

Key words: standardized design; double configuration; reclosing function; operation analysis; smart substation

基于内点法和离散粒子群算法的输电网参数辨识

周寅飞

(无锡供电公司,江苏 无锡 214101)

摘要:准确的电网参数是调度平台能量管理系统进行电网安全稳定分析和控制决策的重要基础。以残差加权最小绝对值(WLAV)为目标函数,能有效抑制不良数据对参数辨识结果的影响,采用现代内点法对WLAV进行求解,收敛性好。针对传统参数辨识的系统矩阵条件数过大,易出现程序发散的特点,将原-对偶内点法和离散粒子群(DPSO)算法相结合,给出了一种输电网参数辨识方法,仿真结果表明该方法在计算速度和数值稳定性方面具有明显的优势。

关键词:内点法;离散粒子群算法;可疑支路;抗差估计;参数辨识

中图分类号:TM 734

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)01-0022-04

状态估计自20世纪70年代引入电力系统调度中心以来,已成为调度自动化系统的核心与基石^[1]。网络分析和基于网络分析的优化决策与控制都依赖于状态估计结果,其结果必需尽可能接近真值。然而实际量测系统中往往含有不良数据,对状态估计结果产生影响,从而偏离真实值^[2,3]。此外,传统状态估计一般假定电网参数正确,而实际上由于参数录入错误、参数理论与现场实际值不对应以及工况变化等都可能造成电网参数错误,对电网决定与控制产生长期不利的影响^[4]。因此,状态估计应具有同时对不良数据及参数错误进行辨识的功能。目前关于这一问题的研究主要侧重2个方面:(1)在已有参数辨识程序中嵌入含不良数据辨识^[5]的模块,该方法存在难于处理杠杆量测及多个强相关不良数据的不足;(2)抗差估计,其中较受欢迎的是加权最小绝对值(WLAV)估计^[6]。WLAV估计结果能保证多个量测量的残差为0,从而有效利用正确的量测值摒弃不良数据。

参数辨识主要有基于残差灵敏度分析和增广状态估计法,由于直接将支路参数作为状态变量增广到状态估计中进行计算易于处理,在实际应用中较为广泛^[7-9]。但该方法容易导致系数矩阵条件数过大,降低了程序稳定性。文献[10]用可疑支路潮流补偿量代替支路参数来做参数辨识,一定程度上改善了数值稳定性。文献[11]利用粒子群(PSO)算法对参数辨识进行求解,但该方法运行效率不高,难于直接用于实际电网。非线性内点法^[12]和PSO算法在WLAV参数辨识的应用已取得了一定的经验和成果。前者具有收敛性好、鲁棒性强的优点,但难于处理变压器档位等离散变量;后者具有很强的离散变量处理能力和全局收敛的优点,但寻优速度慢,使得其单独在参数辨识的应用受到限制^[13]。文中将原-对偶内点法和离散粒子群(DPSO)算法相结合,给出了一种输电网参数辨识方

法,并进行了算例仿真。

1 WLAV 参数辨识数学模型

在给定结构和网络参数的条件下,电力系统的遥测量方程可表示为:

$$Z_i = h_i(x) + r_i \quad i=1,2,\dots,m \quad (1)$$

式中: Z_i, h_i, r_i 分别为系统中测点*i*的量测值、量测函数和量测误差; x 为系统状态,包括节点电压幅值和相角; m 为系统中测点数目。

状态估计的加权最小绝对值数学模型为:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^m c_i |r_i| \\ \text{s.t. } r_i = Z_i - h_i(x) \quad i=1,2,\dots,m \end{cases} \quad (2)$$

式中: $c=[c_1, \dots, c_m]^T$,为权系数向量,一般取 $c_i=1/\sigma_i^2$, σ_i^2 为第*i*个量测误差的方差。

参数估计的增广状态估计,就是将待估计参数作为变量,与原节点状态量一起参与估计。相应的增广状态估计量测方程为:

$$Z_i = h_i(x, p) + r_i \quad i=1,2,\dots,m \quad (3)$$

式中: p 为参数状态量。

2 非线性内点法

对式(2)模型进行求解,引入松弛变量 $l>0, u>0$, $l \in R^m, u \in R^m$,文献[4]提出利用 $l+u$ 替代 $|r|$,即:

$$\begin{cases} Z - h(x) - r + 2l = 0 \\ -Z + h(x) - r + 2u = 0 \end{cases} \Rightarrow l + u = |r| \quad (4)$$

将式(2)的等式约束改造为障碍函数,可得拉格朗日函数如下:

$$L(x, y, l, u, \alpha, \beta) = c^T(l+u) - y^T[Z - h(x) + l - u] - \alpha^T l - \beta^T u \quad (5)$$

式中: $y \in R^m, \alpha \in R^m, \beta \in R^m$ 为拉格朗日乘子。该式的库

恩-塔克(Karush-Kuhn-Tucker)条件为:

$$\begin{cases} L_{\alpha} = -l \Rightarrow L_{\alpha}^{\mu} = ALe - \mu e = 0 \\ L_l = c - y - \alpha = 0 \\ L_{\beta} = -u \Rightarrow L_{\beta}^{\mu} = BUe - \mu e = 0 \\ L_u = c + y - \beta = 0 \\ L_x = \nabla_x h(x)y = 0 \\ L_y = -Z + h(x) - l + u = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\nabla_x h(x)$ 为 $h(x)$ 的雅可比矩阵; μ 为扰动因子; L , U , A , B 分别为以 l , u , α , β 作为对角元素的对角阵; $e = [1, \dots, 1]^T$ 。将式(6)各式进行泰勒级数展开,并保留 L_l 与 L_u 的高阶项,得到:

$$L\Delta\alpha + A\Delta l = -ALe + \mu e - \Delta A\Delta l e \quad (7)$$

$$-\Delta y - \Delta\alpha = -c + y + \alpha \quad (8)$$

$$B\Delta\alpha + U\Delta\beta = -BUe + \mu e - \Delta B\Delta Ue \quad (9)$$

$$\Delta y - \Delta\beta = -c - y + \beta \quad (10)$$

$$\nabla_x^2 h(x)y\Delta x + \nabla_x h(x)\Delta y = -\nabla_x h(x)y \quad (11)$$

$$\nabla_x h(x)\Delta x - \Delta l + \Delta u = Z - h(x) + l - u \quad (12)$$

式中: $\nabla_x^2 h(x)$ 为 $h(x)$ 的海森矩阵。由式(7)、式(9)相加得 $\mu = (\alpha^T l + \beta^T u) / (2m)$, 定义对偶间隙 $C_{\text{gap}} = \alpha^T l + \beta^T u$ 作为收敛判据(例如 $C_{\text{gap}} < 10^{-6}$ 则算法收敛^[6]), 若不满足收敛条件, 则修正障碍参数:

$$\mu = \sigma C_{\text{gap}} / (2m) \quad (13)$$

然后进行下一次迭代计算, 直至算法满足收敛条件。式中 σ 为中心参数, 一般取 0.1, 在大部分情况下能够获得比较好的收敛性。利用阻尼牛顿法可对以上线性方程组进行求解, 并计算:

$$\begin{cases} \alpha_p = 0.9995 \min\left\{\min\left(\frac{-l_i}{\Delta l_i}, \Delta l_i < 0; \frac{-u_i}{\Delta u_i}, \Delta u_i < 0\right), 1\right\} \\ \alpha_d = 0.9995 \min\left\{\min\left(\frac{-\alpha_i}{\Delta \alpha_i}, \Delta \alpha_i < 0; \frac{-\beta_i}{\Delta \beta_i}, \Delta \beta_i < 0\right), 1\right\} \end{cases} \quad (14)$$

$$\alpha = \min\{\alpha_p, \alpha_d\} \quad (15)$$

式中: α_p , α_d 分别为原、对偶变量的迭代步长, 其目的是保证各变量满足大于 0 的条件。各变量修正方程为:

$$\begin{cases} x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha_p \Delta x \\ l^{(k+1)} = l^{(k)} + \alpha_p \Delta l \\ u^{(k+1)} = u^{(k)} + \alpha_p \Delta u \end{cases}, \begin{cases} y^{(k+1)} = y^{(k)} + \alpha_d \Delta y \\ \alpha^{(k+1)} = \alpha^{(k)} + \alpha_d \Delta \alpha \\ \beta^{(k+1)} = \beta^{(k)} + \alpha_d \Delta \beta \end{cases} \quad (16)$$

3 DPSO 算法

Clerc 提出一种针对离散变量优化问题的 DPSO 算法, 该算法中粒子也是通过追踪 2 个极值粒子进行

迭代寻优。DPSO 算法的数学描述如下:

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1 r_1 (p_{\text{best}, id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (g_{\text{best}, id}^k - x_{id}^k) \quad (17)$$

$$x_{id}^k = \begin{cases} 1 & r_3 < S(v_{id}^{k+1}) \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases} \quad (18)$$

式中: x_{id}^k, v_{id}^k 分别为粒子 i 在第 k 次迭代时的位置和速度; w 为惯性权重; c_1, c_2 为学习因子, 一般取 1.9~2.1; r_1, r_2, r_3 为 0~1 之间均匀分布的随机数; $p_{\text{best}, id}$ 为粒子 i 本身找到的最优解; $g_{\text{best}, id}$ 为整个粒子群的最优解; $S(v) = 1 / (1 + e^{-v})$ 为 sigmoid 转换函数。以线路 L_{ij} 为例, 说明该线路可疑程度的适应度函数为:

$$\text{fitness}(x, p) = \sum_{i=1}^l c_i |Z_i - h_i(x, p)| \quad (19)$$

式中: l 为该线路上的量测数目, 包括首末端功率量测及节点电压量测。

4 混合算法在 WLAV 参数辨识的应用

4.1 混合算法

针对内点法和 DPSO 算法的特点, 文中提出一种有效的混合算法^[13,14]: 首先忽略变压器分抽头等离散变量, 将参数辨识转化为一个连续的非线性规划问题, 利用内点法直接求解; 在此基础上, 根据变量的性质, 将参数辨识分解为连续优化和离散优化 2 个子问题, 分别利用内点法和 DPSO 算法交替求解, 直到取得满意的优化结果。

在利用内点法处理连续优化子问题时, 以离散优化的变压器分抽头辨识结果为基础, 从而将参数辨识问题转化为不含离散变量的优化问题。在利用 DPSO 算法处理离散优化子问题时, 又以内点法的优化结果为基础, 仅计算变压器分抽头等离散变量, 这样可有效减少计算量, 提高参数辨识的效率。为此, 基于原-对偶内点法和 DPSO 算法的参数辨识流程如下:

(1) 输入量测数据, 获取系统的节点信息和支路信息, 将可疑支路集中变压器分抽头等离散变量赋值于 DPSO 算法, 确定 DPSO 的粒子群规模等参数, 并对粒子位置及速度初始化。

(2) 假定离散变量为常数, 利用内点法对参数辨识进行求解, 每次调用时重复如下步骤: ① 初始化参数, 给原变量和对偶变量赋初值, 同时计算障碍参数的初值; ② 在当前建立牛顿方程组式(7—12), 计算牛顿方向; ③ 利用式(13—16)计算原变量和对偶变量的迭代步长, 更新原-对偶变量, 修正障碍参数; ④ 计算对偶间隙 C_{gap} , 若 $C_{\text{gap}} < 10^{-6}$ 则迭代终止转步骤(3), 否则转步骤②。

(3) 计算 DPSO 适应度值, 其中变压器分抽头状

态为上一步最终的计算结果。

(4) 更新粒子的历史最优位置 $p_{best,id}$ 和全局最优位置 $g_{best,id}$ 以及适应度值。

(5) 按式(17)和式(18)更新 DPSO 种群;计算最优适应度值,判断是否满足收敛条件,如是,则转(2),否则转至步骤(3)。

4.2 仿真实验

4.2.1 单一算法的辨识结果

以 IEEE 30 节点系统为例,首先利用内点法和 DPSO 算法单独进行参数辨识。该系统共有 4 台 2 卷变压器,各变压器的分接头位置均设为 21 档(从-10~10),抽头位置每调节一档,变比变化 0.01。所有算法均基于 C 语言实现,在至强 E-1230 V2、主频 3.3 GHz 的个人机器上仿真。其中,DPSO 算法的种群规模都设为 30,最大迭代次数为 100;内点法迭代过程中对偶间隙的收敛判据为 10^{-6} (标么值)。仿真试验用的生数据由潮流结果加 2% 标准差随机误差获得,通过对生数据置零的方式获得仿真量测数据。参数辨识结果见表 1,内点法和 DPSO 寻优过程如图 1 和图 2 所示。

表 1 单一算法的参数辨识结果

可疑 支路	真实值		内点法		DPSO 算法	
	电抗	档位	电抗	变比 / 取整	电抗	档位
T_{6-9}	0.208 0	-2	0.208 2	0.9784/-2	0.208 5	-2
T_{6-10}	0.556 0	-3	0.556 5	0.9618/-4	0.555 7	-3
T_{4-12}	0.256 0	-7	0.255 7	0.9388/-6	0.256 4	-7
T_{27-28}	0.396 0	-3	0.395 4	0.9675/-3	0.387 9	-3

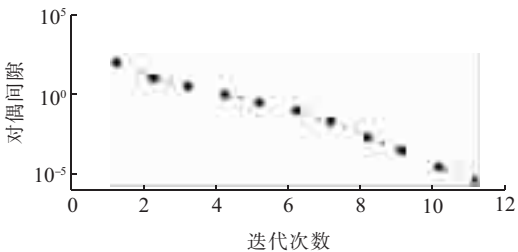


图 1 内点法求解过程

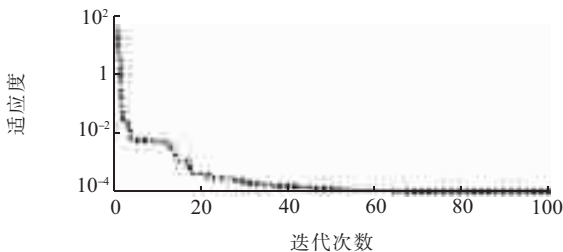


图 2 DPSO 算法求解过程

由图 1 可知,基于内点法的 WLAV 参数辨识迭代 11 次收敛,计算时间仅为 0.457 s,满足工程要求。由表 1 可知,内点法的参数辨识结果与真实值较接近,最大误差仅为 0.001 2,能有效抑制不良数据的影响。但内

点法得到的结果为连续解,不满足实际系统中分接头调节的离散要求,若对内点法辨识结果就近取整,则 T4-12 的档位(-4)又与真实值(-3)不符。因此,单独靠简单的取整策略无法解决内点法难于处理离散变量的问题。而 DPSO 算法由于将分抽头变量看作离散变量,不存在以上问题,但 DPSO 算法寻优过程迭代次数太多,平均计算时间为 18.643 s,且存在容易陷入局部最优解的不足,不适于求解大规模参数辨识。

由以上分析可知,DPSO 算法和内点法各具特色,也各有不足,单独利用上述 2 种方法均无法取得满意的效果。因此,充分发挥两类方法的优势,采用优势互补的高性能混合算法非常必要。

4.2.2 混合算法辨识结果

为了验证该混合算法的有效性,仍以 IEEE 30 节点系统为例进行参数辨识,并与单一算法进行比较,结果见表 2。仿真中,DPSO 算法的种群规模设置为 30,最大迭代次数为 100;内点法的对偶间隙收敛判据为 10^{-6} ,最大迭代次数为 25。图 3 给出了混合策略参数辨识过程。

表 2 混合算法参数辨识结果

可疑支路	T_{6-9}	T_{6-10}	T_{4-12}	T_{27-28}
电抗	0.207 3	0.556 2	0.255 0	0.395 4
分接头档位	-2	-3	-7	-3

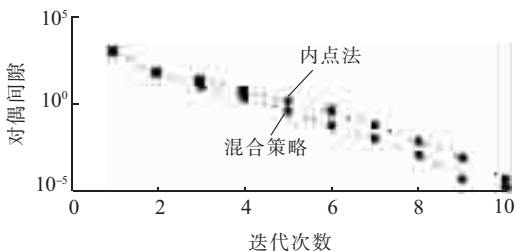


图 3 混合算法求解过程

由表 2 可知,在内点法迭代过程中,不断利用 DPSO 算法对变压器分抽头等离散变量进行更新,辨识结果与真实值基本一致。此外,利用该混合算法进行参数辨识时,能动态调整分接头的档位,使寻优方向更加准确,这与其实际迭代次数减少的现象相符。

4.2.3 算法稳定性讨论

DPSO 算法是一种随机优化方法,每次优化所需的计算时间和辨识结果不尽相同。该混合算法中包含 DPSO 算法,因此在辨识参数过程中也含有随机性。同时,为了验证混合算法和 DPSO 算法对更大规模系统的实际性能,针对 IEEE 118 节点系统进行 100 次参数辨识,变压器分接头档位的统计结果对比见表 3。该系统分接头档位仍为 21 档,调节步长为 0.01。

由表 3 可知,单独采用 DPSO 算法对 IEEE 118 节点系统变压器分抽头进行辨识时,部分最终档位偏离

表3 变压器分接头档位辨识结果统计

可疑 支路	DPSO 算法			混合策略		
	最大 值	最小 值	平均值/ 取整	最大 值	最小 值	平均值/ 取整
T_{8-5}	0	-2	-1.354 3/-1	0	-2	-1.015 4/-1
T_{26-25}	-2	-6	-3.876 9/-4	-3	-5	-3.978 6/-4
T_{30-17}	-3	-5	-4.054 8/-4	-4	-4	-4.000 0/-4
T_{38-37}	-4	-7	-5.348 7/-5	-5	-7	-6.057 9/-6
T_{63-59}	-3	-5	-4.102 7/-4	-3	-5	-3.974 3/-4
T_{64-61}	1	-2	-0.589 6/-1	0	-1	-0.934 8/-1
T_{65-66}	-4	-7	-5.134 8/-5	-6	-7	-6.105 4/-6
T_{68-69}	-5	-7	-5.871 3/-6	-5	-6	-5.871 7/-6
T_{81-80}	-5	-6	-5.587 4/-6	-5	-6	-5.941 3/-6

真实值,且由于优化变量包含节点电压幅值和相角等连续变量,最大波动幅度为 0.052 6,而混合算法将离散变量与连续变量分解,波动幅度仅为 0.001 5,为 DPSO 算法的 12.4%,表明混合算法更加稳定、可靠。同时,在计算效率上,DPSO 算法的平均计算时间为 116.742 s,而混合算法仅需 7.497 s,具有明显的优势。

5 结束语

针对基于内点法的 WLAV 参数辨识难以处理离散变量问题的不足,将 DPSO 算法引入参数辨识的离散优化子问题中,并提出连续优化与离散优化 2 个子问题交替迭代的混合算法。算例仿真验证了算法的有效性,该算法有如下特点:(1)与单独算法求解参数辨识相比,文中混合算法充分利用 2 种方法的优势,相互补充,适用于含离散变量及连续变量的参数辨识问题;(2)将 DPSO 算法嵌入内点法的迭代过程中,一定程度上克服了易陷入局部最优的不足;(3)DPSO 算法与内点法的具体实施方案进行了动态调整,从而大幅度提高混合算法的计算效率。离散优化与连续优化综合算法的理论仍处于不断发展之中,混合算法是一种较为有效的方法。同时,如何进一步提高混合算法的

收敛速度及并行计算等技术值得进一步探讨和研究。

参考文献:

- [1] 李碧君,薛禹胜,顾锦汶,等.抗差估计及其在电力系统中的应用[J].电力系统自动化,1999,23(1):56-60.
- [2] 吴文传,郭 焯,张伯明.指数型目标函数电力系统抗差状态估计[J].中国电机工程学报,2011,1(4):67-71.
- [3] 郭 伟,单渊达.M 估计及其在电力系统状态估计中的应用[J].中国电机工程学报,2000,20(9):26-31.
- [4] CELIK M K,ABUR A. A Robust WLAV State Estimator Using Transformations[J].Transactions on Power Systems,1992,7(1):106-113.
- [5] 刘广一,于尔铿,夏祖治.状态估计中不良数据可检测及可辨识性的定量分析理论[J].电力系统自动化,1991,11(12):22-26,56.
- [6] 颜全椿,卫志农,孙国强,等.基于多预测-校正内点法的 WLAV 抗差状态估计[J].电网技术,2013,37(8):2194-2200.
- [7] SLUTSKER I W, MOKHTARI S, Clements K A. Real Time Parameter Estimation in Energy Management Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3):1393-1399.
- [8] 丁 蓝,欧智乐,汤致凯,等.输电线路参数辨识的影响因素研究[J].电网技术,2013,37(7):1948-1953.
- [9] 何 桦,柴京慧,卫志农,等.基于量测残差的改进参数估计方法[J].电力系统自动化,2007,31(4):33-36,96.
- [10] LIU W H E, LIM S L. Estimation of Parameter Errors from Measurement Residuals in State Estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1):81-89.
- [11] 闫丽梅,张士元,任伟建,等.基于粒子群进化算法的电力系统状态估计研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(22):86-89,95.
- [12] Hua Wei, Hiroshi Sasaki, Junji Kubokawa, et al. Large Scale Hydrothermal Optimal Power Flow Problems Based on Interior Point Method Non-linear Programming[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1):396-403.
- [13] 刘盛松,徐 田,王 敏.基于非线性原-对偶内点法的 OPF 算法及其校正策略[J].江苏电机工程,2005,24(6):31-34.

作者简介:

周寅飞(1986),男,江苏苏州人,助理工程师,从事变电运行工作。

A Hybrid Strategy Based on Interior Point Method and DPSO for Electricity Transmission Network Parameter Estimation

ZHOU Yinfei

(Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214101, China)

Abstract: Accurate power system parameters are the foundation to form a reliable power system model, which is essential for security early warning and control system. The objective function is residual weighted least absolute value(WLAV), which can reduce the impact of bad data on parameter identification results. This model can be solved by modern interior point method (IPM), which has well performance in convergence. Due to the drawback of large number of conditions of traditional parameter identification matrix and bad convergence, a IPM and discrete particle swarm optimal (DPSO) algorithm mixed method is used so that the efficiency of the hybrid strategy is greatly improved. Finally, the numerical examples of IEEE standard systems are employed to validate the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: interior point method; discrete particle swarm optimization; weighted least absolute value; robust estimation; parameter identification

基于辨识模型的变压器故障诊断方法研究

王 峰, 王春宁

(南京供电公司, 江苏 南京 210019)

摘 要:提出了一种基于辨识模型的电力变压器绕组变形和铁心松动的故障检测方法。根据变压器的运行特点, 结合其正常状态和故障状态下不同的振动特性, 利用安装在变压器表面的振动传感器监测振动信号, 对振动信号进行频谱分析, 并根据振动特征频谱判定变压器中是否存在绕组变形和铁心松动故障, 实例验证了该方法的正确性。

关键词:变压器; 故障诊断; 辨识模型; 绕组变形; 铁心松动

中图分类号: TM41

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)01-0026-04

电力变压器是电力系统的核心设备之一, 其安全运行是电网安全运行的基础^[1,2]。变压器最常用的监测方法是油色谱分析 (DGA), 也是目前相对比较成熟的方法^[3]。虽然 DAG 方法在保证电力变压器安全运行方面做出了很大贡献, 但是 DGA 方法存在对非热故障无能为力、对早期潜伏性故障诊断困难等不足。基于振动数据分析的变压器诊断方法最先在美国、加拿大等开展研究及应用。BERLER Z 等人提出, 通过在线监测变压器油箱表面振动噪声信号来分析判断绕组及铁心状况。在线监测变压器油箱表面振动噪声信号, 分析判断绕组及铁心状况的频谱分析和时域波形, 能较好反应绕组故障^[4]。GARCIA B 等结合空载和负载振动信号, 消除磁致伸缩对绕组振动信号的干扰, 以获取基于绕组压紧力的振动相关系数^[5]。基于振动的变压器故障诊断方法通过分析变压器器身振动信号来判断变压器早期潜在的故障, 是一种在线监测方法, 属体外监测, 安装在运行设备表面的振动传感器获取其振动信号, 再应用时域和频域分析方法对信号进行分析处理得出变压器的工作状况。基于辨识模型的电力变压器的故障检测方法结合基于振动的变压器故障诊断方法, 通过建立变压器运行状态的辨识模型和特征向量, 比较特征量与正常阈值得出变压器是否存在故障。该方法具有与整个电力系统没有电气上的联系, 监测安全方便等优点, 同时避免了传统理论模型参数多, 原始参数困难等难题。

1 变压器箱体振动理论模型

1.1 变压器绕组振动模型

大型电力变压器的绕组是由一系列铜线饼叠加而成, 相邻铜线饼之间由绝缘垫块隔开, 绕组上下部都有铁轭, 起到压紧绕组的作用^[6]。变压器工作时, 绕组中的电流与漏磁场作用, 产生电磁力作用于线饼上, 在电磁力的激励下, 单个线饼可以看作是在进行

力学中的简谐振动。线饼间的绝缘油, 对绕组振动起到阻尼的作用。单个线饼的简化动力学模型如图 1 所示。

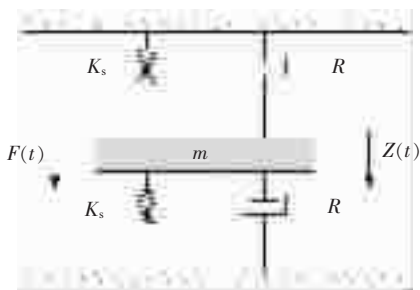


图 1 单个线饼简化动力学模型

图 1 中, m 为单个线饼的质量; K_s 为线饼间绝缘垫块的静刚度; R 为相邻线饼间绝缘油的阻尼系数; $Z(t)$ 为单个线饼的位移; $F(t)$ 为线饼所受的电磁力。对于变压器绕组的整体结构, 可以做如下简化: 假设绕组所有线饼单元质量相同, 以 m 表示; 相邻线饼间变压器绝缘油的阻尼系数相同, 以 C 表示; 相邻线饼间刚度相同, 用 K 表示; 绕组两端的线饼与铁轭的连接处的刚度各不相同。结合以上分析与以及单个线饼模型, 可以得出绕组整体动力学模型, 如图 2 所示。

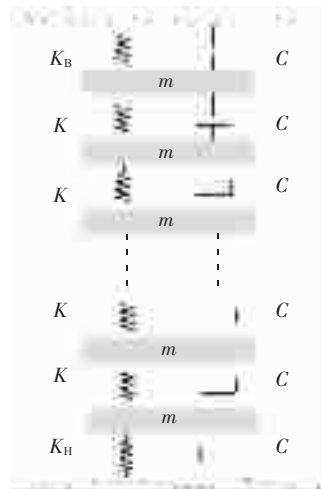


图 2 绕组动力学模型

绕组模型的运动方程为:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 z_1}{dt^2} + C \frac{dz_1}{dt} + K_B z_1 + K(z_1 - z_2) = F_1 + mg \\ m \frac{d^2 z_2}{dt^2} + C \frac{dz_2}{dt} - K(z_1 - z_2) + K(z_2 - z_3) = F_2 + mg \\ m \frac{d^2 z_3}{dt^2} + C \frac{dz_3}{dt} - K(z_2 - z_3) + K(z_3 - z_4) = F_3 + mg \\ \vdots \\ m \frac{d^2 z_n}{dt^2} + C \frac{dz_n}{dt} - K(z_{n-1} - z_n) + K_H z_n = F_n + mg \end{cases} \quad (1)$$

式中: z_n 为第 n 个线饼的位移; C 为相邻线饼间变压器绝缘油的阻尼系数; K_B 为线饼与上端部铁轭之间的刚度系数; K 为相邻线饼间的刚度系数; K_H 为线饼与下端部铁轭之间的刚度系数; F_n 为第 n 个线饼单元所受的电磁力; mg 为单个线饼的质量; $m \frac{d^2 z_n}{dt^2}$ 为第 n 个线饼单元的惯性力; $C \frac{dz_n}{dt}$ 为第 n 个线饼单元受到的阻尼力; $K z_n$ 为第 n 个线饼单元受到的弹性力。可以推得, 变压器绕组动力学模型的振动加速度为:

$$a = -4\omega^2 G \sin(2\omega t + \psi) = -4\omega^2 \frac{p I_m^2}{\sqrt{(K - 4M\omega^2)^2 + 4C^2 \omega^2}} \sin(2\omega t + \psi) \quad (2)$$

式中: G 为振动加速度系数; M 为变压器绕组质量。

1.2 变压器铁心振动模型

变压器绕组内部的磁场可以看作是均匀磁场, 绕组内部磁场强度为^[7]:

$$H = \frac{N}{L_0} I(A/m) = \frac{4\pi N}{10^3 L_0} I(Oe) \quad (3)$$

磁感应强度为:

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_r (N/L_0) I \quad (4)$$

式中: L_0 为铁心环路的平均长度; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ 为真空磁导率; μ_r 为相对磁导率; N 为初级绕组总匝数。

近年来, 由于铁轭和铁心柱采用无纬环氧黏带绑扎以及铁心叠压方式的改进, 变压器硅钢片叠片间和接缝处的电磁力引起的振动较为微弱, 铁心部分的振动可以看作仅由磁致伸缩效应产生。磁场中的硅钢片发生的线性形变与磁场强度的关系为:

$$\frac{1}{L} \frac{dL}{dH} = \frac{2\varepsilon_s}{H_c^2} |H| \quad (5)$$

式中: H_s 为矫顽力; ε_s 为硅钢片的饱和磁致伸缩率。由磁致伸缩率的定义知:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{2\varepsilon_s}{H_c^2} \int_0^H |H| dH = \frac{2\varepsilon_s}{H_c^2} H^2 = CH^2 \quad (6)$$

式中: L 为硅钢片的初始长度; ΔL 为硅钢片长度改变量; $C = \frac{\varepsilon_s}{H_c^2}$ 为硅钢片的伸缩系数。可以推得, 硅钢片的磁致伸缩率为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{2\varepsilon_s}{H_c^2} \int_0^H |H| dH = \frac{2\varepsilon_s}{H_c^2} H^2 = \frac{\varepsilon_s B_0^2}{B_s^2} \cos^2 \omega t = \frac{\varepsilon_s V_0^2}{(N_1 A \omega B)^2} \cos^2 \omega t \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 硅钢片的磁致伸缩率与变压器加载电压的平方成正比, 频率为电压频率的 2 倍。

2 变压器箱体振动辨识模型

2.1 振动辨识模型

由之前的分析知, 传播至变压器表面的振动主要由绕组和铁心两部分产生, 实际变压器中, 绕组多由 A、B、C 三相构成。变压器油箱上的振动是由三相绕组和铁心同时产生^[8]:

$$v_{100} = K_A I_A^2 \cos(2\omega t + \varphi_A) + K_B I_B^2 \cos(2\omega t + \varphi_B) + K_C I_C^2 \cos(2\omega t + \varphi_C) + K_{core} U^2 \cos(2\omega t + \varphi_{core}) \quad (8)$$

式中: K_{core} 、 φ_{core} 分别为铁心的传递系数; K_A 、 K_B 、 K_C 、 φ_A 、 φ_B 和 φ_C 分别为各相绕组振动的传递系数。式(8)即为变压器油箱表面测得振动加速度信号基频分量的模型。式中前 3 项分别反映的是 A、B、C 三相绕组的振动, 第 4 项为铁心产生的振动。

2.2 模型参数识别

由于模型是针对加速度信号中的基频信号, 即 100 Hz 频段的信号, 因此首先需要将采集到的信号滤波, 去除 100 Hz 以外的分量。文中使用带通滤波器, 滤除 0 到 60 Hz, 以及 130 Hz 以上部分

为了确定模型参数, 同时保证模型参数可以准确刻画振动输出与输入变量之间的依赖关系, 选取变压器在不同加载电压和电流条件下测得的振动信号。算法中参数取值人工鱼数目为 100 只, 最多迭代次数为 100 次, 最多试探次数为 200 次, 感知距离为 1, 拥挤度因子为 0.618, 步长取为 0.1。取:

$$Y = |K_A I_A^2 \cos(2\omega t + \varphi_A) + K_B I_B^2 \cos(2\omega t + \varphi_B) + K_C I_C^2 \cos(2\omega t + \varphi_C) + K_{core} U^2 \cos(2\omega t + \varphi_{core}) - V_{real}| \quad (9)$$

式中: Y 为适应度函数; V_{real} 为 100 Hz 频段振动信号的实测值。以适应度函数值最小为目标, 辨识 K 和 φ 等参数。

当模型参数确定之后, 该变压器箱体振动模型用于计算任意加载电压和电流下箱体振动信号的基频分量幅值大小。通过比较同等加载电压和电流下实测值

和模型计算值的大小和误差,发现实测值和计算值有较好的吻合度,且相对误差在可接受的范围(5%)内,因此文中所提出的模型可以用于对不同的变压器负载和加载电压预测变压器箱体表面振动的基频分量。

2.3 振动特征量

2.3.1 绕组变形

考虑到电力变压器故障征兆与故障原因之间的关系错综复杂,仅将单一频率分量的变化作为诊断依据,往往很难满足故障诊断的要求。经过大量实验研究,并结合绕组变形故障后各频带的变化规律,建立由3个诊断特征构成的绕组变形诊断综合判据如下:

$$\begin{cases} E_{T50} + E_{T150} = C_1 \\ q(E_{T50} + E_{T150}) / (E_{T100} + E_{T200}) = C_2 \\ E_{F100} / E_{T100} = C_3 \end{cases} \quad (10)$$

式中: E_{T50} , E_{T100} , E_{T150} , E_{T200} 分别为变压器油箱顶面振动信号 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz 分量的能量值; E_{F100} 为变压器油箱正面中部振动信号 100 Hz 分量的能量值; C_1 , C_2 , C_3 分别为特征一、特征二、特征三的特征值。

要从监测的变压器油箱表面振动信号确定绕组的状况,则首先确定在正常与故障状态下特征向量 T 的特征值:

$$T = [C_1 \ C_2 \ C_3] \quad (11)$$

当高、低压绕组之一出现变形后,原频率处幅值出现变化。变压器表面的振动与变压器绕组的压紧状况、位移及变形密切相关,它们的变化将引起作为标准特征向量的正常状态变压器振动特征向量的变化,一旦变压器发生故障,将当前特征向量 T_x 与标准特征向量 T_N 作比较就可以迅速判断变形故障。

2.3.2 铁心松动

虽然铁心松动会引起 100 Hz 分量的改变,但因 100 Hz 分量影响因素多,故不把 100 Hz 作为主特征。以 300 Hz, 50 Hz, 150 Hz, 100 Hz 振动分量为共同特征进行诊断;以振动信号中 300 Hz 分量为第一特征;50+150 Hz 分量之和为第二特征;100 Hz 分量为第三特征。

2.4 基于辨识模型的故障诊断流程

基于辨识模型的故障诊断流程如图 3 所示。

3 算例分析

以实际算例验证绕组变形故障,铁心松动故障验证过程类似。所选变压器型号为 S9-M-100/10,电压比为 10/0.4 kV。3 个加速度振动传感器通过磁铁吸附方式分别固定于 A、B、C 三相铁心的正上方,通过尼高力数据采集仪采集,采样频率为 10 kHz,并传输至 PC 机进行分析并判定故障。

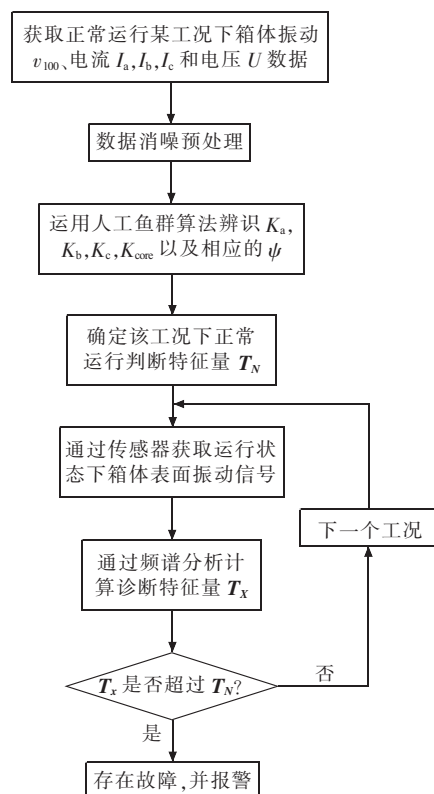


图 3 基于辨识模型的故障诊断流程

变压器设置绕组变形故障前后频谱如图 4、图 5 所示。当紧固螺杆松动时,硅钢片接缝处电磁力和磁致伸缩效应会增大。同时,硅钢片松散程度增大会增大硅钢片间的间隙,改变铁心整体的刚度和片间阻尼,导致片间振动加剧。这是 100 Hz 以及 300~600 Hz 处幅值变大的主要原因。

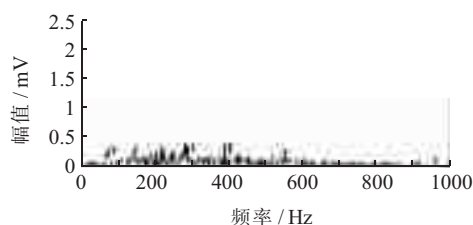


图 4 正常时频谱

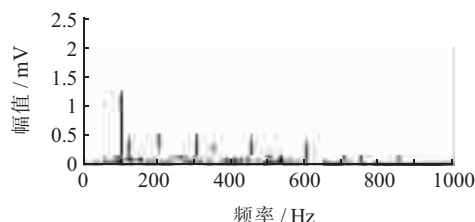


图 5 绕组变形后频谱

由表 1 分别计算测点 1、2、3 处的 $\Delta T = T_x - T_N = [\Delta C_1 \ \Delta C_2 \ \Delta C_3]$, 结果如表 2 所示。由此可见变压器 3 个测点处的 ΔC_1 、 ΔC_2 、 ΔC_3 均为正值。则初步认为绕组内部存在变形。

根据表 1 可得变压器的顶面基频能量 E_{T100} 增加

表 1 监测点的特征向量

测点	标准特征向量 T_N	当前特征向量 T_X
1	[0.3125 0.2404 1.055]	[6.132 3.627 1.361]
2	[0.2554 0.2343 1.277]	[5.785 3.443 1.563]
3	[0.2512 0.2156 1.118]	[5.955 3.514 1.516]

表 2 特征向量的对比

测点	ΔC_1	ΔC_2	ΔC_3
1	5.8195	3.3866	0.3060
2	5.5296	3.2087	0.2860
3	5.7038	3.2984	0.3980

了14.94%，其能量值增加不明显，而正面基频能量 E_{F100} 增加了57.87%，其能量增加幅度较大，故可确定该变压器的绕组故障即为绕组变形故障。

4 结束语

文中提出了一种基于辨识模型的电力变压器绕组变形和铁心松动的故障检测方法。该方法根据变压器的运行特点，结合其正常状态和故障状态下不同的振动特性，利用安装在变压器表面的振动传感器监测振动信号，通过频谱分析，比较同一工况下正常和异常的特征向量，判定变压器中是否存在绕组变形和铁心松动故障，并总结了绕组变形和铁心松动故障的特征判据。同时该方法避免了传统理论模型参数多，原始参数困难等难题，实例验证了方法的正确性。

参考文献:

- [1] 黄明华,李 红,伏祥运,等. 参数不同变压器并列运行时负荷分配计算[J]. 江苏电机工程,2012,31(1):52-55.
- [2] 陆志平. 一起 110 kV 主变差动保护误动作原因分析[J]. 江苏电机工程,2013,32(1):13-14,17.
- [3] 孙 颖. 色谱分析方法在变压器故障诊断中的应用[J]. 广州化工,2010(8):89-90.
- [4] BERLER Z, GOLUBEV A, ROSOV V, et al. Vibro-acoustic Method of Transformer Clamping Pressure Monitoring[C]//Conference Record of 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Anaheim, CA, USA, 2000:263-266.
- [5] GARCIA B, BURGOS J C, ALONSO A M. Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding Deformations :Part I experimental verification[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006,21(1):157-163.
- [6] 马宏忠,耿志慧,陈 楷,等. 基于振动的电力变压器绕组变形故障诊断新方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(8):89-95.
- [7] 马宏忠,赵宏飞,陈 楷,等. 基于振动的变压器铁心松动判定方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(13):72-76.
- [8] BARTOLETTI C, DESIDERIO M, DICARLO D, et al. Vibroacoustic Techniques to Diagnose Power Transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004,19(1):221-229.

