

★四川省一级期刊

• 万方数据数字化期刊群入网期刊

• 《中国学术期刊(光盘版)》入编期刊

• 《中国期刊全文数据库》收录期刊

• 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊

• 北极星 中华期刊网入网期刊

• 中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊

• 中国农村电气化信息网

• 重庆维普中文科技期刊数据库

• 《超星数字图书馆》入网期刊

• 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录

四川電力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954



9 771003 695159

四川省电机工程学会 四川电力科学研究院

Vol.38
2015
No.6



华一 致能
HYERGY



四川华一电器有限公司座落于四川省广汉市(三星堆古文化遗址),距离成都市区38 km 具有良好的交通运输条件。公司注册资金10 160万元,占地230亩(其中生产厂房建筑面积67 000 m²);现有员工500余人,40%员工具有大专以上文化程度。

四川华一电器有限公司成立于2001年,是集研发、设计、制造、销售为一体的输配电成套设备制造企业。是四川省高新技术企业、四川省重合同守信用企业、省级企业技术中心,是低压成套开关设备CCC认证产品A类生产企业。

公司是西门子、ABB等世界知名电气公司战略合作伙伴及授权生产商。

公司主要产品:40.5 kV及以下高低压成套开关设备、户内和户外断路器、预装式变电站、开闭所、“三箱”类产品、电缆桥架、封闭式母线槽、变压器等。产品广泛应用于发电厂、变电站、石化、冶金、市政、轨道交通、机械、建材、军工等国民经济重要领域,畅销全国并出口越南、印度、阿塞拜疆、印度尼西亚、土耳其等国家。以其高品质及高效快捷的服务,赢得了广大客户的认同和好评。

公司按照ISO9001、ISO14001和OHSAS18001标准建立了质量、环境、职业健康与安全一体化的管理体系,使产品从设计、开发到生产、服务全过程都得到有效的管理和控制。所有产品均通过了国家级试验站型式试验,低压成套开关设备全部通过CCC认证。



四川华一电器有限公司

全国服务热线: 400-1698-678

地址: 四川省广汉市三亚路三段一号
电话: 0838-5100668 0838-5105556

邮编: 618300
传真: 0838-5100888

《四川电力技术》 编辑委员会名单

主任委员 王 平

副主任委员 张 伟

刘俊勇

委 员

(按姓氏笔画为序)

方文弟 王 卓 白家棣

刘 勇 朱白桦 朱国俊

朱 康 邓亚军 鄢小端

李兴源 李建明 严 平

胡 灿 徐 波 唐茂林

韩晓言 谢 舫 甄 威

秘 书 李世平

吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN1003-6954
CN51-1315/TM

2015年第38卷第6期(总240期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主 编:胡 灿

副 主 编:吴小冬

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力科学研究院情报室

地 址:成都市青华路24号

邮政编码:610072 电话:(028) 87082037

传 真:(028) 87082036

E-mail:cdsclj@163.com

印 刷:四川经纬印务有限公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册6.00元

[期刊基本参数] CN51-1315/TM* 1978*

b* A4* 94* zh* P* ¥6.00* 4300* 21*

2015-12

目 次

• 基金项目 •

基于优化的果蝇算法的光伏 MPPT 仿真研究

..... 王素宁 潘三博 杨青斌 林成栋 (1)

基于模糊理论的电缆故障风险预估模型

梁 敏 李兴源 (5)

基于 GIS 系统的配电网分析与研究

..... 张东明 常喜强 刁海勇 王维庆 任 华 (9)

• 高压技术 •

特高压直流输电系统逆变站换相失败对整流站的影响及其保护配置策略优化建议

..... 禹 佳 孙 文 李 琨 刘俊杰 (12)

高压电缆附件局部放电在线监测系统

..... 杨 琳 田晓菲 吴德永 刘帅卓 王 颖 吴小林 (18)

一起 PT 引流线设备夹断裂失效分析与防范措施

..... 王红梅 蔡志强 王 志 李 刚 (23)

基于成都电网高压输电线路雷击跳闸的研究与分析

黄江龙 李倩竹 (27)

超特高压交流紧凑型输电线路带电作业试验分析

..... 彭 勇 肖 宾 雷兴列 刘 凯 刘 庭 吴 田 苏梓铭 唐 盼 (33)

强电磁场对 1 000 kV 等电位在线验电器的影响和防护措施

..... 张大堃 张文胜 (38)

高压开关柜过热原因分析及监测措施

夏志军 (43)

一种用于配电变压器绕组材质诊断的新方法

何 良 刘隆晨 毛 强 (47)

宜宾站换流变阀侧电压测量故障分析及处理

孙 文 禹 佳 陈 伟 (51)

变电站铜铝过渡线夹超声相控阵检测工艺及应用

..... 王 志 王红梅 陶 勇 林雪松 蔡志强 (56)

• 电网技术 •

四川电网实时发电计划与 AGC 闭环控制策略研究

..... 周 剑 于昌海 吴继平 滕贤亮 (60)

综合智能可视化告警与 WAMS 一体化应用的研究与实现

..... 温丽丽 赵 静 郭 亮 (63)

基于自适应 FCM 算法的智能母线负荷聚类特性研究

..... 吴 茵 岳菁鹏 罗 欣 杨小卫 (68)

基于 K-means 聚类算法的风电场机群划分方法

..... 徐立亮 胡仁祥 张 毅 常喜强 闫亚东 (72)

自升压标准电压互感器的误差测量方法

..... 蒋映霞 吴德永 孙 军 徐 灿 (76)

基于 D-S 证据理论的电能质量在线监测算法研究

..... 赵 静 温丽丽 郭 亮 (80)

地市供电公司信息通信综合网控室的建立

..... 罗晓战 万烨松 曾绍成 (85)

基于 RTDS 的发电机功率变送器录波性能试验

文一字 (88)

2015 年全年总目录

(91)

本期责任编辑 刘静文 编辑 吴小冬 洪 洁 程文婷

CONTENTS

Simulation Research of Photovoltaic MPPT Based on Fruit Fly Optimization Algorithm	Wang Suning Pan Sanbo Yang Qinbin Lin Chendong (1)
Risk Forecast Model of Cable Fault Based on Fuzzy Theory	Liang Min Li Xingyuan (5)
Analysis and Research of Distribution Network Based on GIS System	Zhang Dongming Chang Xiqiang Diao Haiyong Wang Weiqing Ren Hua (9)
Influence of Commutation Failure of Inverter Station on Rectifier Station in UHVDC Transmission System and Suggestions for Optimization of Its Protection Configuration Strategy	Yu Jia Sun Wen Li Kun Liu Junjie (12)
Design of On – line Monitoring System for Partial Discharge of HV Cable Accessories	Yang Lin Tian Xiaofei Wu Deyong Liu Shuaizhuo Wang Ying Wu Xiaolin (18)
Failure Analysis on a Fractured Jumper Conductor Clamp of PT and Its Preventive Measures	Wang Hongmei Cai Zhiqiang Wang Zhi Li Gang (23)
Study and Analysis on HV Transmission Line Tripping Caused by Lightning Stroke in Chengdu Power Grid	Huang Jianglong Li Qianzhu (27)
Experimental Analysis of Live – line Working Carried out on UHV/EHV AC Compact Transmission Lines	Peng Yong Xiao Bin Lei Xinglie Liu Kai Liu Ting Wu Tian Su Ziming Tang Pan (33)
Influence of High Electromagnetic Environment on 1 000 kV Equipotential On – line Electroscopic and Its Protective Measures	Zhang Dakun Zhang Wensheng (38)
Cause Analysis on Overheating of Enclosed High – voltage Switch Cabinet and Its Monitoring Measures	Xia Zhijun (43)
A New Method to Diagnose Winding Material of Distribution Transformer	He Liang Liu Longchen Mao Qiang (47)
Analysis and Treatment for Valve – side Voltage Measurement Fault of Converter Transformer in Yibin Converter Station	Sun Wen Yu Jia Chen Wei (51)
Ultrasonic Phased Array Detection Technology and Its Application for Copper to Aluminum Terminal Connector of Substation	Wang Zhi Wang Hongmei Tao Yong Lin Xuesong Cai Zhiqiang (56)
Research on Closed – loop Control Strategy with Real – time Generation Scheduling and AGC in Sichuan Power Grid	Zhou Jian Yu Changhai Wu Jiping Teng Xianliang (60)
Research and Implementation of Integrated Application of Integrated Intelligent Visual Alarm and WAMS	Wen Lili Zhao Jing Guo Liang (63)
Research on Intelligent Bus Load Clustering Characteristics Based on Adaptive FCM Algorithm	Wu Yin Yue Jingpeng Luo Xin Yang Xiaowei (68)
Partitioning Method of Wind Turbine Grouping Based on K – means Clustering Algorithm	Xu Liliang Hu Renxiang Zhang Yi Chang Xiqiang Yan Yadong (72)
Error Measurement Method for Self – boosting Standard Voltage Transformer	Jiang Yingxia Wu Deyong Sun Jun Xu Can (76)
Research on On – line Monitoring Algorithm of Power Quality Based on D – S Evidence Theory	Zhao Jing Wen Lili Guo Liang (80)
Establishment of Integrated Information Communication Network Control Room for Prefectural – level Power Supply Company	Luo Xiaozhan Wan Yesong Zeng Shaocheng (85)
Wave Recording Performance Test of Power Transducer in Generator Based on RTDS	Wen Yiyu (88)
Contents of 2015	(91)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2015 Vol. 38 No. 6
(Ser. No. 240)

Bimonthly, Started in 1978

Address: No. 24, Qinghua Road, Chengdu, Sichuan, China
Postcode: 610072

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering
Sichuan Electric Power Research Institute

Editor in chief: Hu Can

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

基于优化的果蝇算法的光伏 MPPT 仿真研究

王素宁¹ 潘三博¹ 杨青斌² 林成栋¹

(1. 上海电机学院电气学院, 上海 201306;

2. 中国电力科学研究院新能源研究所, 江苏 南京 210003)

摘 要: 光伏阵列在不同的光照强度和温度等外界环境下, 其 $I-V$ 和 $P-V$ 输出特性曲线呈非线性。为了提高光伏发电系统的发电效率, 对其进行快速和精准的最大功率跟踪显得尤为重要。果蝇算法是一种求解函数极值的新算法, 其具有收敛速度快且准确的特点, 因此, 在建立光伏阵列的数学模型基础上, 提出了一种改进的果蝇算法的光伏最大功率跟踪方法, 并通过在 Matlab 中仿真, 与粒子群跟踪算法的跟踪性能进行了对比, 证明了该算法在光伏最大功率跟踪方面的快速性和有效性。

关键词: 光伏阵列; 最大功率跟踪; Matlab 仿真; 改进的果蝇算法

Abstract: Under different sun light and temperature of the external environment, the $I-V$ and $P-V$ output characteristic curves of photovoltaic (PV) array are nonlinear. In order to improve the efficiency of photovoltaic power generation system, it is important to track the maximum power point quickly and accurately. Fruit fly algorithm is a kind of new algorithm to solve the extremum of function, it has a quick and accurate convergence speed, therefore, a kind of improved fruit fly algorithm for photovoltaic maximum power point tracking is proposed based on the established mathematical model of PV array. Through the simulation with Matlab, the quickness and accuracy of the proposed algorithm are verified by comparing tracking performance with particle swarm optimization algorithm.

Key words: PV array; MPPT; Matlab simulation; improved fruit fly optimization algorithm

中图分类号: TM615 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-0001-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.001

0 引 言

随着光伏发电系统在世界范围内的广泛应用, 光伏发电系统也渐渐暴露出了许多问题。其中最突出的问题就是光伏发电系统效率偏低, 光伏电池不能完全地发挥其效能。要解决此问题, 提高光伏发电系统的跟踪效率是其必经之路, 即, 寻找更优良的光伏最大功率跟踪控制算法是必要的^[1-2]。通过提高光伏发电系统的跟踪效率, 进而改善整个系统的发电效率。

2011 年 7 月, 台湾大学教师潘文超博士提出一种新的智能优化算法——果蝇算法。果蝇算法源于提出者对果蝇觅食行为观察后, 总结模拟果蝇在寻找食物的过程中的行为, 这种算法可广泛应用于科学和工程领域^[3-4]。

目前已经存在的最大功率跟踪方法有固定电压法 (constant voltage tracking, CVT)、扰动观察法

(perturbation & observation, P&O, 俗称爬山法)、电导增量法 (incremental conductance, INC) 和粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)^[5] 等。但它们都有自身的不足, 如动态特性不好, 不能应对外界环境的变化, 当环境温度、光照强度的变化等, 跟踪到最大功率点后会其附近来回振荡, 损失掉部分能量。针对上述情况, 利用果蝇算法在求解目标函数最大值收敛速度极快的特性, 提出一种改进的果蝇优化算法实现最大功率跟踪的方法, 能够克服以上问题, 实现快速、精确、振荡较小地得到光伏电池最大功率点, 减少功率损耗。

1 光伏阵列数学模型和输出特性研究

1.1 光伏电池工程模型

光伏电池的等效模型^[6-7] 根据电子学理论, 光伏电池的等效电路如图 1 所示。

根据图 1, 忽略结电容 C_j , 可以得到光伏电池的 $I-U$ 特性曲线方程为^[8]

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

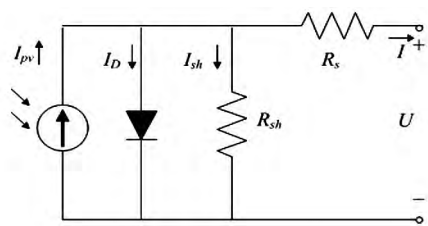


图1 光伏电池等效电路

式中: I_L 为光电流, A; I_0 为反向饱和电流, A; q 为电子电荷 (1.6×10^{-19} C); K 为玻耳兹曼常数 (1.38×10^{-23} J/K); T 为绝对温度, K; A 为二极管因子; R_s 为串联电阻, Ω ; R_{sh} 为并联电阻, Ω 。对电路模型简化处理, 推导出一个方便计算最大功率的工程模型, 即式(2)。

$$\begin{cases} I = I_{sc} \{ 1 - C_1 [e^{\frac{U}{C_2 V_{oc}}} - 1] \} \\ C_1 = (1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) e^{-\frac{U_m}{C_2 V_{oc}}} \\ C_2 = (\frac{U_m}{V_{oc}} - 1) [1 \ln(1 - \frac{I_m}{I_{sc}})]^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

光伏阵列是由若干太阳能电池板根据负载容量大小要求, 通过串并联的方式组成较大功率的装置。因此, 光伏阵列和单个电池板之间有如下的关系:

$$V_N = N_s V \quad (3)$$

$$I_N = N_p I \quad (4)$$

$$P_N = I_N V_N \quad (5)$$

$$I = N_p I_{sc} \{ 1 - C_1 [e^{\frac{U}{C_2 V_{oc}}} - 1] \} \quad (6)$$

式中: V 为光伏电池板的输出电压; I 为光伏电池板的输出电流; P 为光伏电池板的输出功率; N_s 为太阳能电池板串联数目; N_p 为太阳能电池板并联数目; V_N 为光伏阵列的输出电压; I_N 为光伏阵列的输出电流; P_N 为光伏阵列的输出功率。

1.2 光伏阵列输出特性曲线

采用尚德公司的光伏电池板, 在标准测试下参数为: $V_{mp} = 36.4$ V, $I_{mp} = 5.34$ A, $V_{oc} = 45.3$ V, $I_{sc} = 5.67$ A, $P_{max} = 196$ W。光伏阵列在受到外界不同的光照条件下, 其 $I-V$ 和 $P-V$ 输出特性曲线如图2、图3所示。

由图2和图3看出温度相同时, 随着光照强度的增加开路电压几乎不变, 短路电流增加变化较大, 最大功率也有所增加。

通过图2、图3仿真结果可以得出以下结论: 太阳能电池由于光照强度等环境因素影响很大, 其输

出具有明显的非线性。基于光伏电池输出特性具有非线性和最大功率点的特点; 而且最大功率点也随着光照强度和环境温度等因素变化, 为提高能量转换效率, 在实际应用中光伏电池需采用适当的最大功率点跟踪算法控制光伏系统, 保证光伏电池总是运行在最大功率点。

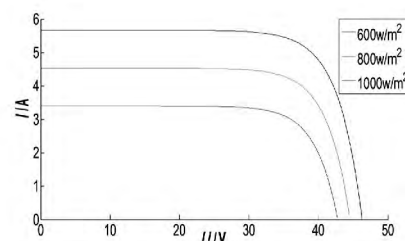


图2 不同光照强度下的 $I-V$ 特性曲线

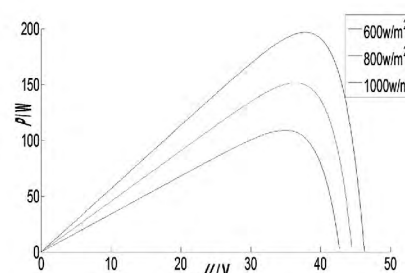


图3 不同光照强度下的 $P-V$ 特性曲线

2 果蝇优化算法原理

2.1 果蝇算法在最大功率跟踪上应用分析

果蝇算法是一种模仿果蝇觅食行为的寻优新方法。果蝇寻找食物先依靠灵敏的嗅觉判断与食物的大致距离, 再利用视觉向食物方向靠近, 多个果蝇一起觅食就构成一种群体智能寻优算法^[9-10]。

目前果蝇算法已经成功应用到数据挖掘技术、Z-Score 模型系数、广义回归神经网络参数优化、支持向量机参数优化、最大功率分类预测和求解数学函数极值等领域^[11-12]。

光伏最大功率跟踪的过程实质就是对光伏阵列建立的目标函数进行最优值寻找的过程, 即找到公式(5)的最大值。果蝇算法在寻找目标函数最优值方面具有较好的收敛性, 每个果蝇个体根据自己的嗅觉先判断出光伏最大功率点的具体位置, 然后通过沿着横坐标和纵坐标按照一定的步长飞行逐步靠近最大值, 通过比较每个果蝇个体的最优值, 得到果蝇种群的最优值。果蝇群体迭代搜索食物示意图4所示。