作者简介:

王 峰(1984),男,浙江丽水人,工程师,从事变压器故障在线诊断研究;

王春宁(1966),男,江苏南京人,高级工程师,从事电力企业科技管理工作。

Research on Transformer Fault Detection Based on Identification Model

WANG Feng, WANG Chunling

(Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: A fault detection method for winding deformation and loosening of stator core based on identification model is proposed. According to operational characteristic of transformer, and combining with different vibration characters of normal and abnormal states, the spectrum of vibration signal is analyzed through the sensor installed on the surface of transformer. Based on the result of spectrum analysis, whether winding deformation and loosening of stator core occurs to transformer can be judged. Finally, a case study validates the proposed method.

Key words: transformer; fault detection; identification model; winding deformation; loosening of stator core

江苏全社会用电量跃居全国第一

2014年1月7日,来自国网江苏省电力公司的数据显示,2013年江苏省全社会用电量实现历史性突破,较上年增长8.20%,达4957亿千瓦时,超过广东省4830.13亿千瓦时的全社会用电量,跃居全国第一。

江苏是经济大省,经济发展和人民生活水平快速提高,对电力的需求持续增长。江苏也是资源小省,电力供求长期处于紧平衡状态。同时,江苏新能源产业正在兴起。面对这一省情,江苏省政府提出“区外来电和省内电源建设并举,大力发展新能源”的电力发展方略。为增加省内电力供应,国网江苏电力加快推进电源点配套输变电工程建设,积极服务火电机组上大压小和燃气、新能源机组并网发电。配电网是供电的“毛细血管”和“末梢神经”。2013年,江苏城乡配电网建设加快推进,新增配电容量674.16万千伏安。

发挥电网优势、增加区外来电,是保障电力供需平衡的又一法宝。2013年夏季用电高峰时,江苏区外来电达1515万千瓦,全年从区外净输入电量551.7亿千瓦时,占全社会用电量的11%,其中通过锦苏特高压工程受入电量213亿千瓦时。

摘自《江苏电力信息网》

面向电网削峰的商业楼宇空调负荷调控实证研究

叶剑斌, 黄 堃, 刘 琼, 李天阳

(国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210061)

摘 要:伴随各类空调的广泛应用,空调负荷快速增长,已占夏季尖峰负荷的30%以上,电网峰谷差进一步拉大,加剧了电网高峰负荷供应缺口,影响电网的安全稳定运行。基于商业楼宇空调负荷具有较大可控性,开展了面向电网削峰的商业楼宇空调负荷调控实证研究,验证商业楼宇空调负荷调控技术实现电网削峰的可行性及其效果,为规模化推广空调负荷调控储备必要的技术和经验。

关键词:电网削峰;商业楼宇;空调负荷调控

中图分类号:TM925

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)01-0030-05

伴随国民生活水平的不断提高,各类空调得到了广泛应用,一些大中城市和经济发达省份的空调负荷已占到夏季尖峰负荷的30%以上,某些地区甚至超过40%^[1],且电网高峰负荷集中出现在夏季的数百小时内。受空调负荷影响,各电网用电负荷迅速增长,峰谷差进一步拉大。同时,受电力需求持续快速增长、水电减发等因素的影响,华东、华中及南方等大部分省市电力供应偏紧,部分省份电力供应缺口达25%以上^[2],极大影响电网的安全稳定运行。若单纯依靠增加装机容量^[3]和输配电装备,需要付出巨大的投资,且造成发电和输配电环节设备利用效率低下^[4],资源浪费严重。据统计,在夏季电网负荷高峰时段,商业楼宇空调负荷约占电网总负荷的12%,有效削减商业楼宇空调负荷能够发挥电网削峰作用。由于绝大部分商业楼宇空调在设计和选型时都是依据最大承受原则,而实际应用过程中因为缺乏专业的空调运行管理知识和制度,导致空调输出量远大于实际需求,因此商业楼宇空调负荷具有较大的可控性。通过精细化控制,商业楼宇空调负荷在高峰的短时间内(2 h)普遍可以取得削峰5%~10%的效果,部分甚至可以达到10%~15%。文献[1,3,5,6]基于空调及电网负荷特性提出了空调负荷调控的相关措施及建议,但在商业楼宇空调负荷调控结合电网削峰的实证化研究方面,还未见有相关文献报道。依托国家发展与改革委员会“关于委托开展居民和商业用户空调负荷调控课题研究”的文件,国家电网公司2012年开展了科技项目“智能用电实证研究”,旨在验证商业楼宇空调负荷调控技术实现电网削峰的可行性及其效果,为今后规模化推广空调负荷调控储备必要的技术和经验。

1 实证楼宇选取

影响商业楼宇空调使用的主要因素包括:(1)天

气状况;(2)经济水平;(3)地域气候习惯,其中天气状况是最为紧密最为直接的因素。

我国华东、华中与华北区域电网由于其地域原因,天气表征虽存在较大差别,但在夏季天气炎热时期,商业楼宇空调负荷占电网负荷比例大方面具有相同性,从这三大区域分别选取实证楼宇具有很好的地域代表性,便于将来研究成果的推广应用。有关统计表明,第三产业经济水平也是影响商业楼宇空调使用的重要因素,经济水平越高,空调使用程度越高,对地区电网高峰负荷的影响也就越大。这三大区域各自经济中心城市级的电网峰谷差明显,从中选取实证楼宇更利于研究商业楼宇空调负荷调控对电网削峰的支撑效果。

空调负荷调控实证涉及智能用电、计算机、通信、暖通等多个领域,依托国家电网公司先前试点建设的智能楼宇工程,利用楼宇已有的硬件和软件基础,能够快速经济地构建实证研究所需的软硬件环境。因此,最终选取上述3个地域中不同类型的商业楼宇作为实证楼宇,下文以重庆市电力公司新生产大楼为例进行具体介绍。

2 实证方案

2.1 软硬件建设

重庆市电力公司新生产大楼是国家电网公司智能楼宇试点之一,大楼地面共9层,为南北区对称结构,采用风冷式中央空调系统,有5台345 kW空调主机和5台37 kW循环水泵,17台新风机组,约750个风机盘管,先期已建成智能楼宇能效管理系统,实现了楼宇用能分项计量,室外环境数据采集以及空调系统部分远程控制功能,如新风机组、空调主机和循环水泵启停,水泵变频,空调主机出水温度调节等。由于大楼空调系统已经正式投入使用2年多,从稳定运行需要出发,兼顾空调负荷调控实证研究的环境需求,设计如下建设方案。

(1) 硬件。包括:(a) 更换新风水阀执行器,铺设与新风机组直接数字控制(DDC)系统之间的交互电缆,实现新风水阀开度的远程平滑调节;(b) 增加新风机组回风温/湿度传感器以及与新风机组 DDC 系统的通信线缆,实现新风状态数据的实时监测,从而动态调节新风机组的运行参数,保证新风机组运行工况满足实际需要;(c) 在每楼层的南北区分别选取若干具有典型环境代表性的房间及走廊,安装 zigbee 通信方式的温度传感器,实现室内环境的实时动态跟踪;(d) 在大楼监控机房安装实证服务器、工作站、交换机及物理防火墙等,建设与智能楼宇能效管理系统前置服务器、zigbee 集中器的通信通道,开通互联网服务。整个实证环境的硬件架构如图 1 所示。

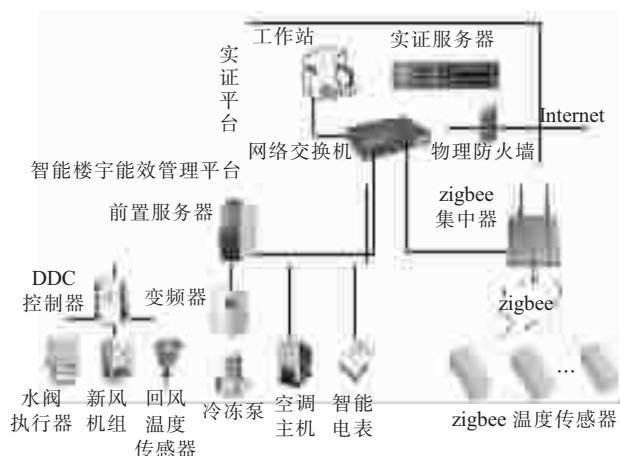


图 1 实证硬件架构

(2) 软件。研发商业楼宇空调负荷调控实证软件系统(后简称实证系统),并模块化配置到实证服务和工作站。设计 4 个服务功能模块:数据接口、智能用电、需求响应和效果评估,其中数据接口实现实证系统与智能楼宇能效管理系统、zigbee 集中器的信息交互;智能用电由用电监测、策略管理和数据分析等子模块构成,是需求响应服务的基础;需求响应包括策略生成和优化协调,是实证系统的核心,决定空调负荷调控执行效果的优劣;效果评估服务由数据统计、数据查询、基线负荷预测、削峰评价等组成,为空调负荷调控提供效果的后分析评估和展示发布。图 2 显示了实证系统的软件架构。

扩展智能楼宇能效管理系统功能,如新风水阀执行器控制、新风机组运行参数设置以及回风温/湿度传感器数据采集等,借助通信接口在实证系统间接实现这些功能。

2.2 调控策略

结合重庆当地电网负荷特性、天气特点、过去 3 年天气资料以及大楼的实际情况,拟定从 2012 年 7~9 月份选择 25 个气温炎热(气温要求在 32℃及以上)的工作日,在 13:00~15:00 电网负荷高峰时段开展空调

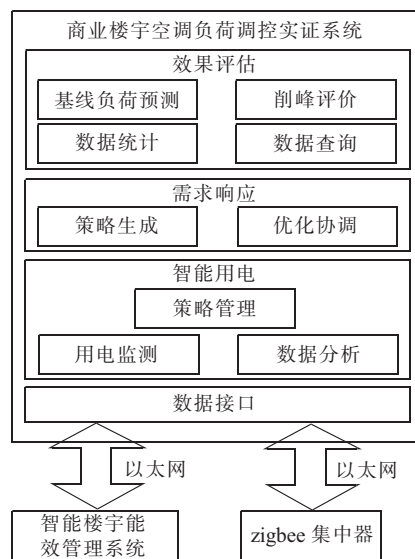


图 2 实证软件架构

负荷调控,具体策略计划见表 1。

表 1 实证策略计划

序号	策略	次数
1	全局温度控制	3
2	提前制冷	2
3	关停新风机组	1
4	关停风机盘管	1
5	调节水阀开度	2
6	调节空调主机出水温度	3
7	冷冻泵变频	3
8	减少运行空调主机数目	2
9	关停新风机组+冷冻泵变频	3
10	关停新风机组+减少运行空调主机数目	2
11	调节水阀开度+减少运行空调主机数目	3

2.3 调控效果评价体系

2.3.1 指标体系的框架设计

实证调控效果综合评价指标体系影响因素众多,不仅包括定性指标,而且包括定量指标。采用层次分析法对实证调控效果综合评估指标体系进行分级、分层次,进而形成有序的层次结构模型。对综合评价指标关键因素进行梳理,分析层次模型中状态因素、评判集和权重系数等关键参数,对实证策略调控效果形成合理、有效的综合评价。

实证调控效果包含电能信息指标、经济指标、管理指标和环境指标等诸多因素,根据上述评价指标体系构建方法,建立实证调控效果综合评估指标体系框架,如图 3 所示。

2.3.2 指标体系的量化评估

选用模糊综合评估来求解体系,其基本思想是利用模糊线性变换原理和最大隶属度原则,考虑与被评

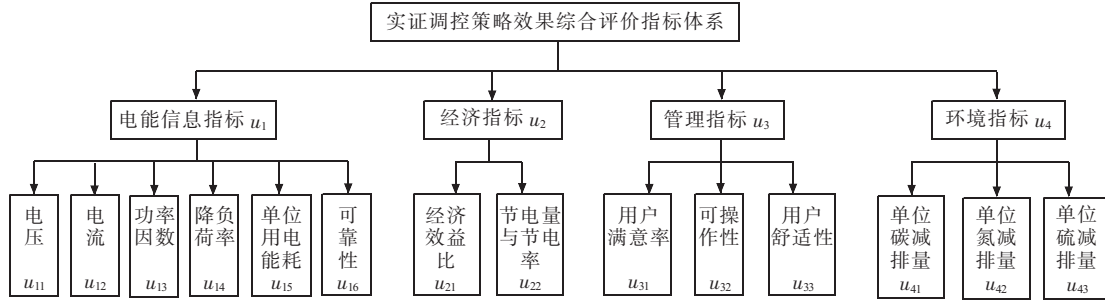


图3 实证调控效果综合评估指标体系框架

价目标相关的各个因素^[7]。先从最低级层次的各个因素进行综合评价,再依次向上,直到最高的目标层,进而得出最终评价结果,其基本步骤如图4所示。

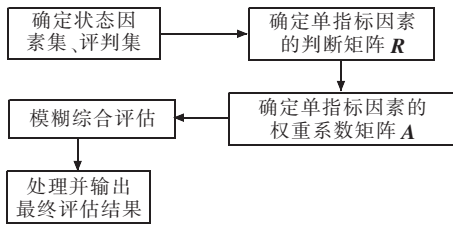


图4 调控效果评估流程

(1) 确定状态因素集。设 U 为包含所有评判因素的因素集,将 U 中的因素按照某一准则分组,性质相近的因素分在一组,设 U 中的因素分为 l 组,即其中: U 为高层因素集, $U_i (i=1,2,\dots,l)$ 为低层因素集。

将调控效果评估指标体系分为2层,如图3所示,则综合评判因素集 $U=\{U_1, U_2, U_3, U_4\}$,最底层的单因素集分别为:

$$\begin{cases} U_1=\{u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}, u_{16}\} \\ U_2=\{u_{21}, u_{22}\} \\ U_3=\{u_{31}, u_{32}, u_{33}\} \\ U_4=\{u_{41}, u_{42}, u_{43}\} \end{cases} \quad (1)$$

(2) 设置评判集及权重系数。设 $V=\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ 表示评判集,它对任一层、任一因素的评判都适用。另假设 $A_i=(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im})$ 为 U_i 中各因素相对 V 的权重系数集,且满足 $a_{i1}+a_{i2}+\dots+a_{im}=1$, a_{im} 根据 U_i 中各因素的重要程度分配。同理,对于高层因素集,可设 $A=(a_1, a_2, \dots, a_l)$ 为 U 中各因素相对 V 的权重系数集,且满足 $a_1+a_2+\dots+a_l=1$, a_{il} 根据 U 中各因素的重要程度分配。

将调控效果由高到低分为4级:红、橙、黄、蓝。各等级表示的状态情况大致如下。

(a) 红色。表示整体的调控水平很低,可实施的程度低。

(b) 橙色。表示整体调控水平低,可实施程度水平

中等。

(c) 黄色。表示整体的调控水平中等,可实施水平中等。

(d) 蓝色。表示整体调控水平良好,可实施水平较高,用户满意度高。

故评判集可表示为: {红, 橙, 黄, 蓝}。

(3) 综合评判矩阵的求取。通过各单因素模糊评价获得模糊综合评判矩阵:

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{in} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: r_{ij} 表示对 u_i 的评价中,评判等级 $v_j (j=1,2,\dots,m)$

所占份额,即 $r_{ij}=f_{ij}/\sum_{j=1}^n f_{ij}$,式中 f_{ij} 为第 i 个因素被评为第 j 个评判等级 v_j 的总次数。利用复合运算求出对子因素集 U_i 的综合评判结果:

$$\begin{cases} B_i=A_i \cdot R_i=[b_{i1} \ b_{i2} \ \dots \ b_{im}] \\ b_{ij}=\sum_{k=1}^n (a_{ik} r_{kj}) \ 1 \leq j \leq m \end{cases} \quad (3)$$

下一步对高层因素集进行评判,即对评判空间 (U, V, R) 进行综合评判,对于因素集 U 的单因素评判矩阵 R 则由较低层次的综合评判输出 B_i 构成:

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \cdot R_1 \\ A_2 \cdot R_2 \\ \vdots \\ A_l \cdot R_l \end{bmatrix}_{l \times m} \quad (4)$$

对于因素集 U 的最后综合评判结果为:

$$B=A \cdot R=(b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (5)$$

以上是二级评判模型,更多层次评判模型的建立方法与二级模型类似。

(4) 评估指标敏感性分析。在调控效果综合指标评价下,某策略属于第 $l(1, \dots, 4)$ 类能效色的隶属度表示为:

$$a_l(\sum_{i=1}^i \sum_{k=1}^n a_{ik} r_{kl}) = a_l(\sum_{i=1}^i a_{1k} r_{kl} + \sum_{i=2}^i a_{2k} r_{kl} + \sum_{i=3}^i a_{3k} r_{kl} + \sum_{i=4}^i a_{4k} r_{kl}) \quad (k \in n) \quad (6)$$

若保持权重指标不变,调整 Δr_{kl} ,那么属于第 $l(1, \dots, 4)$ 类效果色的隶属度为:

$$a_l(\sum_{i=1}^i \sum_{k=1}^n a_{ik} r'_{kl}) = a_l(\sum_{i=1}^i a_{1k} r'_{kl} + \sum_{i=2}^i a_{2k} r'_{kl} + \sum_{i=3}^i a_{3k} r'_{kl} + \sum_{i=4}^i a_{4k} r'_{kl}) \quad (k \in n) \quad (7)$$

其敏感度为:

$$\partial u_{ij} = \frac{a_l'(\sum_{i=1}^i \sum_{k=1}^n a_{ik} r'_{kl}) - a_l(\sum_{i=1}^i \sum_{k=1}^n a_{ik} r_{kl})}{\Delta r_{kl}} \quad (8)$$

结合实证策略的应用场景和能效指标体系,电能信息指标是最重要的调控指标,可以直观反映调控综合水平,但是若对用户影响较大,即使调控水平很高也不具备推广性和可行性,故管理指标也是整体调控效果的重要衡量指标,而经济指标和环境指标属于整体调控水平提升的附属效益。因此,4个二级指标的重要性排序依次为电能信息指标、管理指标、经济指标和环境指标。

3 实证实施

3.1 实证试验

夏季期间,大楼空调系统在电网高峰负荷时段正常运行状况为开启3台空调主机、3台循环水泵以及全部新风机组。实证共进行空调负荷调控试验26次,其中7月份8次,8月份12次,9月份6次,采用了11种调控策略,其中“关闭风机盘管”策略由人工操控风机盘管电源开关实现。同时,为实现调控效果的分析评估,实证系统不间断采集了7~9月份的所有相关数据,包括空调主机、循环水泵、新风机组等的负荷和运行状态,以及楼宇内外部环境。

另外,同步开展大楼用户的走访调查,了解调控对用户感觉的影响。结果显示,空调负荷调控对用户感觉基本没有什么影响,只出现过一次用户投诉反馈,当日调控策略是“关停风机盘管”。

3.2 实证分析

对大楼调控试验数据和用户走访调查进行综合分析,得出以下结论:

(1) 商业楼宇空调负荷调控削峰效果显著,基本不影响用户舒适度。在7~9月份调控时间段内,平均削减空调负荷255.19kW,占调控前空调总负荷21.68%。以2012年8月1日为例,当天实施了“全局温度控制”策略,在13:00~15:00时间段内,室内平均温度上升

约0.87℃(当时室外平均温度33.6℃),单个室内温度最高达到26.1℃,对人体舒适度基本没有影响,但是空调负荷削减比例达到34.38%,空调负荷与室内平均温度对比曲线如上图5所示。

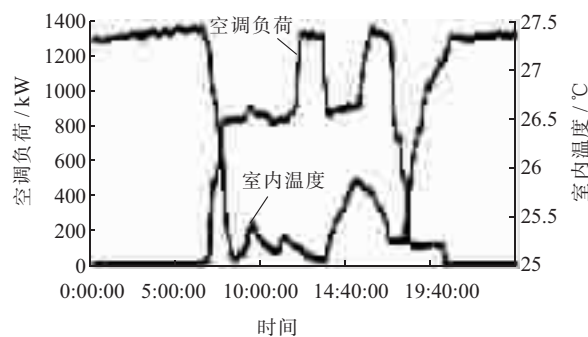


图5 2012年8月1日空调负荷与室内温度对比曲线

(2) 商业楼宇空调负荷调控技术手段多样,部分具有较好实用推广性。大楼共使用了包括控制空调主机、新风机组、循环水泵、风机盘管等11种调控策略,每种调控策略的调控效果不尽相同,效果如表2所示。

表2 空调负荷调控效果

序号	策略	次数	平均降负荷率/%	室内温度平均升高/℃	用户感觉
1	全局温度控制	3	36.13	0.83	基本无
2	提前制冷	2	31.65	0.67	基本无
3	关停新风机组	1	6.59	0.03	无
4	关停风机盘	1	8.42	1.23	有
5	调节水阀开度	2	6.20	0.07	无
6	调节空调主机出水温	3	7.73	0.32	基本无
7	冷冻泵变频	3	8.24	0.26	基本无
8	减少运行空调主机数目	2	24.04	0.77	基本无
9	关停新风机组 + 冷冻泵变频	3	13.69	0.27	基本无
10	关停新风机组 + 减少运行空调主机数目	3	25.31	0.77	基本无
11	调节水阀开度 + 减少运行空调主机数目	3	27.41	0.79	基本无

结合表中数据,依据负荷削减率和用户感觉,并根据调控效果综合评价指标体系对上述11种策略进行分析计算得出,全局温度控制、减少运行主机数量等调控策略的整体调控效果综合评价合格率均大于60%,具有良好的推广前景;关闭风机盘管策略调控评价合格率低,不适宜推广。

(a) 全局温度控制。该策略充分利用了空调系统各组成部分的性能,对水泵、新风机组、空调主机等执行组合控制,实现多元、多方位综合调节,能大幅降低空调负荷,同时利用量测体系,形成回馈机制,减少对室内环境温度的影响。该策略要求空调系统远程控制

手段较为全面,伴随空调系统自动控制技术的广泛应用,具有良好的推广前景。

(b) 减少运行主机数量及其相关策略。商业楼宇空调系统在设计和选型时普遍都留有较大的裕量,大部分时间都处于低载运行,即使这样,运行空调的输出量往往也远大于实际需要。在满足楼宇实际需求的前提下,可以短时间内关停其中部分运行主机,借助楼宇自身的保温体系,维持楼宇的冷负荷输出,从而有效降低空调负荷。因此该策略也具有很好的推广性。

(c) 关闭风机盘管。该策略阻断了室内冷负荷的输入通道,影响室内冷热负荷的有效交换,致使室内温度上升过快,用户感觉明显不适;同时在空调主机制冷量不变的情况下,单纯的关闭风机盘管,对主机制冷负荷的降低影响效果较小,同时还造成一定程度上的能源浪费。因此不具备推广价值。

4 结束语

通过对重庆市电力公司新生产大楼的空调负荷调控实证研究,验证了商业楼宇空调负荷调控在技术上的可行性,并且能够充分发挥对电网削峰的支撑作用,已具备规模化推广的基础技术条件。下一步需要针对区域性离散商业楼宇群的空调负荷调控进行深入研究,以实现电网的有序削峰。

参考文献:

- [1] 张志强. 基于电网侧的空调负荷特性分析及其调控措施研究[D]. 北京:华北电力大学,2007.
- [2] 赵建华. 煤价上涨过快,中国将进行临时价格干预. 中国新闻网,2011-11-30.<http://www.chinanews.com/ny/2011/11-30/3498776.shtml>.
- [3] 华 瑶,惠 璟,张炜炜. 夏季空调负荷分析及调控措施研究[J]. 工业技术经济,2009,28(10):121-123.
- [4] 李啸宇,谈金晶,王蓓蓓. 智能园区需求响应项目实施效益研究[J]. 江苏电机工程,2013,32(4):20-23.
- [5] 吕迎春. 重庆地区夏季空调负荷分析及调控措施建议[J]. 科学咨询,2007(12):15-16.
- [6] 李东梅,李敬如,赵 静,等. 北京空调负荷结构及调控措施研究[J]. 电力技术经济,2005,17(6):30-32.
- [7] 吴剑飞,姚建刚,陈华林,等. 电力客户能效状态模糊综合评估[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(13):94-98.

作者简介:

叶剑斌(1977),男,湖北红安人,硕士,高级工程师,从事智能用电方面的研究;
黄 堃(1986),男,江苏南京人,硕士,工程师,从事节能方面的研究;
刘 琼(1986),女,江苏连云港,助理工程师,从事节能方面的研究;
李天阳(1978),男,江苏南京人,工程师,从事智能用电方面的研究。

Empirical Study on Air-conditioning Load Regulation of Commercial Building for Power Grid Peak Clipping

YE Jianbin, HUANG Kun, LIU Qiong, LI Tianyang

(NARI Technology Development Limited Company, Nanjing 210061, China)

Abstract: With wide application of various types of air-conditioning, air-conditioning load has fast grown and up to more than 30% of the summer peak load. It contributes to peak valley difference of grid and aggravated supply gap in the period of peak load, which resulted in safety and stability issues to power grid's operation. In considering that air-conditioning load in commercial building is flexible and controllable, an empirical study on air-conditioning load regulation in commercial building for power grid peak clipping is carried out. The study results verifies that it is effective to employ air-conditioning load regulation to clip power grid peak load. Moreover the necessary technology and experience for large-scale promotion of air-conditioning load regulation is accumulated.

Key words: power grid peak clipping; commercial building; air-conditioning load regulation

广 告 索 引

江苏华电戚墅堰发电有限公司	封一	《江苏电机工程》协办单位	前插 4
远东电缆有限公司	封二	南京苏逸实业有限公司	(黑白) 文前
南京南瑞继保电气有限公司	前插 1	江苏南瑞帕威尔电气有限公司	封三
《江苏电机工程》协办单位	前插 2、3	南瑞科技股份有限公司	封四

基于 PCS-985B 的发电机定子接地保护应用及整定

张伟伟, 徐 静, 张婷昉
(华能南通电厂, 江苏 南通 226003)

摘 要:结合发变组保护改造工程,介绍了基于 PCS-985B 装置的 100%定子接地保护的配置方案和整定计算等应用,结合实测数据论证了整定的合理性,并对 PCS-985B 装置零序电压接口与现场设备不完全匹配的问题进行了讨论,提出了解决方法。

关键词:定子接地;整定计算;零序电压;三次谐波电压

中图分类号:TM307

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)01-0035-03

定子接地故障是常见的发电机故障。发电机定子接地后,接地电流经故障点、三相对地电容、三相定子绕组而构成通路。当接地电流较大时,能在故障点引起电弧,造成定子绕组和铁心烧伤,甚至扩大为相间或匝间短路,导致发电机严重损坏^[1]。近年来,就曾发生过由于发电机定子接地故障时,定子接地保护拒动或动作时间过长而导致主设备严重损坏的事故。而与此同时,定子接地保护误动导致机组非停的事件也时有发生^[2]。因此,工程上研究如何更加优化配置和整定定子接地保护,对确保发电机组安全稳定运行具有重要意义。结合 350 MW 机组发变组保护改造,从工程应用的角度阐述了由基波零序电压保护和三次谐波保护构成的 100%定子接地保护的配置方案、整定计算等应用。

1 定子接地保护配置方案及二次接线

1.1 100%定子接地保护配置方案

350 MW 机组发变组保护改造工程采用基波零序电压和三次谐波电压保护相结合,共同构成 100%定子接地保护的配置方案。PCS-985B 装置对零序电压的三次谐波滤除比达 100%,基波零序电压保护范围达到定子绕组的 85%~95%,在中性点附近存在死区;三次谐波电压保护在中性点附近有较高灵敏度,与基波零序电压保护相互配合,构成 100%定子接地保护^[3]。

1.2 保护二次接线

定子接地保护的二次接线主要采集以下电气量:(1)发电机中性点零序电压,作为基波零序电压保护的主判据,取自中性点接地变压器二次侧;(2)机端零序电压,作为基波零序电压保护的辅助判据,取机端 PT(电压互感器)开口三角或自产零序电压;(3)主变高压侧零序电压,作为基波零序电压保护的闭锁判据,取自主变高压侧 PT 开口三角绕组;(4)机端及

中性点三次谐波电压,作为三次谐波保护判据。

1.3 零序电压接口不匹配问题解决方案

该发电机中性点接地变压器变比为 14 400:240,当机端发生定子接地时,中性点零序电压二次值最大可达 221 V,与 PCS985B 装置电压互感器(TV)电压采样插件的额定电压 100 V 不太匹配。针对该问题,有以下 2 种方案。

(1)更改发电机中性点接地变压器变比。若将变比改大从而降低二次电压,可解决电压不匹配问题,但将导致中性点接地电阻一次值放大,可能无法满足发电机抑制过电压的技术要求^[3]。若二次侧电阻同时改变,从而保持一次值和功率不变,则理论上能满足抑制过电压的要求,但实施起来较为复杂,且实际上改变了一次系统参数。

(2)在中性点接地变压器二次侧接地电阻上加装抽头。该方法在不改变一次系统参数的情况下,通过电阻分压调整输入到装置的二次电压,电阻特性的改变可能影响分压比。

该发电机中性点接地电阻为多片叠加式陶瓷体线性电阻,阻值特性非常稳定,且增加中间抽头也很方便,因此采用第 2 种方案。更改后,输入到保护装置的电压为接地变压器二次侧电压的一半,即发电机中性点一、二次电压变比为 14 400:120。

2 基波零序电压定子接地保护整定

2.1 定子接地电流计算

由于发电机侧为中性点经高阻接地系统,当发生定子接地故障时,流过故障点的电流为通过发电机及连接设备对地电容构成回路的电容电流 I_C ,以及与中性点接地电阻构成回路的电阻电流 I_R 之和,等效电路如图 1 所示。图中: R_n 为中性点接地变压器二次侧电阻的一次值; C_{Σ} 为机端每相对地总电容,包括发电机绕组、机端外接电容器、主变低压侧以及单元变高压侧对地电容等; R_g 为接地过渡电阻; $U_{\phi d}$ 为故障点电压,由式

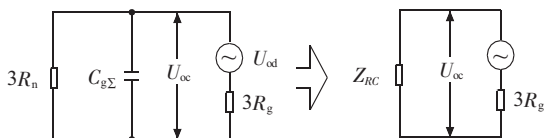


图 1 定子绕组单相接地等效

(1) 计算:

$$U_{od} = \alpha U_{ph} \quad (1)$$

式中: U_{ph} 为发电机相电压; α 为中性点至故障点匝数所占每相绕组总匝数的百分比。接地故障电流 I_0 为:

$$3I_0 = 3\alpha U_{ph} / \sqrt{(R_{RC} + 3R_g)^2 + X_{RC}^2} \quad (2)$$

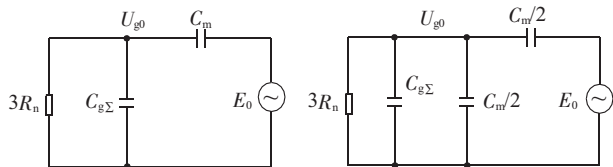
式中: R_{RC} 为 $Z_{RC} = 3R_n // (-jX_{Cg\Sigma})$ 的实部, X_{RC} 为 Z_{RC} 的虚部。

根据 DL/T 684—2012^[4], 300 MW 以上机组定子绕组单相接地故障电流允许值为 1 A。可算得当定子绕组金属性接地 ($R_g=0$) 故障且 $3I_0 \leq 1$ A 时, $\alpha \leq 0.174$, 即当定子绕组距中性点 17.4% 处发生金属性接地时, 故障电流将超过安全电流, 因此必须配备定子接地保护, 以较短延时动作于跳闸停机。

2.2 基波零序过电压保护整定计算

基波零序过电压保护设灵敏段和高定值段。灵敏段取中性点零序电压作为主判据, 同时受机端零序电压及主变高压侧零序电压闭锁, 动作值 $U_{op, sen}$ 按躲过正常运行时最大不平衡基波零序电压 $U_{unb, max}$ 整定。实测机组正常运行时 $U_{unb, max}$ 的值非常小 (0.2 V), 考虑到保护的可靠性, 根据文献[4], 灵敏段定值一般按 5%~10% U_{0n} 整定, U_{0n} 为机端金属性接地时中性点或机端的零序电压二次值。该工程 U_{0n} 为 110.7 V, 整定灵敏段定值为 7.5 V (对应一次值为 900 V)。

为防止区外故障时定子接地保护误动, 必须校验系统高压侧接地短路时, 通过升压变压器高低压侧绕组间耦合电容 C_m 传递到发电机的零序电压 U_{g0} 大小。传递电压计算用近似简化电路如图 2 所示。



(a) 主变高压侧中性点不接地时 (b) 主变高压侧中性点接地时

图 2 计算传递电压的近似简化电路

图中: E_0 为系统侧接地短路时产生的基波零序电动势, 一般可取^[4]:

$$E_0 \approx 0.6 U_{ln} / \sqrt{3} \quad (3)$$

C_m 的大小由变压器制造厂提供, 若未提供, 可用以下公式近似计算^[4]:

$$C_m = K_{M0} \times \sqrt{S_n} \times 10^{-4} \quad (4)$$

式中: S_n 为变压器额定容量; K_{M0} 与额定电压有关。当主变高压侧中性点不接地时, 传递到机端的零序电压 U_{g0} 最大为:

$$U_{g0} = E_0 \frac{3R_n // (-jX_{Cg\Sigma})}{3R_n // (-jX_{Cg\Sigma}) + (-jX_{cm})} \quad (5)$$

求得 U_{g0} 二次幅值为 13.5 V > 7.5 V, 即 U_{g0} 可能引起基波零序过电压保护误动作。同理可计算当主变高压侧中性点接地时, U_{g0} 最大为 6.7 V < 7.5 V, 不会引起误动作。

定值上无法躲过主变高压侧接地故障时, 高低压侧绕组耦合电容传递到发电机的零序电压, 若要求基波零序过电压保护以较短延时动作, 必须采取防止误动的措施。该工程采用主变高压侧零序电压闭锁措施, 即当主变高压侧零序电压大于定值时, 闭锁基波零序过电压灵敏段。闭锁电压定值 $U_{0, Lock}$ 整定如下。

由图 2 等效电路, 计算出当高压侧故障, 耦合到机端的零序电压为 $U_{op, sen}$ 时, 对应的高压侧零序电压 $U_{0, H}$, 再根据高压侧 TV 变比求出零序电压二次值 $U_{0, Hs}$ 。整定为:

$$U_{0, Lock} = K_{rel} \times U_{0, Hs} \quad (6)$$

式中: K_{rel} 为可靠系数。当主变高压侧中性点不接地或直接接地方式时, U_{Hs} 分别为 93 V, 193 V, 取两者最小值, 考虑可靠系数 0.7, 最后整定高压侧零序电压闭锁定值为 60 V。

PCS-985B 基波零序电压定子接地保护灵敏段动作于跳闸时, 还需经机端零序电压闭锁, 闭锁定值不需整定, 保护装置根据系统参数中机端、中性点 TV 的变比自动转换。零序电压高定值段只取中性点零序电压作为判据, 定值上躲过主变高压侧接地故障时传递到机端的零序电压最大值可整定为 15%~25% U_{0n} , 该工程对应为 17~27 V, 最终整定为 25 V。

发电机定子接地保护是主保护, 由于基波零序过电压保护灵敏段采取了高压侧零序电压闭锁措施来防止传递过电压误动, 故在时间上可整定较短延时。根据文献[4], 动作延时一般取 0.3~1 s。该工程灵敏段和高定值段动作延时都整定为 0.5 s, 动作于停机。

2.3 保护范围及灵敏度校验

灵敏段最大保护范围为:

$$\alpha_{min, sen} = U_{op, sen} / U_{0n} \quad (7)$$

该工程 $\alpha_{min, sen}$ 为 0.068, 即接触电阻为零时, 灵敏段最大可保护机端往中性点方向 93.2% 定子绕组的接地故障。同理, 可算得高定值段最大保护范围 $\alpha_{min, hi}$ 为 0.226。设保护动作可靠系数为:

$$K_{rel} = U_{oc} / U_{op} \quad (8)$$

式中: U_{oc} 为故障时机组施加给保护的测量零序电压;

U_{op} 为基波零序电压保护的整定值。由等效图及式(2)可得:

$$U_{oc} = I_0 Z_{RC} = \frac{\alpha U_{ph} Z_{RC}}{3R_g + Z_{RC}} \quad (9)$$

其幅值为:

$$U_{oc.M} = \frac{\alpha U_{ph} Z_{RC.M}}{\sqrt{(3R_g + R_{RC})^2 + X_{RC}^2}} = K_{rel} U_{op} \quad (10)$$

则接地过渡电阻为:

$$R_g = [\sqrt{(\alpha U_{ph} Z_{RC.M} / K_{rel} U_{op})^2 - X_{RC}^2} - R_{RC}] / 3 \quad (11)$$

式中: $Z_{RC.M}$ 为 Z_{RC} 幅值。若 K_{rel} 取 1.1, 当 α 为 0.174, 即接地电流为最大安全电流时, 由式(11)可算出灵敏段动作最大过渡电阻(即灵敏段最小灵敏度^[5]) $R_{gsen.min}$ 为 3.6 k Ω 。同理, 当发电机机端接地故障(α 为 1)时, 灵敏段动作最大过渡电阻(即灵敏段最大灵敏度) $R_{gsen.max}$ 为 29.4 k Ω ; 高定值段最大灵敏度 $R_{ghi.max}$ 为 7.6 k Ω 。可见, 该工程整定后的基波零序电压定子接地保护最大保护范围超过 93% 定子绕组, 且当发电机发生超过安全电流的接地故障时, 有较高灵敏度。

3 三次谐波电压定子接地保护整定

3.1 保护原理及判据

如果把发电机对地电容等效地看作集中在发电机的中性点和机端, 且每相的电容大小都是 $C_g/2$, 并将发电机机端引出线、升压变压器、厂用变压器以及电压互感器等设备的每相对地电容 C_w 也等效在机端, 并设三次谐波电动势为 E_3 , 其等效电路如图 3 所示^[6]。

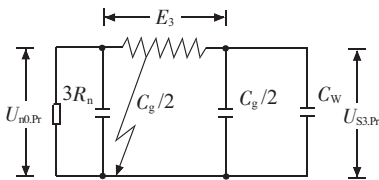


图 3 发电机三次谐波电压分布等效电路

发电机正常运行时, 机端中性点三次谐波电压(二次值)比为:

$$\left| \frac{U_{S3}}{U_{n3}} \right| = \left| \frac{3U_{S3.Pr} \cdot \frac{n_n}{n_s}}{U_{n3.Pr}} \right| = \frac{3 \times [(1/3R_n)^2 + (3\omega \times C_g/2)^2]^{1/2}}{3\omega(C_g/2 + C_w)} \cdot \frac{n_n}{n_s} \quad (12)$$

当在距发电机中性点 a 处接地故障时, 该比为:

$$\left| \frac{U_{S3}}{U_{n3}} \right| = 3 \times \frac{(1-\alpha)E_3}{\alpha E_3} \cdot \frac{n_n}{n_s} = \frac{3(1-\alpha)}{\alpha} \cdot \frac{n_n}{n_s} \quad (13)$$

式中: $U_{S3.Pr}$, U_{S3} 分别为机端三次谐波电压一、二次值; $U_{n3.Pr}$, U_{n3} 分别为中性点三次谐波电压一、二次值; n_s , n_n 分别为机端和中性点 TV 变比; R_n 为中性点接地电

阻。正常运行时, 机端中性点三次谐波电压比与发电机两侧 TV 变比、中性点接地电阻、发电机及机端连接设备对地电容有关, 是一个相对恒定的值; 当中性点附近绕组发生金属性接地故障时, 该比值将只与接地点位置有关, 故障点越靠近中性点, 比值越大。三次谐波保护就是利用故障前后机端中性点三次谐波的这种变化规律构成的 100% 定子接地保护。

PCS-985B 装置提供了 2 种方案的三次谐波定子接地保护, 原理如下:

$$\left| \frac{U_{S3}}{U_{n3}} \right| > K_{3wzd} \quad (14)$$

$$\left| \dot{U}_{n3} - \dot{k}_t \times \dot{U}_{S3} \right| > K_{re} \times U_{n3} \quad (15)$$

式(14)为三次谐波比率判据, K_{3wzd} 为三次谐波电压比整定值。式(15)为三次谐波电压差动判据, $\dot{k}_t$ 为自动跟踪调整系数向量, 正常运行时由软件计算得到, 修正后的机端中性点三次谐波电压相等, 方程的左侧即动作量接近 0, 从而在接地故障时获得最大的相对变化量; K_{re} 为三次谐波制动系数定值, 其取值只取决于计算误差, 可以很小, 从而大大提高灵敏度。

3.2 保护整定

将参数代入式(12)可算得正常运行时发电机端中性点三次谐波电压比为 0.615。开机时实测三次谐波电压比并网前最大为 0.608, 并网后最大为 0.599, 与计算值基本相符。由于发电机出口无断路器, 并网前后三次谐波电压比变化不大。

三次谐波比率判据的定值 K_{3wzd} 按正常运行时机端中性点最大三次谐波比整定, 考虑可靠系数 1.2~2.0, 最后整定并网前后 K_{3wzd} 都为 1.0。三次谐波电压差动判据的 K_{re} 值按厂家推荐取经验值 0.3。根据文献[4], 三次谐波电压定子接地保护一般延时动作于信号, 该工程整定延时 3 s, 出口动作于信号。

由式(13), K_{3wzd} 为 1.0 时, 三次谐波比率定子接地保护的最大保护范围为 0.61, 即中性点往机端方向 61% 的绕组, 能满足可靠保护中性点附近 25% 绕组的要求。三次谐波差动定子接地保护理论上可实现全绕组接地保护, 保护范围达 100%, 且灵敏度更高。

4 结束语

定子接地保护是发电机的重要保护之一, 工程上合理配置和整定定子接地保护, 对确保发电机组安全稳定运行有非常重要的意义。从工作实际出发, 详细阐述了基于南瑞继保 PCS-985B 装置的 100% 定子接地保护的配置、整定和实现。通过理论计算、实测数据以及现场经验相结合的方法, 重点阐明了定子接地保护

(下转第 41 页)

智能继电保护测试仪程序在线升级技术研究

王治国, 于 哲, 王言国, 周 强, 李兴建, 沈全荣

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 2111024)

摘 要: 简要分析智能保护测试装置的特点, 提出了一种通用的保护测试装置智能板卡程序在线升级解决方案, 并详细介绍了设计思路。该方案采用升级程序和应用程序完全分离机制, 通过网络及装置内部数据总线传输程序数据, 实现程序的在线升级。该方法简单易行, 通用性强, 已在实际工程中得到应用。

关键词: 智能保护; 测试装置; 数据总线; 在线升级

中图分类号: TM774

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)01-0038-04

智能继电保护装置是保证智能电网安全稳定运行的重要设备之一, 有效测试智能电网继电保护装置的各项性能指标, 保证产品质量是其首要功能。智能保护测试装置一般有许多智能板卡组成^[1]: 主控 CPU 板卡、模拟量输出板卡、数字量输出板卡、开关量输出板卡、开关量输入板卡、对时板卡等, 这些板卡可以输出各种模拟量信号、数字量信号及开关量信号, 并能接收各种硬接点信号, 用于完成各种智能保护装置保护逻辑功能测试和接点动作监测, 通过内部数据总线连接, 与主控 CPU 板卡进行数据交换。如要升级测试装置智能板卡程序, 需拔掉板卡, 通过仿真器进行程序下载, 工作繁琐, 且不利于现场操作。因此, 研究一种简洁、高效、低成本的嵌入式程序在线升级方法与技术具有重要的实际意义^[2-4]。结合智能电网保护测试装置实际情况, 给出了基于各智能板卡采用 ARM 公司处理器芯片作为主控制器的一种程序在线更新方案。该方案由客户端下载程序、主控 CPU 程序之数据传输子程序、智能板卡升级程序、智能板卡应用程序之跳转子程序构成, 4 个子程序分工协助, 共同完成板卡程序的在线升级任务。该方案充分利用装置内部数据总线来传输程序升级数据, 对智能板卡升级程序和应用程序采用完全分离机制, 更有利于应用程序开发, 且具有较强的通用性, 已在智能电网保护测试装置中应用, 并取得了良好效果。

1 BOOT 升级程序设计

1.1 在线应用编程(IAP)技术

要实现应用程序的更新, 需要对 flash 进行编程, 首先擦除原程序, 再将新程序烧写进去。LPC2119 固化在 flash 中的 BOOT 装载程序提供了 2 种 flash 编程接口, 一种是通过串口进行在系统编程(ISP), 另一种是通过 IAP, 其中 BOOT 装载程序所在的扇区不允许被擦除。由于 IAP 技术实现起来简单灵活, 可通过

网络进行远端升级和维护, 故系统使用 IAP 接口。

LPC2119 是基于 ARM7 内核、带 IAP 功能的微控制器, 内部有 128 kB 的 Flash 和 16kB 的随机存取存储器(RAM)。flash 存储器分为 0#~15# 共计 16 个扇区, 每个扇区有 8 kB 的存储空间。其中, 0#~14# 扇区共有 120 kB 存储空间, 可用于放置嵌入式用户程序或非易失性数据; 15# 扇区称为引导块(BOOT Block), 存放芯片出厂时的固化程序, 包括芯片上电复位引导程序、ISP 服务程序和 IAP 服务程序等, 分别用于完成芯片的复位引导、ISP 和 IAP 等功能。RAM 中仅有少量的字节预留给 ISP 和 IAP 等功能使用^[5]。

IAP 功能是通过调用固化在 BOOT Block 区域中的 IAP 服务实现的。根据功能函数传递给 IAP 服务的不同命令代码和参数, 可实现各种 IAP 功能: 如选择编程扇区, 将 RAM 内容复制到 Flash 扇区, 擦除扇区, 扇区查空, 内容比较等服务。

1.2 IAP 功能实现

(1) 定义 IAP 时钟, 这个是关键。

```
#define IAP_FCCLK 10000;
```

(2) 定义 IAP 入口地址。

```
#define IAP_ENTER_ADR 0x7FFFFFFF1;
```

(3) 定义 IAP 函数指针。

```
void (*IAP_Entry)(UINT32 IN[], UINT32 OUT[]);
```

(4) 定义 IAP 入口参数和出口参数缓冲区。

```
UINT32 para_in[8], para_out[8];
```

(5) 初始化 IAP 函数指针。

```
IAP_Entry=(void(*)())IAP_ENTER_ADR;
```

通过以上定义, 就可以调用固化在芯片中的 IAP 服务(一般用到选择扇区、擦除扇区、写入扇区、比较扇区 4 项服务), 从而对 Flash 进行擦除和编程写入。LPC2119 微处理器芯片的 IAP 服务支持一次性写入 256BYTE、512BYTE、1024BYTE、4096BYTE, 考虑到该芯片的内部空间, 文中选择在接收 512 字节后, 一次性将 512 字节写入 Flash, 如图 1 所示。

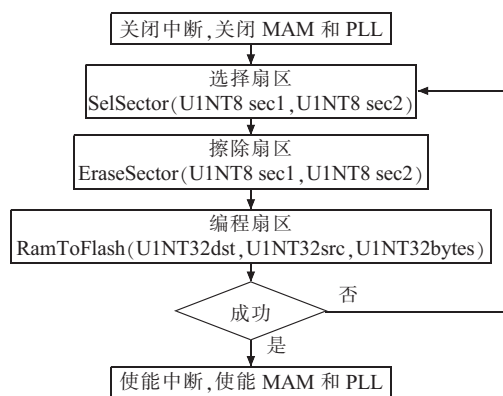


图1 IAP 程序操作示意图

1.3 ARM 存储空间配置设计

采用升级程序和应用程序完全分离机制,存储空间划分必须保证升级程序不能被升级过程改变。因此,升级程序和应用程序须存放在固定的位置,空间独立不能交叉。因此对 LPC2119 内置 Flash 和 RAM 空间的合理配置是实现 IAP 升级的关键之一。而 IAP 操作又是以扇区为单位进行的,必须熟悉 Flash 空间的扇区分布,同时对扇区进行功能划分。

根据升级程序和应用程序的运行需要,将 LPC2119 内置 Flash 空间划分为 3 个功能区:扇区 0-1 为升级程序存放区;扇区 2-14 作为应用程序区;扇区 15 为 BOOT Block。相应地将内置 RAM 分为 3 个区,应用程序使用区(0x4000 0000-0x4000 2FFE);BOOT 升级程序使用区(0x4000 3000-0x4000 3FDF);IAP 作用区(0x4000 3FE0-0x4000 4000)。

ARM Linker 采用 Scattered 链接方式,生成复杂的 ELF 格式的映像文件,实现 BOOT 程序和应用程序的精确定位。由于 IAP 功能会用到 RAM 空间顶部的 32 字节,因此需在启动代码 Startup.s 文件中的 InitStack 函数中调整各个模式的堆栈空间位置。根据存储空间划分进行.scf 文件配置,如图 2 所示。

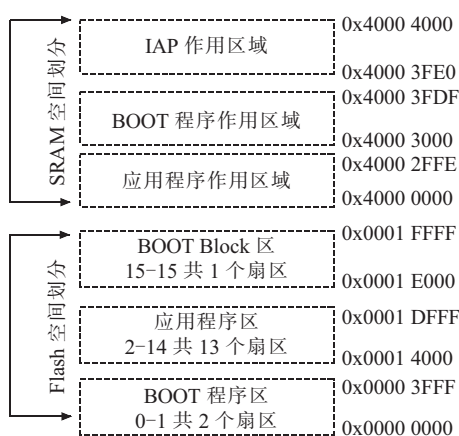


图2 片内 Flash 和 SRAM 空间分配图

1.4 板卡程序设计

智能保护测试装置上电,组成智能保护测试装置

的各个智能板卡首先执行 Boot Block 中的引导程序,对微处理器进行初始化,如初始化控制器局域网络(CAN)、定时器等。读取 Flash 应用程序数据区域(扇区 2-扇区 14),计算校验和,并判断应用程序数据是否完整,如果应用程序数据完整,则执行跳转程序,跳转到 0x0000 4000 处,运行应用程序,否则执行升级功能程序,并向保护测试装置 CPU 板卡发送报警指令,提示该板卡运行在升级程序状态,提醒下载应用程序。

首先升级程序通过测试装置内部 CAN 总线接收 CPU 板传来的程序升级数据,并将数据编程写入指定 flash 空间,最后对该空间内的应用程序数据进行完整性校验。完整性校验这种机制可以有效防止在程序升级过程中装置突然掉电,程序下载过程中出现误码所导致的下载失败从而不能再次升级程序的问题。升级程序所在区域不可擦除,通过仿真器一次性编程写入,应用程序虽然下载失败,但程序完整性校验不能通过,也就不会跳转运行应用程序,而只能停留在升级程序循环接收 CAN 总线数据阶段,直到程序下载成功,校验通过,才运行应用程序。执行程序完整性校验的一个关键技术点是编程实现对应用程序 bin 文件格式的数据校验,并在程序最后添加 2 个字节的校验和,从而实现对应用程序的完整性校验。

定义应用程序所占用 Flash 空间的地址变量, F_P_S 为开始地址, F_P_E 为结束地址,应用程序完整性校验如下:

Uint8 CheckFlashAppCRC(void)

```

{
    unsigned short *ptr, crc_result=0;
    unsigned long i, len;
    ptr=(unsigned short*)F_P_S;
    len=(F_P_E-F_P_S)>>1
    for( i=0; i<len; i++)
        crc_result += *(ptr++);
    return (crc_result? 1:0);
}
  
```

p 为指向板卡程序的指针, len 为板卡程序字节长度, bin 程序文件校验代码如下:

u_short MakeSoftCRC(u_char *p, int len)

```

{
    int num=0, i;
    u_short crcval=0, crc;
    pData=( u_short* )p;
    for( i=0; i< len/2; i++) {
        crc=*(pData++);
        crcval+=crc;
        if(i==size-1) {
  
```

```

num=(F_P_E-F_P_S)/2-size-1;
while(num>0){
    crcval+=0xFFFF;
    num--;
} break;
}
}
return (u_short)(0-crcval);
}

```

通过 IAP 功能编程 flash 后,一个重要步骤是在装置不断电的情况下实现程序的跳转:即从升级程序跳转到应用程序运行。当智能保护测试装置各板卡运行在应用程序时,收到程序升级命令需要从应用程序跳转到升级程序,从而完成对应用程序的在线升级。而当智能板卡运行升级程序时,收到升级命令向客户端回答帧,即可升级程序。定义如下程序跳转函数:

```
#define JumpFlash(addr)((void(*)())(addr))
```

在运行升级功能的程序时,addr 指向应用程序开始地址 (0x0000 4000);而在应用程序中 addr 需要指向升级功能的程序存放地址 (0x0000 0000)。应用程序和升级程序通过该跳转函数进行跳转,并执行相应的函数功能。

2 下载客户端程序设计

通过对智能电网保护测试装置各板卡程序升级的需求分析,客户端需满足以下功能:(1) 对不同数量和不同插槽位置上的板卡进行灵活升级;(2) 对整个装置智能板卡进行程序升级;(3) 为实现一次性下载,需对各种智能板卡程序进行打包及解包操作,数据组包如图 3 所示。根据板卡类型选入程序到发送缓冲区。因升级程序是根据板卡的 CAN ID 号来进行询问升级,所以无论客户端程序还是智能板卡的升级程序及应用程序都应具有板卡类型识别功能,同种类型的板卡下载同一种程序。程序下载流程如图 4 所示。

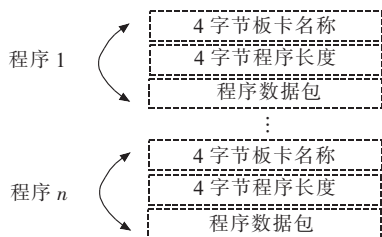


图 3 程序数据包

客户端采用 VC++ 进行代码编写。客户端首先完成 bin 或 hex 文件解析并将程序数据下载给保护测试装置主控 CPU,再由该板卡将数据通过内部总线传送给各个 ARM 智能板卡子 CPU。客户端通过网络连接智能测试装置,召唤智能保护测试装置所有板卡的程

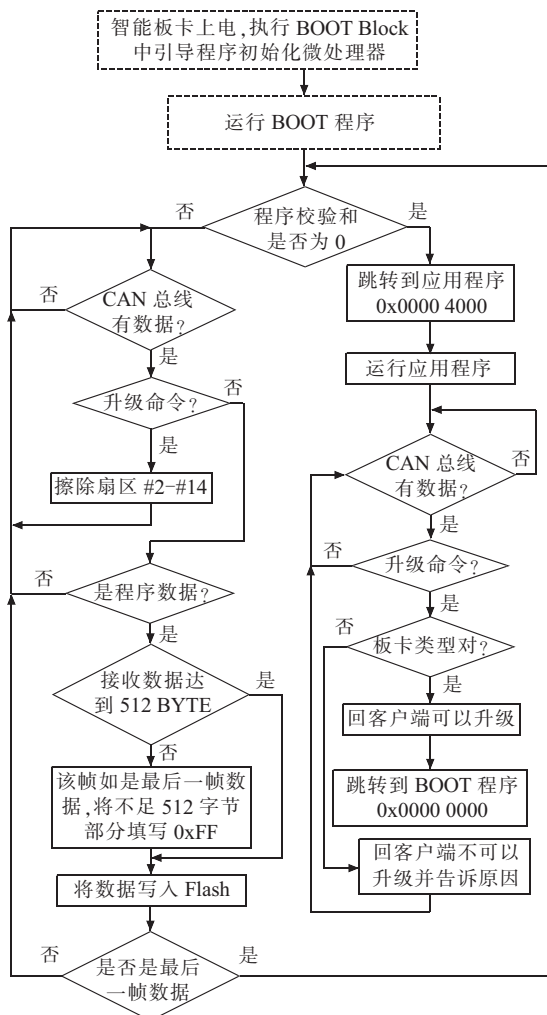


图 4 升级程序流程

序版本,通过校验各板卡程序版本与程序数据包中程序版本及程序编译时间,自动给出程序在线升级提醒;对所有智能板卡程序按照图 3 格式进行打包和解包,对选择的板卡类型及 CAN ID 进行保存,根据板卡类型从程序数据包中选择程序和 CAN ID 进行程序询问式升级。

客户端通过用户数据包协议 (UDP)/传输控制协议(TCP)报文与智能保护测试装置智能插件通信。中间需要借助智能保护测试装置 CPU 板进行通信中转。上层:客户端通过 TCP 报文与智能保护测试装置 CPU 板卡进行通信,底层:保护测试装置 CPU 板卡通过 CAN 总线与各智能板卡 CPU 进行数据通信。客户端软件首先根据测试装置的 IP 地址建立 Socket 连接,再从 CAN ID 地址列表中选择第一个板卡属性向测试装置发送程序下载升级命令,智能板卡收到升级命令,跳转到 BOOT 升级程序运行并向客户端发送许可命令,从而完成智能保护测试装置智能板卡程序的灵活在线升级,详见图 4。

3 结束语

产品的自由在线升级功能是产品成熟度的一个重

要标志,灵活的产品在线升级功能不仅为用户提供极大的方便,而且减少了现场维护时间和维护费用。文中结合智能电网保护测试装置的特点,提出了基于网络与内部总线的程序在线升级解决方案,不增加任何硬件成本,仅通过软件架构即可实现该功能,具有一定的通用性和一定的推广使用价值。该程序在线升级方案已在智能电网保护测试装置上实现,结果证明,该方法简单可靠,使用方便、快捷。

参考文献:

- [1] 王治国,李兴建,王言国. 基于统一建模的继电保护测试装置开发研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(19):180-181.
- [2] 孟志强,朱良焱,石瑜. 基于 IAP 和 USB 技术的嵌入式程序升级方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2009,36(6):41-42.
- [3] 李忠安,沈全荣,王言国,等. 电力系统智能装置自动化测试系统的设计[J]. 电力系统自动化,2009,33(8):77-80.
- [4] 胡红兵,李丽君,韩民畴. 继电保护装置自动化测试系统的设

计与实现[J]. 江苏电机工程,2013,32(2):54-56.

- [5] Philips Semiconductors LPC2119/2129/2194/2292/2294US-ER-MANUAL [C/OL]. [2004].<http://www.semiconductors.philips.com>.

作者简介:

王治国(1978),男,河南周口人,工程师,从事电力系统继电保护及自动化测试工作;

于哲(1979),男,山西运城人,工程师,从事电力系统继电保护及自动化测试工作;

王言国(1977),男,江苏徐州人,系统分析师,从事软件工程师;

周强(1979),男,湖北武穴人,工程师,从事电力系统控制保护平台软件开发工作;

李兴建(1977),男,山东潍坊人,高级工程师,从事电力系统继电保护仿真测试工作;

沈全荣(1965)男,江苏吴江人,研究员级高级工程师,从事电力系统继电保护研究、开发和管理工作的。

Research on Online Upgrade Technology of Smart Relay Tester Program

WANG Zhiguo, YU Zhe, WANG Yanguo, ZHOU Qiang, LI Xingjian, SHEN Quanrong

(Nanjing NARI-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: A brief analysis of the characteristics of Smart Protection Tester is presented. Based on the analysis, a general online upgrade solution for protection device smart card program is proposed and designing details of the program is described. The scheme adopts the mechanism of that the upgrade program and application program are completely separated. Through internal data bus and device network, online upgrading is realized. The proposed method is easy to be implemented, and has been applied into practical engineering projects.

Key words: intelligent protection; testing device; data bus; online upgrade

(上接第 37 页)

整定中的保护范围、灵敏度、可靠性等问题,为工程应用提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 梁少华,申建彬,张杰,等. 发电机注入式定子接地保护方案改造及现场应用[J]. 江苏电机工程,2013,32(1):34-36.
- [2] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2005:219-224.
- [3] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京:中国电力出版社,1996:131-133,134-137.
- [4] 电力行业继电保护标准化技术委员会. DL/T 684-2012 大型发

电机变压器继电保护整定计算导则[S].

- [5] 张长彦,原爱芳,杨兆阳,等. 发电机定子绕组接地保护整定原则[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(17):65-70.

- [6] 焦斌,周平. 大型发电机三次谐波定子接地保护的探讨[J]. 电力建设,2010,31(2):101-105.

作者简介:

张伟伟(1983),男,江苏南通人,工程师,从事电气检修工作;

徐静(1985),女,江苏南通人,助理工程师,从事电气检修工作;

张婷昉(1985),女,江苏无锡人,助理工程师,从事电气检修工作。

Application and Setting of Stator Ground Fault Protection Based on PCS-985B

ZHANG Weiwei, XU Jing, ZHANG Tingfang

(Huaneng Nantong Power Plant, Nantong 226003, China)

Abstract: The configuration program and setting calculation of the 100% stator ground fault protection based on the NARI PCS-985B equipment are introduced by taking the reform project of generator-transformer-unit protection as an example, and the field testing data validates the correctness of setting calculation. Besides this, the problem of mismatching between the zero-sequence voltage interface of PCS-985B equipment and field device is discussed, and reasonable solution to the problem is provided.

Key words: stator ground fault; setting calculation; zero-sequence voltage; three harmonic voltage

便携式保护在智能电网设备投运中的应用

姚亮, 陈琦, 邹磊

(国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京, 211100)

摘要:变电站设备投运工作操作复杂、耗时较长,为此研制一种能够适用于传统变电站和智能变电站的新一代便携式保护装置。其与原来设备投运工作中的临时保护比较,具有更可靠、更方便、更经济的特点。该便携式保护在设备投运中的应用表明,减少了投运环节,降低了二次设备风险,提高了工作效率,保证了电网可靠性。

关键词:电网设备投运;便携式保护;航空插座;智能变电站

中图分类号: TM773

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)01-0042-03

随着电力系统的发展,现代电网的规模不断扩大,新建、扩建、改造、检修工作日益增多,而且传统变电站与智能变电站在较长的一段时期内会大量共存,同一座变电站内传统设备与智能设备也会在一段时期内同时在网运行,因此设备的改造投运工作日趋繁重。设备投运涉及设备验收、稳定校核、保护整定、方案编制、调度操作、现场作业等诸多环节,是一项复杂的电力工作,需要计划、调度、变电检修工区、超高压工区等多部门专业人员互相协作,密切配合。电网日趋坚强,分层分区工作进一步深入,社会对电网供电可靠性要求也不断提高,现在的设备投运方案暴露出操作工作量大、风险高造成电网运行风险大、供电可靠性及效率低等问题,给电网的安全稳定运行带来极大隐患。为提高电网运行的效益、保障供电可靠、减少投运工作负担,亟需对电网设备投运方案进行风险评估分析,研究、制定改进措施,并建立全过程、全方位的电网安全预控体系^[1-4]。

1 便携式保护的研制

1.1 临时保护在投运中的应用现状

设备投运一般都需要进行冲击合闸、核相、二次定相、保护相量检查等工作。投运的继电保护装置,要带负荷对其接线正确性进行检测。以往变电站在设备投运时,校验保护或通过电流继电器和时间继电器组成的临时保护装置,如图1所示,或借用母联(分段)保护装置或者线路保护装置客串保护装置。其是一种非常简单的反应相间和接地故障的过电流保护^[5,6],但目前国内尚未有专业的临时保护装置,因此现场只能采用一些替代方案,亟需性能更加完善的,具有完整自检、自测、自校的便携式继电保护装置。

1.2 新式便携式保护的技术特点

基于可靠、安全、便捷的要求,为满足在不同变电站之间频繁移动使用,便携式保护采用了面向用户、

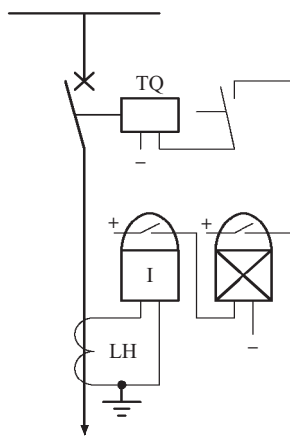


图1 电流和时间继电器的临时保护装置

应用及产品的嵌入式平台技术,符合 DL/T478—2013 要求^[7];机箱采用全封闭一次成型、背插式结构,具有较高的抗振动、粉尘和电磁干扰能力。箱体仅为 215 mm(宽)×210 mm(高)×280 mm(深),面板将保护控制操作区域和外设接口区域分开。

可开启的透明面罩内的部分为保护控制显示及操作区域,由键盘、指示灯、液晶显示屏、压板、复归按钮组成。元器件合理的布局和面板的数控精密加工使该部分模块显得和谐、稳重,易于操作与观察,体现电力设备的可靠特质。同时透明面罩可防止无关人员误操作。而装置左侧的部分为外设接口区域,平时由一扇可开启的活动门防护,内置开关、航空插座、光纤接口。使用时将活动门打开,即可进行相应的操作。将功能区域进行明确划分既便于日常工作中的观察和使用,又可防止误操作,达到了美观和功能性的统一。装置满足 GB 4208—2008 标准^[8],设有防护面板,无外露端子,由于安全防护措施到位,可以长期安全运行,已申请外观图形专利并公开(申请号 200930043076.2,公开号 CN301161630)。

便携式保护适用更宽的直流电压范围 88~253 V。为同时能满足传统变电站和智能变电站的应用需求,交流采样既能支持传统的模拟量采集,其中传统采样

自适应 CT 二次额定电流为 1 A 或 5 A 的工况,装置亦可以接收来自合并单元输出 DL/T 860.92 (IEC 61850-9-2) 或 GB/T 20840.8 (IEC 60044-8) 格式的采样值(SV)^[9-12]。而跳闸方式既能支持传统接点方式输出,也可以支持通过 GOOSE 报文方式输出跳闸信号,装置动作时同时输出跳闸动作接点和跳闸 GOOSE 报文,如图 2 所示。SV 采样及 GOOSE 服务在保护 CPU 中实现,通过装置通信光纤接口实现与其他设备进行通信。便携式保护主要由采样模块、CPU 模块、I/O 模块和人机交互模块组成,保证该保护能在不同电压等级、不同运行环境的变电站内均可靠、友好、通用的运行,已经申请实用新型专利并公开(申请号 201220604387.8,公开号 CN202997531U)。

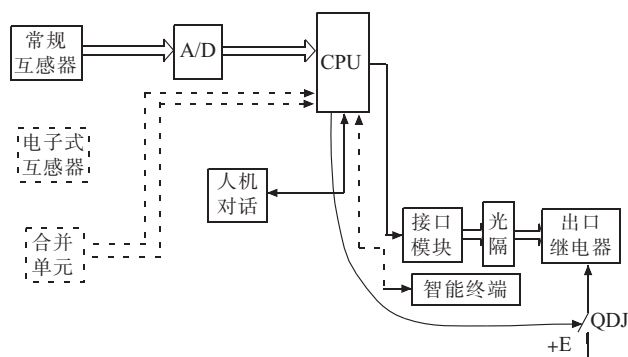


图 2 便携式保护模块配置

1.3 便携式保护与其他临时保护的对比

便携式保护与临时搭接保护和母联(分段)或线路保护客串保护的比较如表 1 所示。

由此可见,临时搭接的保护和其他保护客串的保护由于其自身原因,与专用的便携式保护比较,在经济性、安全性、可用性等方面有诸多不足。

2 便携式保护在投运工程中的应用

2.1 便携式保护的回路接入

便携式保护装置一般按单套配置,220 kV 间隔接于第二套保护屏,不启动失灵;500 kV 间隔接于断路器保护,启动失灵。若系统配置 2 套便携式保护装置,则分别接入对应的保护屏中,保护跳闸接点接入断路器对应的一组跳闸线圈。220 kV 旁路间隔单套配置便携式保护装置时,保护跳闸接点分别接入断路器的两组跳闸线圈。电缆接线时断开电流试验端子排 1D1、1D3、1D5 的试验连接片,回路按图 3 所示连接装置。

当 SV 采样和 GOOSE 跳闸时,只需要对应接入装置的光纤端口,装置根据配置的相关地址信息接收合并单元的 SV 报文和发送 GOOSE 报文至智能终端^[13-15]。

2.2 便携式保护在设备投运中的操作流程

变电站设备投运时,传统方案采用空出一条母线的方法,一次设备的倒闸操作较复杂,系统运行方式薄

表 1 装置性能对比

对比项目	便携式保护	临时搭接保护	其他客串保护
保护性能	动作性能较好	保护动作快速性较差,动作值的离散值较大,不具备故障记录功能	动作性能较好
定值范围	大	小	大
通用性	能同时满足电源电压 110 V 或 220 V	不能同时满足电源电压 110 V 或 220 V	不能同时满足电源电压 110 V 或 220 V
电流	能同时满足额定电流 1 A 或 5 A	不能同时满足额定电流 1 A 或 5 A	不能同时满足额定电流 1 A 或 5 A
改造成本	低	较低	一般
安装调试	设备少,接线简单,摆放位置灵活;调试方便,整定简单	设备较多,安装需要专用平台,接线复杂;调试难度较大,要求较高的专业技术水平	设备较少,接线难度一般,设备摆放位置不灵活;调试较为方便,难度较小,但由于仅采用部分功能,整定繁琐,容易出错
可靠性	可靠性高	运行稳定较差,设备容易损坏	稳定性较高
操作性	压板设置规范,运行操作简便,无需继电保护专业人员配合	压板设置规范性较差,运行操作难度较大,需继电保护专业人员配合进行	压板设置规范性较差,运行操作难度较大,需继电保护专业人员配合进行
安全性	可以在屏内放置,无需采取特殊的外设安全措施,设备故障能及时报警	不能在屏内放置,强调外设安全措施,设备故障不能报警,要求注意运行监视	不能在屏内放置,要采取外设安全措施,设备故障能及时报警,需设施安全运行监视及巡视

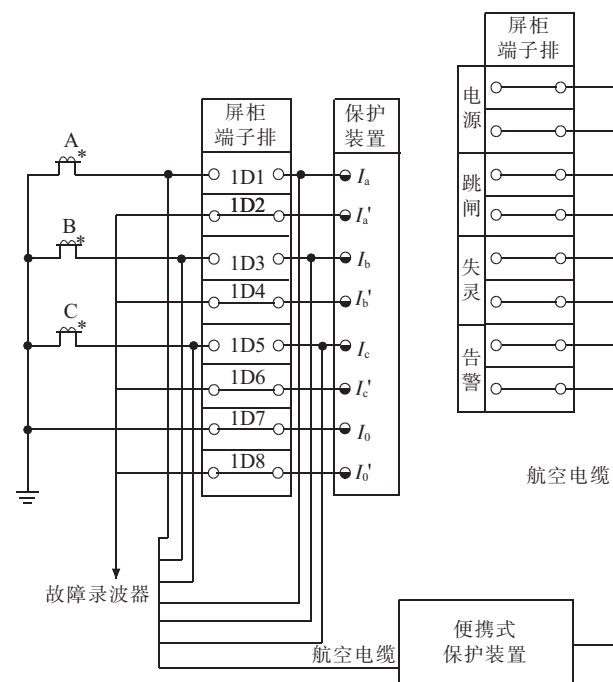


图 3 便携式保护电气接线

弱,启动时间长。启动方案必须充分考虑因系统运行方

式的调整而带来的不利影响,有时还需采取防全停措施直至临时限电,以防止产生不良后果。而在保护回路中加装便携式保护装置,可以减少运行一次设备操作的工作量,降低操作风险和系统运行风险,减少启动时间,提高供电的可靠性,确保电网的安全稳定运行。

(1) 经过检验合格后的便携式保护可以直接投入运行,不需要进行带负荷试验。

(2) 保护运行期间,不允许对便携式保护接线及其相关回路进行任何变动,应防止新设备保护带负荷试验工作影响保护的正常运行,防止保护失去电源、误退跳闸出口、失灵出口及电流回路开路或被短接等情况发生。

(3) 便携式保护为单套配置时,在设备冲击及保护带负荷试验期间,保护应始终处于投入运行状态。

(4) 单套配置的 220 kV 线路和 500 kV 主变 220 kV 开关临时保护在设备启动冲击前投入。设备保护带负荷试验时需先进行第一套设备保护的带负荷试验。所有试验正确结束,第一套设备保护投运后,再进行第二套保护带负荷试验工作,同时停用临时保护,此后临时保护不再投入使用。

(5) 双重化的便携式保护运行。保护装置带负荷试验采用逐套进行的方法,当第一套设备保护进行带负荷试验时,相应的第一套临时保护停用,第二套临时保护投入运行。第一套设备保护带负荷试验结束后,投入第一套保护,而第一套临时保护不再投入。随后停用第二套临时保护后进行第二套设备保护带负荷试验。第二套临时保护带负荷试验结束后,投入第二套设备保护,而第二套临时保护不再投入,并待启动试验项目结束后进行保护拆除。

2.3 便携式保护应用的经济分析

以双母线接线方式,配置 2 台主变、四回出线的典型 220 kV 变电站为例。采用传统启动方案时,启动前后方式的调整和恢复,变电站现场共有 300 项操作、耗时约 6 h,而新的启动方案仅需约 70 项操作、耗时 2 h,不仅提高了工作效率,也降低了设备投运的风险。

与传统的空出一条母线的投运方案相比较,新的设备投运方案无需进行母线倒排工作。由于运行方式的来回调整增加了投运时间,传统投运方案一般每个间隔的母线倒闸一次需要 1 h。以每年投运主变 8 台(750~1 000 MV·A),每台 500 kV 主变以平均负载为 300 MV·A,正式投运推迟 8 h 计算,则减少的供电量约为 240 万 kW·h,以 10 元/(kW·h)计,每次经济效益为 2 400 万元,则一年新增的经济效益为 1.92 亿元。

3 结束语

该便携式保护装置采用保护控制操作和外设接口

分区设计;既支持传统模拟量输入,自适应二次额定电流 1 A 和 5 A,也能接收 SV 报文;既能提供传统的开出接点,亦能输出 GOOSE 报文。同时装置能在 110 V 或 220 V 直流电源的正常工作,传统电气量连接采用航空端子,数字量通信提供 LC 和 ST 两种光纤接口方式,可靠、安全、便捷地满足不同运行环境的变电站内使用要求。便携式保护在电网设备投运中的应用遵循“安全性、适用性、通用性、经济性”协调统一原则,无需进行母线倒排工作,减少在投运启动时的运行方式调整,合理减少操作风险,防止启动时的保护死区,通过提升工作效率和提高电网管理水平,促进了安全生产,带来良好的社会效应和较好的经济效益。

参考文献:

- [1] 牟善科. 电网检修计划安排与优化系统的研究与实现[D]. 杭州:浙江大学,2007.
- [2] 蒋献伟,黄民翔,许诺,等. 供电设备检修计划优化[J]. 电力系统及其自动化学报,2007,19(4):116-120.
- [3] 颜伟,林烨,罗锡斌,等. 考虑负荷转移的检修计划安全校验优化方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(16):92-96.
- [4] 刘艳,刘国良,顾雪平. 输电网架恢复方案线路投运风险评估[J]. 电力系统自动化,2011,35(13):12-16.
- [5] 常风然,张洪,高艳萍. 新设备投运与继电保护运行方式[J]. 电力系统自动化,2003,27(21):89-91.
- [6] 秦江平. 关于电网新设备投运模式的探讨及建议[J]. 广西电力,2008,32(6):68-70.
- [7] DL/T 478—2013 继电保护和安全自动装置通用技术条件[S]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [8] GB 4208—2008 外壳防护等级(IP)代码[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [9] DL/T 860.92—2006,变电站通信网络和系统 第 9-2 部分:特定通信服务映射(SCSM)映射到 ISO/IEC 8802-3 的采样值[S].
- [10] IEC 61850-9-2, Communication Networks and Systems in Substations-Part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM)-Sampled Values over ISO/IEC 8802-3[S].
- [11] GB/T 20840.8—2007 互感器第 8 部分:电子式电流互感器[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [12] IEC 60044-8 Instrument Transformers-Part 8 Electronic Current Transformers[S].
- [13] 冯亚东,李彦,王松,等. IEC 61850-9-2 点对点采样值传输在继电保护中的实现与应用[J]. 电力系统自动化,2012,36(2):82-85.
- [14] 李铁成,张兵海,张立,等. 投运前继电保护向量检查技术在智能变电站的应用[J]. 河北电力技术,2012,31(4):1-2.
- [15] 周斌,仇新宏,黄国方,等. 基于 IEC 61588 和 GOOSE 的交互式采样值传输机制[J]. 电力系统自动化,2012,36(20):80-83.