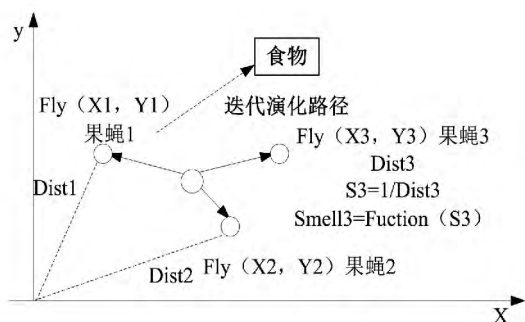


图4 果蝇群体迭代搜索食物示意图

2.2 果蝇算法的步骤

1) 首先对果蝇群体位置的初始化,初始化结果为 $\text{init}U_axis$; $\text{init}P_axis$ (U 代表电压值, P 代表功率值);

2) 设定电压和功率搜索方向为随机函数 $\text{rand}()$ 产生一个 $[0, 1]$ 的步长,则电压和功率的随机搜索坐标便可以通过下面的公式获得。

$$U_i = \text{init}U_axis + 10 \times \text{rand}() \quad (7)$$

$$P_i = \text{init}P_axis + 10 \times \text{rand}() \quad (8)$$

3) 由于最大值位置不可知,因此需要估计光伏电压和功率当前位置和原点之间的距离 Dist_i ,之后计算最大值判定值 S_i , S_i 等于距离 Dist_i 的倒数。

$$D_i = \frac{1}{\sqrt{U_i^2 + P_i^2}} \quad (9)$$

$$S_i = \frac{1}{D_i} \quad (10)$$

4) 将各个味道浓度判定值代入味道浓度判定函数 Fitness (适应值函数),并找出群体最优果蝇位置和最值,将 S_i 代入最大值判定函数 Function 中,将公式(5)代入味道浓度判定函数,寻找出光伏阵列当前位置的最大值。

$$\text{Smell}(i) = \text{Function}(S_i) \quad (11)$$

5) 光伏阵列最大值由式(12)获得。

$$[\text{bestSmell} \text{ bestIndex}] = \max(\text{Smell}(i)) \quad (12)$$

6) 保留光伏阵列当前最大值和与其对应的电压和功率坐标,这时果蝇群体通过自身的视觉对食物源进行定位,之后飞向最大值所在的位置。

$$\text{Smellbest} = \text{bestSmell} \quad (13)$$

$$U_axis = X(\text{bestIndex}) \quad (14)$$

$$P_axis = Y(\text{bestIndex}) \quad (15)$$

7) 进入迭代寻优,重复迭代步骤2)~5),同时判断最大值是否大于前一迭代局部最大值;若成立,则执行步骤6)。

从以上步骤可发现果蝇优化算法只需设定种群规模群、搜索半径和种群繁衍代数,其参数设定方便,算法结构简单,易于编程实现。

2.3 改进的果蝇优化算法

由步骤2)中的公式(7)和公式(8)可以明显看出,横纵坐标的初始位置是一个随机分布函数,搜索范围很大,经过公式(9)和公式(10)将味道浓度判定值 S_i 变得很小;这时将味道浓度作为判定函数,找到最优值很慢,因此在横纵坐标迭代区间进行缩小,将电压和功率值分别归一化为无量纲的数值,将其范围归一化到 $(0, 1)$ 区间,即将上述的步骤3)中由 U_i 和 P_i 计算得到 S_i 的自变量进行归一化,即

$$U_{il} = U_i / V_{OC} \quad (16)$$

$$P_{il} = P_i / P_{mp} \quad (17)$$

式中: V_{OC} 为光伏开路电压; P_{mp} 为光伏给出的额定功率。

将式(16)、式(17)的电压和功率新坐标重新带入式(9)、式(10)得到新的 D_{il} 和 S_{il} ,再带入步骤4)式(11)中的判定函数 Function 中重新计算。

当迭代结束,找到最大功率值时进行反归一化,将电压和功率坐标值反归一化为真实值。将步骤6)式(14)、式(15)中的电压和功率坐标进行改写为

$$U_axis^{new} = U_axis \times V_{OC} \quad (18)$$

$$U_axis^{new} = X(\text{bestindex}) \quad (19)$$

$$P_axis^{new} = P_axis \times P_{mp} \quad (20)$$

$$P_axis^{new} = Y(\text{bestindex}) \quad (21)$$

依照这个思路,使得果蝇算法得到优化。在精度不减小的条件下,为了进一步加快搜索范围,优化的果蝇算法采用变步长进行搜索迭代。

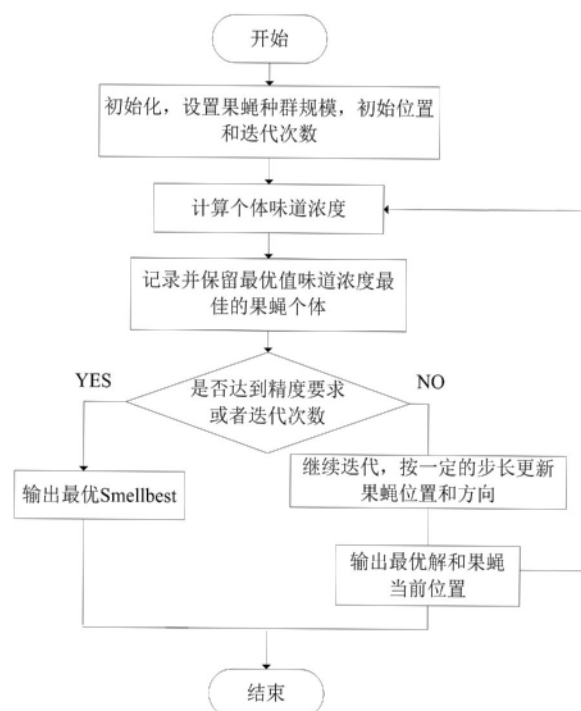


图5 软件流程图

在迭代过程中采用新的坐标

$$U_i = \text{init}U_Axis + K \times \text{rand}() - \beta \quad (22)$$

$$P_i = \text{Init}P_axis + K \times \text{rand}() - \beta \quad (23)$$

式中 K 为常数, 范围在 $[0, 1]$ 内 $\beta = \frac{\text{Smellbest} - \text{bestSmell}}{\text{bestSmell}}$ 。

将得出的果蝇每个个体最优值进行比较, 得出最大值, 设定一个误差值 E_{error} , 当最大值与理论值差值的绝对值小于 E_{error} 时, 即 $|\text{Smellbest} - P_{\text{max}}| < E_{\text{error}}$ 并且到达最大迭代次数, 则停止迭代。

具体详细流程图参考图 5。

3 实验结果分析

在光伏电池温度 $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、辐射强度 $R=1\ 000\text{ W/m}^2$ 的情况下对果蝇优化方法和 PSO 进行仿真实验。仿真结果如图 6 所示。

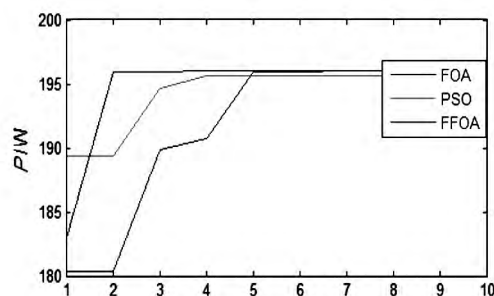


图 6 3 种算法仿真结果对比

4 对比与结论

通过仿真验证, 从图 6 中得出改进的果蝇优化算法在跟踪速度方面比 PSO 具有明显优势。该算法原理简单, 实现起来方便, 在寻找光伏阵列最大值上收敛速度特别快。具体表现在以下 4 个方面:

1) 种群规模: 果蝇优化算法的种群规模为 20, PSO 的种群规模 30, 改进的果蝇优化算法种群规模仅为 10。

2) 计算量: 在同样的迭代次数下, 改进的果蝇优化算法跟踪到最大功率点的种群规模少, 需要设定的参数少, PSO 需要设置 PopSize (种群规模)、 MaxIt (迭代次数)、 $\text{iter}=0$ (标志位)、 maxw (最大惯性权值)、 minw (最小惯性权值)、 w (每一步惯性权值)、 interdec (每一步惯性权值变化量)、 popul (位置参数)、 vel (速度参数)、 $c1$ (速度方向迭代计算系数)、 $c2$ (速度方向迭代计算系数) 等参数。而改进的果蝇优化算法只需要 PopSize (种群规模)、 MaxIt

(迭代次数)、 InitX_axis 和 InitY_axis (初始位置和方向参数); 两者相比较, 改进的果蝇优化算法在参数设置方面节省程序空间, 程序运行需要的时间快。

3) 快速性: 果蝇优化算法和 PSO 算法需要迭代 5 次才能跟踪上, 而改进的果蝇优化算法第 2 次就能跟踪上。

4) 精确度: 光伏最大功率值的理论值是 196 W , 果蝇优化算法得到的数值为 195.987 W , 比 PSO 的精确度要高。

具体对比结果如表 1 所示。

表 1 算法运行结果对比

算法	基本果蝇算法	粒子群算法 (PSO)	改进的果蝇算法 (FFOA)
参数	种群规模 20, 需要设置 4 个参数	种群规模 30, 需要设置 11 个参数	种群规模 10, 需要设置 4 个参数
跟踪速度	第 5 次跟踪上	第 5 次跟踪上	第 2 次跟踪上

该算法还存在一定的缺点: 由于光伏最大值判定取值为距离的倒数, 它限定了变量的取值为正, 同时限制了它的使用范围; 并且收敛容易陷入局部最大值, 稳定性也有待进一步研究。

改进: 针对陷入局部极值问题可以采用和其他智能算法或者数学方法结合, 扩大收敛范围。

参考文献

- [1] 高志强, 王建隼, 纪延超, 等. 一种快速的光伏最大功率点跟踪方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 105-109.
- [2] 赖东升, 杨苹. 一种应用于光伏发电 MPPT 的变步长电导增量法[J]. 电力电子技术, 2012, 46(3): 40-42.
- [3] 潘文超. 果蝇最佳演化算法—最新演化式计算技术[M]. 台湾: 沧海书局, 2011.
- [4] 潘文超. 应用果蝇优化算法优化广义回归神经网络进行企业经营绩效评估[J]. 太原理工大学学报, 2011, 29(4): 1-5.
- [5] 陈剑, 赵争鸣, 袁立强. 等. 光伏系统最大功率点跟踪技术的比较[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(5): 700-704.
- [6] 苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 409-412.
- [7] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.

(下转第 17 页)

统;延时 2.602 s,Y 闭锁,跳交流断路器。

3.3 换相失败保护策略优化建议

在目前策略下,结合特高压直流实际运行情况可知,特高压直流在 4 000 MW 功率以上时,若发生换相失败引起 2 次功率波动后,系统可以保持稳定;但如果发生 3 次及以上类似功率波动过程后,电网有可能稳定破坏。建议对换相失败保护进行优化。

1) 建议直流运行在 4 000 MW 以上增加双极换相失败加速段。

2) 建议极控检测本极在运阀组均发生连续任一桥换相失败,将本极动作信号置位并发给对极。极控检测本极动作信号和对极动作信号同时满足,闭锁本极。

3) 在增加双极换相失败加速段后,建议直流双极功率高于 4 100 MW,开放双极换相失败加速段跳闸功能;直流双极功率低于 4 000 MW,闭锁双极换相失败加速段跳闸功能。

4 结 语

以宾金直流换相失败为例,分析了逆变侧换相失败对整流侧交、直流系统的影响,提出以下建议:

1) 任一桥发生换相失败的保护策略及安稳装置的配合随着电网的发展还有进一步研究优化的空间。若阀组中任一桥发生换相失败,为防止陷入互相扰动的恶性循环中,建议换相失败保护定值加快闭锁该阀组时间。

2) 在目前的保护配置策略及安稳装置的配置策略下,若复奉、宾金、锦苏特高压直流同时换相失

败,直流系统被退回的有功功率会在同一送端电网(四川电网)产生较大的扰动,影响安全稳定运行。鉴于此,若检测到多条特高压直流同时发生换相失败,建议对处于在同一送端的多条直流启动安控装置的同时进行远方切机。

3) 直流系统在 4 000 MW 以上时,建议保护逻辑增加双极换相失败加速段程序。

4) 建议直流系统中对 400 V 负荷(主泵软启动器、风机变频器、换流变压器冷却器)保护整定值考虑换相失败导致的扰动因素。

5) 在发生换相失败后,建议送端电网降低系统的电气量(频率、电压)的暂态波动幅度,这样有利于直流系统快速恢复。

参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社 2011.
- [2] 刘振亚. 特高压电网(第1版)[M]. 北京: 中国经济出版社 2005.
- [3] 国网运行分公司编组 特高压直流换流站岗位培训教材: 二次系统[M]. 北京: 中国电力出版社 2012.

作者简介:

禹 佳(1983), 本科, 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;

孙 文(1980), 本科, 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;

李 琨(1985), 本科, 助理工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;

刘俊杰(1989), 本科, 助理工程师, 研究方向为特高压直流输电技术。

(收稿日期: 2015-08-21)

(上接第4页)

[8] 万晓凤, 张燕飞, 余运俊, 等. 光伏电池工程数学模型比较研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(3): 113-117.

[9] 韩俊英, 刘成忠. 自适应混沌果蝇优化算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(5): 1313-1316.

[10] 张勇, 夏树发, 唐东生, 等. 果蝇优化算法对多峰函数求解性能的仿真研究[J]. 暨南大学学报, 2014, 35(1): 82-87.

[11] 雷秀娟, 史忠科, 周亦鹏. PSO 优化算法演变及其融合策略[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(7): 90-93.

[12] 靳其兵, 赵振兴, 苏晓静, 等. 基于粒子健康度的快速收敛粒子群优化算法[J]. 化工学报, 2011, 62(8):

2328-2333.

作者简介:

王素宁(1990), 硕士研究生, 主要研究方向为光伏发电技术;

潘三博(1974), 副教授, 硕士生导师, 主要研究可再生能源光伏发电及储能技术、高效率电力电子变换器、谐振逆变器等方面;

杨青斌(1988), 助理工程师, 主要研究方向为新能源发电及其并网检测;

林成栋(1991), 硕士研究生, 主要研究方向为光伏逆变器设计。

(收稿日期: 2015-08-26)

基于模糊理论的电缆故障风险预估模型

梁 敏, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 在电力电缆预防性试验、运行状态在线监测、运行环境统计数据的基础上,应用模糊理论的方法确定各指标的隶属度,计算合适的权重,将这些分散指标的状态利用模糊综合评判法进行综合,结果反映了电缆综合运行状态。将不同等级的运行情况赋值量化,计算得到电缆整体风险值,构建了能够反应电缆整体故障风险大小的评估模型。对一定区域内多条电缆风险状态进行评估,并将评估结果进行量化排序,可以使管理与维护人员了解一段时间内哪些电缆最易发生故障,以便于合理地分配对多条电缆的监控力度,对故障可能性更高的电缆给予更高的关注度。

关键词: 电力电缆; 模糊综合评判; 故障风险

Abstract: Based on the statistical data of preventive experiments, on-line monitoring of operating condition and runtime environment, fuzzy theory is used to confirm the relative degree of each target and calculate the weighting factor. And then these targets are synthesized by fuzzy comprehensive evaluation, the results reflect the comprehensive operating condition of cables. The operating condition with different risk grade is assigned to calculate the overall value at risk for cables, and the evaluation model is established to reflect the overall risk level of cable. The risk condition of several cables in a certain area are evaluated, and the evaluation results are qualified and ranked for the management and maintenance staff to know which cables are more prone to failure, so that they can give more attention to the cables with higher failure probability.