作者简介:

姚亮(1979),男,江苏南京人,高级工程师,从事继电保护及辅助装置领域的研究与开发工作;

闭锁逻辑解析在电脑钥匙软件设计中的应用

任金华

(南京南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211102)

摘要:用电脑钥匙执行操作票是微机防误操作中最为核心和关键的部分,也是电脑钥匙软件设计的难点。通过对各种不同电气设备防误闭锁方法的研究梳理,解析出几个基本的闭锁和状态检测操作元素。以基本操作元素为基础,构建各种设备操作过程的逻辑描述表达式。采用结构程序设计的方法,按照表达式的逻辑要求进行软件设计,能够较好化简程序,满足五防电脑钥匙在操作票执行过程中对任何设备解闭锁操作方式的要求。

关键词:电脑钥匙;闭锁逻辑;防止误操作

中图分类号:TM344.1

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)01-0045-03

在电力系统微机五防装置中电脑钥匙是关键设备之一,起着承上启下作用,它接收来自五防后台的操作票,然后面对众多被闭锁的电气设备进行位置编码和状态识别以及解闭锁操作^[1]。由于设备的形式多样,需要闭锁的方式也有很大差异,不同的设备在同一步操作票中要进行解锁、闭锁、检验状态等操作的过程也不相同。组合操作类型繁多,需求变化较大。如果每种操作过程都分别控制,工作将会相当复杂繁琐,过程不易控制。通过对操作过程进行解析,得出以若干基本操作类型为基础的操作过程逻辑表达式。用这些逻辑表达式组建相应的数据结构进行结构程序设计,简化了程序设计,提高了软件的效率和灵活性。

1 电气设备类型及操作过程归纳

1.1 电气设备的主要类型

1.1.1 需要验电型

在对设备进行实际操作之前需要验电,确保设备不带电。类似的有网门、具有电动操作机构的地刀操作箱、线路地刀、接地桩等。验电实际又分4种类型:

- (1) 有源验有电通过;
- (2) 有源验无电通过;
- (3) 无源(无外部电源由电脑钥匙提供电源)验有电通过;
- (4) 无源验无电通过。验电可以识别设备是否带电。

1.1.2 需要验状态型

(1) 由电气锁内部检测出的设备电气节点分合状态;

(2) 由设备的机械状态检测出来的分合位状态。

1.1.3 允许一步操作票开多把锁操作的设备

(1) 网门:设备在一个带电区间内,该区间有多个网门可以出入,这种情况下对 N 个网门中任何一个都可以打开,可打开其中的一个或全部,没有先后顺序;

(2) 需分相操作的隔离刀闸或接地刀闸:分相操

作时三相先后顺序可以不分;

(3) 可电动或手动操作的刀闸:设备既可以电动操作也可以手动操作;可任取其中一种方式。

1.1.4 允许遥控的设备

在自动化程度比较高的变电站以及数字化站很多设备是可以遥控的,当设备无法遥控操作时就必须到现场进行手动或电动操作,因此在一步操作票执行时以及在执行的过程当中都有可能进行遥控操作,因此有必要给需要遥控操作设备类型进行归类,在条件具备的时候自动向主机发送当前的遥控操作步号,待主机操作完成收到操作成功的报文后电脑钥匙转入下步操作^[2]。

1.2 设备操作过程

任何复杂的操作都是由几个基本的操作单元组合而成,基本操作元素归纳如下:

(1) 由外部电源供电的有源验有电 Y 和有源验无电 $\bar{Y}$;

(2) 由电脑钥匙供电的无源验有电 X 和无源验无电 $\bar{X}$;

(3) 验设备机构分合位状态 U ;

(4) 开挂锁 G ;

(5) 开电气锁 J (或者遥控)。

操作方式都可以用5个基本集合元素 $\{G, J, U, X, Y\}$ 来表达。令 $\rightarrow$ 表示操作流程, $\|$: $\|$ 表示可重复的循环操作, $\{..+..+..\}$ 表示多个解闭锁节点的或操作,则根据操作闭锁逻辑^[3]典型的操作方式如表1。

根据各自的逻辑表达式可知所有的操作项目都可以用这几个元素的组合序列构成。为了表达的方便:

$$R = \{ \| : (J + \{ X \rightarrow \| : (G_1 + G_2 + \dots + G_n + J) : \| \rightarrow U \} : \| \} \} \quad (1)$$

操作过程解释为:(1) 是否是遥控操作,如果是可以直接向后台发出遥控请求完成所有设备的操作;(2) 如果是就地操作先验设备是否无电;否则不得操作;(3) 确认无电后可以在 n 把锁中任开一把并可重复直至 n 把锁全部操作完成;(4) 操作完成后验设备状态结束。

表 1 设备类型及其操作闭锁逻辑

类型	解锁闭锁流程	逻辑表达式
I	可遥控开检测状态挂锁当钥匙与主机相连时自动发出请求主机遥控命令	$I=(G \rightarrow U)+J$
Z	开挂锁并检测状态	$G \rightarrow U$
P	先有源验有电再开挂锁并检测状态	$Y \rightarrow G \rightarrow U$
Q	先有源验无电再开挂锁并检测状态	$\bar{Y} \rightarrow G \rightarrow U$
V	先开一把操作箱的挂锁,再开电气锁不带状态检测	$V=G_1 \rightarrow G_2$
S	操作带操作箱电动刀闸:先开一把操作箱的挂锁,再开电气锁带状态检测	$S=G_1 \rightarrow G_2 \rightarrow (Y)$ (Y):合操作验有电,分操作验无电
s	负验电带操作箱电动刀闸:先开一把操作箱的挂锁,再开电气锁带状态检测	$s=G_1 \rightarrow G_2 \rightarrow (\bar{Y})$ ($\bar{Y}$):合操作验无电,分操作验有电
M	验电网门:先验有电再逐一开锁网门打开网门	$M=Y \rightarrow W$
W	网门锁,允许重复操作	$W= :G_1+G_2 \cdots G_n $
E	高压分相操作地刀带分合位状态检测的网门锁,先操作除分合锁外的锁并可遥控,操作结束后状态码有就验状态最大开锁数量 24 个	$E=J+(W \rightarrow U)$
J	可遥控锁号或开电气锁并检验状态,锁号=1 时可确认通过	
K	可遥控或开电气锁不检状态	
N	可遥控或就地手动操作开挂锁	$N=J+G$
B	带验电装置的网门先验无电再逐一开锁网门打开网门	$B=Y \rightarrow W$
U	防止走空行程查验分合位状态通过	
R	可遥控操作,手动进行分相操作前先看有源验无电	$R=J+(\bar{Y} \rightarrow E \rightarrow W)$
r	进行分相操作前先看无源验无电	$r=\bar{X} \rightarrow E \rightarrow W$
$\bar{Y}$	有源验无电通过	
Y	有源验有电通过	
H	带状态检测的电气锁有源正验电	$H=G \rightarrow (Y)$
h	带状态检测的电气锁无源正验电	$h=G \rightarrow (X)$ (X):合操作验有电,分操作验无电
G	开挂锁	
$\bar{X}$	无源验无电通过	
X	无源验有电通过	
p	先无源验有电再开挂锁并检测状态	$p=X \rightarrow G \rightarrow U$
q	先无源验无电再开挂锁并检测状态	$q=\bar{X} \rightarrow G \rightarrow U$

根据表达式可以将复杂的操作方式描述成简单的操作方式的流程组合,采用流程控制的方法完成执行过程。

2 数据结构与软件设计

2.1 操作票步骤的数据结构

根据前述的描述方法,在执行操作票的时候,软件

流程设计通过流程与逻辑表达方式的分解得以简化,当获取操作票步骤的内容后,得知下述内容:(1) 操作属性,提示性还是有具体操作项;(2) 设备状态变化,合 $\rightarrow$ 分、分 $\rightarrow$ 合等;(3) 设备操作类型一个字符;(4) 设备对应锁号 1~23 个。

操作步骤的结构为:

{操作步骤长度:WORD

操作属性:BYTE

操作类型:BYTE

状态属性:BYTE

主锁号:DWORD

合锁号:DWORD

分锁号:DWORD

操作内容描述:字符串 112 字节

或锁个数 $n+n*2$ 个字节锁号 + 操作内容描述(长度=112-1- $n*2$) ($n \leq 20$)}

锁的编码是采用的非接触式 ID 编码,当电脑钥匙读出锁号时获取一个双字的唯一编码。为了减少扩展锁号占用过多的操作步骤描述空间,将存放于操作票步骤中的锁号由双字四字节改成单字两字节,只用锁号的低两个字节,在同一批编码中低两个字节同号的概率为 $1/2^{16}$,在用扩展锁码执行操作的时候将读取的锁号用低两个字节与其进行匹配。操作票执行软件流程如图 1 所示。

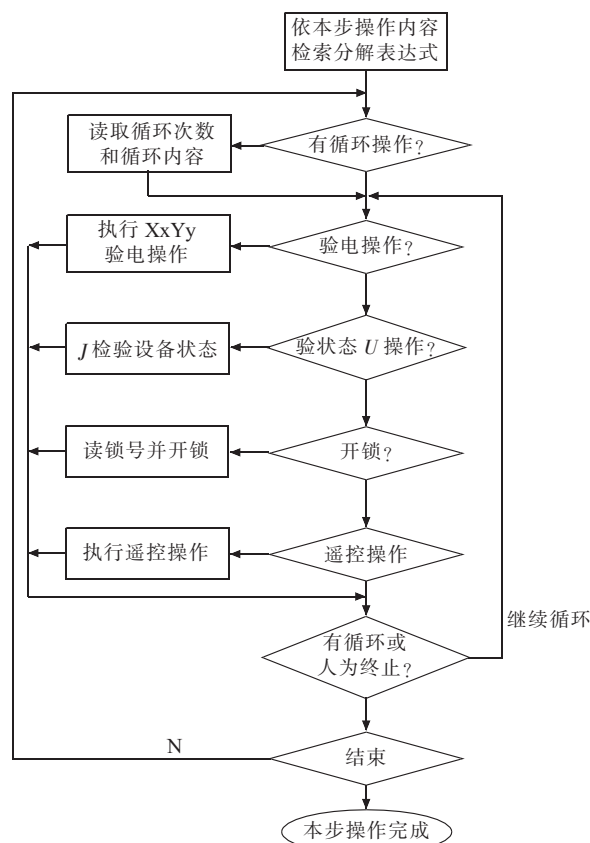


图 1 操作票执行软件流程

2.2 软件设计方法

通过前述方法的归纳总结,采用前述方法进行编程设计给电脑钥匙带来如下2个优点:

(1) 不需要对每种操作类型分别进行操作过程的跟踪与控制,只要把表达式用基本类型的操作和相应数据结构描述集合起来就可以统筹解决各类操作过程的控制如图1所示;

(2) 无需更改程序就能适应新的操作类型扩充。

把操作步骤的数据结构按照表1的类型和逻辑关系表达式构建各自的映射表作为顺序控制驱动时^[4],软件的编程思路更为清晰,并且具有通用性。以操作类型R为例,将构建出操作表项如表2所示。

表2 操作顺序控制

顺序	基本操作	操作属性	位置编码
1	遥控	允许	
2	验电	有(验无电)	主锁号
3	循环操作开锁	有($0 < n \leq 20$)	$G_1 \sim G_n$ (任意匹配)
4	状态检测	有/无(无检测 码则不检状态)	合位码 分位码

根据表格顺序执行相应的操作,其中循环操作每执行一次均有提示,可根据实际需要随时退出循环。

3 结束语

尽管电气设备的型号种类很多,但是通过对设备类型的分解和逻辑化的操作过程解析,组建相应的数据结构,可以化繁为简,使得用电脑钥匙执行操作票的过程变成对基本操作单元的顺序逻辑组合和循环,从而提高了编程效率,保证了程序正确性。当变电站设备有其他的闭锁和操作方式时,该方法具有较好的扩展性,只需要增加相应的描述表达式即可完成,而软件无需变更。

参考文献:

- [1] 赵旭峰,朱学勇. 变电站防误装置的功能及应用[J]. 江苏电机工程,2010,29(4):59-61.
- [2] 余亚林,王俊峰. 微机五防装置防误基本规则及闭锁逻辑式优化[J]. 广西电力,2012(3):24-26.
- [3] 周健. 变电所微机防误闭锁逻辑分析和改进[J]. 现代装饰理论,2011(11):99.
- [4] 陈邦达. 从微机五防到顺序控制[J]. 湖北电力,2012,36(2):21-22.

作者简介:

任金华(1954),男,安徽天长人,研究员级高级工程师,从事电力系统计算机应用。

Application of Lockout Logic Analysis in Computer Key Software Designing

REN Jinhua

(Nanjing NARI-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Using computer key to execute operation is the core of microprocessor-based anti-misoperation system, and is also the difficult part in designing the system. Through an investigation of anti-misoperation and lockout systems for various electrical devices, several basic operational operation units for lockout operation and state detection are pointed out. Based on the basic operational operation units, logic relationships between operational steps of various electrical devices, as well as corresponding expressions, are established. Module type based program designing method and logic relationships between operational steps of various electrical devices can simplify the process of software development, and satisfy the requirements of any electrical devices' operation.

Key words: computer key; block logic; misoperation

(上接第44页)

陈琦(1985),男,江苏盐城人,助理工程师,从事继电保护及辅助装置领域的研究与开发工作;

邹磊(1982),男,吉林长春人,工程师,从事继电保护及辅助装置领域的研究与开发工作。

Application of Portable Protection for New Device Commission in Smart Power Grid

YAO Liang, CHEN Qi, ZOU Lei

(Guodian Nanjing Automation Co. Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: For tackling the complexity and time-consuming of new device commission, a new portable protection which applies to both traditional substation and smart substation is developed. Comparing to old temporary protection, the developed protection is more reliable, more convenient and more economical. The application of the proposed protection in reality shows that it reduces the course of new device commission, decreases the risk of secondary equipment, improves working efficiency, and enhances the reliability of the power grid.

Key words: new device commission; smart substation; portable protection; aerial socket

基于缓存的补采策略在智能用电系统中应用

陶晓峰, 陈方周

(国网电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

摘要:针对用电采集系统中的数据补采提出了一种基于缓存的智能用电海量数据补采策略,通过预先在分布式缓存中按采集任务对需要采集的数据项进行初始化,采用数据包标记法提取元信息数据后通过哈希算法进行精确定位和快速标记,补采服务检索缓存中的标记信息生成相应的补采任务,该方法提高了智能用电采集系统的补采效率,有效提升了系统的采集成功率。

关键词:缓存;补采;海量;数据包标记法;智能用电

中图分类号:TP333

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)01-0048-02

用电信息采集系统中主要采用采集终端汇总电表数据再上送主站的采集模式^[1],其中采集终端和系统主站之间主要采用 GPRS 无线通信方式^[2]。目前由于地域等原因会造成无线通信信号不稳定,导致周期采集任务中有些任务会执行失败,造成部分数据缺失。为了保证系统采集数据的成功率和完整性^[3],需要引入数据补采机制作为对自动周期定时采集的一种必要补充。为了减少大型数据库 I/O 操作和提高检索效率,文中引入了一种基于缓存的海量数据的补采策略,通过在缓存中保存数据采集成功与否的状态标识,直接遍历缓存数据,有效减少对数据库的检索压力,通过制定延时同步回写数据库机制对采集成功标识进行持久化保存。

1 数据补采策略设计

数据补采策略主要由补采服务、分布式缓存、采集服务 3 个服务子模块组成。补采服务主要负责根据设定的采集任务将每个数据采集状态在分布式缓存中进行初始化,根据指定的采集任务模块检索缓存中的数据,采集状态发起补采任务,任务保存在分布式缓存的任务队列,采集机获取补采任务进行执行,通过解析数据报文,采用数据包标记(DPM)方法对采集数据包进行快速解析,获取数据信息,对采集成功的数据在分布式缓存中进行标记。补采流程如图 1 所示。

2 数据采集状态标识设计

在数据规模越来越大的情况下,采用遍历数据库判断数据缺失的方式会增加数据库 I/O 的负载,而采用对系统中的数据采集项进行内存初始化打点设计方案,则可减少数据库的直接操作。

哈希技术在信息系统的数据存储与访问中占有重要地位,它把关键词直接映射为存储地址,达到快

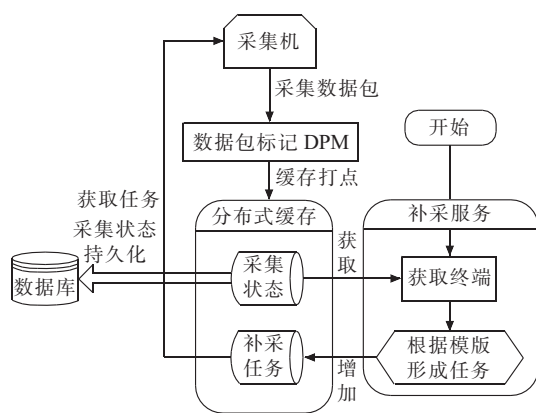


图 1 数据补采流程

速寻址的目的。根据用电采集系统的物理结构,一个采集设备下负责收集几百到上千不等的用户电表数据,数据采集状态标识采用位打点标记法,系统中通过数据时标 Time、测量点号 Pn 和数据项编码 Fn 共同组成数据信息的三元组作为关键词 Key;1 个用户电表的数据状态代表 1 个数据位,数据位值 0 代表没采集成功,1 代表采集成功,将所有用户电表的数据采集状态按测量点号 Pn 组合成一个状态位字符串作为值 value,将采集设备的三元组信息关键词 Key 和状态位字符串值 value 进行内存映射成哈希表。

根据数据分布和哈希函数的效率选择哈希函数,文中采用乘法哈希函数:

$$H(m) = \sum_{i=0}^m (m_i \times p_i) \quad (1)$$

式中: $H(m)$ 为哈希运算函数; m_i, p_i 分别为信息关键词和状态位值。此哈希函数利用乘法的不相关性^[4],提高了检索速度。

3 数据包标记法

用电信息系统中数据的采集交互都是以数据包按照一定的协议格式传输的,DPM 法的主要思想是数据

包发送给采集服务器后,由数据包解析器将接收到的数据包中直接分离出数据标识信息^[5],对数据格式和详细的数据明细采用弱化处理方式提高解析效率。数据包的格式如图2所示,标记服务通过从数据包中提取出数据单元标识,DPM将解析出数据时间、测量点号、数据项编码项作为数据信息的三元组,根据三元组信息组合成Key,根据上述乘法哈希函数可以快速定位数据采集状态标记。

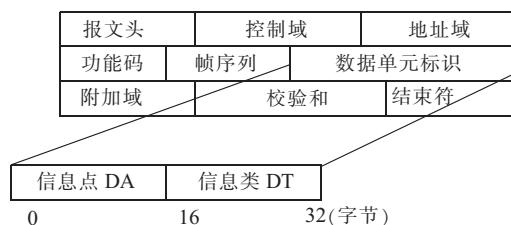


图2 数据报文信息域

4 补采任务的快速生成

采集终端下所有用户的数据采集状态,根据采集任务模板预先初始化生成状态位字符,状态位通过位标识符都标记在了状态字符串内,将这些状态位字符保存在分布式缓存中^[6],采集成功的数据会更新相对应的状态位字符,补采服务定期遍历每个终端的状态字符串,将状态位转化为数组形式,可以一次通过检索出状态位是0的数组索引下标值,此下标值代表了数据信息的三元组中的Pn值,根据Pn值可以定位到唯一的用户电表。根据这些信息生成不同的补采任务,前置模块可以并发执行补采任务。

5 数据补采优化技术

5.1 数据采集状态持久化机制

对于保存在内存中的采集状态是一种暂态的状态,当程序重新初始化时就会丢失,因此需要对这些状态进行持久化保存,在数据库中根据Map的Key和Value设计对应的数据表,以数据信息三元组中的3个属性作为联合主键,状态属性为Varchar2属性,采用延迟回写机制减少对数据库的操作^[7]。

5.2 上线即补采策略

对于GPRS无线通信方式,特别是信号覆盖差的地方其在线时间很不稳定,通过上线即补采策略可以在最大程度上消除信号不稳定带来的影响,其原理是当终端上线后触发一个上线事件给补采服务,补采服务监听到上线事件后检索内存中的采集状态,实时地生成补采任务^[8]。补采流程如图3所示。

5.3 周期补采策略

设定周期补采策略时根据系统和通信信道的空闲程度可以调整补采的策略,通过灵活定义正则表达式

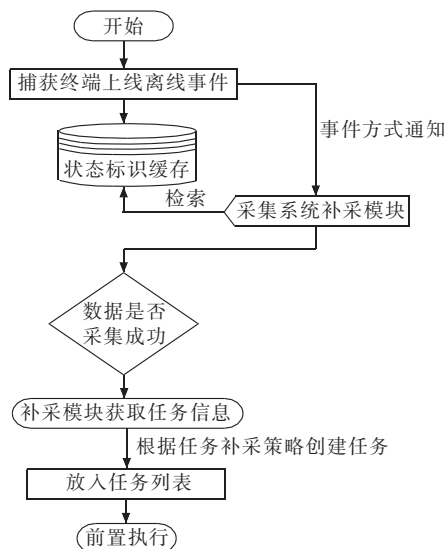


图3 上线即补采流程

(一种文本模式,包括普通字符和特殊字符)来设定周期补采的时间和补采频率,对一些优先级高的任务可以提高补采频率实现提升采集成功率的目标。

6 应用效果

该补采策略在青海、新疆、江西、安徽等多个省级集中部署的用电信息采集系统中进行了实际运用,实践证明对系统提高采集成功率有明显效果,通过在一天之中的多次补采,采集成功率至少提高了5%以上。如表1所示。

表1 补采策略应用和采集成功率关系表

补采次数	采集成功率/%
0	90
1	94
2	96
3	97
4	98

7 结束语

该补采策略针对智能用电信息采集数据量大、通信不是很稳定的特点设计的,实践证明该模块对用电采集系统提高采集成功率有明显效果,目前已经成为系统中必不可少的关键模块。

参考文献:

- [1] 李卫良,田伟,王晓丹.以AMI为核心的智能配用电技术体系研究[J].江苏电机工程,2011,30(3):1-6.
- [2] Q/GDW378.1—2009 电力用户用电信息采集系统设计导则:主站软件设计导则[S].北京:中国电力出版社,2009.
- [3] Q/GDW376.1—2009 电力用户用电信息采集系统通信协议:主站与采集终端通信协议[S].北京:中国电力出版社,2009.
- [4] CORMEN T H, LEISERSON C E, RIVEST R L, et al. Introduc-

760 kN 绝缘子双联耐张串金具研究

陈 宁, 黄海俊, 王圣博

(中国能源建设集团南京线路器材厂, 江苏 南京 210037)

摘 要:为提高特高压输电线路工程安全性和经济合理性,减少安装和运行维护工作量,适应绝缘子向提高负荷等级方向发展的趋势,开发了760 kN 绝缘子耐张串非标金具。采用760 kN 绝缘子双联耐张串替代550 kN 绝缘子三联耐张串,减少了绝缘子和金具的数量,缩短了两外挂点间的距离,改善了铁塔受力条件,提高了铁塔的抗冰、抗风和抗震能力。该研究成果已应用于锦屏—苏南±800 kV 直流特高压输电线路工程中。

关键词:760 kN 绝缘子;双联;耐张串;金具;特高压

中图分类号:TM216

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)01-0050-04

随着社会经济的发展,我国对能源需求正在持续快速增长。为满足超远距离大容量的传输电能需求,特高压工程应运而生^[1]。目前,我国晋东南—南阳—荆门 1000 kV 交流、向家坝—上海±800 kV 直流等特高压输电线路工程已建成投运^[2-4]。特高压线路由于传输电能容量大,对直接承载导线拉力的耐张绝缘子串承载能力提出了更高的要求。增加绝缘子串联数是一选项,但串联数过多,会大幅增加安装、运行维护工作量和生产成本。而采用串联数较少、负荷等级较高的绝缘子串将可解决上述问题。为此,开展了超高负荷等级绝缘子及配套产品的前期调研,在取得初步成果的基础上,承担了锦屏—苏南±800 kV 直流特高压输电线路工程 760 kN 绝缘子双联耐张串金具的研究开发工作。

1 绝缘子双联耐张串串型研究

锦屏—苏南±800 kV 输电线路工程所用导线为 JL/G3A-900/40 钢芯铝绞线,查阅标准 GB/T1179—2008^[5],导线额定拉断力为 198.83 kN。参照文献[6-8],对工程六分裂导线组、导线拉断力及安全系数等参数进行综合计算,得出耐张串所需机械总负荷,具体计算方法如下所示:

$$F_{\text{总}} = F_{\text{高}} \times K_1 \quad (1)$$

$$F_{\text{高}} = T_a \times n \quad (2)$$

$$T_a = T \times K_2 \quad (3)$$

$$T = T_1 \times 95\% / K_3 \quad (4)$$

式中: $F_{\text{总}}$ 为耐张串所需机械总负荷; $F_{\text{高}}$ 为6根导线 JL/G3A-900/40 最高点使用张力; K_1 为绝缘子安全系数; T_a 为导线最高点张力; n 为导线数; T 为导线水平张力; K_2 为挂点系数; K_3 为导线安全系数; T_1 为 JL/G3A-900/40 导线额定拉断力。由式(1—4)计算得

到 $F_{\text{总}}$ 为 1346 kN。

耐张串不同联数时每联绝缘子所需机械负荷为:

$$f = F_{\text{总}} / m \quad (5)$$

式中: f 为每联绝缘子所需机械负荷; m 为联数。耐张串设计为三联时,每联绝缘子所需机械负荷为 449 kN,选取负荷等级为 550 kN;耐张串设计为双联时,每联绝缘子所需机械负荷为 673 kN,初步考虑负荷等级为 730 kN。对以上 2 种情况进行分析比较:

(1) 三联设计的单个绝缘子机械负荷为 550 kN,高于需要的 449 kN,能够保证 6 根导线的安全运行,且有成熟的经验,但是此绝缘子串塔头部分两外挂点距离为 1300 mm。为了保证导线的受力平衡,其下的三串绝缘子需连接组合联板,将挂点数由三变为二,增加了工程安装和运行维护的工作量,同时自身的荷载也较大。550 kV 三联耐张串图如图 1 所示。

(2) 双联初步设计的单个绝缘子吨位为 730 kN,高于计算的 673 kN,此设计仅需两绝缘子串,即可完成对六分裂导线的连接。同时,减小了两耳轴挂点的间距,降低了铁塔悬挂点的扭矩,改善了铁塔受力条件,提高了铁塔的抗冰、抗风和抗震能力,为工程的安全性和稳定性奠定了基础。

由此可以看出,730 kN 绝缘子双联耐张串的综合性能要优于 550 kN 三联耐张串,但 730 kN 双联所承受的总吨位略低,考虑工程运行的安全性,并听取工程相关方的意见,将 730 kN 提高到 760 kN。760 kN 双联耐张串图如图 2 所示。

2 配套金具研究

耐张绝缘子串金具主要包括联塔金具、联板、碗头挂板、耐张线夹、跳线间隔棒、均压环、屏蔽环等。研制按照 GB/T2314—2008^[9]、GB/T2315—2008^[10]等国家、电力行业标准和工程技术要求进行。该研究重点是 760 kN 绝缘子双联耐张串配套金具,故仅对碗头挂板、联塔

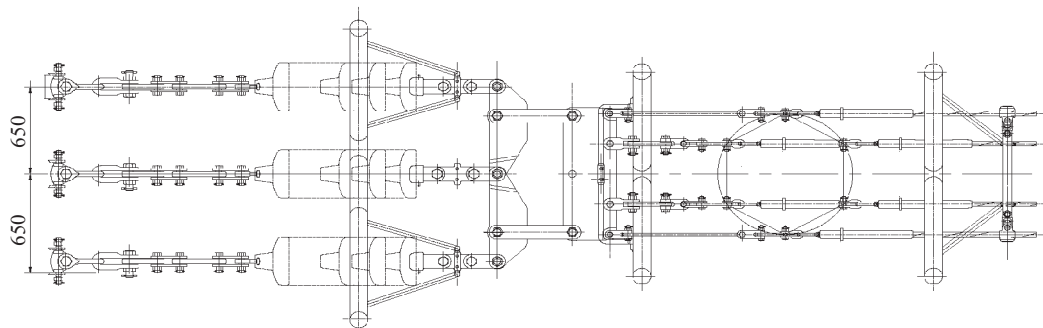


图1 550 kN 三联耐张串直流输电线路

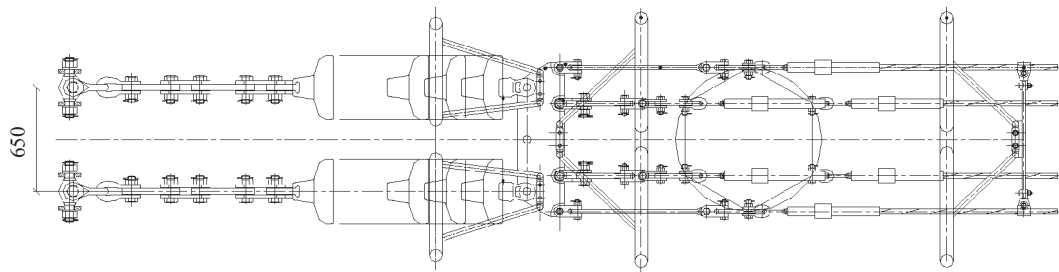


图2 760 kN 双联耐张串直流输电线路

金具、跳线间隔棒等主要产品作一简要分析。

2.1 碗头挂板

目前,国内相关标准中,绝缘子串元件的球窝连接尺寸^[11]最大连接标记所对应的碗头挂板标称破坏载荷为 550 kN,参照碗头挂板相关标准的结构型式,根据与绝缘子厂家配套的绝缘子部件相关尺寸,结合现有碗头挂板系列的设计经验^[12],成功开发出 760 kN 碗头挂板。

碗头挂板的碗头部分整体外形设计为圆柱状,外径为 $D120\text{ mm}$,构造独特,不仅能够满足工程的安全和连接尺寸的要求,而且方便了生产加工,提高了工艺性能。其球窝尺寸的设计根据 760 kN 绝缘子串元件配合尺寸综合考虑,头部尺寸为 41 mm,球窝半径 R_s 定为 50 mm,以配合 760 kN 的绝缘子球头颈部,球窝及外形等相关尺寸既考虑到连接灵活,配合适当,又保证安全可靠。结构型式如图 3 所示。

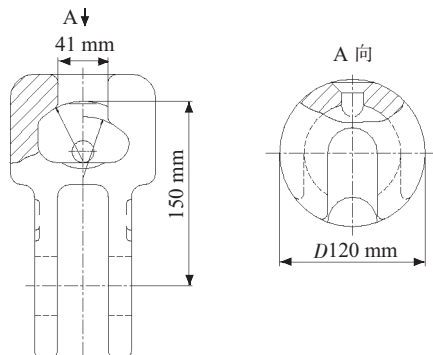


图3 碗头挂板

2.2 联塔金具

联塔金具是将耐张绝缘子串连接到铁塔横担上的

一个金具,它决定送电线路是否安全运行。除要有足够的机械负荷以外,联塔金具更需具备转动的灵活性和耐磨性。目前特高压输电线路工程中采用的耳轴挂板,能够各个方向转动灵活。根据特高压线路设计经验,考虑联塔金具的上部与铁塔连接处的磨损等因素,联塔金具的负荷一般比理论需要的高,该耳轴挂板所定吨位比 760 kN 绝缘子负荷高一个等级,为 840 kN。与 550 kN 三联绝缘子串进行比较,该耳轴挂板厚度增加到 36 mm,螺杆杆径扩为 $D48\text{ mm}$ 。同时,针对导线耐张串负荷的特点,联塔金具采用整体锻造方式加工,以提高组串的机械性能。具体的型式如图 4 所示。

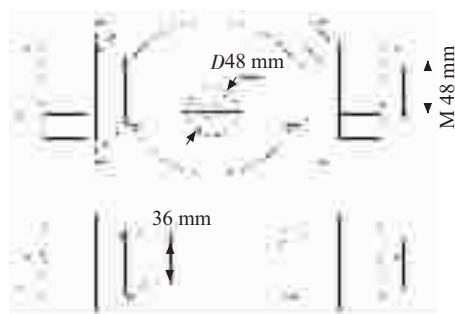


图4 联塔金具

2.3 跳线间隔棒

间隔棒^[13]分为刚性间隔棒和柔性间隔棒 2 类。刚性间隔棒使子导线之间不产生任何位移,但防止微风振动和抑制次档距振荡效果不好。因此目前导线间隔棒大多采用柔性间隔棒。因为阻尼形式的不同,柔性间隔棒通常分为橡胶阻尼和弹簧阻尼 2 种。橡胶阻尼方式是利用在关节处嵌入橡胶垫,消耗振动能量,对抑制微风振动和次档距振荡效果明显,从运行状况来看,情况较好。

该跳线间隔棒的设计采用橡胶阻尼间隔棒。在直臂和夹头本体的关节处,嵌入橡胶垫,以抑制微风振动。同时,为保护导线的磨损和消除振动,间隔棒的夹头内侧放入橡胶垫,具体设计如图 5 所示。

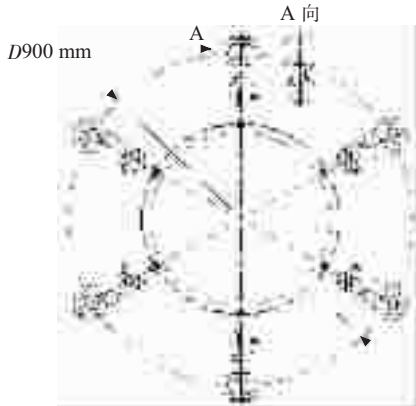


图 5 间隔棒型式

3 试验情况

760 kN 绝缘子双联耐张串配套金具,所有的联结金具均通过了破坏荷载试验,同时耐张线夹通过握力试验,均压屏蔽环通过了电晕试验。目前,研究开发的 760 kN 绝缘子双联耐张串非标金具已成功应用于锦屏-苏南±800 kV 输电线路工程,运行良好。

3.1 碗头挂板试验

取 3 件碗头挂板进行试验,外观尺寸、镀锌层厚度均符合要求。机械试验按照 GB/T2317.1—2008^[14]要求进行。3 件试品试验数据均符合要求,判定为合格(如表 1 所示)。碗头挂板试验时间-试验力曲线详见图 6 至图 8。

表 1 机械试验数据

试件组号	标称破坏载荷 /kN	实测数据 /kN	判断依据	结果
1	760	879.64	达到标称破坏载荷,保持 60 s,试品没有出现破坏	合格
2	760	829.46	达到标称破坏载荷,保持 60 s,试品没有出现破坏	合格
3	760	853.64	达到标称破坏载荷,保持 60 s,试品没有出现破坏	合格

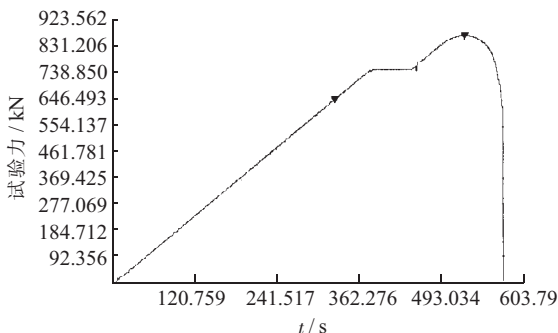


图 6 试件 1 时间-试验力曲线

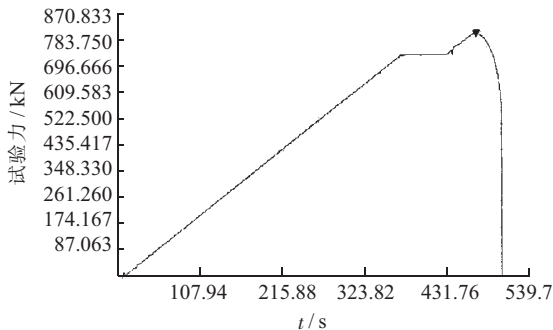


图 7 试件 2 时间-试验力曲线

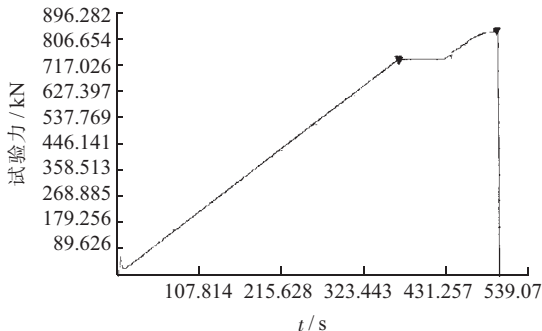


图 8 试件 3 时间-试验力曲线

3.2 耐张线夹试验

试验采用对拉形式,夹于卧式拉力机上,按照 GB/T2317.1—2008 相应要求进行试验,在张力逐步增加到规定的握力值,保持 60 s 后,金具与导线未发生相对滑移现象,并且导线没有出现断股或破坏。经判定,3 个试件全部合格。具体情况如表 2 所示。

表 2 握力试验数据表

试件组号	握力要求 /kN	实测数据 /kN	判断依据	结果
1	193.2	202	试验中导线相对金具没有出现滑移现象,且导线没有出现断股或破坏	合格
2	193.2	204	试验中导线相对金具没有出现滑移现象,且导线没有出现断股或破坏	合格
3	193.2	203	试验中导线相对金具没有出现滑移现象,且导线没有出现断股或破坏	合格

4 结束语

760 kN 绝缘子双联耐张串,与 550 kN 三联耐张串相比较,在保证安全运行的情况下,减少了绝缘子和金具的数量,优化了组串的结构形式,节约了成本,符合我国特高压建设中“降本增效”这一理念。同时,双联耐张串还缩短了两外挂点间的距离,减少了导线荷载对铁塔悬挂点的扭矩,改善了铁塔受力条件,提高了铁塔的抗冰、抗风和抗震能力,从而为工程的安全性和稳定性奠定了坚实的基础。研究开发的 760 kN 绝缘子双联耐张串所配套的碗头挂板等非标金具符合国家、电

力行业标准和工程技术规定,机械和电气性能试验均满足要求。研究成果已成功应用于锦屏—苏南 ± 800 kV 输电线路工程。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2006: 27-35.
- [2] 赵 彪, 孙 河, 刘姜玲. 特高压交流试验示范工程的经济性[J]. 电力建设, 2009, 30(11): 24-26.
- [3] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2007, 29(14): 1-3.
- [4] 黄 莹, 徐 政, 曾德文, 等. 西电东送纯直流输电方案研究[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 1-4.
- [5] GB/T1179—2008 圆线同心绞架空导线[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [6] 郭思顺. 架空送电线路设计基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 40-93.
- [7] 胡安民. 架空电力线路实用计算[M]. 北京: 中国水力水电出版社, 2003: 3-15.
- [8] 柴玉华, 王艳君. 架空线路设计[M]. 北京: 中国水力水电出版社, 2001: 27-54.
- [9] GB/T2314—2008 电力金具通用技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [10] GB/T2315—2008 电力金具标称破坏载荷系列及连接型式尺寸[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [11] GB/T 4056—2008 绝缘子串元件的球窝连接尺寸[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [12] 董吉涛. 电力金具手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 161-171.
- [13] 程应镗. 送电线路金具的设计安装试验和应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989: 163-166.
- [14] GB/T2317.1—2008 电力金具试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

作者简介:

陈 宁(1963), 男, 江苏如皋人, 高级工程师, 从事电力金具研究开发和相关标准起草工作;
 黄海俊(1974), 男, 江苏如皋人, 高级工程师, 从事电力金具设计、产品试制研究与分析;
 王圣博(1987), 男, 江苏新沂人, 工程师, 从事金具产品的设计及工艺研究。

Research on the Fittings for Double Strain Insulator-strings of 760 kN

CHEN Ning, HUANG Haijun, WANG Shengbo

(China Energy Engineering Group Nanjing Line Accessories Manufacturer, Nanjing 210037, China)

Abstract: In order to improve the reliability and the economic rationality of EHV transmission projects, reduce installation and maintenance, and adapt to the development trend of raising load about insulator, the duplex strain insulator-string fitting for 760 kN is developed. The number of insulators and fittings reduced, the distance between the two hard points shortened, and the stress condition and the ice-resistant, wind-resistant, vibration-resistant capacity of tower improved through substituting 760 kN double strain insulator-strings for 550 kN triple strain insulator-strings. The research productions had been successfully applied to the Jinpin-Sunan ± 800 kV EHV DC Transmission Project.

Key words: 760 kN insulator; duplex; strain insulator-string; fittings; extra-high voltage

(上接第 49 页)

- tion to Algorithms. Third Edition. Cambridge, Massachusetts London, England; The MIT Press, 2009: 253-285.
- [5] 阎 冬, 王玉龙, 苏 森, 等. 基于协作交互的概率性数据包标记溯源方法[J]. 北京邮电大学学报, 2012, 35(1): 51-54.
- [6] 周功业, 吴伟杰, 陈进才. 一种基于对象存储系统的元数据缓存实现方法[J]. 计算机科学, 2007, 34(10): 146-148.
- [7] 卢成均. 缓存机制及其在数据存取层中的应用模型研究[J]. 计算机应用与软件, 2008, 25(12): 172-174.
- [8] 钱立军, 李新家. 用电信息采集系统中数据比对功能的实现及应用[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(2): 64-65.

作者简介:

陶晓峰(1977), 男, 江苏张家港人, 工程师, 从事智能用电采集系统的设计和开发研究工作;
 陈方周(1986), 男, 宁夏银川人, 工程师, 现从事智能用电采集系统的设计和开发研究工作。

Application of Cache Based Data Supplement Acquisition Strategy in Smart Electricity Consumption Acquisition System

TAO Xiaofeng, CHEN Fangzhou

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: This paper proposes a distributed cache based data supplement acquisition strategy for massive data mining complement in electricity acquisition system. By pre-initializing required data items in the distributed cache, using hash algorithm to precisely locate the meta data extracted by data package mark method and generating the supplementary acquisition task with the tag information pre-stored in distributed cache, the complement trick efficiency of smart electricity acquisition system and the system acquisition success rate is significantly improved.

Key words: cache; Recall; large quantity; packet marking method; smart electricity consumption

低压灭磁开关触头发热分析及处理

高 雷, 肖立军

(神华国华太仓发电有限公司, 江苏 太仓 215433)

摘 要:以国华太电 8 号机组一起灭磁开关主触头发热引起机组停机为例,介绍了框架式开关触头发热故障的危害,分析了造成低压灭磁开关柜触头发热的主要原因是接触电阻增加,讨论了接触压力、触头材料、触头温度及触头表面状况对接触电阻的影响,并提出有效的预防和处理措施,以确保安全可靠运行。

关键词:灭磁开关;触头发热;接触电阻

中图分类号:TM591

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)01-0061-02

低压抽屉式开关柜具有操作简单、动作安全可靠、检修维护方便等优点,广泛应用于发电厂及变电所。在日常运行过程中,由于其独特的结构,触头接触面不能有效接触、接触电阻过大、静触头弹簧老化、周围运行环境温度高等因素都有可能造成开关柜出现触头发热,导致开关电气性能下降,供电可靠性降低。开关柜触头发热会逐步成为安全隐患,造成开关柜内电气设备元件发生变性扭曲、烧毁等严重事故,甚至引起配电系统大范围停电,直接影响到企业的安全生产^[1,2]。下面以国华太电 8 号机组灭磁开关主触头受热烧损引起机组停机为例,分析了低压灭磁开关触头发热的原因,并提出了预防和处理措施。

1 事故发生经过

8 号机组灭磁开关型号为 AT40;技术参数为:额定电压 880 V、最大 1000 V 交流;额定电流 4000 A,最大开断电流 65 kA;开关绝缘等级为 B 级;生产厂家:日本三菱电机机电有限公司;投产日期 2005.12.8;开关主触头采用铜镀银;开关柜操作方式为低压抽屉开关。

事故发生时,机组负荷为 500 MW,无功功率 50 MV·A,励磁电压 271 V,励磁电流 2895 A,定子电流 14 825 A,励磁室内温度 23 ℃,室内湿度 70%。8:20 就地检查发现 8 号机励磁小间有异味,8:30 现场检查灭磁开关,发现 A 相触头温度高达 158 ℃,B、C 相温度为 69 ℃。随即启动相关事故预案,采取降低励磁电流控制温度的措施,手动将机组无功由 59.5 Mvar 降至 15.5 Mvar,励磁电流由 2 892 A 降至 2 740 A。就地加装 2 组冷却风扇强制冷却灭磁开关触头温度,并使用红外成像仪持续监测开关温度变化。申请退出 8 号机组 AGC,降低有功负荷,将机组负荷由 528 MW 降低并保持在负荷 450 MW。9:44 红外成像仪显示灭磁开关 A 相触头温度降低至 125 ℃。11:13 灭磁开关

A 相触头温度突升,最高升至 173 ℃,且温度有继续升高的趋势。11:34 8 号机组手动解列停机。

2 事故原因分析

2.1 停机后灭磁开关柜检查情况

(1) 外观检查。灭磁开关防护面板 A 相发热变色,灭弧栅处发热,B、C 相完好无损。灭磁开关 A 相动触头塑料保护罩熔化,三相接触面长度一致

(2) 解体开关主触头灭弧室。A 相灭弧栅内有塑料保护罩熔解物,A 相主触头正常,B、C 相灭弧栅及主触头均正常。

(3) 解体静触头及静触头触指。A 相部分静触头触指固定弹簧疲劳,弹簧压力降低,接触电阻变大,动静触头接触面发热,触头发黑,A 相静触头触指固定弹簧变色,触指发热变色。

2.2 原因分析

该次事故直接原因为灭磁开关 A 相静触头固定弹簧疲劳,弹性降低,静触头触指与开关动触头接触压力减小,接触电阻增大,在工作电流(2800 A)流过时,因接触电阻增大,接触面发热,又促使静触头固定弹簧逐步疲劳恶化,弹性逐步降低,并进一步增大接触电阻,恶性循环,累积电热效应,最终造成 A 相触头过热,触指部分烧损。

接触电阻增加是影响触头发热的主要原因,而影响接触电阻的因素有接触压力、触头材料、触头温度、触头表面情况、接触形式及化学腐蚀等。这些因素将会导致动静触头接触电阻增大,触头接触面温度升高,静触头压紧弹簧长期处于高温下产生疲劳、老化。

2.2.1 接触压力的影响

接触压力对接触电阻的影响最大,当接触压力很小时,其微小的变化都会使接触电阻值产生很大的波动。增大接触压力,可将氧化膜压碎,使膜电阻减小,但是压力增大到一定程度后,膜电阻稳定在一个较小的数值。

2.2.2 触头材料的影响

触头材料对接触电阻的影响主要决定于触头材料的电阻系数、材料的抗压强度、材料的化学性能等。触头材料的电阻系数 ρ_k 越低,接触电阻就越小。常用材料电阻系数与铜的比较如表1所示。

表1 常用材料电阻系数与铜的比较

触头材料及其覆盖层	ρ_k 比较值	触头材料及其覆盖层	ρ_k 比较值
铜	1	钢	35
镀锡的铜	0.7	碳	1000
搪锡的铜	2.0	黄铜—黄铜	4.0
镀银的铜	0.3	铜—黄铜	2.2
银	0.2	铜—铝	1.3
铝	2.5	铜—钢	7.0

从表1可以看出银的电阻系数小于铜,但银比铜价格贵,所以常采用铜镀银或镶银的办法,以减小接触电阻。

2.2.3 触头温度的影响

触头的接触电阻与它本身的金属电阻一样,也受温度的影响,随着触头温度的升高,接触电阻增加。由试验得知,接触电阻 R_j 与温度之间的关系式为:

$$R_j = R_{j0} (1 + \frac{2}{3} \alpha_0 \theta) \quad (1)$$

式中: R_{j0} 为触头在 0°C 时的接触电阻, Ω ; α_0 为触头材料的电阻温度系数, $1/^\circ\text{C}$; θ 为触头的温度, $^\circ\text{C}$ 。触头金属材料的电阻温度系数为 $1/^\circ\text{C}$,接触电阻的电阻温度系数为 $2/3 \alpha_0$,后者比前者小 $1/3 \alpha_0$,这是由于接触处温度升高后,材料硬度有所降低,有效接触面积增大,导致温度增加时接触电阻的增加比金属材料电阻的增加要小一些。实际上,因为温度升高会加剧氧化,所以,温度对接触电阻的影响要大些。

参考 GB1984—2003^[3]及 GB/T 11022—2011^[4],在周围空气温度不超过 40°C ,断路器触头最高运行温度不应超过以下温度值:当触头材料为裸铜或裸铜合金时,在空气中不超过 35°C ,即最高温度不超过 75°C 。当触头表面镀银或镀镍时,在空气中不超过 65°C ,即最高温度不超过 105°C 。当温度超过规定值时,触头会加剧劣化。

2.2.4 触头表面情况的影响

(1) 触头表面氧化膜的影响。暴露在空气中的接触面(除铂和金外)会发生氧化作用。当温度高于 70°C 时,铜触头氧化加剧,氧化铜的导电性能很差,使膜电阻急剧增加,因此,铜触头的允许温升都是很低的。银氧化后的导电率与纯银差不多,所以银或镀银的触头工作很稳定。为了减小接触面的氧化,可以将触头表面搪锡或镀银,以获得较稳定的接触电阻。

(2) 触头表面清洁状况的影响。当触头的压力较小时,触头表面的清洁度对接触电阻影响较大,随着压力的增加,这种影响逐渐减小。

(3) 触头表面的电化学腐蚀。采用不同的金属作触头时,由于两金属接触处有电位差,当湿度大时,在触头对接触处会发生电解作用,引起触头的电化学腐蚀,使接触电阻增加。

3 开关触头发热的危害

电力系统中,电气设备与电气设备、母线与母线、母线与设备连接的导体形成的可拆卸的电气触头在实际运行中经常出现过热故障。导电的金属材料如果长期处在高温下,则会退火软化,机械强度下降;有机绝缘材料若长期受到高温作用,则会逐渐变脆、老化、失去弹性,以致绝缘性能下降、寿命缩短;导体接触表面温度若过高,则会强烈氧化,接触电阻将增加,弹簧接触部分的弹性元件退火,压力降低,有效接触面积减小,当负荷电流增大时,发热量(温度)将相应增大,接触电阻因热效应而进一步增大,如此恶性循环,可能导致接触部分烧熔,无法正常工作,甚至可能酿成重大火灾事故。

4 事故防范措施

(1) 定期对灭磁开关进行红外成像,及时发现设备异常现象,并及时处理;(2) 每次停机检修时对灭磁开关动静触头进行检查,发现触头镀银层磨损严重,应及时更换触头;(3) 停机检修时清理开关主触头氧化层及触头上灰尘以减小接触电阻;(4) 改善灭磁开关运行环境,降低开关运行环境温度,必要时采取强制冷却方式进行冷却;(5) 必要时增加接触点数目、以减小接触电阻,降低触头发热;(6) 对于容量不符合规定的开关应立即更换。

5 结束语

低压灭磁开关在配电系统中起着重要作用,如果由于日常维护及检修不当,开关触头接触电阻增大将会造成触头发热,弹簧疲劳、老化,进而导致停机事故的发生。了解灭磁开关触头发热的原因并在检修和维护时采取适当的防范措施可以及时发现设备的异常现象并及时处理,可以避免因灭磁开关故障造成的经济损失。因此在日常工作中应加强巡检和检修维护,尤其是触头容易发热的部位,做到早发现早消除,采取相应的防范措施,杜绝事故发生。

参考文献:

- [1] 刘宇卿,王德胜. 电气设备过热的原因与对策[J]. 电气应用, 2008(24):38-41.

中低压母线电弧光保护设计与应用

牛洪海, 严伟, 王杰

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:分析了中低压开关柜、母线装设电弧光保护的必要性,并结合 PCS-9656 电弧光保护装置介绍了电弧光保护装置的设计原理和关键技术以及电弧光保护的具体应用。试验及现场运行表明,电弧光保护装置可以快速准确地毫秒级切除母线和开关柜故障,保护母线和开关柜的安全。

关键词:弧光保护;光度学余弦原理;无源光传感器;工频变化量

中图分类号: TM77

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)01-0056-04

目前我国电网结构中的中压系统,即 35 kV 及以下电压等级,大多使用封闭式的中置柜以电缆引出,由于出线多,操作频繁,运行电流大,故障过电压高,设备安全距离与高压设备相比有差距,制造质量近年来有下降趋势,短路事故几率较高。柜内母线故障的后果是其产生的气体急剧膨胀造成开关柜爆炸,电弧高温导致铜排、铝排、电缆烧毁,开关设备强烈震动,导致固定件松动,高温、强光、有害气体、碎片飞溅、爆炸声等会造成人员伤害。由于目前继电保护规程中,中、低压母线未要求配置专用母线保护,针对上述情况,传统解决办法^[1]包括:(1) 变压器后备过流保护:考虑整定配合,保护整定时间一般为 1.0 s 以上,切除时间长,设备损伤程度大,甚至烧毁,影响生产运营;(2) 采用馈线过流元件反向闭锁进线的过流保护,保护整定时间为 100 ms,但接线施工复杂,增加二次电缆投资;(3) 母线电流差动保护,动作速度快,但由于总体投资大,且柜体安装空间小,安装困难;此外由于电流互感器(TA)易饱和,且装置支路数量很难满足间隔众多的要求,使得母差保护应用受限。

为了保证变压器及母线开关设备的安全运行,根据继电保护快速性的要求,迫切需要配置专用中低压母线保护。电弧光保护系统可在中、低压母线发生短路故障时快速切除故障,使设备免于遭受结构性损伤。在开关柜内加装电弧光保护装置,当柜内有微小弧光时,可迅速切断所有运行开关,将故障限定在最小范围内,尽可能减小损失^[2]。国外著名的开关柜生产厂家,如 ABB 等,其中低压开关柜均有配套使用电弧光保护系统^[3]。以南京南瑞继保电气有限公司的 PCS-9656 电弧光保护装置为例,讨论分析电弧光保护装置的设计原理、关键技术及应用。

1 系统基本构成

电弧光保护系统如图 1 所示,包括弧光传感器、

传输光纤、电弧光保护装置。

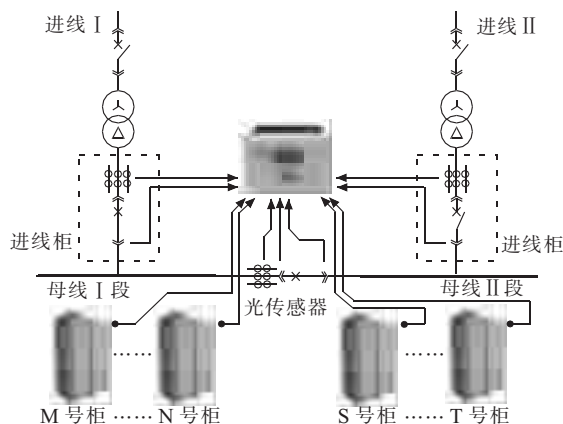


图 1 系统组成

电弧光保护装置可就地采集进线电流和弧光信号,也可以接收其他装置或合并单元的电流信号以及其他弧光单元的弧光信号,并完成逻辑判断、跳闸出口、事件记录、人机交互等功能。

专用的弧光传感器就地安装在开关柜需要监视的小室壁,将检测到的模拟光信号传输给电弧光保护装置,由电弧光保护装置完成光电信号转换。

2 设计原理

2.1 硬件设计

保护装置的硬件平台采用双核处理器作为主处理器,其内含微处理器(MPU)和数字信号处理器(DSP1),分别完成通信管理功能和保护功能,此外配置一块光信号采集插件,由其上的 DSP2 完成光信号的光电转换和数据处理。

装置各板卡间通过高速内部总线完成数据交互,实现插件的智能化配置。硬件整体架构如图 2 所示。

2.2 软件设计

MPU 的运行基于实时内核的 Linux 操作系统,运行包括 MASTER、SLAVE、LCD、IEC103、IEC61850、PRINT 等应用进程,负责装置初始化管理、调试的主管

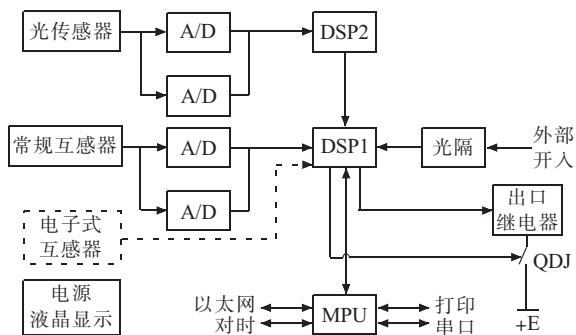


图2 硬件整体架构

理进程,以及由主管理进程协调调度的事件记录进程、故障录波进程、人机界面进程、通信进程、打印进程等。

DSP1 负责保护运算、逻辑判断功能,DSP2 负责光信号采集、计算、传输。保护应用程序使用元件思想进行模块化设计,通过系统程序提供的变量“注册输入”、“注册输出”、“注册参数”等接口实现板内、板间数据通信。DSP1 系统程序通过芯片内的共享静态随机存储器(SRAM),实现与 MPU 之间的通信,完成信号注册、输入、输出表处理。

装置的通用模块部分取自系统模块库,包括事件记录模块、打印模块、人机界面管理模块等。专用模块包括弧光信号采集模块、信号发送模块、信号接收模块、信号汇总模块、电弧光保护元件模块等,通过这些专用模块可以快速搭建电弧光保护系统,完成各种接线及运行方式下的系统配置。

3 关键技术

3.1 基于光度学余弦原理的无源光传感器

国内外同类产品已工程化使用的光传感器中,部分为有源光传感器,柜内完成光电转换,以电缆进行信号传输,该方式将弱电信号引入强电开关小室,且传输过程中的弱电信号易受安装环境的电磁干扰,可靠性降低;部分为无源光传感器,但传感器正前方 180° 全视场角范围内的感光效果差异较大,与其产品说明书中描述的性能不符,导致监视范围缩小,甚至会有监视死区。

为此,南京南瑞继保电气有限公司自主研制了基于光度学余弦原理^[4]的无源光传感器,传感器正前方 180° 全视场角内的电弧光可靠监视,消除监视死区。并且光强度大小相同的入射光,通过光传感器获取后的感光效果应如图3所示,即水平入射时弧光传感器获取的光强度应与垂直正入射时弧光传感器获取的光强度相当。

3.2 基于工频变化量原理的弧光保护判据

采用基于工频变化量原理的电气量信号判据,在保证检测快速性的前提下,提高电弧光故障检测可靠

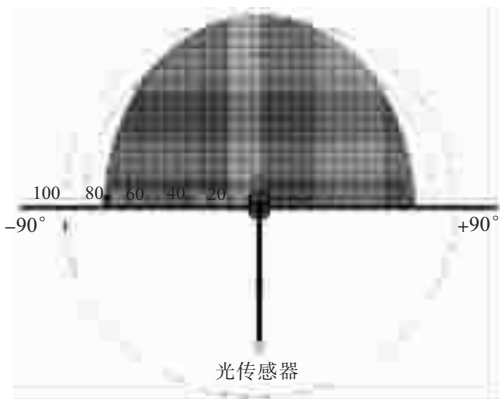


图3 光传感器感应曲线

性,且定值整定不受系统运行方式影响,重负荷状态下故障可靠动作,灵敏度高。

反应相电流工频变化量的保护元件采用浮动门槛,正常运行及系统振荡时变化量的不平衡输出均自动构成自适应式门槛,浮动门槛始终略高于不平衡输出,在正常运行时由于不平衡分量很小,装置有很高的灵敏度。当相电流变化量大于整定值,电信号判据满足。判据如下:

$$\Delta I_{\Phi\Phi} > k \Delta I_{\Phi\Phi th} + I_{\Phi\Phi th} \quad (1)$$

式中: $\Delta I_{\Phi\Phi}$ 为相电流变化量; $I_{\Phi\Phi th}$ 为浮动门槛,随着变化量输出增大而逐步自动提高; k 为比例系数,保证门槛电压始终略高于不平衡输出; $I_{\Phi\Phi th}$ 为固定门槛,电流变化量启动值。按躲过正常负荷电流波动最大值设定。

电信号判据与光信号判据与门输出电弧光保护动作标志,并延时出口。电弧光保护的逻辑如图4所示。

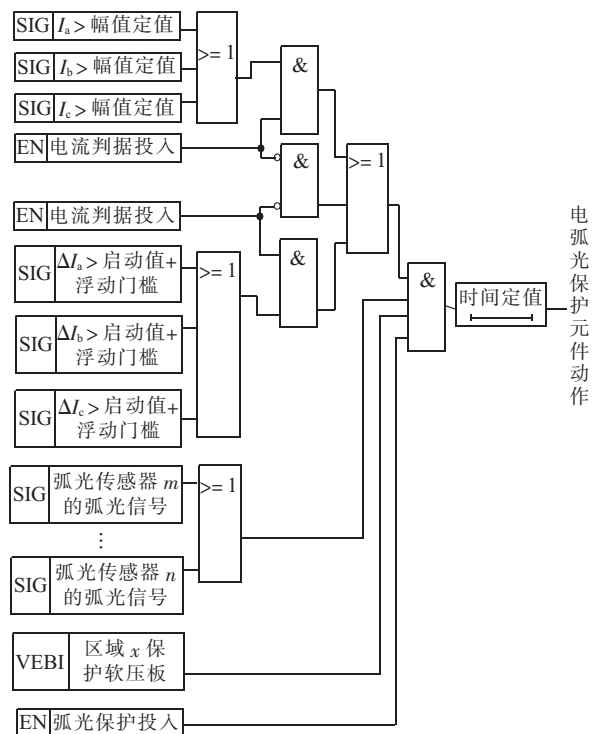


图4 电弧光保护逻辑

4 实际应用

4.1 光传感器感光性能实测

随机抽取光传感器,实测感光数据见表 1。可以看出,光强度大小相同的入射光,水平入射时弧光传感器获取的光强度与垂直入射时弧光传感器获取的光强度偏差小于 20%,满足工程化使用要求。

表 1 光感应数据实测

光入射角度 / (°)	照度 / lx	与垂正入射照度偏差 / %
-90(水平)	11 300	8.9
-45	11 700	5.6
0(垂直)	12 400	0
+45	11 600	6.5
+90(水平)	11 200	9.7

4.2 保护动作时间实测

开关柜内部故障电弧燃烧所产生的能量如图 5 所示,电弧燃烧持续时间超过 100 ms,所释放的能量开始急剧增加,将对开关设备的电缆、铜排以及钢材造成严重损坏^[5]。

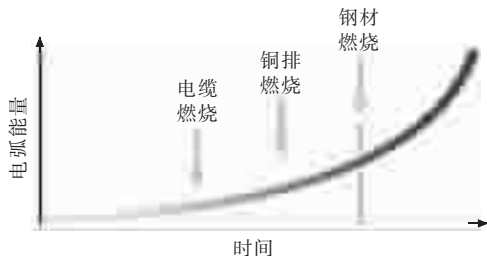


图 5 开关柜内部故障释放的能量与电弧燃烧时间关系曲线

在动模实验室模拟故障,装置录波如图 6 所示。

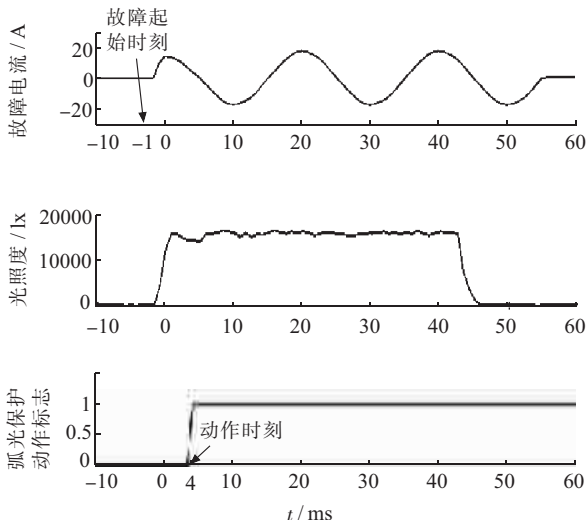


图 6 电流和光强故障录波

由波形可以看出,从故障开始到装置动作出口时间为 5 ms,计及开关固有分闸时间 30~40 ms,故障切

除时间小于 50 ms,有效避免图 5 所示的电弧燃烧释放的巨大能量对设备的损害和人员的伤害。

4.3 现场应用

PCS-9656 电弧光保护已在多个 35 kV、110 kV、220 kV 站等工程中得到应用,可适用于单母、单母分段、多段母线等多种接线方式,为母线、馈线、箱变等设备提供电弧光保护功能^[6,7]。

以重庆某钢厂 35 kV 站的 10 kV 母线保护为例,说明其应用配置方式。该站共 3 段 10 kV 母线: I 母 12 个间隔, II 母 5 个间隔, III 母 12 个间隔,考虑未来扩建, I 母、III 母各需预留 4 个间隔。因每台 PCS-9656 电弧光保护装置最多可以接入 24 个光传感器,故每段母线配置 1 台 PCS-9656D 即可,配置如图 7 所示。装置就地安装在进线 I 开关柜 107AH、进线 II 开关柜 203AH、进线 III 开关柜 307AH。

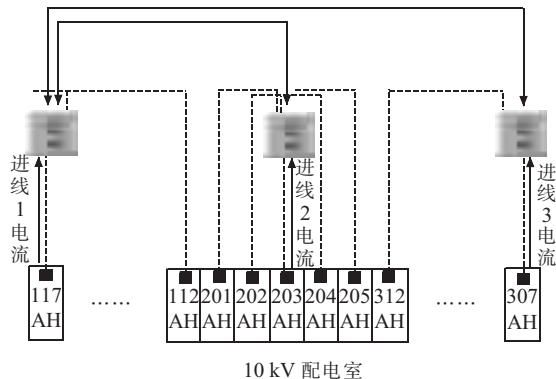


图 7 电弧光保护配置示意图

II 母、III 母的从机完成弧光信号的采集和光电转换,并将处理结果传输至 I 母主机,由 I 母主机归并。I 母主机将归并后的全站光信号下发至每台从机,从机结合各自的工频变化量电气量信号判据实现母线的电弧光快速保护,保护动作后跳进线开关以及相邻的母联开关,在保证设备和人员安全的前提下,最大限度缩小停电范围。该项目光传感器共配置 29 个,安装在各开关柜的母线室,监视主母线和分支小母线。保护装置光输入通道共预留 43 个,可满足今后扩建的要求。上述配置方案简洁明了,较国外同类产品的复杂配置,减少了用户的维护难度,深受用户好评。装置投运以来,运行情况良好。

5 结束语

随着国家对中低压配电系统安全运行要求的提高,电力公司、电厂、工业企业的新建项目已逐步将电弧光保护作为开关柜招标技术规范的技术要求之一,而且呈至上而下的发展趋势,如云南电网公司 2010 年发文“关于在中低压开关柜加装电弧光保护的通知”,江西省电力公司农电工作部 2011 年发文“关于推广使

用电弧光保护产品的通知”等。此外,为了在设备选型、试验、安装、运行等环节有章可循,全国量度继电器和保护设备标准化技术委员会已组建工作组,起草国家标准《弧光保护装置技术要求》(项目编号为20130678-T-604),预计2014年发布。该标准将助力弧光保护推广的有序进行,电弧光保护的应用将更加广泛,电力系统稳定、设备和人员的安全,都将会得到进一步提高。

参考文献:

- [1] 田广青. 电弧光保护及其在中低压开关柜和母线保护中的应用[J]. 电工技术杂志, 2004(1): 27-30.
- [2] 王梅义. 高压电网继电保护运行与设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 138-139.
- [3] 吴志勇. 电弧光保护在电力系统的应用[J]. 四川电力技术, 2009, 32(4): 49-51.
- [4] 安连生. 应用光学 [M]. 3 版. 北京: 北京理工大学出版, 2003: 112-113.
- [5] SIDHU T S, SAGOO G S, SACHDEV M S. Multi Sensor Secondary Device for Detection of Low-level Rcing Faults in Meta-lclad MCC Switchgear Panel [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(1): 129-134.
- [6] 万山景, 王 坚, 张梓望. 电弧光保护系统配置方案探讨 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 99-103.
- [7] 王德志, 张爱萍. 电弧光保护在应用实践中的改进 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 230-231.

作者简介:

牛洪海(1980),男,辽宁鞍山人,工程师,从事电厂继电保护及自动化装置研发工作;
严 伟(1975),男,湖南长沙人,高级工程师,从事电气主设备微机保护的研究、开发和管理工
王 杰(1984),男,山西霍州人,助理工程师,从事厂矿继电保护及自动化装置研发工作。

Design and Application of Arc Protection for LV/MV Busbar

NIU Honghai, YAN Wei, WANG Jie

(Nanjing NARI-relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: This paper analyzes the necessity of arc protection for the low-voltage/medium-voltage switchgear and busbar. By taking PCS-9656 arc protection device as an example, the designing principles and key technologies, as well as the specific application of the arc protection are presented. The field operation and simulation results show that the arc protection device can quickly and accurately cut off the faults in milliseconds, and protect busbar and switchgear.

Key words: arcc protection; photometry cosine law; passive optical sensor; power frequency variation

(上接第 55 页)

- [2] 张 钰, 杨晓慧. 2012 年江苏省电厂电气一次设备红外检测及分析[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(04): 66-69.
- [3] GB1984—2003 高压交流断路器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [4] GB/T 11022—2011 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

作者简介:

高 雷(1982),男,江苏徐州人,工程师,从事电气一次设备检修维护工作;
肖立军(1979),男,辽宁朝阳人,工程师,从事电气一次设备检修维护工作。

Analysis and Recommendation on Contact Overheat of Low-voltage Field Discharge Switch

GAO Lei, XIAO Lijun

(Shenhua Guohua TaichangPower Generation Co. Ltd., Taicang 215433, China)

Abstract: The harm of contact overheat of a frame type switch is introduced by taking the example of the shutdown of the No.8 generator units in Guohua Taidian power plant caused by the overheat of the main contact of field discharge switch. The reason causing main contact overheat of field discharge switch is analyzed, and is believed to be the increase of contact resistance. The effects of contact pressure, contact material, contact temperature and surface condition of contact on contact resistance are discussed. Based on these analysis, effective preventing and handling measures are proposed to ensure safe operation.

Key words: field discharge switch; contact overheat; contact resistance

特高压淮南—上海输变电工程新施工技术的应用

鲁俊荣¹, 宋念达¹, 宋丹¹, 熊化吉², 严行健³

(1.江苏省宏源电力建设监理有限公司,江苏南京 210036;2.江苏省送变电公司,江苏南京 210028;
3.江苏省电力公司,江苏南京 210024)

摘要:1000 kV 特高压淮南—上海输变电国家重点工程的地形和地质条件十分复杂,给施工带来了困难。针对该工程,采用了新型旋挖钻机、新式索道运输机和具有过载保护功能机动绞磨等3项新技术,解决了施工难题,取得了较好的经济效益和社会效益。

关键词:特高压;输变电工程;施工;新技术

中图分类号:TM752

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)01-0060-03

建设1000 kV特高压淮南—上海输变电工程,对于推动和提高我国输变电施工技术升级,带动国内相关科研、设计部门的技术创新,提高电力及相关的整体技术和综合实力,都具有重要意义。该工程施工过程中,采用新型旋挖钻机、新式索道运输钢管塔和具有过载保护功能机动绞磨新技术,减轻了施工劳动强度,提高了施工效率。

1 工程概况

1000 kV 淮南—上海输电线路工程是国家电网特高压骨干网架的重要组成部分,是我国首条1000 kV同塔双回路输电工程。线路起自安徽淮南变电站,止于上海沪西变电站,线路总长度为2×647 km,铁塔1411基。在特高压线路中使用的钢管塔技术,可以大大增强塔身结构性能、强度、刚度,实现同塔双回路甚至多回路架设,缩小线路所需的走廊宽度,节约土地资源。

该工程线路经过安徽、江苏、浙江、上海等4个省市,地形和地质条件十分复杂,主要地形有河网、山地丘陵、水田等,而钢管塔重型构件最大单件达到直径1 m、长度12 m、质量5 t,给施工带来了困难。

2 新施工技术的应用

2.1 新型旋挖钻机在淮河大跨越灌注桩中的应用

2.1.1 淮河大跨越项目背景及新型旋挖钻机的特征

该工程淮河大跨越项目位于安徽省淮南市东北方向15 km,左岸跨越位于淮南市潘集区高皇镇汤渔湖行洪区内,右岸跨越位于淮南市大通区洛河镇洛河洼行洪区内。跨越段属于淮河冲击平原区,跨越塔所在的2个行洪区地形平坦开阔,现均为农田。基础根据杆塔基础的设计载荷、水文和工程地质,该大跨越杆塔确认选用灌注桩^[1]。

R-415型新型旋挖钻机作为灌注桩中的一种施工工艺设备,已越来越广泛地应用到桩基工程中。与其他钻孔灌注桩相比,其成孔方式、适用范围及在环境保护等方面均有一定的优势。旋挖钻机还可配挂长螺旋钻、地下连续墙抓斗、振动桩锤等,实现其多种功能。适应的地层主要为:黏性土、粉土、砂土、碎石土、全风化基岩及人工填土。具有大扭矩动力头和自动内锁式伸缩钻杆的钻机,可以适应微风化岩层的施工^[2]。结合该工程淮河大跨越项目具体情况,决定采用旋挖钻孔作为灌注桩的施工设备。

2.1.2 旋挖桩成孔施工过程中常见问题及解决方法

(1) 易出现孔壁坍塌,发生埋钻现象,在砂性土、饱和软土及厚度较大的卵石层中经常发生。遇到这些地层时,可采取加深护筒以及使用优质泥浆解决。新型旋挖机钻头直径略大于护筒直径,正好适用工艺施工要求,保证成孔过程中孔壁的稳定。

(2) 旋挖钻进成孔后,孔底沉渣较厚,有的工程沉渣厚度甚至达到6 m,清孔难度很大。由于砂性土层易受扰动的影响,如果不采用合适的旋挖钻头,很难保证有效施工。该机改用双层底的旋挖钻头,解决了这一施工难题。

(3) 在卵砾石、强(中)风化岩层及较硬的黏土层中,钻进效率比较低。对于卵砾石与强(中)风化岩层,该机改用多用钻头,灵活方便,也能在微风化基岩中进行施工。

(4) 桩孔存在局部缩颈现象,这与地基土层的特性以及泥浆的性能等因素有关。当地基土层为流塑状的软土及松散的砂性土,采用与套筒等径钻头和套管跟进、再用优质泥浆灌注等方法加以解决。

综上所述,杆塔基础作为输电线路的重要组成部分,其造价、工期和劳动消耗量在线路工程中占很大比例。建议杆塔基础尽可能采取合理的结构形式,减少基础所受的水平力和弯矩,改善基础受力状态;其次尽可

能充分利用原状土地基承载力高、变形小的良好力学性能,因地制宜采用原状土基础。灌注基础适用于地下水位高的黏性土和沙土等基础,不足之处是施工需要大型机具,施工工艺要求较高,费用昂贵,建议尽可能少用^[3]。

2.2 新式索道运输钢管塔重型构件新技术的应用

该工程线路经过淮河平原地区,沿线河、沟渠、塘湖均比较发达,呈零星分布,地形较平坦,以粉质黏土为主,局部夹杂粉及淤泥质土,地下水位埋深为0~2 m。其中有14基塔位于汤渔湖行洪区,5基塔位于洛河行洪区中,地质情况分类为:普土76.5%,水坑3.7%,泥坑19.8%,交通极为不便。目前在特高压铁塔运输方面还没有相关经验,钢管塔构件等材料在河网等地区的运输必需采用运输钢管塔重型构件等新技术。

在输电线路施工中,交通方便地区常用的塔材运输方案一般为车辆运输。而该工程钢管塔运输则需要增加其他运输方案,主要有索道运输、河道索道运输新技术。

2.2.1 索道架设工艺

索道运输的优点是利用其空中运输优势,可以完全不受地面地形的影响。缺点是投入的工器具、人力较多,架设索道的时间也较长,成本很高。其架设工艺如图1所示。

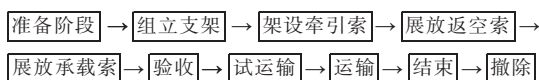


图1 索道架工艺

为了保证索道运输安全,必须对整个索道系统进行受力计算。索道运输受力如图2所示。

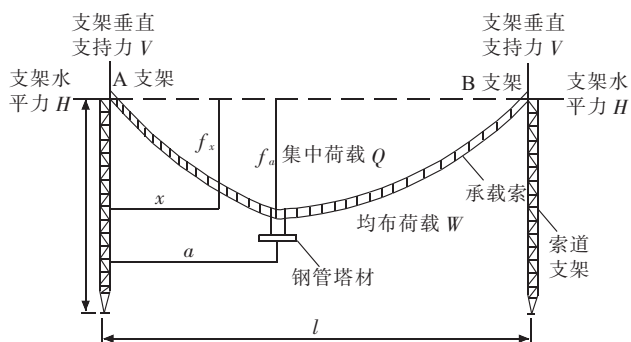


图2 运输索道受力示意图

一般认为索道两侧支架为等高,当钢管运输至离支架A距离为 a 时,承载索距离支架A距离 x 处的孤垂为:

$$f_x = \left(\frac{Q}{H} \cdot \frac{l-a}{l} \right) x + \frac{H}{\omega} \left[\operatorname{ch} \frac{l\omega}{2H} - \operatorname{ch} \frac{(\frac{l}{2} - x)\omega}{H} \right] \quad (1)$$