Key words: power cable; fuzzy comprehensive evaluation; failure risk

中图分类号: TM247 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-05-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.002

0 引 言

随着中国经济建设和科学技术的快速发展,电力电缆的投运越来越广泛,数量也逐年增长;但是,电力电缆多埋于地下,一旦发生故障,寻找起来十分困难,往往要花费数小时甚至几天,浪费了大量的人力财力,同时会造成难以估计的停电损失,因此如何准确、迅速、经济地预估、查寻、排除电缆故障,保证电网的安全运行,成为电缆使用中最重要的工作。

目前电缆故障诊断发展方向是主动对电缆绝缘状态进行在线监测,分析绝缘老化情况,提前发现电缆线路故障隐患,在准确检测基础上,实现电缆的预防性维修过渡至预知性维修。以电缆的状态监测为基础,综合各种测量值,电缆运行环境的统计量,对电缆整体的运行状况及其风险值进行评估;并对多条电缆进行风险排序,便于供电部门更好分配监测力度,科学、准确、安全、经济地做好状态维修,减少故障发生。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51037003)

少电缆故障导致的停电停产,提高电缆线路运行的安全度,保证供电系统的可靠性,具有良好的社会效益。

1 电缆故障的原因及指标

造成电力电缆故障发生往往是由多个因素共同作用下的结果^[1-2];如果不能及时处理,会导致电气事故频繁连锁发生,导致“多因多果”的故障出现,带来无法估计的损害,因此分析电缆故障产生的原因是故障预测和诊断必不可少的工作。结合电缆各类故障分析,导致故障的原因可分为以下4个方面:

1) 电缆本体的缺陷

引起电缆本体故障的主要原因有:受设计、制造、施工等影响导致的质量问题;选型不当,选取的电缆不满足运行的电压等级或载流量等;敷设过程中损伤;绝缘老化。

2) 电缆附件缺陷

电缆附件缺陷主要是指电缆接头引起的故障。引起接头故障的原因主要包括:接头生产质量缺陷、

工作人员安装缺陷、接头所在的电缆线路影响。

电缆本体以及接头质量的指标有电缆的生产厂商、质量等级和绝缘型号等,及其电缆本体绝缘老化的监测^[3-5]参数,例如直流泄露电流 I 、接地电容电流 I_c 、介质损耗角正切 $\tan \delta$ 、绝缘电阻 R_e 等。同时也可以有效地利用使用年限、故障次数、维修记录等指标来预估电缆现在及未来一段时间内的运行情况和故障风险的大小。

3) 电网环境影响

电缆运行故障主要由电网实际运行条件引起,如电缆过负荷运行和过压运行。表示电网运行环境的指标主要有电网的负荷率 L_d 、实际运行电压、过电压故障记录等。

4) 外部环境影响

外部环境主要包括外力破坏、通道环境的影响导致的电缆故障。外力破坏事故多发生在市政基础、绿化以及其他涉及地下的施工工程。通道环境的温度、湿度、是否靠近易燃、易爆物质等条件都是造成电缆故障的因素。

用于表征外部环境对电缆运行情况的影响指标有施工工地与电缆通道位置的水平净距离、进口安防等级、通道湿度等。

2 电缆故障风险模糊综合评估模型

2.1 综合评估模型的建立

当前主要的综合评估方法有层次分析法和熵值法^[6]、基于灰色理论的评估法^[7]、基于证据理论和模糊理论综合评估法^[8]等。电缆故障风险模糊评估模型是根据模糊数学隶属度理论^[9]把对电缆故障风险的定性分析转化为利用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象进行定量分析,做出一个总体的评价。它具有结果清晰、系统性强的特点,能较好地解决模糊的、难以量化的问题,适合各种非确定性问题的解决。具体步骤如下:

1) 建立评价指标集。可以把城市地下电缆设施看作是一个多因素的集合,然后把能表明安全风险各种状况属性的对象全体 $i_1, i_2, \dots, i_n$ 叫做评价指标集 I ,记为

$$I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\} \quad (1)$$

2) 建立评语集。按照电缆运行的风险状态可标记为“正常运行”、“低风险”、“中风险”、“高风险”4个风险等级^[10]。评判模型的标语集表示为

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\} = \{\text{正常}, \text{低风险}, \text{中风险}, \text{高风险}\} \quad (2)$$

3) 由隶属函数确定地下电缆指标集元素与评语集之间的模糊评判矩阵。假设有 m 个评价指标,其评判矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & a_{m4} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 a_{ij} 表示指标集中第 i 个指标对评语 u_j 的隶属关系。

4) 确定评价因素权重向量 W 。采用第2.3节的方法分析各个因素对城市地下电缆设施安全风险状况影响的大小,然后确定各个因素的权重分配。

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\} \quad (4)$$

5) 计算评判结果向量。考虑到电力电缆的运行状态是动态变化的,所有评判指标都对应综合评价有所贡献,因此选取加权平均型算子,计算公式为

$$b_j = \sum_{i=1}^m w_i a_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

综合评判模型为

$$B = W_R \cdot A_R \quad (6)$$

式中: b_j 是对应评语 u_i 的评判结果; w_i 是评判指标的权重系数; a_{ij} 是评判指标的隶属度。这种模糊算子既保留了单个评判指标的全部信息,又突出了重要评判指标的影响程度,比较客观地反映了评价对象的全貌。

由上述内容可知,模糊评判模型最重要的两个工作就是由隶属函数求取模糊矩阵,及其求各因素集权重的问题。

6) 将评语集赋值量化。计算多条电缆风险值,根据风险值对电缆故障风险大小进行排序,由此确定不同电缆应给予的关注度。

2.2 模糊评判矩阵的确定

隶属函数是建立模糊评判矩阵的基础。为使隶属函数更贴近电缆运行的实际情况,综合了三角形隶属度函数和半梯形隶属度函数^[11]实现多级隶属度的划分,形成对应于电力电缆4种运行状态的隶属度函数,如图1所示。

确定各指标对应于4种安全状态的模糊矩阵的步骤如下:

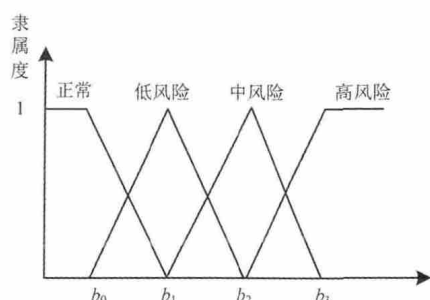


图1 隶属度函数

1) 根据预防性实验数据、电缆运行规程、运行人员或专家的经验,确定组合隶属函数中对应的4种状态的模糊界限。

2) 利用公式对电力电缆运行的系统各指标进行隶属度的计算。具体计算公式如下:

①偏小型

$$f_1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (7)$$

②偏大型

$$f_2(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (8)$$

③中间型

$$f_3(x) = \begin{cases} 1 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{x-c}{c-b} & b < x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (9)$$

式中 a, b, c 为各种状态转化时的模糊界限值。

3) 由隶属函数建立各指标对应于4种状态的模糊矩阵。

2.3 评价因素权重的计算

1) 模糊层次分析法求权重的新方法

用模糊一致判断矩阵确定因素权重^[12]的计算如公式(10)所示。

$$w_i = \frac{1}{n} - \frac{1}{2\alpha} + \frac{1}{n\alpha} \sum_{k=1}^n r_{ik}, i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (10)$$

式中 $\alpha \geq (n-1)/2$ 为调整参数。很明显在公式(10)中,当因素个数很多(即 n 取值很大)时,各因素的权重偏差会很小,只能确定方案的序关系,不能确定方案的权重大小,不利于分辨各因素对电缆整体的

影响性。基于此问题,采用了一种模糊层次分析法求权重的新方法^[13],计算公式如(11)所示。

$$w_i = \beta^{\frac{1}{n}} \sum_{j=1}^n r_{ij} / \sum_{k=1}^n \beta^{\frac{1}{n}} \sum_{j=1}^n r_{kj}, i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

参数 β 反映了决策者的分辨能力,要确定因素的权重,必须考虑参数 β 的选择。通过增大 β 的值可以提高因素优劣的分辨率;但是 β 很大时,某些权重值会趋向于0,不利于计算机处理,因此 β 是确定权重大小的关键。考虑到上述的两个影响,第3部分算例中采用的取值为 $\beta = e^5$ 。

2) 判断矩阵的建立

将传统的1-9标度方法^[14]过渡到模糊层次分析法标度,令 $r_{ij}(\alpha) = \log_{\alpha} x_{ij} + 0.5$,式中 x_{ij} 表示1-9标度法得到的标度值, $\alpha \geq 81$ 以保证 $0 \leq r_{ij}(\alpha) \leq 1$,且 $r_{ji}(\alpha) + r_{ij}(\alpha) = 1$,则 $R = [r_{ij}(\alpha)]_{n \times n}$ 是模糊互补判断矩阵。相应的各级模糊标度含义如表1所示。

表1 模糊层次分析法标度及含义

标度	含义
0.5	两个因素同等重要
$\log_{\alpha} 1 + 0.5$	第 i 个因素比第 j 个稍微重要
$\log_{\alpha} 5 + 0.5$	第 i 个因素比第 j 个明显重要
$\log_{\alpha} 7 + 0.5$	第 i 个因素比第 j 个重要得多
$\log_{\alpha} 9 + 0.5$	第 i 个因素比第 j 个极端重要
$\log_{\alpha} i + 0.5, i = 2, 4, 6, 8$	上述两相邻判断的中值
$-\log_{\alpha} i + 0.5, i = 1, 2, \dots, 9$	两因素反比较

以第3部分为例进行分析,算例中取用的指标分别有电缆的负荷率 L_d 、空气湿度 H_u 、施工工地与电缆通道水平净距离 D 、反应水树枝老化程度的接地电流 I_c 、有功损耗状态 $\text{tg}\delta$ 、电缆整体绝缘性能 R_e 。它们对电缆故障的重要程度为: $L_d = H_u < D < I_c < \text{tg}\delta < R_e$ 。由以上标度法构造判断矩阵,应用公式(11)即可求得个因素的权重 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 。

3 算例分析

针对10 kV 高压 XLPE 电缆运行状况进行评估。表2给出了参考样本值,其中 b_0, b_1, b_2, b_3 的取值可以参考预防性试验、以往的绝缘判据以及专家经验综合确定。表3为D1~D5实测样本。

表 2 参考样本值

	b_0	b_1	b_2	b_3
$H_u / \%$	50%	60%	70%	80%
L_d / IN	0.6	0.7	0.85	1
D / m	2	1.5	1	0.5
I_c / mA	0	10	40	100
$\text{tg}\delta$	0	0.2	2	5
$R_e / \text{M}\Omega$	5 000	4 000	1 500	100

表 3 实测样本

	H_u	L_d	D	I_c	$\text{tg}\delta$	R_e
D1	68	0.8	>5	1	0.1	4 300
D2	75	0.68	>5	65	1.3	2 000
D3	75	0.68	0.65	50	1.3	2 200
D4	90	0.75	>5	16	1.4	5 000
D5	80	0.9	>5	85	4.0	300

具体计算过程:

1) 由公式(7)~公式(9)确定电缆各指标的隶属情况得到模糊矩阵,以电缆 D1 为例。

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0.333\ 3 & 0.666\ 7 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2) 由表 1 确定模糊一致判断矩阵,取 $\alpha = 729$, 两两因素比较后得到的矩阵如下。

$$R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.3 & 0.207\ 0 & 0.145\ 8 & 0.1 \\ 0.5 & 0.5 & 0.3 & 0.207\ 0 & 0.145\ 8 & 0.1 \\ 0.7 & 0.7 & 0.5 & 0.3 & 0.207\ 0 & 0.145\ 8 \\ 0.793\ 0 & 0.793\ 0 & 0.7 & 0.5 & 0.3 & 0.207\ 0 \\ 0.854\ 2 & 0.854\ 2 & 0.793\ 0 & 0.7 & 0.5 & 0.3 \\ 0.9 & 0.9 & 0.854\ 2 & 0.793\ 0 & 0.7 & 0.5 \end{bmatrix}$$

由公式(11)求得各因素的权重为 $W = (0.039\ 3\ 0.039\ 3\ 0.085\ 6\ 0.141\ 8\ 0.255\ 8\ 0.438\ 2)$ 。

3) 由公式(5)计算评估结果为 $B_1 = w_i \cdot A_1$ $(0.472\ 6\ 0.469\ 8\ 0.057\ 6\ 0)$ 。

4) 重复以上步骤得到 D2~D5 的模糊评估结果如表 4。

5) 评语集赋风险值^[15],风险等级越高,赋风险值越大。这里用{20, 40, 65, 95}代替评语集中的{正常, 低风险, 中风险, 高风险}进行赋值,将评判的结果转化为单一的风险值。经过计算,5 条电缆的风险值分别为 $f_1 = 31.988$ 、 $f_2 = 57.686\ 5$ 、 $f_3 = 61.400\ 5$ 、 $f_4 = 36.985\ 5$ 、 $f_5 = 82.295$ 。按风险值由大到小的排序为:

D5、D3、D2、D4、D1。

表 4 电缆模糊评判结果

电缆	模糊评判结果
D1	(0.472 6 0.469 8 0.057 6 0)
D2	(0.093 4 0.218 6 0.609 2 0.078 7)
D3	(0.007 9 0.253 6 0.635 3 0.103 2)
D4	(0.523 8 0.224 9 0.212 0 0.039 3)
D5	(0.085 6 0.209 5 0.704 9)

分析故障风险排序结果可知,D5 电缆故障风险值最高,故障可能性非常大,应予以更换。D2、D3 两条电缆风险值中等,应做好检查和维护工作,避免进一步恶化。对比发现,两条电缆运行指标大致相同,甚至 D3 的某些指标优于 D2;但由于 D3 电缆附近有市政工程施工,D3 受外力破坏的可能性很大,所以故障风险值要高于 D2,因此要加强对 D3 的监测与保护。D4 与 D1 绝缘状况,运行环境均处于良好状态,故障风险较低;由于 D4 的运行环境较 D1 差很多,容易导致电缆绝缘受潮且老化,所以故障的风险值较 D1 稍高一些。

4 结 语

电缆运行状态的评价指标繁杂众多,每一指标反应电缆运行状态在时间、部位、深度均有所不同。应用的权重计算方法,通过适当调整 β 提高因素的分辨率,确定不同因素的权重系数,通过综合评估模型,最终求得综合评估状态。

对于一定区域内的多条电缆,应用上述模型进行故障风险值预估,并对这些电缆的故障风险值进行排序。管理人员可根据风险排序的结果了解到未来一段时间内,哪些电缆最容易发生故障,并采取相应的措施。

参考文献

- [1] 王少华,叶自强,梅冰笑,等. 电力电缆故障原因及检测方法研究[J]. 电工电气,2011(5): 48-58.
- [2] 侯晓东. 电力电缆故障的原因分析及应对措施[J]. 内蒙古电力技术,2006(S3): 119-120.
- [3] 李红雷,张丽,李莉华. 交联聚乙烯电缆在线监测与检测[J]. 中国电力,2010,43(12): 31-34.
- [4] 朱宇川,赵斌,闫小军. 基于接地线电流法的电力电缆绝缘监测系统的设计[J]. 信息通信,2011(2): 120-121.

(下转第 22 页)

3 结 论

高压电缆附件作为电力电缆中运行设备,它的安全程度直接影响电力电缆的运行,从而影响到整个电力系统的运行。在阅读大量国内外的文献以及局部放电监测的有关资料后,设计了高压电缆附件局部放电在线监测系统,得到以下结论:

1) 设计了 1 套电缆附件局部放电在线监测系统,可实现对运行中的电缆附件因各种绝缘故障所产生的局部放电信号进行实时在线监测分析;

2) 采用小波去噪方法可去除局部放电信号中的窄带干扰信号、白噪声干扰信号和脉冲型干扰信号等干扰信号,并实现局部放电信号的时频综合分析;

3) 采用高频电流传感器作为局部放电信号检测原件可提高局部放电信号的检测灵敏度,并实现对高频局部放电信号的实时采集。

参考文献

- [1] 孙建锋,葛睿,郝力,等. 2010 年国家电网安全运行情况[J]. 中国电力, 2011, 44(5): 1-4.
- [2] DL/T 596-1996, 电力设备预防性试验规程[S].
- [3] 王昌长,李福祺,高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [4] 刘兵. 基于行波电力电缆故障单端在线测距研究

(上接第 8 页)

- [5] 孙建涛,文习山,胡京,等. 高压 XLPE 电缆绝缘多参数在线监测[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(7): 7-11.
- [6] 刘杨,陈亚哲,李祥松,等. 基于层次分析法和熵值法的产品广义质量综合评估方法[J]. 中国工程机械学报, 2009, 7(4): 494-498.
- [7] 刘毅超,吕建华,闵建平. 基于灰色理论的矿井电缆运行状态评估模型[J]. 信息技术, 2013(9): 163-166.
- [8] 夏向阳,张琦,李明德,等. 证据理论与模糊理论集成的 XLPE 电缆绝缘状态评估研究[J]. 电力系统与控制, 2014, 42(20): 14-17.
- [9] 李安贵,张志宏,孟艳,等. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [10] 褚晓杰,杨太华. 城市地下电缆设施安全风险的模糊综合分析[J]. 能源与环境, 2013(6): 21-24.
- [11] 周栾爱,唐文左,崔晓华,等. 电力电缆运行安全非

[D]. 武汉: 武汉大学硕士学位论文, 2002.

- [5] 杨建国. 小波分析及其工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [6] 张国华,张文娟,薛鹏祥,等. 小波分析与应用基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [7] 刘贵忠,邸双亮. 小波分析及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992.
- [8] 黄子俊,陈允平. 基于小波变换模极大值的输电线路单端故障定位[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(2): 10-14.
- [9] 赵宇,刘青,高授利,等. 高压 XLPE 电缆线路局部放电测试系统应用研究[J]. 电力设备, 2008, 9(9): 45-49.
- [10] 葛景滂,邱昌容,谢恒堃. 局部放电测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [11] 陈庆国,龚细秀,李福祺. 变压器油中局部放电超高频检测的试验研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(12): 23-25.
- [12] 孙晓龙,李宝树,赵书涛. 虚拟仪器技术及其在电力系统中的应用[J]. 电力情报, 2001, 5(2): 5-9.
- [13] 刘君华,贾慧芹. 虚拟仪器图形化编程语言[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [14] 李志谭,辛彦红. 基于 LabVIEW 的测试软件的研制[J]. 机械工程与自动化, 2006(1): 110-112.
- [15] 陈锡辉,张银鸿. LabVIEW 20 程序设计从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [16] 丁玉剑. 基于 LabVIEW 的局部放电检测系统的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2007.

(收稿日期: 2015-08-04)

线性模糊综合评判模型[J]. 山东大学学报(工学版), 2013, 43(12): 83-86.

- [12] 张琦,夏向阳,杨志峰,等. 基于模糊理论的 XLPE 电缆绝缘状态评估研究[J]. 绝缘材料, 2014, 47(2): 84-87.
- [13] 兰继斌,徐扬,霍良安,等. 模糊层次分析法权重研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006(9): 107-112.
- [14] Thomas L. Saaty. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [15] 葛少云,闫大威,董智. 基于模糊综合评判的城市电网电缆改造[J]. 现代电力, 2005, 22(6): 37-40.

作者简介:

梁 敏(1990), 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统的稳定与控制;

李兴源(1945), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电。

(收稿日期: 2015-09-10)

基于 GIS 系统的配电网分析与研究

张东明¹, 常喜强³, 刁海勇¹, 王维庆², 任 华¹

(1. 国网新疆电力公司巴州供电公司, 新疆 库尔勒 841000;

2. 教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047;

3. 新疆电力调度通信中心, 新疆 乌鲁木齐 830001)

摘 要: 针对配电网自动化改造工程, 重点研究了配电网拓扑算法, 并在地理信息系统 (geographic information system, GIS) 平台上建立了详细的配电网模型; 在 Matlab 中编辑了潮流计算程序, 并将组件插入到 GIS 平台中, 调用潮流计算, 结合实例验证了配电网模型以及潮流计算的正确性, 为配电网自动化改造工程提供了建设性依据。

关键词: 配电网自动化; 地理信息系统; 网络拓扑结构; 潮流计算

Abstract: According to the renovation project of distribution network automation, it focuses on the research of distribution network topology algorithms, and a detailed distribution network model is established on the platform of geographic information system (GIS). The power flow calculation program is edited with Matlab, and the module is inserted into the GIS platform. Based on an example, the correctness of distribution network model and power flow calculation are verified with the call of power flow calculation, which provides a constructive basis for the renovation project of distribution network automation.