式中: f_x 为钢管运输至离支架A距离为 a 时,承载索距离支架A距离 x 处的孤垂; Q 为钢管产生的集中荷载;

l 为运输索道档距; ω 为承载索单位长度自重。式(1)主要用于验算承载索对地面障碍物的安全距离,当 x 为 a 时,即为验算钢管悬挂点处的孤垂。承载索的最大张力 N 出现在支架悬挂点,其值为:

$$N = \sqrt{V^2 + H^2} \quad (2)$$

其中 V 为支架垂直支持力,A支架处为 V_A ,B支架处为 V_B ,计算公式为:

$$V_A = Q \frac{l-a}{l} + H \operatorname{sh} \frac{l\omega}{2H} \quad (3)$$

$$V_B = Q \frac{a}{l} + H \operatorname{sh} \frac{l\omega}{2H} \quad (4)$$

2.2.2 河道采用索道运输钢管塔

该工程经过河网地区较多,考虑重型钢管运输无法通过一般型桥梁,而绕道距离较远,因此需要采取有效合理重型钢管过河方案。当河流跨度在50 m以内时采用河道索道进行过河运输是较为经济的运输方案。河道索道运输的整体示意如图3所示。河道架设工艺和普通索道架设工艺类似。

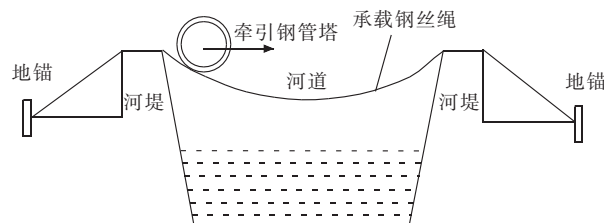


图3 河道索道运输钢管塔示意

由于该索道运输方案跨越档距较小,钢丝绳的重量和运输的钢管相比为较小的量,为了简化计算并且偏于安全,钢丝绳的自重按集中荷载的方式作用在中点。当钢管运输至中点时,索道系统简化的受力如图4所示。

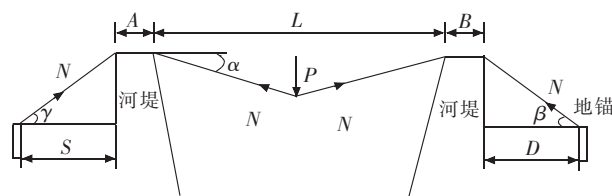


图4 河道索道系统受力分析

首先根据钢管的质量由多少根承载索共同承担,按照不平衡系数1.2进行分配,即:

$$P = 1.2 \frac{G}{n} + G' \quad (5)$$

式中: P 为作用在钢丝绳中间的集中荷载总值; G 为钢管自重; n 为索钢丝绳总根数; G' 为单根承载索钢丝绳在 L 档距范围内质量。从图4可以看出,钢丝绳的轴线张力 N 为:

$$N = \frac{P}{2 \sin \alpha} \quad (6)$$

承载索的总长度 $L_{\max}$:

$$L_{\max} = \frac{L}{\cos \alpha} + A + B + \frac{S}{\cos \gamma} + \frac{D}{\cos \beta} \quad (7)$$

地锚的水平抵抗力 H 为:

$$H = \max(N \cos \gamma, N \cos \beta) \quad (8)$$

地锚的数量抗拔力 T 为:

$$T = \max(N \sin \gamma, N \sin \beta) \quad (9)$$

实际使用参数值大于以上计算,使用情况很好。

河道索道运输方案由于其投入的工器具、设备较为简单,运输方便,因此在大型设备无法进入的一般跨河运输可以优先考虑。由于其局限性,一般用于跨度不大于 50 m 的河流,同时,河流两岸的地质条件也必须满足索道地锚承载力的需要。

2.3 具有过载保护功能机动绞磨的应用

由于该工程的特殊性,设备单件超长超重,吊装困难,高空作业多,防护要求高;大跨度、大重量、超高度的构架吊装组立等关键工序的施工难度大,安全风险高;从环境的角度来看,施工条件恶劣,线路 38% 多为山区丘陵,27% 为河网泥沼,给现场安全施工带来很大难度。在该工程中使用更加灵活的机动绞磨配上过载保护装置,为钢管塔组立、吊装、牵引和紧线施工等关键工序从装备上提供了安全保障。

目前国内的普通机动绞磨一般都没有过载保护功能,机动绞磨在启吊和牵引时,操作人员对钢丝绳受力等不安全因素较难估计,凭经验来操作掌控。如果经验不足,在操作时就会造成事故隐患,轻则毁物,重则伤人,所以机动绞磨的安全使用在施工安全中非常重要。

2.3.1 过载保护系统构成

JM-50C 机动绞磨的基本参数。额定负载/牵引速度:50 kN/4.5 m, 20 kN/11m; 动力配置:汽油机(9.6 kW);手拉启动。电子拉力传感器额定负载:50 kN;工作环境要求:能防水、防震、防尘。

该系统主要由机动绞磨、电子拉力传感器、显示和控制仪器、直流电驱动的执行机构、直流电源以及相关的连接附件等组成。其中仪表、执行机构和直流电源安装在机动绞磨上,执行机构通过连杆与机动绞磨的离合器进行连接;电子拉力传感器串接在机动绞磨的拉环与地锚之间。机动绞磨过载保护系统整体原理如图 5 所示。

2.3.2 系统工作原理

由输入装置,可对机动绞磨过载保护系统设定过载保护值。电子拉力传感器串接在机动绞磨的拉环和地锚之间,可检测绞磨所承受的负载,传感器的输出信号送至系统测量控制模块,经信号处理后转化为数字量,一方面送至显示装置,实时显示拉力数值,同时送

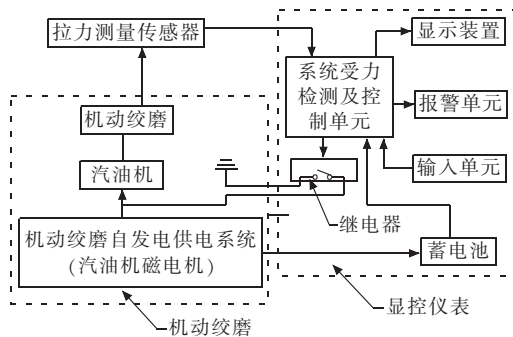


图 5 机动绞磨过载保护系统整体原理

至逻辑模块进行判断处理。如逻辑模块判断拉力值大于预定过载保护值,则一方面发报警信号报警,另一方面发动机信号值电动执行机构,电动执行机构动作,驱动离合器,分离机动绞磨的动力机构和绞磨本身达到保护自助。

该设备直接应用于同塔双回路线路施工,消除了事故隐患,确保了安全生产。

3 结束语

该工程在淮河大跨越灌注桩中采用了新型旋挖钻机;在重型钢管塔构件不可运输的环境中成功应用了索道运输新技术;在吊装、牵引等施工过程中成功使用具有过载保护机动绞磨新技术。这 3 项新技术为该工程淮河大跨越灌注桩、钢管塔运输和组立施工及紧线施工等关键工序从装备和技术上提供了安全保障,促进了国内送电施工技术水平的提高,为电网施工技术的进一步发展打下了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 国家电力公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 2 版. 北京:中国电力出版社,2012:21-25.
- [2] 钟玉龙. 旋挖钻机主要技术参数的选择及在桩孔施工中的钻头选用[J]. 安装,2006(5):46-47.
- [3] 严行健,付 慧. 特高压输电线路工程部分关键技术[J]. 江苏电机工程,2006,25(S):1-6.

作者简介:

- 鲁俊荣(1974),男,江苏宝应人,工程师,从事送变电工程施工技术研究工作;
- 宋念达(1987),男,安徽宿州人,助理工程师,从事输变电技术及管理研究;
- 宋 丹(1985),男,安徽宿州人,助理工程师,从事输变电技术及管理研究;
- 熊化吉(1971),男,江苏宿迁人,高级工程师,从事工程施工监理和设备监理工作;
- 严行建(1945),男,湖南长沙人,高级工程师,从事输变电技术研究工作。

(下转第 64 页)

开闭所开关柜排列方式对配网运行检修的影响

沈 忱

(南京供电公司,江苏 南京 210019)

摘 要:针对近年来 10 kV(20 kV)配电网开闭所典型故障案例,分析了开关柜排列方式对配网运维检修的影响,通过对开关柜 2 种排列方式的比较,给出了改进意见,建议采用分离式排放开关柜,以降低开闭所整体故障率,避免双回路同时停电,缩小故障停电范围,提高供电可靠率。

关键词:开闭所;排列方式;母联

中图分类号:TM672

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)01-0063-02

在城市配电网中,尤其是负荷密集区域建设开闭所是提高配电网运行可靠性和经济性的有效手段。合理设置开闭所,可加强对配电网的联络控制,提高配电网运行方式的灵活性^[1]。特别是遇到线路、设备检修或发生故障时,开闭所运行方式和操作的灵活性优势就得以体现。可通过一定的倒闸操作使得停电范围缩小,甚至不停电。同时,开闭所一般都由来自不同变电站或同一变电站不同 10 kV(20 kV)母线的两路或者多路相互独立的馈线供电,确保重要用户的供电。通过对开闭所近年来故障情况的分析,发现开闭所发生单一母线段短路故障时,产生的单一间隔跳闸往往影响另一段母线的跳闸。该现象严重影响了开闭所分段用户的用电可靠性,扩大了停电范围,也给抢修提高了难度。开闭所的开关柜排列方式有合并式排放和分离式排放 2 种。在多起事故中发现造成两段母线同时短路故障的开闭所均为合并式排放,可见开关柜的排列方式对开闭所整体的故障率具有一定的影响。

1 开闭所故障分析

1.1 典型故障实例

2011 年 10 月 31 日 18:06 江边变 10 kV 幕府佳园 1 号线 163 开关过流 I 段保护动作跳闸,10 kV 幕府佳园 2 号线 263 开关过流 I 段保护动作跳闸,同时 10 kV I 段母线单相接地。经现场勘察 1 号开闭所母联 110 开关与 102 开关支柱瓷瓶绝缘被击穿,同时短路弧光造成母联柜隔板击穿 II 段母线跳闸。事故导致幕府佳园小区大面积停电。2012 年 12 月 24 日 18:59 丰富变 10 kV 人防 1 号、2 号线同时过流 I 段动作跳闸,正洪街开闭所母联翻牌柜烧坏。

2013 年 1 月 15 日 20:39,夹河变旭日 1 号线 135 开关过流 I 段动作,同时桥北线 187 开关过流 I 段动作;21:56,浦口变桥北线 187 开关过流 I 段动作重合不成。旭日华庭小区开闭所严重烧毁,导致小区整体

失电。

1.2 开闭所短路故障类型的判据

开闭所通常采用单母线分段的结构,每段母线有一回进线,若干回出线,母联断路器在正常运行时处于分断位置。设开闭所进线断路器为 DL_1 ,开闭所出线断路器为 DL_{2m} ^[2]。设流过 DL_1 的电流为 I_1 ,流过 DL_{2m} 的电流为 I_{2m} 。

判据一。第 m 回出线短路的充分必要条件为:

$$I_{2m} > I_e \quad (1)$$

其中, $m \in [1, a]$, a 为本段母线的出线数量; I_e 为最大负荷电流值。

判据二。母线短路的必要条件为:

$$\begin{cases} I_1 > \sum_{m=1}^a I_{2m} + I_e \\ I_{2m} < I_e \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\forall m \in [1, a]$

否则,必定不是母联短路击穿故障,可见母联短路的必要条件相当苛刻。从实际故障统计分析来看,开闭所发生单一回路故障以及单一进出线断路器故障的数量占开闭所故障的大多数。

1.3 开闭所故障原因分析

故障中单段母线的短路电流弧光和爆炸产生的高温会导致母联柜隔板被电击穿和融化,使得短路电流不通过母联开关直接延伸至 II 段母线,造成开闭所双母线跳闸停电。该类型的故障停电范围广,抢修施工难度大。事故中开闭所均为合并式排放,可见合并式排放开关柜母联在发生单段母线故障时存在母联柜隔板被击穿的安全隐患。

2 开闭所开关柜排列方式的比较

开闭所合并式排放的开关柜母联均采用铜排硬连接,设有单一母联开关,母联柜顶部由柜体隔板相互分离;分离式排放的开关柜母联采用电缆软连接,在两段母线两侧设有独立母联开关,除电缆连接部分不存在

任何相互联通的路径,独立性明显^[3],将单段母线发生故障甚至爆炸时对二段母线的的影响降到了最低,避免了由母联柜隔离挡板击穿引起的停电范围扩大到二段母线的重大事故的发生。

在开闭所整体更换开关柜时,分离式排放的开关柜因具有双母联开关,在整体更换时可减少双回路重复停电,增加供电可靠率。合并式排放的开关柜在整体更换时,在考虑工作量以及减少停电范围的基础上需要申请停电3次,其中包括一次双回路同时停电。更换合并式排放的开关柜步骤如下:申请二段母线进线开关拉开,更换二段母线开关柜并断开母联柜与母排的搭接部分并拆除原有母联铜排;申请一段母线进线开关拉开,更换一段母线开关柜及母联部分;申请双回路进线同时停电,搭接母联柜。而整体更换分离式开关柜只需拉开母联,及相对应母线段的进线开关即可开展开关柜更换工作。

开闭所内部开关柜的土建基础固定,在更换设备尤其是在抢修时需要考虑设备的大小与基础的匹配程度。开闭所更换某一段母线开关柜时,开关柜合并式排放的基础长宽对设备的影响远大于分离式排放,有时必须调用相同厂家的同型号的开关柜用于拼装。由于寻找与基础匹配的备品备件从而导致抢修工作无法在第一时间开展,这一问题在目前开闭所抢修改造工作中愈显突出。而开闭所采用分离式排放开关柜时,两段

基础相互独立,尤其是在初次投建时留有一定裕度的情况下,两段开关柜可以搭接各类厂家的不同柜型,在将来开闭所扩建时也减少了土建基础的二次投入。

3 结束语

综上所述,开闭所开关柜分离式排放有利于减少开闭所内双回路之间的不良影响,在单回路发生故障时,最直接地保护二段母线的正常供电,在开闭所整体更换工程中减少双回路停电,可显著提高用户供电可靠率。分离式排放可减少开闭所原有基础对于开关柜的选型影响,可以避免抢修过程中备品备件的不匹配,大大缩短停电时间,在设备改造过程中也可以灵活拼接不同型号的柜型。因此,建议采用分离式排放开关柜,以降低开闭所整体故障率,提高供电可靠率。

参考文献:

- [1] 张大立. 城市中压配电网接线与开闭所配置[J]. 电网技术, 2007,31(7):83-86.
- [2] 卢志刚,陈金阳. 基于负载率的配电网变电站与开闭所规划[J]. 电网技术,2009,33(6):63-69.
- [3] 李荣峰. 试论提高城市配电网供电可靠性[J]. 广西电业,2005(1):73-75.

作者简介:

沈 忱(1989),男,江苏南京人,助理工程师,从事配网设备运行检修管理工作。

The Impact of Switchgear's Arrangement in Switch Station on the Operation and Maintenance of Distribution Network

SHEN Chen

(Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: This paper analyzes and compares the impact of switchgear's arrangement in 10 kV (20 kV) distribution network's switch station on the operation and maintenance of the distribution network in recent years. Through the analysis of daily power failure and the comparison of switchgear's two kinds of arrangements, separation type switchgear is recommended to reduce overall failure rate of switch station. Also the arrangement of separation type switchgear can also avoid double-loop power failure at the same time, which narrows the scope of power failure and improves power supply reliability rate.

Key words: switch station; arrangement; bus-tie

(上接第 62 页)

Application of New Constructive Technology in the Ultra-high Voltage Huainan-Shanghai Power Transmission and Transformation Project

LU Junrong¹, SONG Nianda¹, SONG Dan¹, XIONG Huaji², YAN Xingjian³

(1. Hongyuan Electric Power Construction Supervision Co. Ltd., Nanjing 210036, China;

2. Jiangsu Electric Power Transmission & Transformation Corporation, Nanjing 210028, China;

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

Abstract: The complexity of topographical and geological conditions of the 1000kv ultra-high voltage Huainan-Shanghai power transmission and transformation project brings great challenges to construction. Three new technologies, namely new rotary drilling rig, new conveyor, and overload protected motor-drive grinding, are adopted to tackle with the difficult encountered in the project. The utilization of these three new technologies brings remarkable economic and social benefits.

Key words: ultra-high voltage; transmission and transformation project; construction; new technology

江苏省火力发电机组二氧化碳排放量估算

孙栓柱, 代家元

(江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:通过对火力发电机组二氧化碳排放量核算3种方法的详细解析,总结了排放因子法、物料衡算法、实测法的特点,结合江苏省电力行业机组结构状况及行业统计数据,如发电量、煤耗等,最终选取排放因子法,估算了全省年度二氧化碳排放量及二氧化碳排放因子。

关键词:火力发电机组;二氧化碳排放量;排放因子法

中图分类号:X511

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)01-0065-03

为了进一步激励企业降低排放水平,用更低成本实现碳减排目标。2011年10月,国家发改委确定北京、天津、上海、重庆、广东、湖北、深圳等7省市进行碳交易试点工作,计划在2013年正式实施试点工作,电力行业作为最大的二氧化碳排放源,被纳入范围已成定局。由于燃煤火力发电企业既存在能源消耗产生的二氧化碳排放,又存在脱硫工艺过程中产生的二氧化碳排放,二氧化碳排放量的统计过程比较复杂^[1,2]。另外由于国内对二氧化碳的排放核算工作开展较晚,国内应用的排放因子数据目前基本参照国际机构公布的排放因子,而这些排放因子是国外机构根据国外的煤质及火电机组燃烧情况研究得出的,与国内实际情况并不完全吻合,完全套用该算法可能与实际情况存在一定的偏差。因此,需要对电力行业的二氧化碳排放量统计方法进行研究,进而分析火力发电行业二氧化碳总排放量,为科学制定碳排放控制目标、合理分配碳交易配额奠定基础。

1 火力发电机组二氧化碳排放量计算方法

目前国际或国家组织制定的二氧化碳排放量核算原理主要有物料守恒法、实测法和排放因子法,其中以排放因子法为主。目前国际上最主要的3种核算标准ISO14064:2006、PAS2050、《温室气体协议:企业核算和报告准则》(GHG)的基本原理均以排放因子法为主。

1.1 排放因子法

排放因子法主要通过排放因子计算二氧化碳的排放量,而排放因子目前均由专业机构根据以往的数据统计得出的经验值,专业机构包括中国国家统计局、政府间气候变化专业委员会(IPCC)、英国环境、食品及农村事务部(DEFRA)等。目前我国应用的排放因子也是基于IPCC提供的《2006年IPCC国家温室气体清单指南》的数据。

排放因子是为电力企业消耗的各类燃料提供一组缺省排放因子,用于估算不同类别燃料类型的电力企业二氧化碳排放量,根据燃烧的燃料不同,缺省排放因子也不同,计算公式^[3]如下:

$$E_{\text{CO}_2} = C_{\text{m,燃料}} \times EF_{\text{CO}_2} \quad (1)$$

式中: E_{CO_2} 为二氧化碳排放量; $C_{\text{m,燃料}}$ 为燃烧的燃料热量(TJ); EF_{CO_2} 为二氧化碳排放因子,按燃料类型给出的二氧化碳排放因子(kg/TJ)为:

$$EF_{\text{CO}_2} = EF_{\text{C}} \times O \times \frac{44}{12} \times q \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中: q 为燃煤热值(kJ/kg); EF_{C} 为碳排放因子(kg/GJ),代表单位热值化石燃料含碳量,在理想的燃烧条件下,燃料中所含碳将全部转化为二氧化碳; O 为碳氧化因子,代表煤中碳元素转换成二氧化碳的百分比例。据IPCC公布的统计数据,锅炉未完全燃烧损失大致为0.6%~6.6%,主要包括飞灰含碳量、灰渣含碳量2种形式,IPCC机构默认的煤种碳氧化因子为0.98^[4]。

对于二氧化碳,排放因子主要取决于燃料的碳含量。燃烧条件(燃烧效率、在矿渣和炉灰等物中的碳残留)相对不重要。其中碳排放因子计算模型可简化为:

$$EF_{\text{C}} = C_{\text{C,燃料}} / q \times 10^4 \quad (3)$$

式中: $C_{\text{C,燃料}}$ 为燃料的固定碳含量(%); q 为燃煤热值(kJ/kg)。修正后二氧化碳排放因子、二氧化碳排放量计算公式分别为:

$$EF_{\text{CO}_2} = C_{\text{C,燃料}} \times O \times \frac{44}{12} / 100 \quad (4)$$

$$E_{\text{CO}_2} = C_{\text{m,燃料}} \times C_{\text{C,燃料}} \times O \times \frac{44}{12} / 100 \quad (5)$$

1.2 物料衡算法

根据物质守恒定律,在生产过程中对于某种特定元素和物质是守恒的。火电行业的二氧化碳排放主要包括燃料燃烧过程排放和脱硫过程排放两方面。即:

$$E_{\text{CO}_2} = E_{\text{CO}_2, \text{燃烧}} + E_{\text{CO}_2, \text{脱硫}} \quad (6)$$

式中: $E_{\text{CO}_2, \text{燃烧}}$ 为燃料燃烧过程产生的二氧化碳排放量;

$E_{\text{CO}_2, \text{脱硫}}$ 为脱硫过程的二氧化碳排放量。

(1) 燃料燃烧的二氧化碳排放量。能源燃烧排放的二氧化碳来自燃料燃烧过程中的碳释放，二氧化碳的排放量取决于燃料中的含碳量。在燃烧过程中，大部分碳立即以二氧化碳的形式排放，而少部分碳是其他形式排放例如颗粒物烟灰或灰渣中的碳，其中未氧化的碳不计入温室气体排放总量中。

(2) 脱硫过程的二氧化碳排放量。当脱硫系统中脱硫剂采用 CaCO_3 时，无论是干法还是湿法，则在脱硫系统生产工艺过程中将会产生二氧化碳的排放，可通过脱硫系统进出口在线监测系统数据以及脱硫系统其他参数推算脱硫过程中二氧化碳排放量。

1.3 实测法

实测法即针对电力企业的实际排放数据开展大量的实际测量工作，记录排放烟气中二氧化碳的排放浓度、排放烟气量等主要参数数据，从而计算单个电力企业的二氧化碳排放量。

$$E_{\text{CO}_2} = \varphi_{\text{CO}_2} \times V_{\text{标干}} \times 44/22.4 \quad (7)$$

式中： φ_{CO_2} 为烟气中二氧化碳含量； $V_{\text{标干}}$ 为标干状态下烟气体积量。

1.4 3 种方法对比分析

物料衡算法相对于排放因子法、实测法，计算过程相对复杂，涉及的环节、因素也较多，部分数据（如飞灰含碳量、脱硫剂耗用量等）统计较为困难；而实测法是通过开展现场试验工作计算得到机组排放量，现场工作最大，且由于流场分布复杂等不利因素，使得各类测速仪器、流量仪表无法有效应用于烟气量的测量^[5,6]，应用实测法统计出来的二氧化碳排放量较难保证其准确性；排放因子法作为国内外二氧化碳排放量的首选核算方法，计算结果的准确性相对较高，且计算过程较其他 2 种方法相对简单。

2 江苏省火力发电机组二氧化碳排放量估算

鉴于上述分析，文中选取排放因子法来估算江苏省火力发电机组二氧化碳排放量。

2.1 火力发电机组装机结构分析

江苏省火力发电机组以大型燃煤机组为主，其中截至 2012 年底，135 MW 及以上燃煤发电机组占比达 84.36%，如图 1 所示。其中燃煤机组中，以湿法脱硫机组为主，约占 87.64%，如图 2 所示。

2.2 火力发电行业排放因子估算研究

江苏是煤炭资源的匮乏省份，省内火电机组燃用动力煤绝大部分从外省（如山西、安徽等）引进，火电机组掺烧褐煤情况非常普遍，尤其是在电煤供需失衡时。近 4 年全省火电燃用动力煤成分分析如表 1 所示。

考虑到江苏火电行业中 135 MW 及其以上容量机

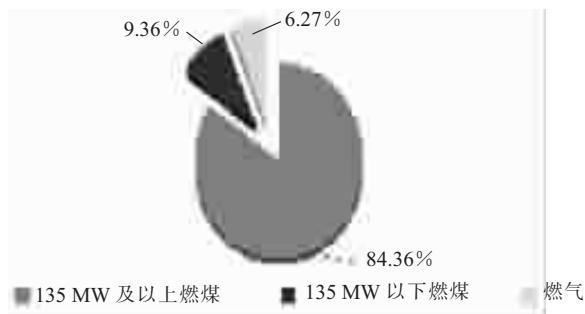


图 1 江苏省火力发电机组装机结构

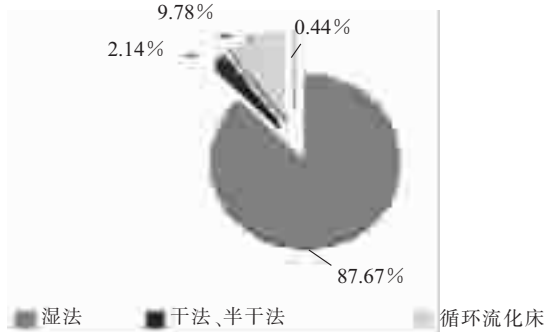


图 2 江苏省燃煤发电机组脱硫设施情况分析

表 1 江苏省 2009~2012 年火力发电燃煤情况

年度	收到基低位发热量/(kJ·kg ⁻¹)	收到基固定碳/%	空干基全硫/%
2009	19 811.4	52.4	0.81
2010	19 777.1	52.3	0.79
2011	19 602.0	51.9	0.74
2012	20 055.1	53.1	0.76

组比例达到 84.36%，机组的燃烧效率普遍偏高，故碳氧化因子按照 0.98 计算，得到近 4 年江苏省火电机组二氧化碳排放因子，如表 2 所示。

表 2 江苏省 2009~2012 年火电机组二氧化碳排放因子

年度	收到基低位发热量/(kJ·kg ⁻¹)	收到基固定碳/%	二氧化碳排放因子/(kJ·kg ⁻¹)
2009	19 811.4	52.4	1.884
2010	19 777.1	52.3	1.879
2011	19 602.0	51.9	1.865
2012	20 055.1	53.1	1.908

2.3 火力发电行业年度二氧化碳排放量估算

2.3.1 火力发电行业指标

“十一五”期间，江苏省火电装机容量飞速发展，发电量也保持高速增长，但随着 600 MW、1000 MW 等级大机组新建投产以及替代小机组的关停，全省火电行业的供电煤耗却一直均在下降，表 3 即为 2009~2011 年期间江苏省火电机组上网电量、供电煤耗等数据如表 3 所示。

2.3.2 二氧化碳排放量

表3 江苏省2009~2011年火电机组上网电量和煤耗情况

年度	上网电量×10 ⁹ / (kW·h)	平均供电煤耗 / [g·(kW·h) ⁻¹]
2009	2797	315.7
2010	3166	313.0
2011	3735	311.8

江苏省二氧化碳排放量计算公式为:

$$B_{\text{标煤}} = W_{\text{上网}} \times b_{\text{供电}} \quad (8)$$

$$B_{\text{原煤}} = B_{\text{标煤}} \times 29271 / q_{\text{全省}} \quad (9)$$

$$E_{\text{CO}_2} = B_{\text{原煤}} \times EF_{\text{CO}_2, \text{年度}} \quad (10)$$

其中: $W_{\text{上网}}$ 为全省火电机组上网电量; $b_{\text{供电}}$ 为全省火电机组平均供电煤耗; $B_{\text{标煤}}$ 为全省火电行业动力煤量(标煤); $q_{\text{全省}}$ 为全省火电行业燃煤平均热值; $B_{\text{原煤}}$ 为全省火电行业动力煤量(原煤); $EF_{\text{CO}_2, \text{年度}}$ 为年度二氧化碳排放系数。计算结果如表4所示。

表4 江苏省2009~2011年火电机组二氧化碳排放量估算

年度	二氧化碳排放因子 / [kg·(kW·h) ⁻¹]	二氧化碳排放量×10 ⁴ /t
2009	0.879	2.458
2010	0.871	2.756
2011	0.868	3.243

* 以电量计。

可以看出,随着发电容量的不断增大,江苏省二氧化碳排放量近几年一直保持10%以上的增长幅度,在燃用动力煤基本没有大的变化的同时,随着供电煤耗的下降,以电量计的二氧化碳排放因子维持持续下降趋势。

采用上述排放因子法,相对于实测法等可以简便快捷地统计出江苏省火电机组二氧化碳排放量,为全省开展碳交易试点、进行碳配额分配奠定了基础。

3 结束语

首先简要介绍了排放因子法、物料衡算法、实测法等3种二氧化碳排放量计算方法的计算模型,然后对3种方法进行了对比分析,最后结合江苏省火电行业数据,估算了全省火电行业2009~2011年二氧化碳排放量及排放因子,为电力行业“十二五”期间二氧化碳排放量计算统计提供理论基础,也为后续二氧化碳减排方案论证和实施提供了详实的数据支撑。

参考文献:

- [1] 吴晓蔚. 火电行业温室气体排放因子测算与排放量估算及减排对策[D]. 南京:南京信息工程大学,2010.
- [2] 刘焕章. 电站锅炉温室气体排放量的计算[J]. 热能动力工程,2007,22(6):23-27.
- [3] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R],Cambridge:Cambridge University Press 2006.
- [4] IPCC. IPCC Fourth Assessment Report. Climate Change 2007: The AR4 Synthesis Report[R].Cambridge:Cambridge University Press,2007:1-15.
- [5] 刘 鸿,周克毅. 锅炉飞灰测碳仪的技术现状及发展趋势[J]. 锅炉技术,2004,35(2):35-38.
- [6] 白江文,魏 威,周 强,等. 烟气排放连续监测系统及其常见故障分析处理[J]. 江苏电机工程,2011,30(3):78-80.

作者简介:

孙栓柱(1973),男,江苏徐州人,高级工程师,从事火力发电在线监测方向研究工作;
代家元(1985),男,河南信阳人,助理工程师,从事火力发电在线监测方向研究工作。

Research on the Estimation of Jiangsu Thermal Power Plant Carbon Dioxide Emissions

SUN Shuanzhu, DAI Jiayuan

(Jiangsu Frontier Electrical Power Technology Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Based on in-depth comparison of three different carbon dioxide emission accounting methods for coal-fired thermal power units, including the emission factor method, material balance method and experimental method, the main characteristics of the three methods are summarized in this paper. Then through analyzing the structural and statistical data, such as power generation and coal consumption of the power units in Jiangsu province, the emission factor method is adopted as a preferred method, and with this method, estimation of the carbon dioxide emission and carbon dioxide emission factors of Jiangsu province is performed.

Key words: thermal power unit; carbon dioxide emission; emission factor method

努力超越 追求卓越

某 600 MW 机组配煤掺烧试验与分析

陈孝武¹, 葛 伟², 张 军¹

(1. 东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096; 2. 华电电力科学研究院, 浙江 杭州 310030)

摘 要: 为研究掺烧对机组 NO_x 排放和锅炉效率的影响, 对某电厂 600 MW 超临界机组进行热态试验。分析了煤质特性、煤的组合方式、配风控制对机组 NO_x 排放和锅炉效率的影响, 阐述了不同工况 NO_x 的排放规律, 为电力生产企业优化燃烧过程, 降低燃料成本和污染物排放提供依据。

关键词: 褐煤; NO_x 排放; 锅炉效率; 燃烧调整

中图分类号: TM621.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)01-0068-04

由于设计煤采购困难, 越来越多的电厂大量燃用非设计煤种^[1-4]。另一方面, 为了降低燃料成本, 电厂也经常掺烧一些低成本的劣质煤。由于煤源较杂, 煤种多变, 电厂缺乏必要的煤质分析手段, 因而对煤质特性以及拟掺烧煤与锅炉设备的适应性认识不足, 导致在煤质发生较大改变时锅炉在运行过程中出现许多问题, 严重影响了锅炉的安全、经济运行。试验电厂地处沿海, 随着煤炭供应紧张, 电厂来煤趋于多元化, 目前常用的煤种主要有神混系列、优混、平混系列、准混系列、印尼煤、褐煤等, 燃用煤种偏离设计煤质较多, 影响锅炉的安全、经济运行。为了提高掺烧过程的科学性, 有必要对锅炉进行掺烧热态试验, 以优化掺烧过程, 提高掺烧过程机组运行的经济性, 降低污染物的排放, 从而降低供电成本。为此, 通过多工况热态试验, 探讨了不同煤质的煤组合、配风等对 NO_x 的排放浓度及锅炉效率的影响, 以指导锅炉燃烧调整。

1 试验方法

1.1 试验设备及试验过程简介

试验在某电厂 2 号炉上进行, 该锅炉为 600 MW 超临界变压运行螺旋管圈直流炉, 单炉膛、一次中间再热, 最大连续蒸发量为 1913 t/h。锅炉燃烧系统按配中速磨冷一次风直吹式制粉系统设计。24 只直流式燃烧器分 6 层布置于炉膛下部四角, 煤粉和空气从四角送入, 在炉膛中呈切圆方式燃烧。最上排燃烧器喷口中心标高为 34 919 mm, 距分隔屏底部 20 931 mm。最下排燃烧器喷口中心标高为 25 459 mm, 在主燃烧器和炉膛出口之间标高 44 099 mm 处布置有 1 组分离燃尽风(SOFA) 燃烧器喷嘴。主风箱设有 6 层强化着火煤粉喷嘴, 在煤粉喷嘴四周布置燃料风(周界风)。在每相邻 2 层煤粉喷嘴之间布置 1 层辅助风喷嘴, 其中包括上下 2 只偏置的辅助风(CFS) 喷嘴, 1 只直吹风喷嘴。主风箱上部设有 2 层紧凑燃尽风

(CCOFA) 喷嘴, 下部设有 1 层火下风(UFA) 喷嘴。在主风箱上部布置 SOFA 燃烧器, 包括 5 层可水平摆动的 SOFA 喷嘴。

按试验设计的工况调整锅炉的运行, 在试验期间保持锅炉稳定运行, 在给煤机取样口处采集原煤, 按质量比例混合, 用样品袋封装送检, 待工况稳定持续一段时间后采集飞灰和渣样封装送检。在试验过程中, 空预器进出口烟气温度测量采用 K 型热电偶, 精度为 I 级, 通过 Fluke 数字温度采集仪记录数据, 烟气组成采用型号为 Testo350XL 德国烟气分析仪进行分析; 采用红外测温仪 Raynger 3i, 从观火孔测量不同标高的炉膛温度; 部分运行数据从分布式控制系统(DCS) 历史工作站中采集。

1.2 试验用煤

电厂设计煤种为神府东胜煤, 由于煤炭市场供应量和价格因素的影响, 实际电力生产中煤种来源较为庞杂。试验中选用典型的神混煤、褐煤、印尼煤和平混煤等煤种, 此 4 类煤使用量大且来源较稳定, 其中褐煤和印尼煤的价格较便宜, 神混煤和褐煤均较容易结渣, 印尼煤和平混煤的结渣情况较好。典型煤种的试验可以为锅炉燃烧相近煤质煤提供参考。典型煤种试验煤质分析见表 1。褐煤收到基水分达到 34%, 热值较低, 氮元素含量与设计煤种和平混煤均较为接近, 但硫含量较低, 掺入后可以减少总的入炉硫含量。印尼煤的收到基含水量也较大, 低位发热量介于设计煤种与褐煤之间, 但氮元素、硫含量较高。神混煤和平混煤的煤质与设计煤种较接近, 其中神混煤的发热量略低于设计煤种, 而平混煤的热容量略高于设计煤种。根据稳燃判别指数^[5], 神混煤和平混煤的稳燃性能与设计煤种相近, 均为易稳燃, 褐煤和印尼煤则属于极易稳燃。

2 试验结果与分析

2.1 不同煤种组合的影响

试验主要考察了满负荷情况下掺烧低品质的褐煤

表 1 典型煤质分析 %

项目	神府东胜煤	褐煤	神混煤	平混煤	印尼煤
工业分析	收到基水分 Mar	13.00	34.00	16.90	13.90
	收到基灰分 Aar	14.00	2.91	15.70	11.48
	收到基挥发分 Var	25.55	32.40	24.23	26.51
	收到基固定碳 FCar	47.45	30.68	43.17	47.18
元素分析	收到基碳 Car	58.04	45.21	53.38	59.11
	收到基氢 Har	3.62	3.59	3.51	3.88
	收到基氮 Nar	0.70	0.71	0.68	0.76
	收到基硫 Sar	0.70	0.26	0.66	0.50
	收到基氧 Oar	9.94	13.31	9.17	10.36
低位发热量 / (J·g ⁻¹)		21 960	16 380	20 240	22 620
				18 940	

以及印尼煤对运行的影响。试验过程中机组负荷为 600 MW,控制氧量在 2.6%左右,每台磨(A-F)对应一层燃烧器,燃烧器最下层为 A 层,最上层为 F 层。进行了 3 个工况的试验,工况一燃用神混煤、褐煤、平混煤,三者的质量比为 31:11:10,其中 A、B、C 磨上神混煤,D 磨上褐煤,E 磨上平混煤,F 磨停用;工况二进一步掺烧品质最差的褐煤而停烧品质最好的平混煤,神混煤与褐煤的质量比为 62:38,为此采用 6 磨运行方式,其中 A、C、E、F 磨上神混煤,B、D 磨上褐煤;工况三掺烧煤质处于神混煤和褐煤中间的印尼煤以取代部分神混煤,神混煤、印尼煤、褐煤三者的质量比为 32:30:38,其中 A、F 磨上神混煤,B、D 磨上褐煤,C、E 磨上印尼煤。不同煤组合下的试验结果如表 2 所示。

表 2 不同煤组合下的试验结果

参数	工况一	工况二	工况三
燃烧器区域火焰平均温度 /℃	1330	1328	1334
炉膛火焰平均温度 /℃	1244	1255	1263
燃料 * Nar/%	0.70	0.77	0.90
主蒸汽流量 /(t·h ⁻¹)	1735.3	1736.8	1762.2
主蒸汽温度 /℃	558.7	559.4	553.2
再热蒸汽温度 /℃	554.60	558.65	549.85
空预器出口 NO _x 含量 /(mg·m ⁻³)	161	171	208
飞灰含碳量 /%	1.88	0.74	1.14
大渣含碳量 /%	2.95	3.00	2.43
未燃尽碳热损失 /%	0.538	0.105	0.296
干烟气热损失 /%	5.085	5.247	5.181
锅炉效率 * /%	93.301	93.214	93.138

* 按照质量比例取煤样混合后送检,得到元素分析和工业分析以及发热量,此处锅炉效率为修正后的数值。

神混煤和平混煤的燃烧性能与设计煤种较为接近,掺烧 1 台褐煤后(工况一),未燃尽碳热损失比设计值(0.63%)低,这是由于褐煤具有更好的着火和燃尽

性能。但是褐煤的掺入使得锅炉效率低于锅炉设计保证热效率(93.55%),原因是掺烧高水分褐煤后,排烟温度升高,干烟气热损失升高(设计煤种干烟气热损失为 4.64%)。

用褐煤取代平混煤后(工况二),锅炉效率降低到 93.214%。褐煤挥发分高,易于着火和燃尽,因此取代平混后飞灰含碳量降低,未燃尽碳热损失减少,但其水分高,导致排烟温度上升,干烟气热损失增大,且燃料中氢元素燃烧生成的损失和燃烧中液体水产生的损失均比工况一大,并最终导致锅炉效率的降低。

进一步将煤质较差的印尼煤取代部分神混煤(工况三)后锅炉效率略有下降。印尼煤的着火和燃尽性能比神混好,但从试验结果来看,印尼煤的加入使飞灰含碳量增加。FAÚNDEZ^[6]等人在利用夹带流反应器的实验研究中也发现高挥发分煤的过多掺入对燃尽会产生不利影响。高挥发分煤的有机质释放温度低,进入炉膛后会更快释放出来。当高挥发分煤加入多时,大量释放的挥发分会占据更多的氧,从而使挥发分低的煤着火和燃烧所需氧量不足,最终导致其燃尽度降低。因此,电厂在今后运行中应合理控制掺烧比例。

受锅炉受热面材料的限制,锅炉的过热器和再热器的出口温度上限为 565℃,在上述 3 组试验中,工况三的蒸汽流量比前 2 个工况多 25 t/h 左右,主汽温度略有降低,减温水用量较少,而前 2 个工况减温水用量较大。

从燃烧器火焰平均温度来看,3 种工况之间最大差值只有 6℃,差别不大,但 3 种工况的炉膛火焰平均温度最大差值达到 19℃。图 1 示出了 3 种工况下炉膛温度的发布,可以看到煤种组合方式对其存在明显影响。工况一下燃烧煤的热值较高,且集中在 A-E 层燃烧器,导致燃烧器区域温度较高。当掺烧更多的热值低的煤后(工况二和三),由于采用 A-F 6 层燃烧器运行,燃烧中心上移,最高温度出现在燃烧器上部,且最高温度升高。工况二掺烧 2 台磨褐煤,煤粉在出燃烧器区域后的温度始终比工况一的高,由于褐煤和神混煤都是易结渣煤,因此这种组合方式对锅炉结渣的防止是不利的。工况三的火焰中心温度介于工况一和工况二之间,而印尼煤结渣性低,因此用其取代部分神混对减轻结渣有利。从对运行过程中锅炉受热面的观察,发现工况一的结渣情况最轻,工况二的最大,这与上述分析是一致的,因此在电厂今后锅炉满负荷运行时需注意控制工况二的掺烧方式。

从烟气 NO_x 测量结果来看,随煤质差的煤加入量的增加,NO_x 含量增加,这主要是所燃用煤中氮含量增加的缘故,分析表明烟气中 NO_x 含量与燃料氮量相关系数为 0.987。从典型煤质分析(见表 1)中可以看出印

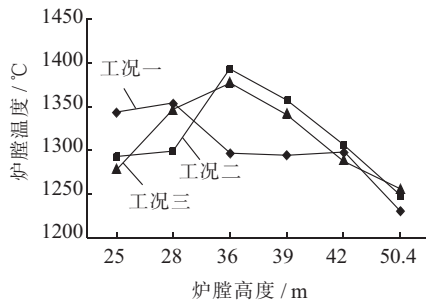


图 1 不同工况炉膛温度变化

尼煤中的氮含量较大,导致其加入后烟气中 NO_x 含量明显升高(见表 2 工况三),且其取代神混煤后也会使烟气量增加,因此随着选择性催化还原(SCR)脱硝技术的使用,如何优化印尼煤的使用是需要考虑的问题。

根据 2013 年 5 月环渤海动力煤价格指数^[7],取不同发热量的煤价格分别为:神混煤价格 525 元/t、平混煤 600 元/t、印尼煤 430 元/t、褐煤 400 元/t。计算出工况一发电燃料成本最大,工况三最低,可见掺入低热值煤虽然带来锅炉效率的降低,但是在当前的煤炭价格条件下,褐煤和印尼煤的价格较低,掺烧褐煤和印尼煤可以降低发电燃料成本。

2.2 不同氧量的影响

该组试验保持机组负荷为 360 MW,B、D 层燃用褐煤,C、E 层燃用印尼煤。控制省煤器出口烟气氧量变化,测量机组运行参数。

不同氧量控制条件下试验结果如表 3 所示。对烟气中 NO_x 含量而言,可以看到氧量对其有显著影响,随氧量的增加, NO_x 含量增加。在低氧条件下,中间产物 NH_3 和 HCN 等易向 N_2 转化;而氧浓度升高后,它们易转化成 NO_x ^[8]。

表 3 不同氧量控制条件下试验结果

参数	工况四	工况五	工况六
控制氧量/%	4.0	4.4	4.75
主蒸汽流量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	993.0	989.3	1 004.1
主蒸汽温度/°C	557.55	557.85	557.05
再热蒸汽温度/°C	559.85	550.80	559.30
空预器出口 NO_x 含量/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	174	194	225
飞灰含碳量/%	0.81	1.65	0.63
大渣含碳量/%	0.65	0.91	0.71
未燃烬碳热损失/%	0.10	0.21	0.08
干烟气热损失/%	5.07	5.12	5.48
锅炉效率/%	93.43	93.30	93.00

此锅炉日常运行中,负荷为 360 MW 时,氧量控制 4.4 左右,当氧量从 4.4%增加到 4.75%时,锅炉效率下降了 0.3%,主要来源于过量空气带来的烟气热损失;氧量降低到 4.0%时,锅炉效率增加了 0.13%,且 NO_x 的排放也有所下降。氧量的变化对主蒸汽温度影响不

大,对再热蒸汽温度有影响。

当氧量从 4.4%下降到 4.0%时未燃烬碳热损失降低,氧量上升到 4.75%时,飞灰含碳量减少更为明显,氧量和飞灰含碳量之间呈现非线性关系。通常过量空气系数的增大会使近燃烧器区内气流流速增大,煤粉与气体间的传热传质状态改善,这对煤粉的燃烧又是有利的。文献[9]在高负荷变氧量试验中,随着氧量的增加飞灰含碳呈下降趋势,出现差异的原因可能是一次风风量不同变化的缘故。试验过程中省煤器氧量控制通过机组协调控制系统(CCS)调节一二次风量来实现,从调节结果看,虽然随着氧量的增加总风量是增加的,但工况六的一次风量最小,工况五的一次风量最大。一次风量越大,煤粉气流着火所需吸收的热量越大,燃烧器区域煤粉浓度降低,煤粉着火推迟,不利于燃尽。此外,该试验是在低负荷下进行的,与高负荷相比炉膛温度较低,一次风的影响更为明显。由此可见,该炉在低负荷下采用褐煤和印尼煤掺烧,一次风量的变化对飞灰含碳影响较大,应通过试验的方法确定合适的一次风量,避免控制氧量变化过程中一次风量调节不合理的情况。试验结果也显示,在机组低负荷运行氧量控制为 4.0%时,炉膛出口过量空气系数约为 1.25,煤粉燃尽所需的氧量已经能够满足,因此电厂今后在锅炉低负荷运行掺烧褐煤和印尼煤时,可适当降低现有运行方式下的氧量。

2.3 SOFA 风调整的影响

试验过程中,煤质参数和磨组合方式均和氧量试验相同,维持机组负荷为 360 MW,保持省煤器出口氧量 4.5%,二次风比率为 77%,SOFA 风挡板开度和试验结果如表 4 所示。

表 4 SOFA 风调整试验结果

参数	工况七 正常 SOFA	工况八 SOFA 增加 20%
SOFA-I 层风挡板控制/%	30	50
SOFA-II 层风挡板控制/%	20	40
SOFA-III 层风挡板控制/%	10	30
SOFA-VI 层风挡板控制/%	60	80
SOFA-V 层风挡板控制/%	40	60
主蒸汽流量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	1 023.6	1 005.4
主蒸汽温度/°C	559.1	559.6
再热蒸汽温度/°C	559	563.65
燃烧器区域火焰平均温度/°C	1262	1255
炉膛火焰平均温度/°C	1167	1169
空预器出口 NO_x 含量/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	167	124
飞灰含碳量/%	1.08	1.19
大渣含碳量/%	0.66	1.42
未燃烬碳热损失/%	0.123	0.144
干烟气热损失/%	4.972	4.961
锅炉效率/%	93.465	93.462

SOFA 风挡板开度整体增加 20%后,燃烧器周围的二次风量相对下降,燃烧器区域过量空气系数减小,燃烧器区域火焰平均温度降低了 7℃。煤粉燃烧延迟,当烟气经过 SOFA 喷口对应区域时,未完全燃烧的可燃物和部分还原性气体实现再燃。从表 4 中可以看出,SOFA 风的增加再热蒸汽温度升高,而主蒸汽的温度变化不大。

在一定范围内,增大 SOFA 风挡板开度,烟气 NO_x 含量降低 43 mg/m^3 的同时,锅炉热效率仅降低了 0.003%,兼顾了氮氧化物排放和锅炉效率。

电厂实际运行中,当锅炉低负荷运行时 SCR 脱硝装置系统会退出,由于在低负荷时,烟气温度较低, NO_x 的催化还原反应不能正常进行。此时,在保证锅炉热效率较低不明显的条件下,通过合理的配风可以使 NO_x 的排放显著降低。

3 结束语

进行分磨制粉,炉内掺烧褐煤可以改善烟煤燃尽特性,掺入 2 台低热值高挥发分煤时未燃尽碳损最低,随着掺入低发热值煤量的增加,不完全燃烧增加,且低热值煤量的增加会导致锅炉排烟热损失增加,锅炉效率降低。但是由于低热值煤价格的优势,总的发电燃料成本降低了,且掺烧印尼煤可以减轻结渣;在相同的配风和氧量控制条件下,烟气中 NO_x 的排放与燃料含氮量关系密切,可以通过掺配低氮燃料来控制入炉总燃料氮,从而降低烟气中 NO_x 的量;在一定的氧量范围内,通过降低省煤器出口氧量可以降低 NO_x 的排放,同时可以减少排烟热损失,增加锅炉效率,低负荷运行

氧量宜为 4.0%,并适当降低一次风量;在一二次风比率不变的条件下,通过增大 SOFA 挡板开度,可以降低燃烧器区域的过量空气系数,降低了 NO_x 的排放。

参考文献:

- [1] 王双童. 煤质劣化后燃煤电厂安全及经济性评价方法探讨[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(5): 69-71.
- [2] 陈庆文. 大型电站锅炉配煤掺烧的 NO_x 排放特性预测与优化运行[D]. 广州:华南理工大学, 2010.
- [3] 陆 潘. 烟煤掺烧印尼煤的动力配煤模型研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
- [4] 杨忠灿, 姚 伟. 电厂锅炉变煤种掺烧问题研究[J]. 中国电力, 2010(11): 42-45.
- [5] 段永华. 600 MW 机组锅炉煤种适应性研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2009.
- [6] FAÚNDEZ J, ARUAS B, RUBIERA F, et al. Ignition Characteristics of Coal Blends in an Entrained Flow Furnace[J]. Fuel, 2007, 86(14): 2076-2080.
- [7] 环渤海动力煤价格指数[R/OL]. http://www.osc.org.cn/news/V02/58669_1.html.
- [8] 宋国良, 吕清刚, 周俊虎, 等. 煤粉浓度对 HCN 与 NH_3 析出特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(17): 49-54.
- [9] 林少国. 3033 t/h 锅炉最佳运行氧量试验及其研究[J]. 中国电力(技术版), 2013(3): 57-60.

作者简介:

陈孝武(1990),男,安徽六安人,硕士研究生在读,研究方向为电站锅炉燃烧优化;
葛 伟(1985),男,江苏兴化人,硕士,工程师,从事电站锅炉节能减排工作;
张 军(1963),男,湖北黄石人,教授,研究方向为燃烧污染控制,生物质热利用。

Experimental Study on Coal Blending Combustion of 600 MW Coal-fired Boiler

CHEN Xiao wu¹, GE Wei², ZHANG Jun¹

(1.School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Huadian Electric Power Research Institute, Hangzhou 310030, China)

Abstract: This paper presents experimental investigations into the NO_x formation behaviors and thermal efficiency of coal blending combustion in one 600 MW boiler. The influence of coal property, combination method and air distribution control strategy on thermal efficiency and the NO_x emission of the boiler is investigated. Based on the test results, emission behaviors of NO_x under various operating conditions are analyzed. This work can provide valuable reference for similar power stations to optimize combustion and reduce pollutant emission.

Key words: brown coal; NO_x emission; boiler efficiency; combustion adjustment

大电网调控一体化联合仿真培训系统在省调投运

近日,江苏电网新一代调控一体化联合仿真培训系统在省调正式投运。这套系统适应“大运行”体系下调控一体化业务需求,实现了调度仿真、监控仿真以及变电站三维仿真三大主要功能,同时具备培训教案自动生成、省地联合仿真等功能,将为调控运行人员业务培训、反事故演习、事故预案编制等工作提供强有力支持。

该系统采用符合 IEEE1516 标准的分布式、交互式电力仿真支撑平台,与智能电网调度技术支持系统联通,全面应用电力系统全过程实时仿真引擎技术、一二次设备统一全息建模与管理技术、基于变电站二次系统详细仿真模型的电网二次系统全维度仿真等技术,整体技术水平国内领先。

摘自《江苏电力信息网》

脱硫废水处理装置运行现状及优化建议

祝业青¹, 傅高健², 顾兴俊²

(1. 国电环境保护研究院, 江苏 南京 210031; 2. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘 要: 针对燃煤电厂湿法脱硫废水处理问题, 在介绍废水产生的原因及水质特点的基础上, 综合介绍了国内外脱硫废水主要处理技术与新技术研究状况, 并结合目前国内燃煤电厂脱硫废水处理运行中普遍存在的问题, 提出了如何进一步优化脱硫废水处理设计及运行。

关键词: 湿法脱硫; 脱硫废水处理; 现状; 优化

中图分类号: X773

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)01-0072-04

SO₂ 是造成大气污染的主要原因之一, 也是造成酸雨的重要原因。截至 2010 年末, 我国完成“十一五”期间的总量控制目标——全年 SO₂ 排放量 2 246.7 万 t, 其中电力行业的控制量为 951.7 万 t。“十二五”规划纲要草案要求 SO₂ 减少 8%, 这对 SO₂ 排放大户燃煤电厂烟气脱硫系统的可靠运行提出了更高的要求。石灰石-石膏湿法脱硫具有脱硫效率高、负荷响应快、使用煤种广、石膏利用技术成熟、运行成本低等优点, 已成为应用最广泛、技术最成熟的烟气脱硫工艺, 目前约占全世界烟气脱硫装置的 85% 以上^[1]。然而, 湿法脱硫中废水处理的重要性往往在运行管理中被忽视, 因此造成脱硫系统运行中的诸多问题。文中通过分析目前国内湿法脱硫废水处理运行的现状, 探讨优化脱硫废水处理的途径。

1 湿法脱硫废水处理的必要性

脱硫废水在燃煤电厂废水排放量中的份额虽然很小, 一般 2 台 300 MW 机组产生的脱硫废水只有 8~10 t/h, 但脱硫废水污染严重, 含盐量极高, 其中主要污染因子如表 1 所示。湿法脱硫废水的杂质主要包括悬浮物、过饱和亚硫酸盐、硫酸盐以及重金属, 其中很多是国家环保标准中要求控制的第一类污染物。脱硫废水中有机物(COD)主要来自煤(主要成分为有机质)、工艺水和石灰石, COD 含量一般为 150~400 mg/L; 脱硫处理系统中, 必须排放部分浓浆液, 浓浆液中悬浮物(SS)高达 60 000 mg/L; 氯离子含量达到 20 000 mg/L 左右。由于脱硫水质的特殊性, 其废水处理难度较大, 同时由于各种重金属离子对环境污染严重, 对脱硫废水进行单独处理是很有必要的^[2]。

2 国内外脱硫废水处理工艺简介

2.1 国内普遍脱硫废水处理工艺

目前国内脱硫废水处理工艺基本依据国家排放

表 1 脱硫废水主要污染因子

污染物	含量/(mg·L ⁻¹)	国家一级排放标准/(mg·L ⁻¹)	备注
Hg	0.04~5	0.05	第一类污染物
Cd	0.3~20	0.5	
Cr	1.0~5	1.5	
Pb	0.5~15	1.0	
Ni	0.5~2	1.0	
pH	5~6	6~9	第二类污染物
SS	6000~15 000	70	
COD	150~400	100	
F	20~40	10	
Zn	2~25	2	
Cu	0.5~23	0.5	
Cl ⁻	15 000~20 000		

注: 第一类污染物测定为车间排放口测定必须达到国家排放标准, 第二类污染物测定为单位总排放口采样测定达到国家排放标准。

标准而选定。主要处理第一类和第二类污染物, 采用的主要工艺方法为物化法。该方法约占国内火电厂脱硫废水处理工艺的 90% 以上。该工艺流程是以国外在我国电厂脱硫废水处理工艺应用基础上进行缩放的模式。

脱硫废水 pH 值一般在 5~6 范围内, 呈弱酸性, 此时许多重金属离子仍有良好的溶解性。所以, 脱硫废水的处理主要是以化学、机械方法分离重金属和其他可沉淀的物质, 如氟化物、亚硫酸盐和硫酸盐。调节 pH 值, 从而使废水能达到有关环保质量标准和排放标准。沉淀分离是一种常用的金属分离法, 除活泼金属外, 许多金属的氢氧化物的溶解度较小。故脱硫废水一般采用加入可溶性氢氧化物, 产生氢氧化物沉淀来分离重金属离子。值得注意的是, 由于在不同 pH 值下, 金属氢氧化物的溶度积相差较大, 故反应时应严格控制其 pH 值。

在脱硫废水处理中, 一般 pH 值控制在 9.0~9.5, 可使一些重金属, 如铁、铜、铅和铬生成氢氧化物沉淀。国内普遍使用调节 pH 值和重金属离子形成氢氧化物沉淀的药剂为 NaOH 或者 Ca(OH)₂; NaOH 可直接从市场

采购, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 则需要市场采购石灰粉进行配置,工艺相对复杂。但使用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的优势是,反应过程中同时产生 CaF_2 、 CaSO_3 、 CaSO_4 沉淀物,以分离氟化物、亚硫酸盐、硫酸盐等盐类物质。采用Steinmuller技术的波兰RAFAKO公司认为,使用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液,通过加絮凝剂、助凝剂还可沉淀 CaCl_2 ,分离 Cl^- 。所以用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 调节脱硫废水pH值是最优选择^[2]。

对于汞、铜等重金属,一般采用加入可溶性硫化物如硫化钠(Na_2S),以产生 Hg_2S 、 CuS 等沉淀,这2种沉淀物质溶解度都很小,溶度积数量级在 $10^{-40} \sim 10^{-50}$ 之间。而 Na_2S 本身的毒性会给污泥的培养以及操作运行人员带来不利影响。国内目前普遍采用15%有机硫(TMT15)溶液替代 Na_2S 来沉淀汞、重金属等,取得比较好的效果。用于混凝剂的药剂为复合铁(硫酸氯铁 FeClSO_4);用于助凝剂的药剂为聚丙烯酰胺(PAM);用于调节pH出水的药剂为HCl。这些工艺操作相对简单,效果相对显著,也是目前国内脱硫废水处理工艺的主流。

添加上述药剂的废水在综合反应槽中进行化学反应。综合反应槽共分3格,由pH调整槽、反应槽及絮凝槽连通构成,分别完成废水的pH调整、沉淀反应和混凝。澄清器主要用于沉淀前级设备反应生成的絮体。由于絮体密度较小,沉降性能较差,因此澄清器采用较低的上升流速和较长的停留时间。澄清池的排泥方式为间断排泥,泥渣通过泥渣泵外排。设计排泥时间一般为每天6~8h。具体流程如图1所示。

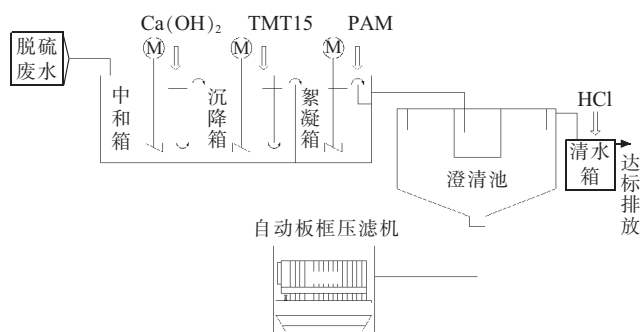


图1 脱硫废水处理工艺流程

根据对中国国电集团公司、华电集团公司、大唐集团公司等40余家火电厂的废水处理系统运行的调研数据,目前国内湿法脱硫废水处理运行经上述处理工艺处理后重金属离子以及氟离子均能稳定达标排放,但SS和COD往往不能稳定达标排放。脱硫废水处理出水COD不达标原因主要是废水中COD浓度高(煤质和石灰石产地不同,浓度也不同)。有的废水COD浓度高达400 mg/L,采用物化法的去除率一般只有45%~55%,因此往往超标。SS浓度超标主要原因是澄清和污泥浓缩池合建,当污泥处置不及时,澄清污泥

浓缩池中污泥界面上升造成沉降时间不足引起SS超标排放。

2.2 国外其他处理方式介绍

2.2.1 离子交换法处理脱硫废水

用大孔巯基($-\text{SH}$)离子交换树脂吸附汞离子,达到去除水中汞离子的目的;吸附法利用活性炭吸附原理,由于活性炭具有极大的表面积,在活化过程中形成一些含氧的官能团($-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, $-\text{CO}$)使活性炭具有化学吸附和催化氧化、还原的性能,能有效去除重金属^[3]。由于工艺控制较为复杂,相对于脱硫废水来说,此工艺主要用于大型水处理项目,因此应用并不广泛。据调研,此工艺占脱硫废水处理工艺的1%以内。

2.2.2 电絮凝法处理脱硫废水

电絮凝技术是一项新兴的废水处理技术,在国外逐步被运用到湿法脱硫的废水处理中。电絮凝是利用电化学的原理,在电流的作用下溶解可溶性电极,使其成为带有电荷的离子并释放出电子。产生的离子与水电离后产生的 OH^- 结合,生成有絮凝作用的化合物。另外释放出的电子还原带有正电的污染物,从而达到去除液体中污染物的目的。电絮凝能有效处理重金属,而且具备设备布置较为紧凑、处理药剂费用较低、处理效果较好等优势,但是工艺较为复杂,普通电絮凝无法去除氯离子,高频电絮凝则存在耗能较高,电极使用寿命有限等缺点。目前电絮凝技术在含油污水和重金属含量较高的化工废水有一定的应用,在脱硫废水处理中尚未普及。据调查,内蒙古鄂尔多斯蒙泰电厂计划引用该工艺对脱硫废水进行处理,但由于尚未投运,目前效果暂不明确。

2.2.3 蒸发处理脱硫废水

将废水通过传统的加药方式进行预处理。处理后的废水经预热器加热后进入蒸发系统。蒸发系统主要分为4个部分:热输入部分、热回收部分、结晶转运部分、附属系统部分。脱硫废水经四级蒸发室加热浓缩后送至盐浆桶,通过2台盐浆泵送入盐旋流器,旋流器将大颗粒的盐结晶旋流后落入下方的离心机。离心机分离出的盐晶体通过螺旋输送机送至干燥床进行加热,使盐晶体完全干燥。旋流器和离心机分离出的浆液返回到加热系统中进行再次加热蒸发浓缩。干燥后的盐结晶通过汽车运出厂。该方法综合了浓缩结晶法和蒸发浓缩法两者的优点,系统回收率较高,除部分干燥损失外,废水基本处理回收,无废液排放;系统每年只需化学清洗一、二次,该系统管理维护量较低;降低了传热面结垢可能,减少了抵制剂投加量;蒸发回收水水质较好。但设备布置较为复杂,控制要求高,耗能较高。目前尚停留在试验研发阶段^[4]。

这些新技术能有效地处理脱硫废水中重金属甚至

是氯离子,但是受技术、条件、环境、投资等多方面因素的制约,未能在国内电厂推广应用。目前该技术在脱硫废水处理中所占比例较小,仅有国外少数工程投入使用,部分关键控制过程尚停留在研发阶段。

3 脱硫废水处理运行中普遍存在的问题

目前国内燃煤电厂湿法脱硫装置废水处理系统绝大部分采用传统的化学沉淀法。但整体投运率很低。国电集团环保评价小组 2010 年上半年对集团公司内多家电厂废水系统的现场评价得出结论:虽然电厂各种废水处理设施齐全,但部分系统和设备未正常投运,设备维护不及时,设备缺陷多。造成废水系统设备投运率低的主要原因有如下几点:

(1) 运行成本问题。国内普遍采用化学沉淀法处理湿法脱硫废水,处理过程中必须不断投加各种药剂,因此加药量是处理效果是否合格的关键因素。脱硫废水处理中所用的药剂主要有盐酸、石灰粉、TMT15、硫酸氯化铁和 PAM。TMT15 和 PAM 大多为进口,市场价格较高。石灰乳配置的工作量大,人工成本较高。据调查,2 台 300 MW 机组脱硫废水处理药剂年运行费用大约为 60~70 万元。

(2) 运行环境及设备问题。混凝沉淀法主要设备包括石灰乳制备装置、计量泵、刮泥机、排泥泵、板框压滤机或离心脱水机,以及其他仪表等设备。其中计量泵、仪表大部分为进口设备,对维护要求较高,故障之后维修周期较长。石灰乳需要人工配置,操作环境较差,受介质影响设备故障率较高;污泥处理所用的板框压滤机或离心脱水机操作较为复杂,对运行人员的操作要求高,而且运行之后的冲洗程序较为繁琐,泥饼的后续处理也是难题,故投运率较低。另外,许多电厂的脱硫废水处理系统中设备积泥堵塞,其中有设备运行过程中的积泥和不适当的设备停用引起的积泥。后者通过运行管理可以得到解决,而前者则因设备本身的设计缺陷造成,运行中难以解决。

(3) 处理排放问题。目前国内电厂湿法脱硫废水执行的排放标准为《燃煤电厂石灰石—石膏湿法脱硫废水水质控制指标》(DL/T 997-2006)与《污水排放综合标准》(GB8978-1996)对比,除化学需氧量和氟化物外,其余污染物排放均执行一级排放标准。在脱硫系统运行中为维持系统水平衡,会采用除雾器冲洗水等方式来弥补烟气吸热而产生的蒸发水损失。从经济运行角度出发,脱硫冲洗水绝大部分采用电厂循环水排污水,因此氯离子在脱硫运行过程中富集。脱硫废水中含有较高的氯离子,并且无法经过化学沉淀处理,因此脱硫废水处理后就往往无法直接排放或者利用,这是造成脱硫废水系统投运率较低的关键原因。

4 脱硫废水处理优化途径

4.1 综合利用途径

由于许多地方环保部门不允许电厂将废水对外排放,可采取排入其他系统统一处理的方式处理脱硫废水,主要处理途径有如下几种:

(1) 利用烟道气处理。由于进入电除尘器的烟气体量大且温度高,而脱硫废水量小,故将废水雾化后喷入烟气,利用烟气所含的热量使废水蒸发,废水中污染物转化为结晶析出,随烟气中的飞灰一起被电除尘器收集下来^[5]。这一方法已经在国内某些电厂得以应用。

(2) 与水力除灰一起处理。国内部分采取水力除灰方式除灰的电厂,可以将脱硫废水排放至水力除灰的灰水中进行统一处理。由于粉煤灰是高分散度的固相结合体,利用其絮凝吸附作用,降低灰水中悬浮固体的含量,包裹废水中重金属以及金属氢氧化物,从而达到降低重金属浓度的作用^[6]。

(3) 对排入渣溢水进行处理。由于脱硫废水和渣溢水的水质特点比较接近,2 套处理系统的处理工艺也基本相同,都加入了絮凝剂及助凝剂,达到了去除悬浮物和沉淀重金属的目的。国内部分电厂锅炉除渣系统采用水力除渣,燃煤在锅炉中燃烧后产生的炉渣,经捞渣机和碎渣机打捞、破碎后用水力送至渣浆泵前池中。电厂将少量脱硫废水排入渣溢水中,跟踪 Cl⁻含量,几个月分析数据表明,Cl⁻含量基本在 1000 mg/L 以下,脱硫废水的 Cl⁻对渣溢水系统设备运行不会产生影响,重金属排放也达到一级标准^[7]。

4.2 传统脱硫工艺设计优化

传统的脱硫工艺由烟气系统、吸收塔系统、石膏脱水、石灰石粉制备浆液系统、工艺水系统、事故浆池以及浆液疏排系统、废水处理等系统组成^[8]。脱硫废水是湿法脱硫设计中的重要环节之一。上述综合利用途径虽然能够较好地处理脱硫废水,但是受多种条件制约,电厂若不具备上述综合利用条件,传统的絮凝加药方式处理脱硫废水工艺也可以在设计、运行上进行优化。

(1) 旋流系统优化。将石膏浆液旋流器布置在高标高的楼层,废水旋流器布置在低标高楼层,对处于二者之间的废水给料箱、废水给料泵,可根据脱硫工程具体情况进行优化设计和布置。当石膏浆液旋流器溢流与废水旋流器入口标高之差产生的静压能克服废水旋流器入口压力与管道水头损失之和时,石膏浆液旋流器的溢流可自流进入废水旋流器,因此可撤去废水给料箱和废水给料泵 2 台设备。当石膏浆液旋流器溢流与废水旋流器入口标高之差产生的静压不能克服废水旋流器入口压力与管道水头损失之和时,可以通过废水给料泵从石膏旋流器溢流浆液箱取废水,从而省略

废水给料箱和搅拌器,降低废水旋流分离系统的运行成本。

(2) 污泥管道系统优化。脱硫废水经过加药絮凝处理后,沉淀的污泥需要进行压滤处理。污泥管道容易堵塞,不易清洗。为防止污泥输送管道堵塞,可在初沉池、澄清池底部的污泥排放管道出口设压缩空气系统,必要时采用压缩空气进行反吹洗。中和箱、沉淀箱、絮凝箱采用一体化制作(三联箱),共用一根排空和溢流管,为防止排空管道堵塞,也可以设置排空管压缩空气反冲洗管路。同时,可以将中和箱、沉降箱、絮凝箱底部污泥排入澄清污泥浓缩池中心筒内,清水箱、消灰溶解箱、消石灰计量箱底部污泥排入地坑,用泵抽至澄清污泥浓缩池中心筒内。这样的设计有利于污泥管道的排空和冲洗,尽可能解决管道堵塞问题。

(3) 板框压滤机管道优化。传统加药絮凝法处理脱硫废水工艺中,板框压滤机脱离出来的水设计是回流到废水缓冲池的,这样的设计导致回流水的二次处理,无论是从节省药品及降低劳动量,还是从节能的角度都是严重的浪费。从处理流程来看这部分水是经过加药处理的,是已经合格的水,另外对水质的化验也表明,水质完全符合排放标准,故将板框压滤机脱离出来的水直接引到净水池回用。

4.3 运行优化

电厂在废水处理的运行过程中,可以根据经验进行工况调整,同样能够达到降低运行成本,提高设备运行可靠性的目的。

(1) 加药量调节。由于各电厂脱硫废水杂质成分并不一样,且悬浮物含量高,一直以来混凝剂投加量较多,为进一步节省药剂成本,建议先在实验室对废水药剂投加做优化试验,逐渐减小混凝剂加药量,助凝剂根据絮凝槽矾花情况适当的调节加药量;在不投加混凝剂情况下,只投加助凝剂也能取得很好的出水效果。另外可以在药剂投加顺序上也尝试进行修改,先投加助凝剂再投加混凝剂都取得良好处理效果。

(2) 设备运行维护。停运时应及时对设备及管道

进行冲洗。其中板框压滤机为间歇运行方式投运,每次停运后须清洗滤布,检查水咀。在线监测仪表如 pH 计、浊度仪等也应及时清洗,保护探头。

5 结束语

我国单机容量在 200 MW 及以上机组采用石灰石-石膏/湿法脱硫工艺的比例约占火电总装机容量的 95% 以上。目前国内大多数电厂的湿法脱硫废水处理系统采用传统的加药絮凝沉淀方式进行脱硫废水的处理,普遍存在运行成本较高,设备故障率高等问题,因此投运率很低。为满足环保要求,各电厂应提高对脱硫废水处理的重视程度,根据电厂的实际情况,选择适合本电厂的废水处理工艺,并对脱硫废水处理系统设计和运行进行合理优化,定期排放处理脱硫废水,以满足脱硫系统正常运行的要求。

参考文献:

- [1] 汤蕴蕾. 湿式烟气脱硫废水处理[J]. 华东电力, 1997(12): 48-49.
- [2] 杨发祥. 浅谈电厂脱硫废水及其处理工艺[J]. 中国高新技术企业, 2010(4): 105-106.
- [3] 罗 晔, 叶琦哲. 燃煤电厂脱硫废水综合利用探讨[J]. 中国资源综合利用, 2009(10): 30-31.
- [4] 徐庆国. 火电厂脱硫废水零排放[J]. 科技资讯, 2009(35): 71.
- [5] 李明波. 利用烟道气处理燃煤电厂 WFGD 废水的技术应用[J]. 电力科技与环保, 2010, 26(2): 53-55.
- [6] 方伟明. FGD 废水对水力除灰系统影响初探[J]. 电力科技与环保, 2010, 26(2): 56-58.
- [7] 张国鑫. 脱硫废水引入渣溢水系统的处理效果分析[J]. 电力科技与环保, 2010, 26(1): 39-41.
- [8] 薛巨勇. 石灰石-石膏湿法脱硫装置的运行维护分析[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(6): 78-81.

作者简介:

祝业青(1981), 男, 江苏扬中人, 工程师, 从事火电厂烟气脱硫和脱硝研究、开发工作;

傅高健(1980), 男, 江苏扬中人, 助理工程师, 从事火电厂环境保护工作;

顾兴俊(1970), 男, 江苏海安人, 高级工程师, 从事火电厂环保研究及并网安全性评价工作。

Operation Condition and Optimization Measures of Treatment Equipment for Desulfurization Waste Water

ZHU Yeqing¹, FU Gaojian², GU Xingjun²

(1. Guodian Research Institute of Environmental Protection, Nanjing 210031, China;

2. Jiangsu Frontier Electrical Power Technology Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Treatment of desulfurization waste water is a problem widely encountered in the flue gas desulfurization system of coal-fired power units. The causes for the waste water and the water characteristics are introduced firstly in this paper, and then the main treatment measures and current research status are analyzed. Through analyzing the issues widely encountered in the coal-fired power plants of our country, suggestions on optimizing waste water processing design and the operation strategy are proposed in this paper.