Key words: distribution network automation; geographic information system; network topology structure; power flow calculation

中图分类号: TM726 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-09-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.003

0 引 言

随着中国经济的飞速发展, 用电负荷的不断增加, 使得配网规模不断扩大, 导致配电网的安全、可靠、经济、高效的运行状态受到影响。根据用电客户对电能质量及其可靠供电的要求不断提高, 供电公司在全国范围内开展基于 GIS 系统的配网自动化改造工程, 因此, 基于地理信息系统 (geographic information system, GIS) 的配电网的分析已成为科研工作者的研究热点。

目前, 大部分学者的研究方向主要有以下几种:

1) 研究地理信息系统和可视化技术融合, 用于电网大量数据的管理, 使得数据的查询与调用更加方便、直观; 2) 研究电网 GIS 的二次开发能力, 电网 GIS 需要嵌入大量的电网专业模块, 对于专业能力的要求很高, 必须要有强大的二次开发能力; 3) 由于电力系统的信息系统很多, 没有统一的信息编码, 使得数

基金项目: 教育部创新团队项目 (IRT1285); 国家自然科学基金项目 (51267017)

据共享与交换困难, 因此, 对于 GIS 系统的数据转换能力的研究也是热点之一。

下面主要在配电网 GIS 系统平台上建立了配电网网络拓扑模型, 在此基础上, 详细分析了配电网的潮流计算, 并结合实例验证了配电网网络拓扑模型的正确性, 为 GIS 系统在配电网中的应用提供参考依据。

1 GIS 系统平台简介

电网 GIS 系统主要是利用地理信息系统对地理位置准确定位, 结合计算机网络技术对电网进行可视化操作以及大量电网数据分析; 是计算机技术、地理学技术、测绘学技术、图形处理技术相结合的综合信息系统; 是利用地理空间数据将用户所关心事物的空间数据、属性数据、拓扑数据和时态数据准确真实、图文并茂的输出给用户。该系统可以直观地提供电力系统中相应的电力设备运行状态信息、电力生产和管理信息以及电力线路途经的自然地理环境, 对电力系统的检修、运行与维护起着十分重要的作用。

1.1 GIS 系统在电力系统中的应用

对电力来说,绝大多数电网资源都与空间位置具有天然联系;地理信息系统(GIS)是构建“数字化电网,信息化企业”不可或缺的重要技术,因此,目前GIS已经在电力行业获得了广泛应用。电网企业的发电、输电、变电、配电、调度、营销、通信等各个专业都需要GIS来提高数据采集、分析和处理的能力。

通过GIS,一方面可以增强一体化平台的功能。电网GIS平台作为一体化平台的组成部分,作为企业级公共信息服务平台,可以支撑各类业务应用的电网空间信息应用需求;同时也扩展增强了一体化平台数据中心对于电网企业四大类数据之一的空间数据管理支持。

另一方面,GIS作为电网资源综合集成管理与可视化分析的有效手段,可有效提高数据采集、分析、处理能力,提供电网分析辅助决策支持,对于降低企业生产运营风险起重要的作用。

1.2 GIS系统平台整体框架

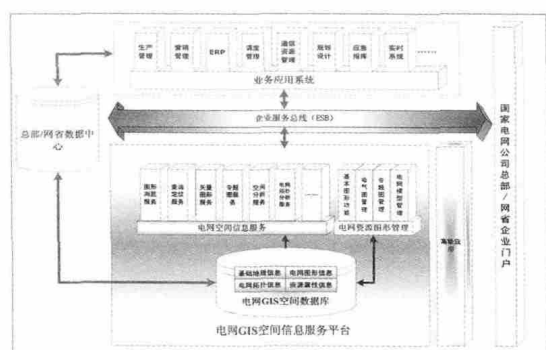


图1 GIS系统平台整体框架

从GIS平台内部结构来看,在数据层面,电网GIS空间数据库中包含四类数据:基础地理数据、电网图形数据、资源属性数据和电网拓扑数据;在功能层面,电网GIS平台主要包含两个大的部分:电网资源图形管理和电网空间信息服务;其中电网资源图形管理主要实现对基础图形、电网模型、电气图、专题图的维护和管理。电网空间信息服务主要为各类业务应用提供各类电网空间信息服务。服务的类型主要包括:图形浏览服务、查询定位服务、矢量图形服务、专题图服务、空间分析服务和电网拓扑分析服务。

从“SG186”中的整体架构来看,电网GIS平台是一体化平台的一部分。通过数据中心、企业服务总线实现与各类业务应用系统的横向集成及总部与网省的纵向贯通;通过应用集成,电网GIS空间信息服务平台发布各类电网空间信息服务,为生产、营

销、ERP、调度、通信、规划设计、应急和实时系统等业务应用提供服务支撑,实现电网GIS平台与业务应用系统的横向集成;通过数据中心、数据交换完成电网空间数据的共享与交换,实现总部和网省的纵向贯通;通过企业门户发布各类空间图形信息。

2 基于GIS平台的配电网建模

配电网是由架空线路、电缆、杆塔配电变压器、隔离开关、无功补偿器及一些附属设施等组成的,在电力网中起到重要分配电能作用的网络。

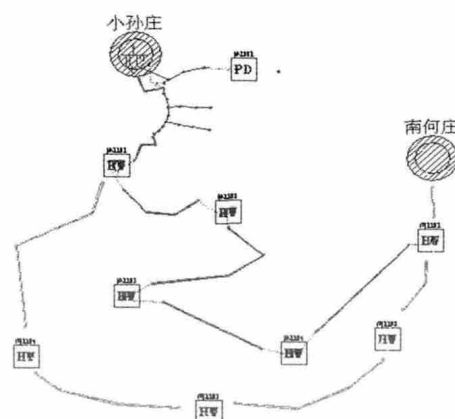


图2 GIS平台下的配电路线图

2.1 配电网拓扑结构分析

GIS平台中根据配电电气元件的链接关系,把整个配电网看成线与点相结合的拓扑结构图,然后根据电源节点、开关节点等进行整个网络的拓扑链接分析,如图2所示。它是配电网进行状态估计、潮流计算、故障定位、隔离及供电恢复、网络重构等其他分析的基础,在此基础上主要研究潮流计算。

2.2 配电网拓扑算法分析

由于配电网的结构复杂,当网络结构发生故障或负荷转移操作时,开关的开合经常发生变化。作为配电网分析的基础,网络拓扑计算需要进一步提高,因此,迫切需要一个好的网络拓扑算法。它不仅能够满足配电网自动化中不同高级功能的要求,还应能实现配电网连通性的快速跟踪和识别,适应事件变化;同时还应节省存储空间和其他高级计算功能的时间。目前国内外在这方面现有的研究有关联表矩阵表示法、网基矩阵表示法、结点消去法、树搜索表示法、离散处理法等。

采用网基矩阵表示法作为配电网的拓扑算法,

该方法是基于图论的表示方法。其基本思想是: 配电网是一个变结构的网络, 网络由结点和弧构成。称变结构网络的各种允许结构形态为网形, 称所有网形中出现的弧的并集对应的基础图为变结构网络的网基。网基用网基结构矩阵来描述, 将配电网的馈线当作无向边, 并采用 N 行 N 列的 D 矩阵加以描述, D 矩阵称作网基结构矩阵, 其中 N 为配电网中节点的个数, 即

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1N} \\ d_{21} & & & \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{N1} & & \cdots & d_{NN} \end{bmatrix}$$

若节点 i 和 j 之间存在一条边, 则 $d_{ij} = d_{ji} = 1$, 其余元素为 0。网基结构矩阵 D 描述了配电网的潜在联接方式, 它取决于配电线路的架设, 这种具有潜在联接方式的配电网构成图被称作“网基”。

3 实例分析

3.1 GIS 平台下潮流分析模块

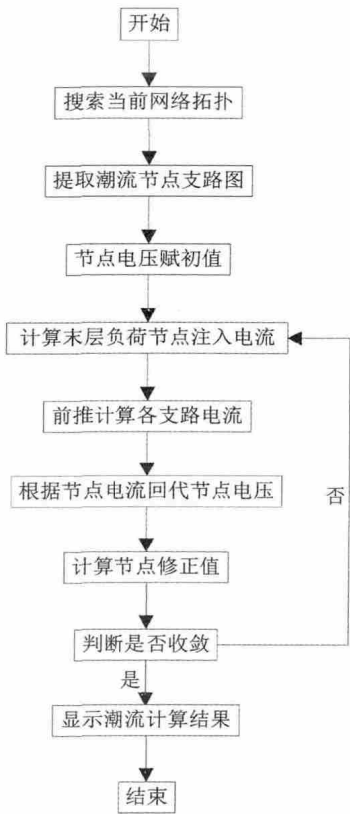


图 3 配网拓扑算法流程
基于网基矩阵表示法, 在 Matlab 中编辑潮流计

算程序, 并将该程序的文件生成 com 组件, 插入到配网 GIS 平台中, 从而可以调用潮流计算程序。其计算程序流程图如图 3 所示。

图 4 所示为某农网在 GIS 平台下搭建的潮流分析图, 该实例中仅截取了 6 个节点。

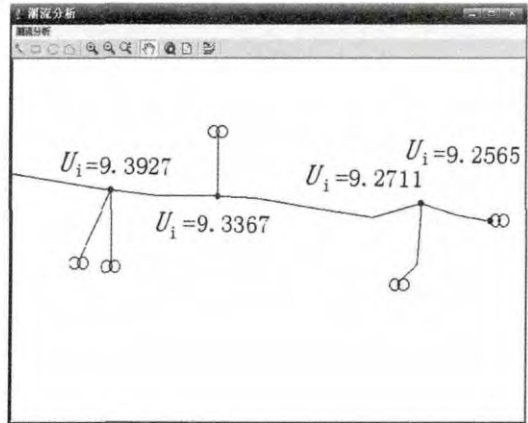


图 4 GIS 平台下潮流分析图

3.2 GIS 平台下潮流计算结果

如图 4 所示, 该线路上没有无功补偿装置, 电压相角必然随着首端到末端逐渐增大。从计算结果看, 是与实际情况相符的, 反映了该算法在配电网潮流计算中的实用性。线路潮流计算结果如表 1 所示。

表 1 线路潮流计算结果

线路 编号	始节点	终节点	有功 /kW	无功 /kVA	节点电 压 /kV	支路损耗 /kW
1	1	2	100	60	10.5	17.8
2	2	3	120	80	10.25	31.3
3	3	4	60	20	10.13	28.54
4	4	5	90	40	10.54	32.14
5	5	6	60	40	9.23	0.45
6	6	7	60	25	9.78	2.36
.	...					
.	...					
.	...					

4 结 论

把整个配网看成是线与点相结合, 在 GIS 平台中建立了配电网详细模型, 根据网基矩阵表示方法分析了配电网的拓扑算法, 并在 Matlab 中编辑潮流计算程序, 将该程序的文件生成 com 组件, 插入到 (下转第 32 页)

- [2] 孙鹞鸿,任晋旗,严萍,等. 架空输电线路雷击跳闸率影响因素研究现状[J]. 高电压技术, 2004(12): 12-14.
- [3] 李川. 架空输电线路雷击跳闸分析及防雷探讨[J]. 广东科技, 2011(8): 56-58.
- [4] 张仕名,张先怡,许安,等. 220 kV 输电线路防绕击侧针防护效果研究[J]. 四川电力技术, 2013, 36(4): 75-79.
- [5] 吴玉麟,高建勇. 高压输电线路雷击跳闸率的计算[J]. 四川电力技术, 2008, 31(3): 16-18.
- [6] 童杭伟,金祖山,赵伟,等. 影响输电线路雷击跳闸的环境因素分析[J]. 浙江电力, 2013(5): 1-3, 25.
- [7] 童杭伟,李思南,杨立川. 以雷电日和落雷密度为参数的输电线路雷击跳闸率计算的对比分析[J]. 浙江电力, 2006(1): 48-49, 68.
- [8] 金祖山,吴健儿. 220 kV 同塔双回输电线路雷击跳闸原因分析[J]. 浙江电力, 2009(1): 51-53.
- [9] 毛峰. 山区输电线路防雷相关问题的探讨[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
- [10] 植芝豹. 柳州电网输电线路防雷研究与实践[D]. 南宁: 广西大学, 2005.
- [11] 贺含峰,张仕名. 四川 500 kV 线路雷击跳闸情况分

- 析[J]. 四川电力技术, 2003, 26(1): 1-5.
- [12] 金祖山,胡文堂,龚坚刚,等. 浙江电网降低高压输电线路雷击跳闸率的措施分析[J]. 浙江电力, 2010(11): 1-5.
- [13] 郭志红,程学启,李树静,等. 山东省输电线路雷击跳闸分析及反措[J]. 高电压技术, 2001(6): 66-69.
- [14] 刘家芳,许飞. 超高压输电线路雷击跳闸典型故障分析[J]. 高电压技术, 2006(4): 114-115.
- [15] 张志劲,司马文霞,蒋兴良,等. 超/特高压输电线路雷电绕击防护性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2005(10): 1-6.
- [16] 王云飞. 输电线路的选择性及其影响因素的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.

作者简介:

黄江龙(1987), 学士, 主要从事高压输电线路防雷应用与技术监督研究;

李倩竹(1989), 硕士, 主要从事输电线路在线监测及防雷措施分析。

(收稿日期: 2015-07-31)

(上接第 11 页)

配网 GIS 平台中, 从而可以调用潮流计算程序计算出潮流结果。结合实例分析验证了模型的正确性。

不足之处是: 利用网基矩阵方法从配电网络的变结构特点出发, 能有效地表示配电网络拓扑; 但它是基于矩阵的表示方法, 而配电网络的矩阵稀疏程度很高, 占用了较大的存储空间, 无法快速跟踪和识别网络故障。下一步将研究 GIS 系统数据存储的问题, 在电力系统公共信息模型(CIM)的基础上建立配电网 GIS 模型, 从而解决了数据存储空间不足的问题, 进一步为配网自动化的改造工作提供参考依据。

参考文献

- [1] 曹英丽,郑伟,周云成. 基于 GIS 平台的配电网潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 125-127.
- [2] 陈根永,陈永华. 基于 GIS 平台的配电网故障诊断算法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 71-74.
- [3] 刘青海,杨建华,杨普,等. 基于 GIS 组件的配电网规

划与改造软件[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 106-109.

- [4] 周云成. 基于 GIS 的 10kV 配电网络电气连通性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 83-87.
- [5] 周云成,许童,朴再林. 基于 CIM 的配电网 GIS 数据模型存储与维护方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 104-108.
- [6] 汤红卫,王华,郭喜庆. 一种基于地理信息系统的配电网规划方法[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 79-82.

作者简介:

张东明(1987), 硕士, 研究方向为电力系统稳定与控制;

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

刁海勇(1973), 高级工程师, 研究方向为输变电检修技术;

王维庆(1959), 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统自动化和风力发电机组的智能控制;

任华(1985), 硕士, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2015-08-10)

特高压直流输电系统逆变站换相失败对整流站的影响及其保护配置策略优化建议

禹 佳 孙 文 李 琨 刘俊杰

(国家电网公司运行分公司宜宾管理处 四川 宜宾 644000)

摘 要: 换相失败是特高压直流输电系统最常见的动态故障之一。以宾(宜宾) —金(金华) 特高压直流发生的任一桥换相失败造成的异常扰动为例, 理论分析其成因, 详述换相失败后整流侧交流系统频率、电压、无功的暂态特性, 进而研究对 400 V 负荷(主泵软启动器、外冷风机、换流变压器冷却器) 的后续影响; 并试着剖析了区域电网间多回特高压直流系统同时换相失败对同一送端电网系统稳定的影响。最后结合 CFPREV(换相失败预测) 逻辑模块分析了宜宾站换相失败保护策略, 并提出合理的优化建议。

关键词: 特高压直流输电; 暂态特性; 多回直流; 同时换相失败; 400 V 负荷; CFPREV

Abstract: Commutation failure is one of the most common dynamic faults in ultra - high voltage direct current (UHVDC) transmission system. Taking the abnormal disturbance caused by commutation failure on any bridge of Bin (Yibin) - Jin (Jin-hua) UHVDC transmission system for example, the reasons are analyzed in theory, and the transient characteristics of frequency, voltage and reactive power of AC system in rectifier side after commutation failure are described in detail. Furthermore, the subsequent impact on 400 V load (soft starter for main pump, air cooling machine, cooler of converter transformer) is studied. And the influence of simultaneous commutation failure in multi - circuit UHVDC transmission system interconnecting regional power grids on the stability of the same power supply system is explored. Finally, combined with the logic module of CFPREV (commutation failure prediction), the protection policy for commutation failure of Yibin station is analyzed and the reasonable optimization suggestions are proposed.

Key words: UHVDC transmission system; transient characteristic; multi - circuit UHVDC transmission system; simultaneous commutation failure; 400 V load; CFPREV

中图分类号: TM72 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2015) 06 - 12 - 06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.004

0 引 言

换相失败是逆变器和交流系统故障发生后的物理过程。绝大多数换相失败是由交流电压扰动引起, 并且在目前设备情况下是不可避免的, 它因此成为区域性互联直流输电系统常见的故障现象之一。据全国换流站多年运行经验, 换相失败多发生在逆变侧。如果换相失败后控制不当, 会引发多次连续换相失败, 最终可能会导致直流传输功率的中断。且在目前形势下, 特高压直流系统大密度接入交流电网, 直流输电系统众多, 送出、流入的直流系统并存, 交直流电网互联, 使得交直流系统间的影响应该更受关注, 因此研究换相失败对直流输电影响具有重要的理论及现实意义。

1 换相失败过程的理论分析

实际工程中, 整流站和逆变站是 12 脉动换流阀, 等效为两个相位相差 30° 的 6 脉动桥。正常情况下触发角与触发越前角有如下关系^[1]。

$$\beta = 180^\circ - \alpha \quad (1)$$

式中: β 为触发越前角; α 为触发角。

换相角 μ 的计算公式如式(2)。

$$\mu = -\gamma + \arccos\left(\cos\gamma - \frac{2X_r I_d}{\sqrt{2}E}\right) \quad (2)$$

式中: I_d 为直流电流; X_r 为换相电抗; E 为换相电压; γ 为熄弧角。换相角与触发越前角和熄弧角的关系如式(3) 所示。

$$\gamma = \beta - \mu \quad (3)$$

在逆变器运行过程中,以阀 V_1 对阀 V_3 的换相过程为例,如图1波形所示。

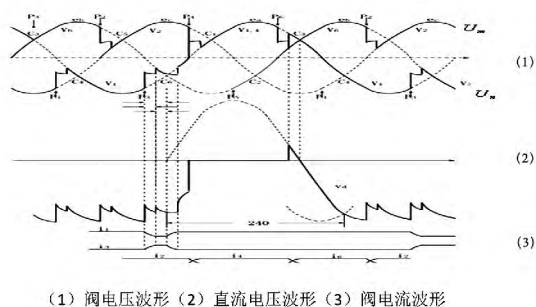


图1 逆变器换相过程

如果阀 V_3 触发时刻 P_3 的越前角 β_3 不够大,或换相角 μ_{13} 较大,以致换相结束后阀 V_1 的熄弧角 γ_1 小于关断所需要的角度(时间),则过了 C_6 点后,由于阀 V_1 元件内还有剩余载流子,因此在正向电压作用下即使不加触发也会重新开通,阀 V_3 已取得的电流又将倒换相到阀 V_1 ,倒换相结束时刻,阀 V_3 关断。

倒换相结束后逆变器仍有阀 V_1 和阀 V_2 导通着,如果没有故障控制,仍按原来的次序触发以后各阀,则在 P_4 时刻阀 V_2 与阀 V_4 开始换相,这时由于阀 V_1 和阀 V_4 同时导通,造成了直流侧短路。直到阀 V_6 导通后,直流短路才消失,逆变器直流电压开始逐渐恢复正常。如果阀 V_1 和阀 V_3 再次换相时不发生换相失败的故障,就能自行恢复正常运行,可以计算出发生换相失败到自行恢复,持续约 100 ms 以上,故障过程中逆变器反电压下降历时 240° [1]。

因此,逆变器运行中熄弧角 γ 非常重要,它的大小将影响阀是否可以成功关断。由上述分析及公式(3),可以得知造成换相失败的原因有:

- 1) 逆变器的换相电压下降。在触发越前角 β 不变的情况下,换相电压的降低增大了换相时间和换相角 μ ,从而使 γ 减小。
- 2) 逆变器侧交流系统不对称故障。这种故障会引起作为换相电压的交流线电压的过零点移动;当过零点前移时, γ 角就减小。
- 3) 直流电流 I_d 增大,使换相所需时间增加,也就是相应的换相角 μ 增大,所以 γ 也随之减小。
- 4) 触发越前角 β 过小,整定的熄弧角 γ 过小,或者由于触发脉冲异常(不触发或误触发)导致阀不能按正常次序进行换相。

2 逆变站换相失败导致整流站异常扰动实例

夏季等大负荷运行期间,交流电网因跳闸、雷击等原因极易出现扰动,造成逆变站换相失败。自2014年7月3日至2015年7月3日受华东交流系统扰动影响,金华换流站共发生30多次换相失败。

2.1 逆变站换相失败对整流站直流系统的影响

逆变站出现换相失败扰动时,查看整流站故障录波,扰动时整流站的直流系统波形如图2所示。

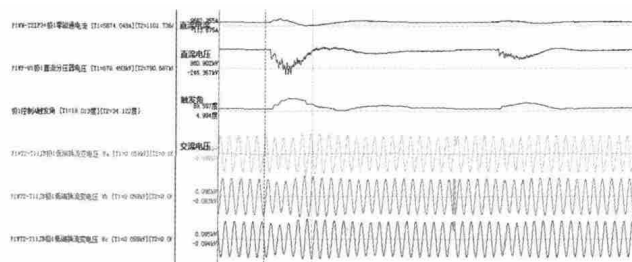


图2 7月15日金华站换相失败时宜宾站直流系统波形

通过以上故障录波以及前面分析可知,换相失败对直流的影响主要表现为:换相失败发生时整流侧直流电压急剧降低、直流电流增加,整流侧 α 角增大至 73.6° ,波动持续 100 ms 左右。

一般而言,逆变侧电网的交流扰动时间相对于换相时间是较长的,同时在直流落点较多的华东地区直流与直流、直流与交流之间的电磁耦合及线路参数的不平衡是复杂多变的。目前特高压直流是同塔双回直流线路,当一极发生扰动时,产生的暂态分量可能会影响到其他正常运行的另一极导线上。

一方面,同属一回直流的一极直流线路故障,可能导致另一极发生换相失败。比如:宾金直流极 I 线路故障,可能会引发极 II 换相失败。

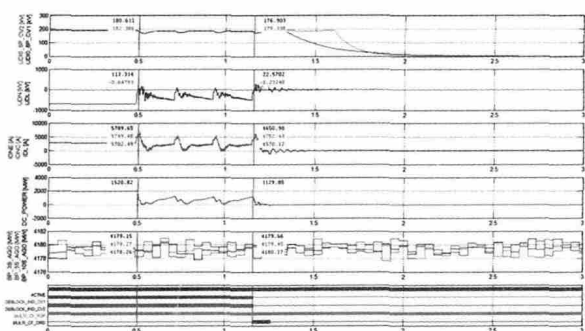


图3 宾金直流极 I 发生故障导致极 II 发生双桥换相失败

另一方面,两条直流受端落地点相距较近,电气距离也近,若一条直流发生故障,可能会引发另一条

直流发生换相失败。比如:由于南桥站与奉贤站落地点较近,葛一南直流发生故障,可能会引发复一奉直流逆变侧奉贤站发生换相失败。

综上所述,逆变侧换相失败会对整流侧直流系统带来如下影响:

1) 逆变站发生换相失败后,直流系统会出现电流过冲。整流侧直流电压急剧降低、直流电流增加,整流侧 α 角增大,波动持续100 ms左右。

2) 换相失败后直流电压下降严重、直流电流增加,造成的交流系统波动可能会引发双桥换相失败或连续换相失败。

3) 对于同塔双回特高压直流而言,因其复杂的电磁耦合及分布参数,若一极发生故障,可能会导致另一极发生换相失败。

4) 对于直流落点密集的东部地区,若受端电网发生较为严重的故障,容易引发同一区域多条直流逆变站同时发生换相失败,进而影响跨区域电网间的联络。

2.2 逆变站换相失败对整流站交流系统的影响

逆变侧换相失败时,整流站直流功率出现大范围波动,受此影响整流站交流系统频率和电压也出现扰动。

2.2.1 换相失败对整流站交流系统频率的影响

换相失败后,直流系统整流器吸收的有功功率会突然变化,这成为整流站交流系统频率波动的扰动源。一般而言,整流侧交流系统频率波动大致可分为3个阶段。

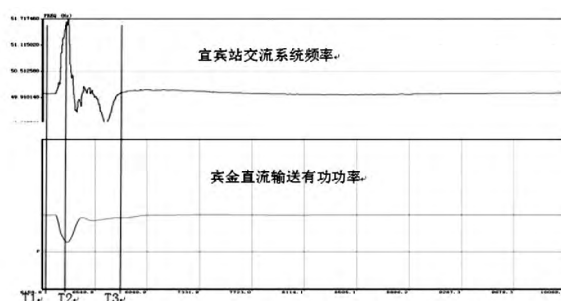


图4 7月15日金华站换相失败时宜宾站交流频率特性

第1阶段($T_1 - T_2$):直流系统换相失败后,在整流器定电流控制器和VDCL等辅助控制器的作用下,直流系统功率逐渐降低,交流系统频率上升;第2阶段($T_2 - T_3$):换相失败故障过程消失后,输送功率迅速恢复,交流频率逐渐降低;第3阶段(T_3 以后):直流输送功率逐渐稳定,系统频率逐步由暂态

恢复至稳态。

2.2.2 换相失败对整流站无功电压的影响

同时,对直流系统而言,交流系统相当于一个恒定的功率源,不仅要进行有功的传递,还要获取足够的无功来支撑换流阀的工作。正常情况下直流系统吸收的无功为

$$Q = UI \tan(\alpha + \frac{\mu}{2}) \quad (4)$$

发生换相失败后,随着直流系统有功的突变,在相关控制器的作用下,整流站吸收的无功也会相应发生边变化。逆变站发生换相失败后,整流站交流系统无功平衡遭到破坏,一般会经过5个阶段才能再次达到平衡。

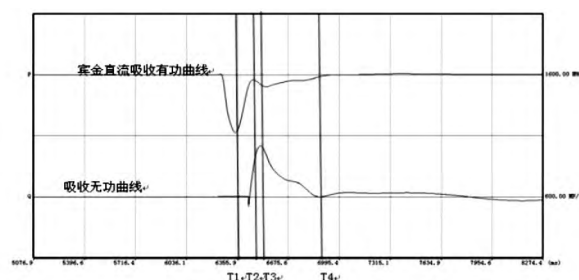


图5 7月15日金华站换相失败时系统无功特性

第1阶段(T_1 之前):由于换相失败,系统有功短时间内突变,整流站交流滤波器投切有个过程,导致系统无功来不及变化;第2阶段($T_1 - T_2$):随着交流滤波器的投切,整流站系统吸收的无功随着有功的增大而增大;第3阶段($T_2 - T_3$):在定电流控制器作用下,整流站吸收的无功随着有功的减小而增大;第4个阶段($T_3 - T_4$):在控制器及VDCL的作用下,整流站吸收的无功随着有功的增大而减小;第5阶段(T_3 以后):直流恢复过程中,整流站吸收的无功随着有功的增大而增大,并恢复至正常水平。

由以上分析可知,换相失败后,随着直流系统有功的突变,整流站交流系统的无功也会发生相应变化,导致整流站交流系统无功平衡遭到破坏,进而会引起交流系统电压波动。如7月15日录波显示宜宾站交流500 kV系统电压最低至435 kV,最高至617 kV,扰动幅度在-13%~23.4%。

7月15日金华站发生换相失败后,整流站受500 kV系统影响,站用电系统也受到了明显扰动,400 V母线电压最低至314 V,最高至476 V,扰动幅度在-22%~19%,如图7所示。

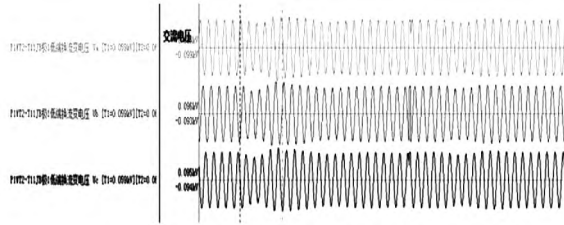


图 6 7 月 15 日宜宾站 500 kV 母线电压波形

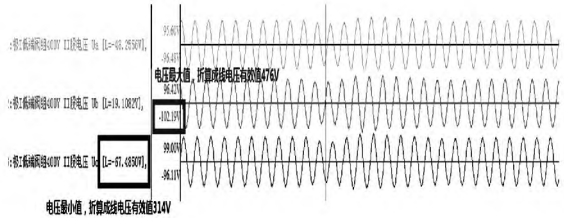


图 7 7 月 15 日宜宾站 400 V 母线电压波形

其实换相失败引起的交流扰动会影响到整流站 400 V 母线电压并非偶然。表 1 汇总了数次换相失败对整流站 400 V 电压扰动。

表 1 金华站换相失败时宜宾站 400 V 母线电压波动范围

日期	最大值 /V	最小值 /V	变化幅度 /V	扰动时间 /ms
2014-07-03	405	381	24	150
2014-07-04	408	378	30	84
2014-07-12	405	372	33	130
2014-07-15	427	351	76	74
2014-07-15	476	314	165	150
2014-07-15	476	326	150	177
2014-07-28	406	384	22	146
2014-08-05	462	346	116	190
2014-08-13	466	325	141	102
2014-08-24	465	332	133	83

通过表 1 可以发现,换相失败对 400 V 电压的扰动是客观真实存在的;而 400 V 母线所带的一些负荷,虽然属于低压设备,但却与高压直流输电的安全稳定运行息息相关。如若内水冷主泵软启动器故障,可能会导致直流闭锁的后果,因此,换相失败对整流站 400 V 电压的影响也是不容忽视的。表 2 是对宜宾站重要 400 V 负荷的定值梳理。

内水冷系统主泵软启动器有直流过压保护和欠压保护,从表 2 可以看出内水冷主泵软启动器设置有一段过压定值 438 V、延时 2 s,设置有两段欠压定值分别为 338 V、延时 2 s;298 V、延时 100 ms。当换相失败过程中,若 400 V 母线电压扰动异常,将会造

成软启动器过压保护或欠压保护正确动作。

表 2 宜宾站重要 400 V 负荷定值保护单

保护设备	过压设置(标么值: 以 480 V 为基准)	欠压设置(标么值: 以 311 V 为基准)	换流站
内冷主泵 软启动器	438 V 延时 2 s	338 V 延时 2 s 298 V 延时 100 ms	宜宾站
外冷风机	560 V(1.17 pu) 无延时	237 V(0.76 pu) 无延时	宜宾站 极 I
变频器	592 V(1.23 pu) 无延时	259 V(0.83 pu) 无延时	宜宾站 极 II
换流变压器 冷却器	440 V 延时 100 ms	340 V 延时 100 ms	宜宾站

极 I 外水冷风机变频器直流过压保护定值为 756 V,欠压保护定值为 320 V,换算成交流电压,分别为 560 V 和 237 V;即使考虑变频器电压测量误差 10% 的情况,定值虽然可以躲过电压波动,但也应该加强监视。极 II 外水冷风机变频器直流过压保护定值为 770 V,欠压保护定值为 405 V,换算成交流电压,分别为 570 V 和 300 V;若变频器电压测量有 5% 的误差,在逆变站发生交流扰动时存在欠压导致风机变频器故障的隐患。

换流变压器冷却器电源切换装置电压监视继电器过压保护动作值 440 V、返回值为 418 V,欠压动作值 340 V、返回值 357 V,保护延时均为 100 ms。逆变站换相失败引起交流电压扰动时,换流变压器两路交流电源可能会出现故障,导致换流变压器冷却器全停。

综上所述,换相失败对整流侧交流系统的影响如下:

- 1) 逆变站换相失败时间长度、时间点不同,对整流站交流系统的影响程度也不一样,但受端电网交流扰动影响送端换流站的情况没有改变;
- 2) 逆变侧发生换相失败后,直流系统吸收的有功功率先减小后增大,整流侧交流系统频率经历一个先增大后减小的波动过程;
- 3) 大负荷情况下若逆变站发生连续换相失败,导致整流站交流电网异常波动,可能会使逆变和整流侧双双发生换相失败,这样就有可能使逆变和整流侧陷入互相扰动的恶性循环中;
- 4) 对站内 400 V 重要负荷电源定值整定时,除考虑自备投及过压、欠压保护外,还应考虑换相失败时对 400 V 母线电压的交流扰动因素。

统;延时 2.602 s,Y 闭锁,跳交流断路器。

3.3 换相失败保护策略优化建议

在目前策略下,结合特高压直流实际运行情况可知,特高压直流在 4 000 MW 功率以上时,若发生换相失败引起 2 次功率波动后,系统可以保持稳定;但如果发生 3 次及以上类似功率波动过程后,电网有可能稳定破坏。建议对换相失败保护进行优化。

1) 建议直流运行在 4 000 MW 以上增加双极换相失败加速段。

2) 建议极控检测本极在运阀组均发生连续任一桥换相失败,将本极动作信号置位并发给对极。极控检测本极动作信号和对极动作信号同时满足,闭锁本极。

3) 在增加双极换相失败加速段后,建议直流双极功率高于 4 100 MW,开放双极换相失败加速段跳闸功能;直流双极功率低于 4 000 MW,闭锁双极换相失败加速段跳闸功能。

4 结 语

以宾金直流换相失败为例,分析了逆变侧换相失败对整流侧交、直流系统的影响,提出以下建议:

1) 任一桥发生换相失败的保护策略及安稳装置的配合随着电网的发展还有进一步研究优化的空间。若阀组中任一桥发生换相失败,为防止陷入互相扰动的恶性循环中,建议换相失败保护定值加快闭锁该阀组时间。

2) 在目前的保护配置策略及安稳装置的配置策略下,若复奉、宾金、锦苏特高压直流同时换相失

败,直流系统被退回的有功功率会在同一送端电网(四川电网)产生较大的扰动,影响安全稳定运行。鉴于此,若检测到多条特高压直流同时发生换相失败,建议对处于在同一送端的多条直流启动安控装置的同时进行远方切机。

3) 直流系统在 4 000 MW 以上时,建议保护逻辑增加双极换相失败加速段程序。

4) 建议直流系统中对 400 V 负荷(主泵软启动器、风机变频器、换流变压器冷却器)保护整定值考虑换相失败导致的扰动因素。

5) 在发生换相失败后,建议送端电网降低系统的电气量(频率、电压)的暂态波动幅度,这样有利于直流系统快速恢复。

参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社 2011.
- [2] 刘振亚. 特高压电网(第1版)[M]. 北京: 中国经济出版社 2005.
- [3] 国网运行分公司编组 特高压直流换流站岗位培训教材: 二次系统[M]. 北京: 中国电力出版社 2012.