Key words: wet flue gas desulfurization; desulfurization wastewater treatment; present situation; optimization

某 1000 MW 机组一次风机变频后存在问题及解决方法

赵恒斌, 马剑宇
(国电谏壁发电厂, 江苏 镇江 212006)

摘 要:针对某发电厂 1000 MW 机组轴流式一次风机变频改造后存在的问题,重点分析了风机容易发生失速和 2 起因控制逻辑不正确而引起了风机运行异常的原因,并提出了解决方法,为其他类似机组将变频方法应用于动叶可调风机提供了有益的参考。

关键词:轴流式一次风机;变频;失速;热控逻辑

中图分类号:TK223.26

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)01-0076-03

某发电厂 1000 MW 机组直流锅炉采用双动叶轴流式一次风机,单炉膛塔式布置,一次中间再热,四角切圆燃烧。制粉系统采用 HP1163/Dyn 型中速磨煤机正压直吹式制粉系统,5 台磨运行带锅炉 BMCR 工况,1 台磨备用。炉后尾部布置 2 台容克式空气预热器。自投产以来一次风机噪音较大,加装防护罩后降噪效果不明显。因此对一次风机进行了变频改造,改造后一次风机转速大幅度降低,噪音也随之显著降低,但存在风机容易发生失速和热控逻辑不正确等问题。文中对此进行了原因分析,并提出了解决方法。

1 风机失速问题及解决方法

1.1 风机特性曲线分析

厂家提供的风机特性曲线只有比压能、动叶角度、风机流量、风机效率参数;而在一次风机实际运行中,只能监测到风机的出口风压、转速、风机动叶等相关参数。根据厂家提供的风机特性曲线,针对不同转速下的工况,进行适当的修正,制成不同转速下、不同的风机动调开度对应的失速线^[1],如图 1 所示。该失速线的含义为风机出口风压如果大于该点,理论情况下都会失速,但是失速线还与其他因素有关,如动叶实际安装角度的偏差、叶片的磨损、环境温度等,因此不可能十分精确。运行人员可以通过查阅图 1,快速进行分析比较,从而避免风机进入失速区域。

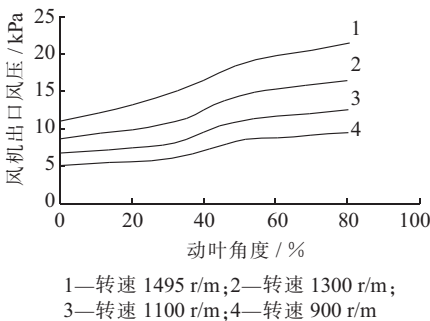


图 1 一次风机(变频)典型转速下对应的失速线

1.2 风机失速工况举例

一次风机变频改造后,在现场实际运行过程中,发生了 3 次风机失速事件,与图 1 比对,发现与理论失速点基本一致。下面将举一典型案例进行分析。

2012 年 6 月 7 日在机组启动过程中,6 台磨煤机中仅 B 磨运行,D、E、F 磨一次风通道部分开启。16:16:00,B 磨跳闸,导致一次风机通道遽然减小,2 台一次风机的风量迅速下降,出口风压迅速上升,最后 A 一次风机失速,具体现象及处理,见表 1。

表中,工况 1:B 磨跳闸前工况;工况 2:B 磨跳闸时的工况,A 风机出口风压由 7.1 kPa 迅速上升至 8.6 kPa 左右;工况 3:A 一次风机“失速”报警信号刚出现时的工况;工况 4:发现失速后的处理工况,迅速关小 A 一次风机动叶,3 s 后 A 一次风机“失速”信号消失,风压也

表 1 A 一次风机失速工况

工况	A 风机电流 / A	B 风机电流 / A	A 风机动叶角度 / °	B 风机动叶角度 / °	A 风机转速 / (r·min ⁻¹)	B 风机转速 / (r·min ⁻¹)	A 风机出口风压 / kPa
1	55	56	56	59	907	909	7.1
2	54	56	56	59	907	909	8.6
3	38	63	56	59	907	909	3.2
4	18	63	25	59	907	909	2.7
5	44	63	43	59	907	909	4.75
6	77	77	56	57	976	986	6.1

稍有上升;工况 5:逐渐提高 A 一次风机动叶至 43%,电流及风压同步上升;基本稳定;工况 6:调平了 2 台一次风机电流、开度、转速,同时为了远离风机失速区域,适当提高了一次风机的转速,开大了磨煤机一次风通道,降低了一次风母管压力。

1.3 风机运行安全评估

对照图 1,机组正常运行时,分析 3 个典型工况下一次风机变频改造前后的安全性能情况如表 2 所示。变频改动后,一次风机安全余量下降较多,特别是在工况 3 运行时,达到了最危险区域,很容易进入失速区域,因为在该工况下,风机通流量相对较小,且风道阻力基本未改变。

表 2 典型工况下一次风机参数

工况	负荷 /MW	磨台数	转速 / ($r \cdot m^{-1}$)	动叶角 度 /%	出口风 压 /kPa	失速点 /kPa
1	1000	6	1493	50	11.0	20.0
2	1000	6	1200	80	11.0	14.5
3	770	4	1030	80	10.4	11.2

同时针对某些特殊工况下,进行一次风机的安全性能评估。2012 年 06 月 15 日 16:30:00,进行吸、送风机快速减负荷(RB)试验,一次风机在变频工况且动叶角度保持 80%时,吸送风机 RB 动作前、中、后 3 种不同工况下的参数如表 3 所示。

表 3 吸送风机 RB 动作前后工况

工况	转速 /($r \cdot m^{-1}$)	出口风压 /kPa	失速点 /kPa
RB 动作前	1130	9.5	13.0
RB 跳磨时	1130	11.5	13.0
RB 稳定后	980	8.7	10.6

查图 1 可知,RB 动作前后一次风机能够保证在安全区域运行。但如果表 2 中的工况 3 发生 RB 动作事件,将导致一次风机失速。

1.4 变频改动后并一次风机

并一次风机时,待并一次风机动叶必需从 0 开始,由图 1 可知,如果待并一次风机转速为 900 r/m、动叶角度为 0 时,失速点为 5 kPa,即如果此时一次风母管压力高于 5 kPa 以上,待并一次风机会发生失速。

避免发生一次风机失速的方法是:维持动叶 0 开度不变,提高待并一次风机转速至失速点以上后(为了安全起见,尽量提高待并一次风机转速,保证一次风机安全余量),再逐步开大动叶,调整另一台一次风机出力,维持一次风母管压力不变,直至 2 台一次风机出力基本一致。

1.5 变频改造后防失速措施

风机经过变频改造后,其安全余量下降较多,特别是在某些特殊工况。而且如果日后一次风机管道特性

发生改变(如预热器堵塞)、风机本身特性改变(如风机动叶磨损),都会将导致风机的安全性能下降,因此必须充分了解其一次风机的特性曲线,做好防止风机失速相关工作。

(1) 机组正常运行时,需尽量降低一次风机管道阻力(如适当开大磨煤机热风调整门等),使一次风机的运行工况点比失速点至少小 2.5 kPa 左右,以便发生 RB 时,一次风机有充足的安全余量。

(2) 加强磨煤机的维护,降低磨煤机压差;做好预热器维护工作,防止预热器严重堵塞。

(3) 做好一次风机检修维护工作,防止因一次风机自身原因而发生安全余量下降。

(4) 在机组启动初期,2 台一次风机运行时,可以适当关小风机动叶且提高一次风机转速运行,从而提高风机的安全余量。

(5) 并一次风机时,注意转速、风压控制,防止一次风机进入失速区域。

(6) 特别要注意某些特殊工况,如 1.3 中的工况 3,在类似工况运行时,需尽量降低一次风母管压力;磨煤机停运时,小心缓慢关小磨煤机通道,防止一次风压突升^[2];必要时可以开大备用磨通道,从而增加风机通流量。

1.6 一次风机(变频)发生失速后的处理方法

一次风母管压力和失速侧的风机电流下降较多,且“一次风机失速”信号报警时,可采取以下方法及时处理。

(1) 迅速关小失速风机的动叶角度,提高失速风机的转速,待“失速”信号消失,且一次风母管压力稳定后,再逐渐调整风机转速和动叶角度,切忌迅速开大,以免压力波动而再次进入失速区域。

(2) 检查另一台一次风机运行情况;注意调整给水流量,控制中间点温度,防止过热器进水;控制主再汽温,防止跌汽温。

(3) 处理正常后,查找失速原因,调整一次风机运行工况,使之在安全区域内运行。

2 热控逻辑引起的问题分析

2.1 热控逻辑问题简介

一次风机变频改造后,大量的热控逻辑需重新构架。这些热控逻辑涉及很多方面,在风机变频改造前,虽已反复讨论修订过,但是在实际运行中,仍然存在一些问题。现针对 2 起典型案例,进行分析。

2.2 典型案例一

2012 年 4 月 30 日,A 一次风机运行,待并 B 一次风机。就地检查 B 一次风机不倒转后,启动 B 一次风机(变频),发现变频器二次电流过大且不返回,立即停

用B一次风机,就地检查发现B一次风机正在倒转。

经分析认为,是一次风机出口门热控逻辑不合理所致。一次风机变频改造前,出口挡板逻辑为:一次风机“工频开关合闸”,延时10 s后,开启出口挡板。一次风机变频改造后,出口挡板逻辑修改为:一次风机“变频运行”,延时10 s后,开启出口挡板。而该变频器装置内部设定为:变频器启动后按750 r/m自动加至最低转速600 r/m。当变频运行延时10 s后,一次风机转速才达到125 r/m,甚至更低,出口挡板开启后,大量高压风倒流,迫使该一次风机无法继续升速,导致一次风机倒转。

因此对一次风机出口挡板逻辑再次进行了修改,即当一次风机转速达到850 r/m以上,联开出口挡板。该逻辑修改后,数次并一次风机,未发生倒转事件。

2.3 典型案例二

2012年06月17日,一次风机RB试验动作时,B一次风机跳闸后,A一次风机转速先下降,6 s后才上升;导致一次风母管压力从8.8 kPa最低下降至2 kPa,严重影响了机组的安全。

在原先热控逻辑中,RB动作时,快增另一台风机转速模块,“一次风机停运信号”取自“一次风机变频器停运”信号,而非“一次风机工频开关停运”信号。这两者有很大区别。“变频器停运”信号说明:任何情况下,当“停止变频器”信号发出时(包含一次风机热控故障

跳闸),变频器将控制转速自动降至600 r/m后,变频器装置才停运,“变频器停运”信号发出。因此在一次风机热工保护跳闸时,“一次风机变频器停运”信号比“一次风机QF开关停运”信号要慢6 s左右。这样才会导致一次风机RB动作后,A一次风机转速模块接受的指令先下降至45.5%(RB动作时,自动给定指令),6 s后才接受到 $45.5 \times 2\% = 91\%$ 的指令,导致A一次风机转速先下降后上升。

3 结束语

一次风机变频改造虽然达到了预期的效果,但也存在一些问题,主要表现在风机失速及热控逻辑方面。经过比较分析,制定了相关解决方案及措施,确保了一次风机变频改造后的安全运行。

参考文献:

- [1] 张志福,苏宜强,曹海猛. 负荷优化运行模型及其算法研究[J]. 江苏电机工程,2013,31(1):20-24.
- [2] 岑可法,周昊,池作和. 大型电站锅炉安全及优化运行技术[M]. 北京:中国电力出版社,2007:370-371.

作者简介:

- 赵恒斌(1962),男,江苏镇江人,工程师,从事火电发电厂运行管理工作;
- 马剑宇(1979),男,江苏镇江人,工程师,从事火电发电厂锅炉运行管理工作。

Issues Associated with Performing Frequency Conversion on Primary Air Fan in 1000 MW Power Unit

ZHAO Hengbin, MA Jianyu

(Guodian Jianbi Power Generation Company, Zhenjiang 212006, China)

Abstract: This work analyzes the issues that appeared after axial fan transducer reconstruction in one 1000 MW ultra-supercritical once-through boiler. The change of the fan characteristics and the problems associated with thermal control logic are introduced respectively. To solve these problems, we firstly analyze the obtained test data and then propose several measures to ensure the safety and economy of the fan. Meanwhile, this paper also aims to supply certain reference for similar fans.

Key words: axial fan; frequency transducer; stall; thermal control logic

下 期 要 目

- 电厂开式循环水系统水藻堵塞的原因及解决措施
- 一起 SVC 一相可控硅全部击穿的原因分析
- 基于 EMS 的地区电网合环风险评估系统
- 真空断路器投切并联电抗器过电压故障分析
- SVC 预防电压失稳的快速控制方法
- 基于 WEB 的省级能效管理平台的设计与应用
- 660 MW 汽轮机组轴瓦温度异常的分析与处理
- 基于 MAS 服务的有序用电信息发布研究与应用

3×35%静调轴流引风机在 1000 MW 机组中的应用

崔国华, 朱广忠, 何俊松
(江苏新海发电有限公司, 江苏 连云港 222023)

摘 要:介绍了某公司 1000 MW 机组首次采用 3 台静调引风机配置的设备概况,并与其他百万机组引风机典型配置进行了安全、经济性比较。机组运行实践表明,3 台静调引风机在工程造价、经济运行方面节能效果显著,安全可靠,操作灵活,对其他新建百万机组具有一定的借鉴意义。

关键词:风机;静调;超超临界

中图分类号:TK223.26 **文献标志码:**B **文章编号:**1009-0665(2014)01-0079-02

某发电公司 1000 MW 机组锅炉为超超临界变压运行螺旋管圈直流锅炉,型号为 SG-3049/28.25-M548,单炉膛塔式布置、一次中间再热、四角切园燃烧、平衡通风、固态排渣、全钢悬吊构造,第一台机组于 2012 年 11 月 21 日通过 168 h,投入商业运行。

1 引风机选型方案

目前国内新建大型燃煤机组脱硫系统基本不再设增压风机,采用引增合一方式,高效节能同时也简化了运行操作。引风机选型主要以动叶可调轴流式风机和静叶可调轴流式风机为主,2 类风机互有优缺点,特性比较^[1]见表 1。

表 1 动调与静调轴流风机特性比较

特性	动调	静调	特性	动调	静调
调节原理	改变动叶角度	改变静导叶角度	变负荷调节效率	较好	较差
风机结构	复杂	简单	运行可靠性	低	高
叶轮直径	较大	较小	耐磨性	较差	较好
风机转速	较高	较低	检修难度	复杂	简单
风机效率曲线	近似椭圆	近似圆面	检修费用	高	低

国内大型燃煤机组引风机采用引增合一方式后,典型配置主要有 2 种:(1) 采用 2 台动叶可调轴流风机;(2) 采用 2 台静叶可调轴流风机。第一种方案在国内百万机组应用范围较广,如国华徐州电厂、国电谏壁电厂、皖能铜陵电厂等,动调风机应用于烟道中,由于旋转部件较多,耐磨性较差,长期运行后故障率较高。第二种方案国内百万机组应用较少,主要由于 2 台静调风机配套电机功率达到 8500 kW,需接引 10 kV 母线,增加了工程造价,同时大功率静调风机对风机制造厂家也是一个重要考验。

根据引风机当前选型及应用情况,该公司提出百万机组配置 3 台静调轴流引风机的设计方案,主要参数及投资费用比较见表 2 及表 3。

表 2 TB 工况下 3 种设计方案主要参数

项目	2 台动调	2 台静调	3 台静调
入口体积流量/(m ³ ·s ⁻¹)	748.68	748.68	534.85
入口全压升/Pa	9005	9005	9005
风机全压效率/%	86.4	83.8	82.6
风机转速/(r·m ⁻¹)	745	745	745
风机轴功率/kW	7634	7871	5433
配套电机功率/kW	8200	8500	5800

表 3 3 种设计方案投资比较

项目	2 台动调	2 台静调	3 台静调
单台风机投资/万元	370	295	265
风机投资费用/万元	740	590	795
风机总投资费用/万元	1 323.5	1 173.5	949
总投资费用差/万元	150	基准	-224.5
运行费用差/万元	-85.87	基准	-6.86
维护费用差/万元	28	基准	4
运行维护费比较/万元	-57.87	基准	-2.86
年费用比较/万元	-32.37	基准	-41.02

表 3 中,总投资费用包括:风机、基础、烟道、土建、风门、起吊等费用,基础投资按 700 元/m³计算,建安按 325 元/m³计算,烟道按 7700 元/t 计算;运行及维护费用按年利用 5500 h 计算,电价按成本 0.26 元/(kW·h)计算;年费用包括总投资费用差、年固定费用率及年运行维护费用差。

从投资比较来看,采用 3×35%静调轴流风机经济性最优,其次为 2×50%动调轴流风机。从运行调节的可靠性及灵活性来看,采用 3×35%静调轴流风机调节可靠性高,操作灵活。根据负荷变化,采用不同的引风机组合方式,保证引风机始终处于高效率运行。

该公司采取 3×35%静调轴流引风机组合方式,引风机实际选型与原设计方案略有偏差,风机转速为 990 r/m,风机配套电机功率为 6450 kW。

2 3×35%静调轴流引风机逻辑设置

由于引风机采用 3×35% 静调轴流风机配置, 送引风机逻辑设置上与常规设计存在较大的不同, 以下重点分析送引风机跳闸之间逻辑设置关系。

2.1 引风机跳闸逻辑设置

引风机跳闸逻辑设置如图 1 所示。

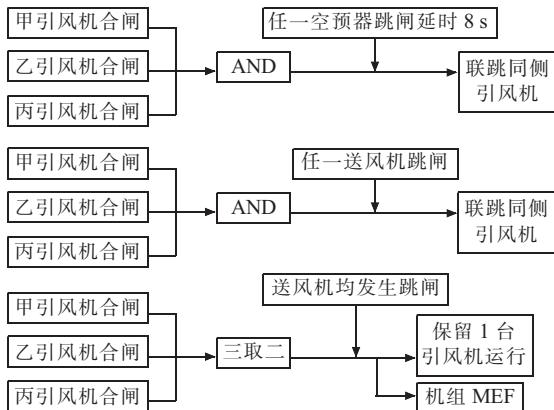


图 1 引风机逻辑设置

(1) 3 台引风机均运行时, 甲(或乙)空预器跳闸 8 s 后, 联跳甲(或乙)引风机。

(2) 3 台引风机均运行时, 甲(或乙)送风机跳闸, 联跳甲(或乙)引风机。

(3) 2 台引风机运行时, 当送风机均停时, 如丙引风机运行, 保留丙引风机运行, 其他引风机跳闸; 如丙引风机未运行, 则保留甲引风机运行。

(4) RB 情况下, 3 台引风机运行, 1 台引风机跳闸, 负荷快减至 700 MW, 同侧送风机不作联跳, 送风机开度作超驰控制; 2 台引风机跳闸, 负荷快减至 400 MW, 并跳闸 1 台送风机。

2.2 送风机跳闸逻辑设置

送风机跳闸逻辑设置见图 2。

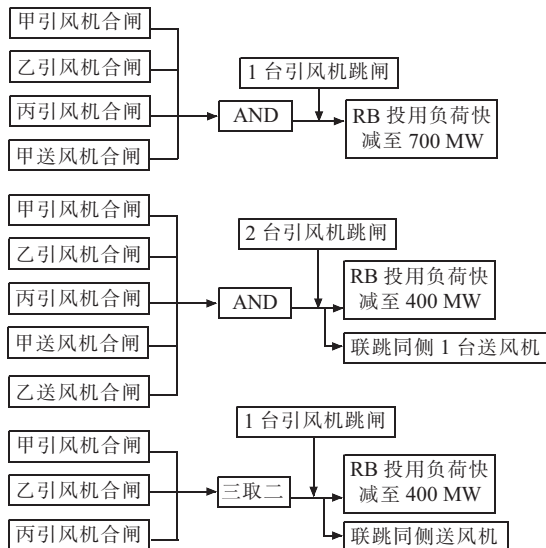


图 2 送风机逻辑设置

(1) 5 台风机(包括送、引风机)均运行时, 1 台引风机跳闸, 机组 RB 动作, 减负荷至 700 MW, 不联跳送风机。

(2) 5 台风机(包括送、引风机)均运行时, 2 台引风机跳闸, 机组 RB 动作, 减负荷至 400 MW, 联跳 1 台送风机。甲乙或甲丙引风机跳闸, 联跳甲送风机; 乙丙引风机跳闸, 联跳乙送风机。

(3) 2 台送风机、两台引风机运行时: ① 甲乙引风机运行, 甲引跳闸联跳甲送风机; ② 甲乙引风机运行, 乙引跳闸联跳乙送风机; ③ 乙丙引风机运行, 丙引跳闸联跳甲送风机; ④ 乙丙引风机运行, 乙引跳闸联跳乙送风机; ⑤ 甲丙引风机运行, 甲引跳闸联跳甲送风机; ⑥ 甲丙引风机运行, 丙引跳闸联跳乙送风机。

3 3×35%静调轴流引风机运行情况

3.1 3×35%静调轴流引风机并列操作

在 1000 MW 机组调试期间, 进行了 3 台引风机并列操作试验 (如图 3 所示)。2012 年 11 月 4 日, 1 号机组负荷 570 MW, 甲引风机静叶开度 50%, 电流 356 A, 乙引风机静叶开度 58%, 电流 349 A, 引风机入口负压 -2.0 kPa。14:55, 启动丙引风机, 其空载电流 176 A。后在甲乙引风机自动调节未切除情况下, 逐渐增加丙引风机出力, 静叶开度在 26% 处电流出现跃升, 电流由 196 A 升至 226 A, 炉压出现瞬间下降过程, 最低降至 -350 Pa, 甲乙引风机电流自动下降, 待炉膛负压恢复正常后, 继续手动增加丙引风机出力, 15:10 在 3 台引风机出力平衡后, 投入丙引风机自动调节。

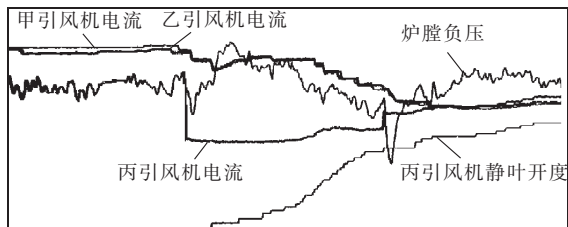


图 3 3 台引风机并列操作

从 3 台引风机并列操作整个过程来看, 炉压有短时变化过程, 但波动尚在允许范围内, 3 台引风机之间未出现相互抢风过程, 也未出现失速现象, 达到了预期效果。另从后期操作经验来看, 3 台引风机并列操作最佳负荷在 600~700 MW 之间。

3.2 3×35%静调轴流引风机解列一台操作

2013 年 1 月 30 日 1 号机组减负荷运行, 当负荷降至 630 MW 机组, 试验要求解列丙引风机 (见图 4), 维持 2 台引风机运行。解列风机前参数: 甲引风机电流 238 A; 乙引风机电流 235 A; 丙引风机电流 237 A。解列丙引风机后参数: 甲引风机电流 327 A; 乙引风机电

能源互联网的发展现状

沈洲¹, 周建华², 袁晓冬², 杨伟¹

(1.南京理工大学自动化学院,江苏南京210094;2.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏南京211103)

摘要:能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础,推动了世界经济和人类社会的发展。在分析能源发展与应用的基础上,引出能源互联网的概念,阐述了能源互联网的内涵与特点。介绍了国内外能源互联网建设概况,结合江苏电网现状提出了江苏发展能源互联网的几点建议。

关键词:能源互联网;智能电网;可再生能源;江苏电网

中图分类号:TK-9

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)01-0081-04

随着化石能源的不断发现与开采,人们逐步重视常规能源日益枯竭和环境保护等问题,世界各国也正积极探索各种不同类型的新能源。目前,可供使用的新能源(如风能、太阳能等)存在分布过于分散、随机性程度高、能量转化效率低和使用成本偏高等一系列问题,使得新能源的大规模发展和推广受到制约。为构建新能源大规模推广应用的理论体系框架,在2003年部分科研项目和媒体宣传资料中出现能源互联网的相关内涵,其后出现了诸多学术研究热点,如智能电网、坚强智能电网、智能配电网、微网、智能微电网等。2008年美国国家科学基金(NSF)项目未来可再生电力能源传输与管理系统的明确提出了能源互联网这一学术概念,指出能源互联网是一种构建在可再生能源发电和分布式储能装置基础上的新型电网结构,是智能电网的发展方向^[1]。

1 能源互联网的内涵和特点

1.1 能源互联网的内涵

能源互联网与之前出现过的智能电网、坚强智能电网、智能配电网、微网、智能微电网等相关概念并不矛盾。可以这样认为,能源互联网是Internet式的智能电网。具体来说,能源互联网是在现有能源供给系统与配电网的基础上,通过先进的电力电子技术和信息技术,深入融合了新能源技术与互联网技术,将大量分布式能量采集装置和分布式能量储存装置互联起来,实现能量和信息双向流动的能源对等交换和共享网络。以可再生能源发电为基础构建的能源互联网络,通过智能能量管理系统实现实时、高速、双向的电力数据读取和可再生能源的接入^[2]。

1.2 能源互联网的特点

能源互联网是新型电力电子技术、信息技术、分布式发电、可再生能源发电技术和储能技术的有机结合,具有以下特点:

(1) 能源来源的种类广泛。能源互联网发电体系包括常规能源、大规模新能源和大容量储能,以可再生能源发电的广泛应用为基础,包容多种不同类型的发电形式。然而,可再生能源发电具有模糊性和随机性,其大规模接入对电网的稳定性产生冲击,从而促使传统的能源网络转型为能源互联网。

(2) 能源来源的地域分散。可再生能源具有较强的地域性特点,来源分散,不易输送。为了最高效地收集和使用可再生能源,需要建立就地收集、存储和使用能源的网络,这些能源网络单个规模小,分布范围广,每个微型能源网络构成能源互联网的一个节点。

(3) 不同能源之间互联。能源互联网是以大规模分布式电源应用为基础,然而大部分微型能源网络并不能保证自给自足,因此,需要将每个微型能源网络互联起来进行能量交换。能源互联网是在传统电网的基础上将分布式发电、储能、智能变电和智能用电组成的微型能源网络互联起来。

(4) 能源网络共享开放。能源互联网不仅具备传统电网的供电功能,还提供能源共享的公共平台,系统支持小容量可再生能源发电、智能家电、电动汽车等随时接入和切出,真正做到即插即用。传统用户不仅是电能使用者,还是电能的创造者,可以没有任何阻碍地将电能传送到能源互联网上并取得相应的回报。从能量交换的角度看,所有微型能量网络节点都是平等的^[2]。

(5) 基础设施建设融入传统电网。传统电网中已有的骨干网络投资大,因此,在能源互联网的结构中应该充分考虑对传统电网的基础网络设施进行改造,并将微型能源网络融入到传统电网中形成新型的大范围分布式能源共享互联网络。

(6) 具有很强的自愈功能。电力系统自愈机制主要是指当电网出现故障时,无需或仅需少量的人为干预,即可实现自动隔离电网中存在危险或潜在危险的器件,使供电中断最小化或恢复其业务的一种机制。能源互联网系统在出现故障时,应能够主动隔离故障,实

现系统自愈功能,必要时允许孤岛运行。

(7) 具备系统运行的高效性。能源互联网通过智能代理终端实现发电端与用户设备之间行为的交互,引入最先进的 IT 和监控技术,既可以对电网运行状态进行精确估计,也可以对负荷、发电端、储能装置等进行实时监控和管理,合理分配电网资源,提高单个资产的利用效率,降低运行成本。

(8) 响应环境友好的政策。能源互联网以分布式可再生能源发电的大量应用为基础,以建立智能型绿色电网为目标,具有绿色、环保的特点,有利于我国改善能源结构,也是构建资源节约型与环境友好型社会的基石^[3,4]。

2 国内外能源互联网建设概况

为了应对未来可再生能源的规模化利用,在能源互联网构想提出之前,各国均以新能源和互联网络为基础的智能电网作为培育新兴产业的重点,有针对性地拟定了发展战略和行动路线。

2.1 美国以智能电网建设为先导推动能源互联网建设

美国虽然尚未明确提出能源互联网,但其提出的智能电网却与能源互联网的内涵有诸多相似之处。美国智能电网技术主要应用在智能电网平台、电网监控和管理、智能计量、需求方管理、集成可再生能源、充电式油电混合动力车或纯电动汽车等方面。早在 2008 年 8 月,美国科罗拉多州的波尔得就完成了智能电网的第一期工程,成为全美第一个智能电网城市。智能电表安装在波尔得的每户家里并与电力公司实现双向通信。消费者不仅可以直观地了解即时电价,从而错开用电量 and 电价的峰平谷阶段,还可以优先使用风电和太阳能等清洁能源。智能变电站可收集到每家每户的用电状况,一旦出现问题,可以重新配备电力,更为有效、安全和可靠地运行电网。目前,美国政府已经在多个州开始设计智能电网,从 2003 年开始一直致力于智能电网研究的得克萨斯州首府奥斯汀市已开始试运行智能电网。此外,通用、IBM、西门子、谷歌、英特尔、思科等企业都积极加入到美国智能电网建设中,并展开了激烈竞争。IBM 将自己的软件和服务器应用到智能电网系统之中,参与各地的智能电网建设。思科主攻链接计量器、转化器、数字化电站、发电厂之间的网络系统。通用生产计量器和部分相关软件。谷歌 2009 年 2 月将开发成功的利用电表节约电费的应用软件 Power Meter 在员工家庭试用。

2.2 德国以实践项目探索来大力推进能源互联网发展

2008 年,德国联邦经济和技术部在智能电网的基础上选择了 6 个试点地区进行为期 4 年的 E-Energy 技术创新促进计划。其目标是建立一个基于信息和通

信技术实现自我调控的智能化能源系统,在整个能源供应体系中实现综合数字化互联以及计算机控制和监测的目标。

(1) 库克斯港 eTelligence 项目。库克斯港在电能使用方面需要综合调节大规模风力发电与供热需求,该项目利用价格杠杆进行自动控制,重点对象为生产型企业和地方用电大户。

(2) 哈茨可再生能源示范区 RegModHarz 项目。哈茨地区的风力、太阳能等自然能源较为丰富且该地区已经建立抽水蓄能水电站,希望依靠可再生能源联合循环利用实现电力供应的最佳调度,对可再生能源发电与抽水蓄能水电站进行协调调度,使其目标效果达到最优。

(3) 莱茵-鲁尔 E-DeMa 项目。该项目主要希望加强消费者与电力系统之间的互动,消费者也可以作为小型电力供应商发挥更积极的作用。即消费者可同时扮演发电者与电力消耗者的专家消费者角色,形成专家消费者能源过多或不足时的交易市场。

(4) 亚琛 Smart W@TTS 项目。该项目希望营建完全自由零售市场。如果零售商能够完全自由地采购与销售,从而可以多角度提升电网的效率,促成符合成本效益和环保的电力供应。

(5) 莱茵-内卡(曼海姆)MOMA 项目。该项目采用了开源软件 OGEMA 直接控制次日价格的提示与家电供电,Energie butler 系统能够帮助个人管理能源,同时也促进了需求响应机制的实现。比如在电力昂贵或电力不是来自可再生能源时,系统会自动关闭冰箱。

(6) 斯图加特 MEREGIO 项目。该项目利用智能电表及各种 ICT 技术,在很大程度上实现对电力生产、电网负荷、电力消耗的自动调节,以达到有效控制二氧化碳减排的效果^[5]。

2.3 我国以实施坚强智能电网来推动能源互联网建设

2009 年 5 月,国家电网公司正式发布了坚强智能电网发展战略。我国的智能电网战略目标是全面建设以特高压电网为骨干网架、各电压等级电网协调发展的坚强电网为基础,以信息化、自动化、互动化为特征的自主创新、国际领先的坚强智能电网^[6]。

华东电网公司于 2007 年在国内率先开展了智能电网可行性研究,并规划了 2008 至 2030 年“三步走”的行动战略。以整合提升调度系统、建设数字化变电站、建设企业统一数据信息平台为主,使电网安全控制水平、经营管理水平得到全面提升。力争到 2010 年全面建成华东电网高级调度中心,2020 年全面建成具有初步智能特性的数字化电网,2030 年真正建成具有自愈能力的智能电网^[7]。

2009 年 2 月,华北电网稳态、动态、暂态三位一体

安全防御及全过程发电控制系统成功通过验收,有力推动了华北公司智能化电网的建设步伐。这套系统将以往分散的在线稳定分析预警系统、电网广域动态监测系统和能量管理系统集成于一体。调度人员无需频繁切换不同的系统与平台,即可实现对电网综合运行情况的全景监视并获取辅助决策支持^[8]。

由中国电力科学研究院等单位承担的国家 973 计划项目“提高大型互联电网运行可靠性的基础研究”研究人员针对当前和未来我国电网大规模互联出现的问题,对电网的安全稳定性问题进行新的基础性和前瞻性研究。该项研究能为降低大电网大停电的风险性提供理论基础和具有重要应用前景的关键技术,并提供进一步研究和开发的平台^[9]。

国家电网公司在 2006 年初启动 SG186 工程,建成运转高效灵活的一体化企业级信息平台,实现“纵向贯通、横向集成”;建成适应公司现代化管理需求的八大业务应用,增强公司各业务管理能力,提高工作质量和效率;建成安全可靠、规范有效的六大保障体系,推动信息化健康、快速、可持续发展。公司信息化水平将力争达到国内领先、国际先进,数字化电网建设取得重大进展,实现信息化企业的建设目标^[10]。2008 年 1 月,华东、华北等电力公司通过 SG186 一体化平台建设工程示范单位评审。2009 年 11 月 SG186 工程实施 ERP 的 28 家省网公司实现系统推广上线。

智能电网的核心技术包括分布式能源系统和储能式混合动力交通工具,无疑智能电网是新能源发展的重要技术支点。国家在可再生能源发电方面也启动了多项 863 高技术研究发展计划项目,如:以煤气化为基础的多联产示范工程,兆瓦级并网光伏电站系统,太阳能热发电技术及系统示范等项目^[11]。

3 江苏省发展能源互联网的几点建议

3.1 努力建成可再生能源示范应用和推广基地

近年来,江苏省新能源产业发展出现快速发展,光伏产业、风能制造产业、生物质能产业皆已崭露头角,产业竞争力显著提高。结合省内 13 个城市的特色,在江苏建成全国领先的可再生能源示范应用和推广基地,推广太阳能、风能、生物质能等可再生能源的应用。建议在南通、盐城、宿迁、淮安和连云港等城市开展居民式风电和光伏计划,加快分布式能源的发展,改变以传统能源为主的状况,提高江苏省支撑引领能源互联网技术领域的创新能力。与此同时,加强推广电动车等新能源汽车的示范及其应用,对新能源汽车出台惠民政策,如加大补贴力度,增设新能源汽车充电站和新能源汽车专用停车位。加快发展电动车等新能源汽车的示范及应用,可以推进机电能源技术协同发展,加速能

源汽车产业结构调整,促进节约型社会的建设^[12]。

3.2 积极构建能源互联网研发的共享平台

目前国内可再生能源技术和设备研发比较分散,缺乏有效的集成和整合平台,应进一步加快可再生能源技术与设备研发布局,构建能源互联网研发的共享平台。以上海能源互联网为模范教材,加快建设江苏能源互联网有关技术研发平台和产业联盟。以江苏省电力科学研究院和东南大学等知名高校研究院所为依托,尽快组建能源互联网研发共享平台。设立相关基础研究项目、对能源互联网体系结构、相关标准协议、分布式系统认同控制等关键基础理论问题进行研究。从长远角度出发,在江苏建成全国性示范能源互联网研发联盟或产业共性技术平台。

3.3 积极争取率先建成智能电网示范城市

在能源互联网时代,电力企业将充分利用在智能电网方面的丰富经验,将成千上万个分布式能源生产企业接入主干电网,从而完成从传统的集电力生产、传输、运营于一体的单一电力能源生产商转型成为电网管理运营服务的提供商。扬州作为配电网建设和管理示范区,完善提升了江苏省公司“三集五大”体系的建设。建设智能配网,以创新为追求,实用为导向,客户感知满意度为核心要素,科学严谨规划为灵魂,构建现代信息化平台为手段。把握好居民感知、社会和谐 2 个维度。形成江苏电网亮点、江苏电网特色,具有先进性、开放性、经济性、推广性。这样有助于带动其他城市的相关产业的发展,为江苏的转型发展提供有力的帮助,采取循序渐进的方式,科学推进能源互联网的发展^[13]。

4 结束语

主要介绍了能源互联网的概念、内涵、特点与国内外发展现状,暨江苏电网发展能源互联网提出了几点建设性意见。积极发展能源互联网,加快第三次工业革命的发展脚步,大大推动创新经济的发展,为率先实现我国能源战略转型提供有力的电力技术保障。

参考文献:

- [1] 崔文静. 能源互联网[J]. 电气时代, 2012(10): 11.
- [2] 孙莹, 李可军, 赵传辉. 新型能源互联网系统: 中国, CN2017 58280U[P]. 2011-03-09.
- [3] 查亚兵, 张涛, 谭树人, 等. 关于能源互联网的认识与思考[J]. 国防科技, 2012(5): 1-6.
- [4] 于慎航, 孙莹, 牛晓娜, 等. 基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 104-108.
- [5] 王叶子, 王喜文. 德国版智能电网“E-Energy”[J]. 物联网技术, 2011(5): 3-5.
- [6] 胡学浩. 智能电网——未来电网的发展趋势[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 1-5.
- [7] 静恩波. 智能电网发展技术综述[J]. 低压电器, 2010(6): 14-18.

- [8] 冯俊青. 智能电网的实现与发展趋势[J]. 信息与电脑, 2010(12):37-38.
- [9] 周孝信, 郭剑波, 孙元章. 大型互联电网运行可靠性基础研究[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 28.
- [10] 郭丽庆. SG186 系统在国家电网企业中应用的研究[D]. 保定河北农业大学, 2012.
- [11] 王成山, 高 菲, 李 鹏, 等. 可再生能源与分布式发电接入技术欧盟研究项目述评[J]. 南方电网技术, 2008, 2(6): 1-6.
- [12] 单业才. 树立“大能源观”助力江苏经济社会发展[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(4): 1-2.
- [13] 袁志彬. 上海距离“能源互联网”到底有多远[N]. 文汇报,

2013-05-29(012).

作者简介:

沈 洲(1988), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向为光伏发电系统;

周建华(1983), 男, 江苏镇江人, 工程师, 从事电力系统分析与可再生能源发电并网技术工作;

袁晓冬(1979), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 从事电能质量、新能源及智能配网方面的研究工作;

杨 伟(1965), 男, 江苏徐州人, 副教授, 研究方向为电力系统运行与分析。

Development and Suggestion of the Energy-Internet

SHEN Zhou¹, ZHOU Jianhua², YUAN Xiaodong², YANG Wei¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Energy is an important material basis of the survival and development for human society, and greatly promotes the development of world economy and human society. This paper leads the concept of the energy internet based on the analysis of development and application of energy, and elaborates the connotation and characteristics of the energy-internet. Finally, the construction of energy-internet home and abroad are introduced, and some pieces of suggestions for the development of energy-internet within Jiangsu Power Grid combining with its current status are presented.

Key words: energy-internet; smart grid; renewable energy; jiangsu power grid

(上接第 80 页)

流 236 A。解列操作期间, 炉膛压力波动范围-200~+150 Pa 之间, 未发生突变现象, 运行状况良好。

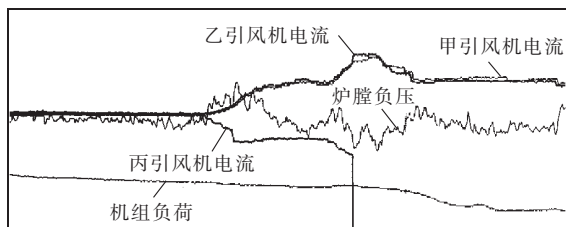


图 4 3 台引风机运行解列丙引风机操作

4 结束语

百万机组配置 3×35% 静调轴流风机具有较强的安全经济优势, 工程造价低, 操作也相对灵活, 单台引

风机容量相当于 600 MW 机组配套引风机, 厂用 6 kV 母线即可满足风机启动降压要求, 国产选型也相对容易, 该方案为今后新建百万机组引风机选型提供了新的思路。

参考文献:

- [1] 孙月亮. 三种锅炉引风机设置方案的技术经济分析[J]. 华北电力技术, 2010(10): 27-29.

作者简介:

崔国华(1961), 男, 江苏金坛人, 高级工程师, 从事火电厂设备管理工作;

朱广忠(1973), 男, 江苏兴化人, 工程师, 从事火电厂设备运行管理工作;

何俊松(1981), 男, 江西宜春人, 助理工程师, 从事火电厂热控设备维护管理工作。

Application of 3×35% Static Blade Adjustable Axial Flow Induced Draft Fan in 1000 MW Power Unit

CUI Guohua, ZHU Guangzhong, HE Junsong

(Jiangsu Xinhai Power Generation Co. Ltd., Lianyungang 222023, China)

Abstract: Three static blade adjustable axial flow induced draft fans have been applied in one 1000 MW power unit recently. For evaluating the safety and economy, comparison analysis between the new fans and the typical fans widely adopted in other 1000MW power units are performed. It is found that significant improvement can be achieved by using the three induced draft fans, from the aspects of reliability, construction cost and operation. It is believed that this work can provide valuable reference for other newly constructed 1000 MW power units.

Key words: induced draft fan; static blade adjustment; ultra-supercritical