作者简介:

禹 佳(1983), 本科, 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;

孙 文(1980), 本科, 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;

李 琨(1985), 本科, 助理工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;

刘俊杰(1989), 本科, 助理工程师, 研究方向为特高压直流输电技术。

(收稿日期: 2015-08-21)

(上接第4页)

[8] 万晓凤, 张燕飞, 余运俊, 等. 光伏电池工程数学模型比较研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(3): 113-117.

[9] 韩俊英, 刘成忠. 自适应混沌果蝇优化算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(5): 1313-1316.

[10] 张勇, 夏树发, 唐东生, 等. 果蝇优化算法对多峰函数求解性能的仿真研究[J]. 暨南大学学报, 2014, 35(1): 82-87.

[11] 雷秀娟, 史忠科, 周亦鹏. PSO 优化算法演变及其融合策略[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(7): 90-93.

[12] 靳其兵, 赵振兴, 苏晓静, 等. 基于粒子健康度的快速收敛粒子群优化算法[J]. 化工学报, 2011, 62(8):

2328-2333.

作者简介:

王素宁(1990), 硕士研究生, 主要研究方向为光伏发电技术;

潘三博(1974), 副教授, 硕士生导师, 主要研究可再生能源光伏发电及储能技术、高效率电力电子变换器、谐振逆变器等方面;

杨青斌(1988), 助理工程师, 主要研究方向为新能源发电及其并网检测;

林成栋(1991), 硕士研究生, 主要研究方向为光伏逆变器设计。

(收稿日期: 2015-08-26)

高压电缆附件局部放电在线监测系统设计

杨琳¹, 田晓菲², 吴德永¹, 刘帅卓³, 王颖³, 吴小林³

(1. 国网四川省电力公司科学研究院, 四川 成都 610072;

2. 国网四川物资公司, 四川 成都 610000; 3. 西南石油大学, 四川 成都 610500)

摘要: 随着电力电缆在电力系统中越来越广泛的应用, 其供电的可靠性也越来越受有关部门和用户的关注。而电缆附件是连接电缆与电缆、电缆与其他设备非常重要的环节。局部放电是导致电缆附件发生故障的主要原因之一, 而高压电缆附件局部放电与内部绝缘状况有密切关系。设计了高压电缆附件局部放电在线监测系统。此系统的硬件部分主要包括信号发生器、高频电流传感器和 PCI8735 数据采集卡等模块, 软件部分主要基于虚拟仪器技术使用 LabVIEW 实现数据重组、去噪等功能。经过实验室测试分析, 证明该系统运行稳定, 采集数据快速准确, 对于高压电缆附件局部放电的监测有一定的现场应用价值, 对于促进能源的合理利用, 资源的节约具有重要的意义。

关键词: 电缆附件; 局部放电; 高频电流传感器; PCI8735 数据采集卡; LabVIEW

Abstract: With the wide application of power cable in power system, the reliability of its power supply attracts more and more attention from the relevant departments and users. Cable accessories are very important aspects connecting cables with cables and cables with other facilities. Partial discharge is one of the main reasons leading to the failure of cable accessories, and partial discharge in HV cable accessories is in close relationship with internal insulation. An on-line monitoring system for partial discharge of HV cable accessories is designed. The hardware of this system mainly includes signal generator, high frequency current sensor and PCI8735 data acquisition card and other modules, and its software uses LabVIEW to achieve data reorganization, denoising and other functions mainly based on the virtual instrument technology. After lab tests and analysis, it proves that the proposed system is stable and can collect data quickly and accurately. It has a certain application value to partial discharge monitoring of HV cable accessories and is of great significance to the promotion of rational energy use and resource conservation.

Key words: cable accessories; partial discharge; high frequency current sensor; PCI8735 data acquisition card; LabVIEW

中图分类号: TM855 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-18-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.005

0 引言

随着城市供电电缆化的快速推进, 电力电缆附件的使用量也在不断增加。但是电力电缆附件在选用、安装过程中存在着众多问题。随着时间的推移和环境的变化, 这些问题日渐显露, 最终引发许多电缆事故。据统计有 80% 以上的电力电缆事故是由电力电缆附件的质量问题所引起的。电力电缆附件的质量问题主要指的是电缆附件内部的局部绝缘缺陷, 当电缆附件内部长期存在局部绝缘缺陷时会在电缆附件绝缘内引发树枝状老化, 同时伴随以局部放电的形态表现出来, 局部放电的发展最终导致电缆附件绝缘的击穿。目前, 局部放电检测是电缆附件故障检测方面应用最为广泛、有效的方法。因此,

对电力电缆附件进行定期局部放电检测就显得特别重要。

因此设计了一种基于高频电磁耦合法的电缆附件局部放电在线监测系统, 可对运行中的电缆附件因各种绝缘故障所产生的局放信号进行实时在线监测分析, 从而为工作人员制定故障修复方案提供科学的依据。本系统可靠性高、操作简单、实用性强, 值得推广。

1 系统介绍

1.1 系统框架设计

所设计的局部放电在线监测系统是基于高频电流法, 配合虚拟仪器技术实现课题的研究。本系统以高速数据采集、数据处理、分析、存储、显示等主要

技术完成局部放电监测。最后根据数据处理结果来判断放电类型。该监测系统框图如图 1 所示。

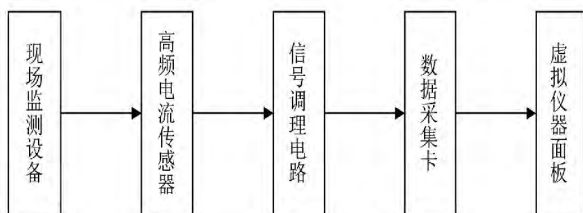


图 1 高压电缆附件局部放电系统框图

在实验时,信号发生器充当监测设备,利用信号发生器输出高频方波信号(模拟高脉冲信号),经过高频电流传感器将信号传送给数据采集卡,最后通过软件显示监测结果。根据放电的幅值、相位以及放电次数对局部放电趋势和局部放电强度进行分析并给出放电监测结果。

1.2 高频电流传感器

罗氏线圈(Rogowski coil)的全称是罗哥夫斯基线圈,它是一种不含铁心的均匀缠绕在非铁磁性材料上的环形线圈,可以直接套在导体上对导体进行测试,有硬性和柔性之分,其输出信号是电流对时间的积分。当线圈套在导体上时,经过导体的交流会在其周围产生一个变换的磁场,然后就能从线圈中感应出与电流成正比的电压信号。罗氏线圈实际上是 1:N 的电流互感器,原边为单匝线圈,是环形铁氧体材料;其副边线圈是 N 匝环形绕组,其窗口面积较大而截面较小,其结构电路如图 2 所示。

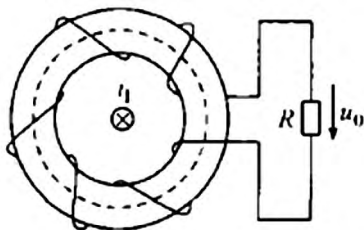


图 2 罗氏线圈结构与等效电路图

1.3 数据采集卡 PCI8735

数据采集卡,即实现数据采集(data acquisition, DAQ)功能的计算机扩展卡,可以通过 USB、PXI、PCI、PCI Express、火线(1394)、PCMCIA、ISA、Compact Flash 等总线接入个人计算机。PCI8735 是基于 PCI 总线的数据采集卡,能够直接插在 IBM-PC/AT 或与之兼容的计算机内的任一卡槽中,构成实验室、产品质量检测中心的等各种领域数据采集、波形分析以及处理系统,还可以构成工业生产过程

中监控系统。

该卡主要的功能有 AD 模拟量输入功能、DI 数字量输入功能、DO 数字量输出功能等。AD 模拟输入功能配置的是 AD7321 芯片,该芯片配有一个高速的串行接口,是一款双通道、12 位带符号位的逐次逼近型 ADC。AD7321 内部原理图如图 3 所示。

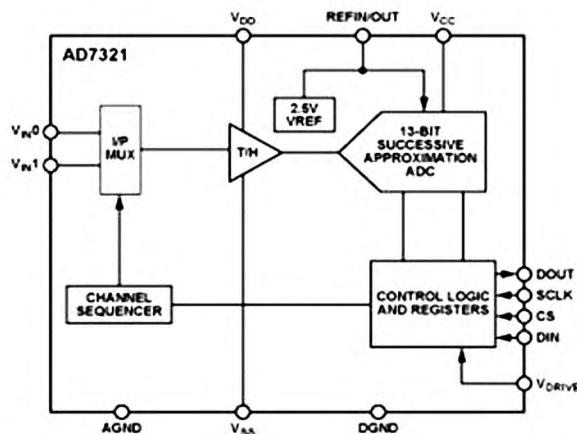


图 3 AD7321 原理图

采用数据采集卡 PCI8735 的作用是采集从传感器中输出的模拟信号,并同时采集到的模拟信号转换成数字信号,再根据计算机端软件将其进行分析和处理,得到所需的数据。它具有性能稳定、便捷等优点。

1.4 系统软件设计

电测仪表发展至今,大体上经历了指针式仪表、数字式仪表和微机化仪表三代,随着计算机技术的发展,使得现代仪器技术与计算机技术有机地结合起来,从而产生功能强大、多变的虚拟仪器。虚拟仪器是由计算机资源(CPU、存储器、显示器等构成)和通用仪器硬件(A/D、D/A 变换器、数字输入输出、定时和信号处理器等)与用于数据分析、过程通讯及用户图形界面的软件有效地结合起来而组成的仪器操作平台。系统软件结构图如图 4 所示。

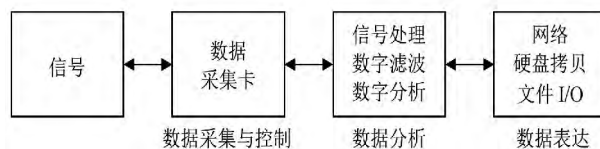


图 4 系统软件结构图

1.4.1 上位机软件设计

LabVIEW(laboratory virtual instrument engineering workbench)是一种用图表编程代替用文本行编程方式的编程软件。其采用编程方式是用数据流和图表来编程,程序的执行顺序是有图表之间的节点

流向来决定的。利用 LabVIEW 开发的上位机端软件的流程图如图 5 所示。

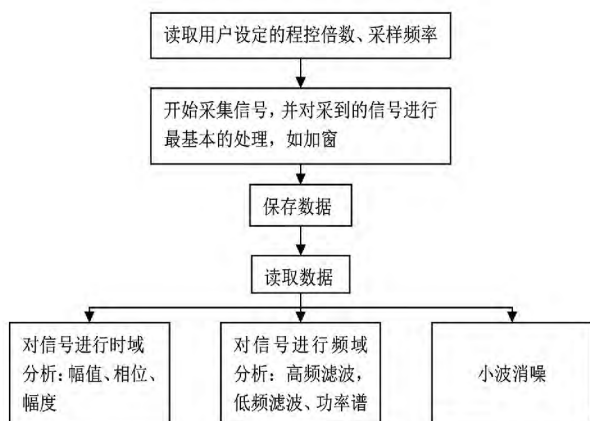


图 5 系统软件流程图

在 LabVIEW 中调用串口时包括参数设置模块、写模块、读模块、数据储存模块和数据显示模块五大部分。串口通讯编程流程图如图 6 所示。

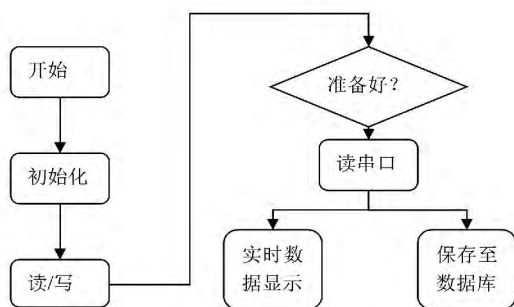


图 6 串口通讯编程流程图

1.4.2 软件消噪设计

局部放电监测中的干扰主要是随传感器和局部放电信号一起被输入监测系统的，其按时域信号特征分类主要有 3 种，分别是白噪声、连续性窄带性周期干扰和脉冲干扰。白噪声主要来源于线圈发热噪声，配电线路以及测量设备等耦合进入的各种噪声；窄带周期性干扰包括系统高次谐波、高频保护、载波通信以及无线电通信等；脉冲干扰主要分周期性脉冲干扰和随机脉冲干扰。滤波器是一种频限装置，对于要求内的频带给予小幅度的衰减，给予要求外的频带大幅度的衰减，从而使信号的有用信息更加明显。数字滤波器是滤波器的一种，相对于模拟滤波器说，数字滤波器具有精度高、灵活性大、可靠性高、易于集成等优点。数字滤波的程序框图如图 7 所示。

对白噪声局部放电信号进行多尺度的分析可知，局部放电信号的小波变换模总是在某一尺度或

相邻几个尺度上比噪声大得多，且其位置与相邻尺度基本对应，而噪声在每个尺度上都有，且随着尺度的增加模值呈减小的趋势。根据局部放电信号和噪声在小波变换上表现出的差别，可以去掉噪声对应的小波变换模，保留局部放电信号的小波变换模。仅用保留的各尺度的小波变换模和最大尺度的平滑系数可以很接近地重构原信号，达到抑制噪声、提高信噪比的目的。

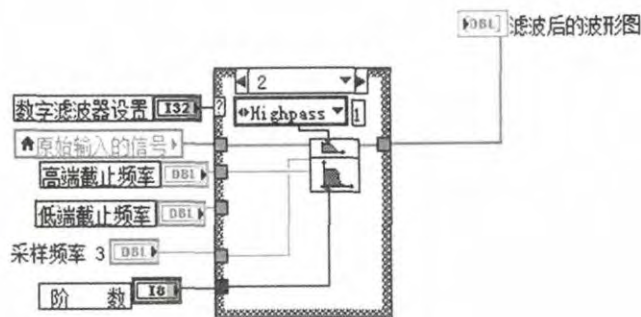


图 7 数字滤波程序图

2 实验分析

利用本系统在实验室里对 10 kV 电缆终端的典型缺陷进行了局部放电检测研究分析。图 8 是根据实际经验制作的电缆附件主绝缘割伤典型缺陷，图 9 是 11 kV 电压下高频电流传感器测得的局放原始信号，图 10、11 分别为滤波后的信号和信号的频谱，图 12 是提取的统计特征参数，图 13 是本套系统软件的处理结果。



图 8 主绝缘割伤(纵向切割)

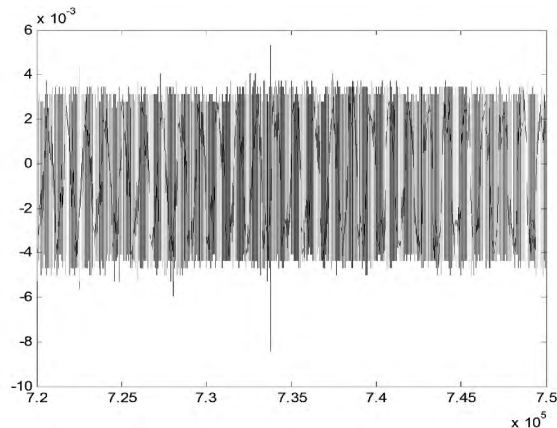


图9 局部放电原始信号

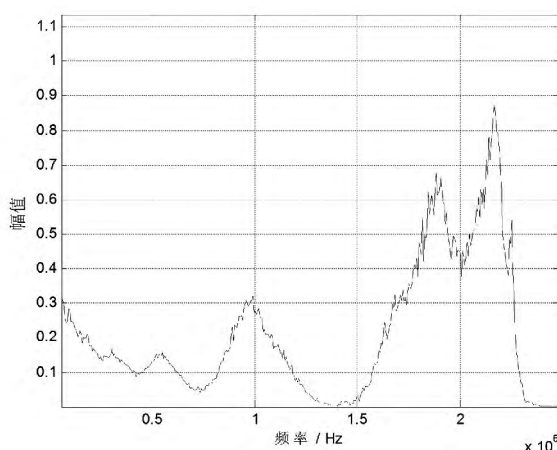


图11 信号频谱

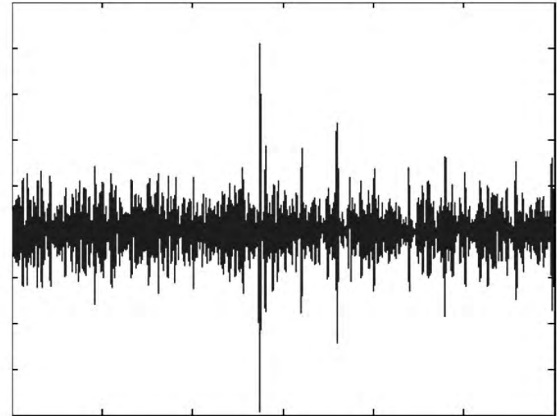


图10 滤波后信号

201	3	3.0510	2.9975	0.4847	0.3301	-0.0109	2.0913
202	3	3.0288	3.0184	0.4038	0.3818	0.0171	0.9902
203	3	3.0163	2.9877	0.3851	0.2853	-0.0463	1.3583
204	3	3.1151	2.8821	0.6691	0.0182	0.0465	4.3409
205	3	2.9808	3.3399	0.2136	1.4256	-0.0204	0.4723
206	3	3.0804	2.9824	0.5221	0.2762	0.0538	2.8340
207	3	3.0745	2.9010	0.5320	0.0681	-0.0277	0.9451
208	3	3.0151	2.8863	0.3912	0.0162	0.3899	0.6953
209	3	2.9981	2.9138	0.2566	0.0891	-0.0208	1.5803
210	3	2.9732	2.8837	0.2766	0.0084	-0.2208	2.0733

图12 特征参数

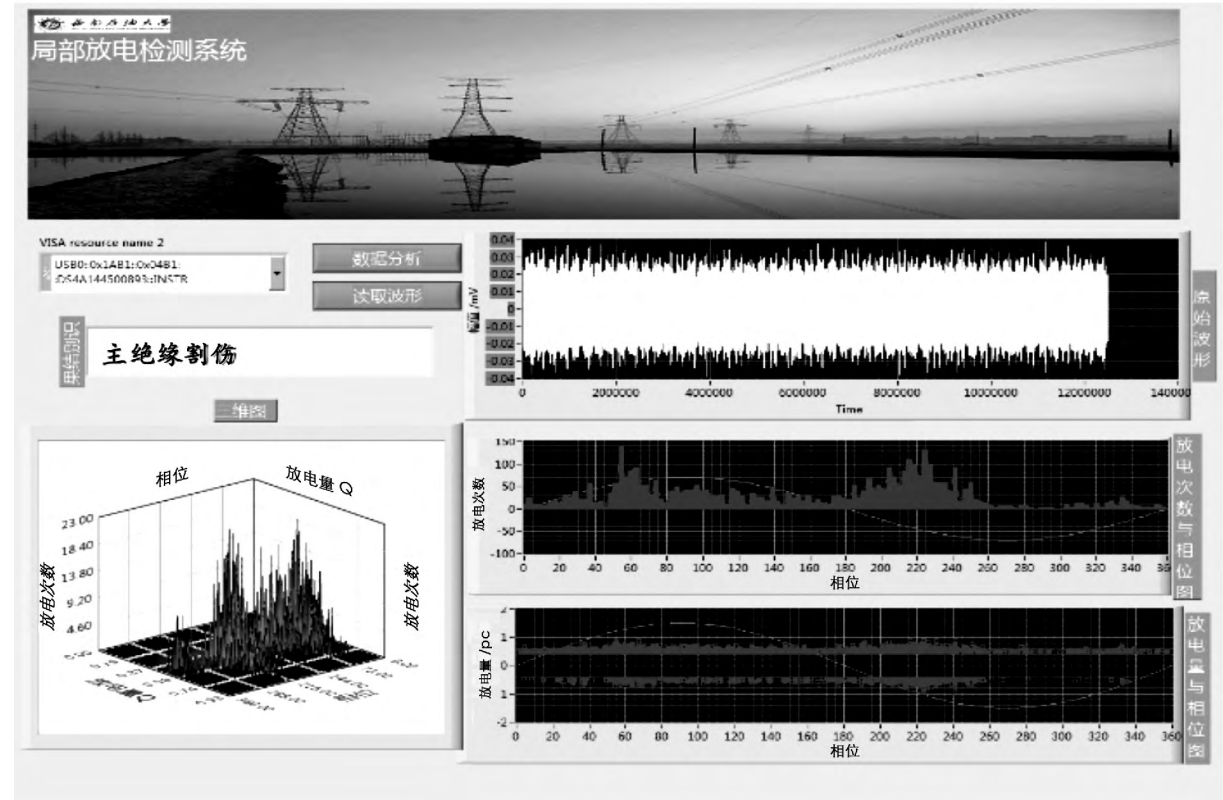


图13 系统软件处理结果

3 结 论

高压电缆附件作为电力电缆中运行设备,它的安全程度直接影响电力电缆的运行,从而影响到整个电力系统的运行。在阅读大量国内外的文献以及局部放电监测的有关资料后,设计了高压电缆附件局部放电在线监测系统,得到以下结论:

1) 设计了 1 套电缆附件局部放电在线监测系统,可实现对运行中的电缆附件因各种绝缘故障所产生的局部放电信号进行实时在线监测分析;

2) 采用小波去噪方法可去除局部放电信号中的窄带干扰信号、白噪声干扰信号和脉冲型干扰信号等干扰信号,并实现局部放电信号的时频综合分析;

3) 采用高频电流传感器作为局部放电信号检测原件可提高局部放电信号的检测灵敏度,并实现对高频局部放电信号的实时采集。

参考文献

- [1] 孙建锋,葛睿,郝力,等. 2010 年国家电网安全运行情况[J]. 中国电力, 2011, 44(5): 1-4.
- [2] DL/T 596-1996, 电力设备预防性试验规程[S].
- [3] 王昌长,李福祺,高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [4] 刘兵. 基于行波电力电缆故障单端在线测距研究

=====

(上接第 8 页)

- [5] 孙建涛,文习山,胡京,等. 高压 XLPE 电缆绝缘多参数在线监测[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(7): 7-11.
- [6] 刘杨,陈亚哲,李祥松,等. 基于层次分析法和熵值法的产品广义质量综合评估方法[J]. 中国工程机械学报, 2009, 7(4): 494-498.
- [7] 刘毅超,吕建华,闵建平. 基于灰色理论的矿井电缆运行状态评估模型[J]. 信息技术, 2013(9): 163-166.
- [8] 夏向阳,张琦,李明德,等. 证据理论与模糊理论集成的 XLPE 电缆绝缘状态评估研究[J]. 电力系统与控制, 2014, 42(20): 14-17.
- [9] 李安贵,张志宏,孟艳,等. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [10] 褚晓杰,杨太华. 城市地下电缆设施安全风险的模糊综合分析[J]. 能源与环境, 2013(6): 21-24.
- [11] 周栾爱,唐文左,崔晓华,等. 电力电缆运行安全非

[D]. 武汉: 武汉大学硕士学位论文, 2002.

- [5] 杨建国. 小波分析及其工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [6] 张国华,张文娟,薛鹏祥,等. 小波分析与应用基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [7] 刘贵忠,邸双亮. 小波分析及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992.
- [8] 黄子俊,陈允平. 基于小波变换模极大值的输电线路单端故障定位[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(2): 10-14.
- [9] 赵宇,刘青,高授利,等. 高压 XLPE 电缆线路局部放电测试系统应用研究[J]. 电力设备, 2008, 9(9): 45-49.
- [10] 葛景滂,邱昌容,谢恒堃. 局部放电测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [11] 陈庆国,龚细秀,李福祺. 变压器油中局部放电超高频检测的试验研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(12): 23-25.
- [12] 孙晓龙,李宝树,赵书涛. 虚拟仪器技术及其在电力系统中的应用[J]. 电力情报, 2001, 5(2): 5-9.
- [13] 刘君华,贾慧芹. 虚拟仪器图形化编程语言[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [14] 李志谭,辛彦红. 基于 LabVIEW 的测试软件的研制[J]. 机械工程与自动化, 2006(1): 110-112.
- [15] 陈锡辉,张银鸿. LabVIEW 20 程序设计从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [16] 丁玉剑. 基于 LabVIEW 的局部放电检测系统的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2007.

(收稿日期: 2015-08-04)

线性模糊综合评判模型[J]. 山东大学学报(工学版), 2013, 43(12): 83-86.

- [12] 张琦,夏向阳,杨志峰,等. 基于模糊理论的 XLPE 电缆绝缘状态评估研究[J]. 绝缘材料, 2014, 47(2): 84-87.
- [13] 兰继斌,徐扬,霍良安,等. 模糊层次分析法权重研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006(9): 107-112.
- [14] Thomas L. Saaty. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [15] 葛少云,闫大威,董智. 基于模糊综合评判的城市电网电缆改造[J]. 现代电力, 2005, 22(6): 37-40.

作者简介:

梁 敏(1990), 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统的稳定与控制;

李兴源(1945), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电。

(收稿日期: 2015-09-10)

一起 PT 引流线设备夹断裂失效分析与防范措施

王红梅¹, 蔡志强², 王 志², 李 刚³

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041;

2. 四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610072;

3. 国网四川省电力公司德阳供电公司, 四川 德阳 618000)

摘 要: 利用扫描电镜及金相显微镜对某变电站内 PT 引流线夹断裂断口进行了微观形貌及金相组织分析, 借助能谱分析仪、XRD 物相分析仪以及显微硬度计对断口表面的成分、物相和显微硬度进行了检测。结果表明, 铜铝焊接处存在夹渣、氧化膜及未熔合等焊接缺陷, 在长期处于复杂应力状态下发展成裂纹, 加上当天当地刮大风, 最终导致设备线夹完全断裂。此外, 对如何加强该类线夹的安全运行提出了应对措施。

关键词: PT 引流线夹; 夹渣; 断裂

Abstract: The micro fracture morphology, metallographic structure, composition of the fracture surface, phases and micro-hardness of a fractured jumper conductor clamp of PT have been studied by means of scanning electron microscope (SEM), metalloscope, energy dispersive spectrometer, XRD phase analyzer and micro-hardness tester. The results show that the clamp is finally fractured because of the heavy wind and the existing welding defects such as slag inclusion, oxidation film and incomplete fusion in the copper-aluminum weld which would develop into a crack under the complex stress for a long time. In addition, the corresponding measures are proposed on how to strengthen the safe operation of such clamps.

Key words: jumper conductor clamp of PT; slag inclusion; fracture

中图分类号: TM451 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-23-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.006

0 引 言

电网设备中的引流导线与电气设备出线端子间的联接通常采用铜铝过渡线夹^[1-2], 究其原因主要在于铜铝设备线夹很好地兼顾了导电性能及经济性。然而近年来国家电网相继发生铜铝过渡线夹断裂失效的案例, 例如 2012 年 6 月的江西电力公司某变电站铜铝过渡线夹断裂事件, 2012 年 6 月, 新疆 35 kV 火车站变电站 35 kV 楼火线 C 相穿墙套管与引流线的铜铝过渡线夹突然断裂, 使得整个火车站镇停电, 电网经济损失巨大^[3]。2015 年 2 月, 国网系统某变电站发生 PT 引流线夹断裂失效事件, 线夹断裂造成 A、B 相间短路, 设备损坏。目前由于四川境内在役铜铝过渡线夹近 5 万只, 全面更换存在极大的难度。为了避免类似事故的发生, 以某变电站内的 PT 引流线夹断裂为例, 对典型铜铝过渡线夹断裂失效进行综合分析, 为此类事故的防范提供依据。

1 PT 引流线夹断裂情况

2015 年 2 月 28 日 16 时 40 分, 某变电站 220 kV 差动保护、快速距离、距离 I 段、纵联距离、纵联零序同时动作, 选相 A、B 相, 短路电流 115 A, 故障测距 0 公里。现场检查发现 T 接于架空线路 A 相的线路 PT 引流线靠近 PT 端设备线夹断裂(见图 1), 引流线脱落晃动导致 A、B 相间短路。

该 PT 引流线夹为螺栓型对接式铜铝过渡设备线夹, 采用闪光焊接技术进行铜铝搭接对接焊, 型号为 SLG-4, 于 1999 年 6 月投运。引流线为钢芯铝绞线, 型号为 LG-185/25。



图 1 断裂的 PT 引流线夹

2 材质鉴定分析

根据 GB 2341 - 1998 中相关技术要求,按该类型线夹设计材质为:铝材牌号按 GB/T 3190 采用不低于 99.6% 铝制造,铜材牌号按 GB/T 2040 采用工业纯铜 T2。为判别材质主要合金元素成分,对已断裂的线夹铜铝两侧板材分别进行了合金元素光谱复核,结果见表 1 所示。

表 1 材质光谱分析

试样	元素成分
铜材	Cu 99.65% Ag 0.11% 其他 $\leq$ 0.03
铝材	Al 99.61% Fe 0.23% Zn 0.035 其他 $\leq$ 0.03

设计铜材(T2)要求含铜+银量 $\geq$ 99.90%,杂质含量 $\leq$ 0.1%;设计铝材(1060)要求铝含量 $\geq$ 99.6%。光谱分析结果表明各试样材质的主要合金元素含量均基本满足标准要求,表明不是因为误用材质而引起的断裂。

3 断口分析

3.1 断口形貌宏观分析

断裂线夹两侧断口见图 2、图 3。该线夹接线板厚度约为 5 mm,断裂部位为铜铝接触部位。通过对两侧断裂面的痕迹观察,发现铝侧断口表面污染严重,通过目视很难区分有效信息,但铜侧断口表面断裂形貌特征明显,可以将截面大致分为 3 个部分,最先开裂 I 区、未熔合 II 区及最终撕裂 III 区。在铜侧断面 I 区发现大量铜绿色腐蚀产物,并附有极少部分的铝,大约占整个截面的一半以上,说明该区域所生成的氧化物时间较长,结合面在断裂之前很可能已经有氧化物存在。III 区表现为铜侧粘有连续存在的光亮铝,面积大约为 10%,基本可以判断为最终撕裂区域。而 II 区主要表现为铜本体颜色,并未像 I 区产生明显的腐蚀产物,开裂时间上应在 I 区之后。在该区域并未发现铝金属光泽,说明该区域极有可能在焊接上铜铝没有形成有效的熔合,即焊接时可能出现大面积的未熔合现象。

此外,从侧边观察断口无明显宏观塑性变形,说明塑性断裂可能性极小,断面基本无倾角,基本可以排除是在剪应力下断裂。在两侧断口中对应部位

数个凹坑和凸瘤。

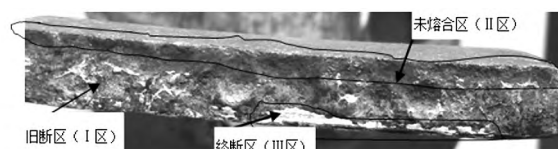


图 2 铜侧断口



图 3 铝侧断口

3.2 断口 SEM 形貌分析

通过断口扫描分析可从微观上及元素分布上更为清晰确定断裂的方式以及为判明断裂失效的模式提供依据^[4-5]。

从断口宏观形貌可以看出,断裂几乎发生在铝侧,铜侧相对保留完整,因此重点选取铝侧断口进行扫描观察。

根据宏观分析得知,断裂面分为最先开裂 I 区,未熔合 II 区以及最终撕裂 III 区,由于最终断裂前有效结合面积已经很小,导致不能承载而最终断裂,形成新鲜断口。因此在截取断口时试样应尽量包含以上 3 个区域,截取方位见图 4。



图 4 试样截取示意图

对断口沿厚度方向选择了 3 个区域(图 5 ~ 图 7)进行扫描电镜观察,图 5 为最终断裂区(新断区)电镜扫描图,可以看到明显的韧窝形貌。图 6 为铝侧突出部位形貌图,断口上附有大量的泥纹状氧化物和少量颗粒状的夹杂(杂)物,这种泥纹状氧化物一般在高温下才能形成,对图 6 中 1 号区域进行能谱分析,主要成分为除 Al 基体外,含有少量的氧化铝、氧化铜以及少量铁和碳。图 7 为中间部位形貌图,发现韧窝中存有较多的第二相颗粒,对其中的第二相颗粒进行能谱分析,主要成分除 Al 基体和少量氧化铝、氧化铜外,还发现少量的硅、氯及硫等元素。

对铜侧凹坑局部扫描形貌图,可以看出断口较平滑,韧窝附近存在较多第二相颗粒,经能谱分析主

要成分除氧化铝、氧化铜外,同样发现少量硫和氯。

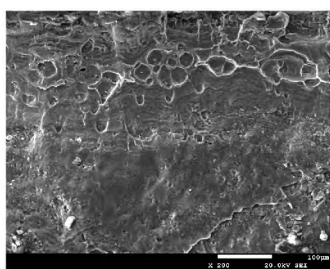


图 5 铝侧边缘(新断区域)扫描电镜形貌图

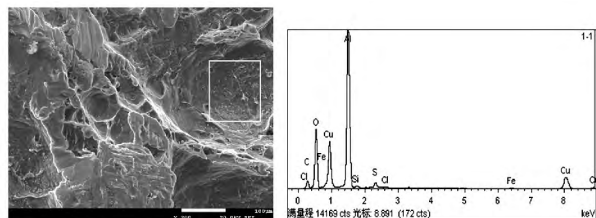


图 6 铝侧中间凸起物扫描电镜形貌及能谱分析图

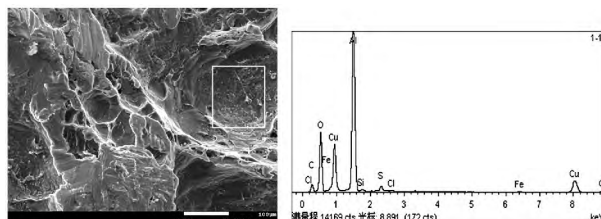


图 7 铝侧中部区域扫描电镜形貌及能谱分析图

扫描电镜及能谱分析表明,断口的主要形貌为韧窝,断口上存在大量的泥纹状氧化物和颗粒状的夹杂(杂)物,这种泥纹状氧化物一般在高温下才能形成。

3.3 金相组织分析

观察断口附近的金相组织有助于分析焊接的热影响程度,判断材质是否存在组织相变或晶粒粗大化等缺陷,以此来分析熔合区的金相组织及焊接质量。

金相组织分析表明铜断口边缘热影响区和母材的组织均为 α 固溶体,铝侧热影响区和母材的组织均为 α (Al) 基体和带状的 α (Al₁₂Fe₃Si) 相,无明显异常。从金相分析上来看,所使用的铜板及铝材均符合相应的国家标准,说明焊接过程并未造成组织变化。

3.4 断口微观成分分析

铜铝闪光对焊时对温度控制要求较高,铜和铝熔合之后极易形成铜铝金属化合物,如 CuAl₂ 及 CuAl₄ 等,这类化合物导电性能极差;而且硬而脆,具有热裂倾向,易发展成微观裂纹源,极大降低焊接质量,因此对其进行 XRD 物相检测和显微硬度测试

来判断该物相是否存在便非常有必要。

3.4.1 XRD 物相分析

图 8、图 9 分别为铜侧断口和铝侧断口的 X 射线衍射图谱,从其分析结果来看,断口表面只存在铜、铝以及氧化铝,并没有发现铜铝间金属化合物的生成,焊接区成分未发现异常,基本上可以判定断裂的原因和焊接生成物没有多大关系。

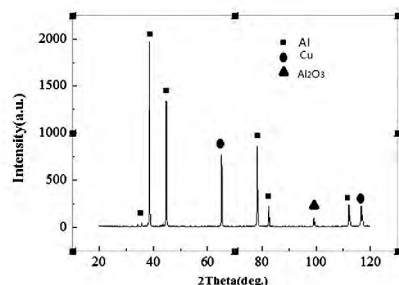


图 8 铝侧断口 XRD

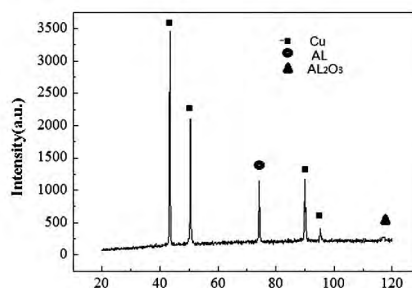


图 9 铜侧断口 XRD

3.4.2 显微硬度分析

由于铜铝均为较软材质,易采用显微硬度进行硬度测试较为合理。对断裂试样按从断口边缘起向两侧均匀取 5 个点,每个点沿宽度方向打 3 个硬度,取其平均值,记录硬度值。检测结果见表 2,从硬度测试结果看,在焊接热影响区附近硬度变化不大,进一步说明在焊接热影响区未显著生产铜铝间的金属化合物等脆性相,这个 XRD 检测结果基本吻合。

表 2 显微硬度值/HV

	1	2	3	4	5
Cu	97.16	94.98	96.61	96.88	98.28
Al	32.25	32.32	33.70	31.48	30.74

4 综合分析

从铝侧断口对应位置的形貌扫描及能谱分析结果可以得知,断口的形貌主要表现为韧窝形貌和覆盖在铝基体上的大量泥纹状氧化膜;而这种泥纹状

氧化物通常在焊接时高温下产生,说明在断裂前的焊接过程中,铜和铝已被一层氧化膜给隔离了,致使铜铝结合面有效强度不够。能谱分析结果显示韧窝和泥纹状氧化膜中含有大量铜和铝的氧化物,以及少量的铁、硅、硫和氯。除氯、硫杂质可能是在断裂后的外部环境所带来的外,硅和铁杂质更多的应是产生于焊接过程或材质本身。在铜铝闪光对焊时,由于温度较高,极易生产氧化铝,而氧化铝又很难熔化;如果顶锻压力不够,未能将其全部挤出而保留在焊缝中成为所谓的“夹渣”,因此,它和硅、硫等杂质一起成为显微孔洞的形核源,微小孔洞聚集长成裂纹源,在外应力的长期作用下,裂纹不断扩展,最后导致断裂。

通过宏观分析可知,铜侧断面中间区域呈铜绿色,说明该区域已长时间处于和外界环境接触状态,裂纹首先应该出现在该铜绿区域。铜在潮湿的空气中产生的电化学腐蚀加快了对线夹有效截面的侵蚀,加剧了线夹的断裂。

此外,根据宏观结果分析,知道铜铝焊接处很大部分区域存在未有效熔合,最终断裂区域只占整个断面的不到10%,且位于焊接边缘,表面断裂前有效强度已经严重不足,导致线夹最终断裂。

5 结论及建议

线夹断裂的原因主要应为铜铝焊接时产生夹渣、未熔合等焊接缺陷,在长期复杂外力作用,在焊接缺陷产生成裂纹,裂纹逐步扩展,致使线夹的有效承载面积不断减小,有效强度不断降低,在遇到较大外力(例如当天的大风),最终导致线夹断裂。

根据该起PT引流线设备夹断裂失效的原因,为防止类似事故再次发生,建议采用以下防范措施:

1) 立即开展该变电站其他类似对接式铜铝过渡设备线夹的排查治理工作,条件满足的应尽快更换该类铜铝过渡线夹。无法立即更换的,应加大宏观巡查和红外测温检测,以及停电检修时的专项检查,重点对设备线夹焊缝接头处进行检测,宏观巡测和温度测量发现异常应停电进行检查处理,对于发现裂纹或存在较大焊缝咬边及未熔合等焊接缺陷的对接焊接铜铝线夹,应立即更换。

2) 鉴于闪光焊和摩擦焊对接式铜铝过渡设备线夹目前常规的检查手段的局限性,不能有效地检出铜铝过渡设备线夹的缺陷,特别是该类设备线夹焊缝内部的缺陷。建议采用目前较为先进的超声相控阵无损检测技术,通过制作专用探头,加工人工试块,可以非常直观形象地有效检测出该类线夹对接焊缝内部缺陷。

3) 由于闪光焊接和摩擦焊焊接工艺控制难,焊接缺陷多,根据国家电网的要求,新更换的铜铝过渡设备线夹不得使闪光焊和摩擦焊对接式线夹,建议采用钎焊或爆炸焊接工艺的铜铝过渡设备线夹。

参考文献

- [1] 陈国宏,倪满生,田宇,等.铜铝过渡线夹使用状况与选型分析[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2012(3):15-19.
- [2] 吴爽登,陈静,梁永纯,等.铜铝钎焊接头盐雾腐蚀行为研究[J].物理测试,2012(1):49-53.
- [3] 国网公司安监部文件.江西南昌220 kV昌东变电站母线失压事件通报[G].2006.
- [4] 张栋,钟培道,陶春虎,等.失效分析[M].北京:国防工业出版社,2004.
- [5] 崔约贤,王长利.金属断口分析[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006.

(收稿日期:2015-07-15)

促节能减排和低碳发展 改善环境保护生态

基于成都电网高压输电线路雷击跳闸的研究与分析

黄江龙,李倩竹

(国网成都供电公司检修分公司,四川 成都 610056)

摘要: 高压输电线路的稳定运行与电网的安全可靠息息相关。雷击跳闸严重影响着高压输电线路的可靠运行,破坏电网的稳定。为降低成都电网高压输电线路的雷击跳闸率,确保成都电网的稳定运行,以成都电网高压输电线路2005—2014年的雷击跳闸事故为例,统计分析其雷击跳闸规律,研究造成输电线路雷击跳闸的主要原因,并得到以下结论:成都地区输电线路雷击故障主要集中在岷江—沱江源山区、沱江—龙泉山交界区及成都城乡结合部等区域;成都电网雷电易击区的形成原因与杆塔所处的地理位置及杆塔本身的耐雷水平有关;针对不同的雷电易击区,采取相应的防雷措施,能有效降低高压输电线路的雷击跳闸率。

关键词: 输电线路; 雷击跳闸; 成都电网; 耐雷水平

Abstract: The stable operation of HV transmission line has close relations to the safety and reliability of power grid. The tripping caused by lightning stroke has severe effects on the reliable operation of HV transmission lines, and it can destroy the stability of power grid. In order to reduce the lightning trip-out rate of HV transmission lines in Chengdu power grid and to guarantee its stable operation, taking the tripping accidents caused by lightning stroke of HV transmission lines in Chengdu power grid from 2005 to 2014 for example, the tripping rules of these transmission lines are analyzed, and the main reasons for lightning stroke tripping are studied. The results show that the areas which are easily struck by the lightning are Minjiang-Tuojiang source mountainous area, Tuojiang-Longquan mountain junction, rural-urban fringe zone and so on. The reasons of these lightning attachment areas relate to the geographic position and lightning withstand level of towers. Aiming at different lightning attachment areas, the corresponding methods should be adopted to reduce the lightning trip-out rate of HV transmission lines efficiently.

Key words: transmission line; lightning stroke tripping; Chengdu power grid; lightning withstand level

中图分类号: TM726.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-27-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.007

0 引言

输电线路故障是主要的电网事故之一,影响电网的稳定运行。高压输电线路绵延数里,跨越之地复杂多变^[1-3],并长期暴露于恶劣的自然环境中,遭受暴雨、雷电、冰雪等各种恶劣自然气候的侵蚀,这些都严重影响线路的可靠稳定运行。雷击是引起输电线路跳闸的主要因素^[4-5]。统计分析显示,70%以上的输电线路事故由雷击造成。雷电灾害作为一种自然灾害,它的发展和分布规律受到所处区域环境的影响^[6-7]。环境因素包括海拔高度、区域气候、地貌特征、人类活动等。不同的环境因素对输电线路的雷击跳闸有着不同程度的影响。例如山区的雷击跳闸概率大于平原地区^[8-10]。这是由于山区地势陡峭,磁场分布不均匀,同时海拔高的地方曲

率大,更易遭受雷击;另一方面,对于同样的防雷措施,因地貌因素的不同,山区输电线路很难像平原一样实施,并且山区的雷电活动程度高于平原地区,所以山区输电线路的雷击跳闸率远远大于平原地区。此外,杆塔本身的耐雷水平也在一定程度上影响着输电线路的雷击跳闸率。

随着电网的不断发展与壮大,输电线路运行的可靠性与国民经济的发展息息相关。为了有效地减少高压输电线路的雷击跳闸率,提高电网的可靠稳定性,高压输电线路雷击跳闸事故的分析及探讨成为保障输电线路稳定运行的研究热点,并为国民经济的发展、生产及生活提供了强有力的可靠保障。

成都平原地势辽阔,地理环境复杂多变,不同的地理环境严重影响着输电线路的雷击跳闸率。结合成都地区高压输电线路的雷击跳闸情况,详细分析了成都地区110 kV和220 kV输电线路在2005—2014

表 1 成都地区 2005—2014 年的雷击跳闸统计结果

年份	雷电个数/个	地闪密度/(次·km ⁻²)	220 kV 雷击次数/次	110 kV 雷击次数/次	雷击总数/次
2005	693 56	3.854 278	2	0	2
2006	967 32	5.375 628	4	0	4
2007	641 83	3.566 802	1	1	2
2008	106 271	5.905 734	0	1	1
2009	124 328	6.909 205	2	0	2
2010	101 093	5.617 98	3	4	7
2011	117 506	6.530 089	6	10	16
2012	423 00	2.350 71	3	0	3
2013	103 858	5.771 638	5	7	12
2014	253 70	1.409 87	1	2	3

年的雷击跳闸事例。通过对这些雷击跳闸数据的统计分析,总结出成都电网易遭受雷击的片区,并对这些地区杆塔易受雷击的原因进行分析,提出合理可行的防雷措施^[11-16]。最后,将采取防雷措施前后的输电线路雷击跳闸率进行对比,分析防雷措施的有效性,为成都电网输电线路雷击跳闸的分析提供了一种可靠有效的研究思路及方法。

1 输电线路雷击跳闸的主要因素分析

雷电的发生具有随机性,其分布特点也不规律。研究雷击跳闸的分布规律,并采取相应的防雷措施,能够更好地避免输电线路雷击跳闸,确保电网稳定。数据统计显示,高压输电线路雷击跳闸的概率与其所处的地理环境及其本身的耐雷水平有关。

1.1 地闪密度对雷击跳闸的影响

大量研究表明,地闪密度与雷击跳闸概率有着密切联系。地闪密度可用雷电定位系统测量的雷电个数除以区域面积得到,反映了一个地方遭受雷击可能性的大小,是雷击风险评估的重要技术参数之一,也是开展防雷工作的重要依据。成都地区 2005—2014 年的雷击跳闸相关数据及每年的地闪密度大小如表 1 所示。

将 2005—2014 年成都电网 110 kV 和 220 kV 输电线路的雷击跳闸点叠加到成都 2005—2014 年平均地闪密度分布图上,如图 1 所示。

从图 1 可以看出,地闪密度大的区域(年地平均闪密度在 5~7 次/km²),雷击跳闸点分布较多;而地闪密度小的区域,雷击跳闸点相对较少。充分

说明:地闪密度是决定输电线路雷击跳闸率的主要因素之一,区域地闪密度越大,其输电线路雷击跳闸的次数越多。

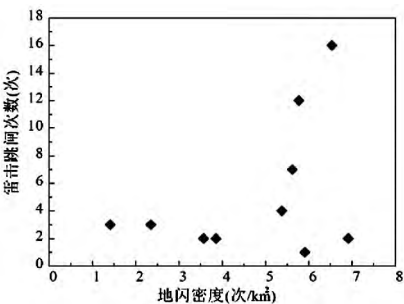


图 1 雷击跳闸与地闪密度的对应关系

1.2 地貌地质对雷击跳闸的影响

输电线路在整个电网中负责电能的输送与分配,跨越线路长,历经复杂多变的地形、地质及恶劣的气候条件。根据统计结果,在成都地区历年的雷击事故中,有超过 2/3 的雷击事故,尤其是 220 kV 线路的故障,发生在有河流起源的山区和河流上游冲积平原。这与高压输电线路所处区域的地貌地质条件有着密切关系。有河流起源的山区通常会有水电站或大的水库区,导致该区域湿度明显高于其他地区;同时由于大山阻隔,暖、冷空气往往在迎风坡交替,极易诱发强降雨,因此,这些地域的雷雨概率和地闪密度明显高于其他地域。由于山峦起伏,造成线路杆塔之间档距往往高于平原地区,多出现大档距(1 000 m 左右)的点位,这些点位档距中央的导线对地距离多在 600 m 以上,使得其绕击耐雷区间极大(10~60 kA),从而导致这些地方输电线路绕击的概率增大。

随着河流向平原辐射,出现了大面积的上游冲

积平原和河间冲积平原。由于河流冲刷,这些地方地层很薄(20~40 cm之间),土壤层之下就是由沙和石头混杂的沙夹石层,土壤电阻率(一般在800~1500 Ω/m 之间)明显高于其他平原地区,因此处于这些区域的输电线路杆塔接地电阻值明显偏高,导致输电线路的反击雷击跳闸率增高。

1.3 杆塔耐雷水平对雷击跳闸的影响

除了地闪密度及地貌形态因素以外,影响输电线路雷击跳闸的因素还有很多,例如杆塔的耐雷水平。耐雷水平越高,则发生雷击跳闸的概率就越低。而杆塔的耐雷水平与杆塔高度、绝缘配置、绝缘劣化程度等有着密切联系。

大量研究表明,输电线路跳闸的直接原因与杆塔的高度和绝缘配置相关。同一地域、同一绝缘配置的情况下,杆塔越高其反击耐雷水平越低。导线离地面距离越远,地面屏蔽作用越弱,其绕击耐雷区间越大,越易遭受绕击。例如在某些城乡结合部区域,线路迁改工程导致杆塔的高度增加;然而绝缘配置并没有因为杆塔的升高而相应提高,因此造成这些点位的反击耐雷水平和绕击耐雷水平都大幅低于平均水平,成为雷电易击区。同样地,杆塔本身的绝缘配置也会影响其耐雷水平。例如,绝缘子材料的选择、避雷器的安装,都在很大程度上影响杆塔的耐雷水平。此外,在杆塔的设计中,有时适当增加绝缘子长度是必要的;然而绝缘子长度的增加,必然会减少绝缘子串对杆塔的风偏裕度,增大了绝缘子串发生风偏跳闸的概率。为了解决线路防雷和防风偏两者统一的问题,在增加绝缘子长度的同时,需增加相应的重锤片,因此选择合适的绝缘子、制定合理的杆塔设计方案及提高杆塔的绝缘配置,对提高杆塔的耐雷水平、降低雷击跳闸率具有重要意义。与此同时,杆塔的绝缘子家族性缺陷诱发劣化程度越高,其耐雷水平越低,越容易遭受雷击。

综上所述,输电线路的雷击故障原因是多种多样的。为了切实有效降低线路的雷击跳闸率,电力运行、科研、试验单位一直致力于研究探索高压线路的防雷新方法、新手段,并根据具体情况制定出经济有效的防雷措施。值得注意的是,在进行输电线路防雷设计、确定线路防雷方式时,应综合考虑系统的运行方式、线路的电压等级和重要程度、线路经过地区雷电活动的强弱、地形地貌特点及土壤电阻率的高低等自然条件,参考当地原有线路的运行经验,根

据技术经济比较的结果,采取合理的防雷措施。

2 成都电网输电线路雷击跳闸分析

成都平原具有丰富的地貌形态,从西到东,地形分为山地、平原、丘陵3个部分,各高压杆塔所在的地形差别很大。成都西部,是高峻的龙门山和邛崃山地,这里山峰众多,位于山区的高压杆塔,土壤电阻率大,易发生线路反击雷击跳闸。成都市大部分区域位于岷江中游地区,河流众多,大小河流共有40多条,河流区域落雷密度大,杆塔易遭受雷击。此外,成都部分地区的高压杆塔采用红星绝缘子,耐雷水平达不到要求,不能有效防雷。

2.1 成都电网雷击跳闸情况统计

统计分析成都地区2005—2014年110 kV和220 kV高压输电线路的雷击跳闸情况,总结出成都地区高压输电线路的雷击跳闸分布规律,如图2所示。

观察图2中的雷击跳闸点,可以看出,2005—2014年成都地区高压输电线路的雷击跳闸事故主要发生在:1)岷江—沱江源山区;2)岷江—沱江上游冲击平原区;3)沱江—龙泉山交界区;4)成都城乡结合区;5)金马河—西河中间区;6)西岭大川河源山区;7)邛崃市郊丘陵区;8)蒲江市郊丘陵区。

2.2 雷击跳闸的原因分析

根据图2中成都地区高压输电线路的雷击跳闸分布规律,对雷电易击地带形成的原因进行详细分析,得出以下结论:岷江—沱江源山区和西岭大川河源山区落雷密度大,导线暴露易发生绕击故障;岷江—沱江上游冲击平原和金马河—西河中间区土壤沙石化严重,电阻率高,易发生雷电反击故障;成都城乡结合区线路杆塔升高后绝缘配置未相应升高,导致其耐雷水平普遍偏低,易遭受雷击;沱江—龙泉山交接区雷电活动高于一般地区,同时由于绝缘子劣化严重,耐雷水平偏低,易发生雷击跳闸;邛崃、蒲江丘陵区则偶尔出现雷击故障。

根据以上线路雷击跳闸的分布规律,可将成都电网高压输电线路的雷电易击区分为如下5种类型:1)河流源头山区(易发生绕击);2)河流上游冲击平原(高接地电阻率易发生反击);3)大城市城乡结合部(不合理改造高杆塔);4)沿河平原山区(交接地带绝缘子劣化严重);5)丘陵地区(零星故障)。

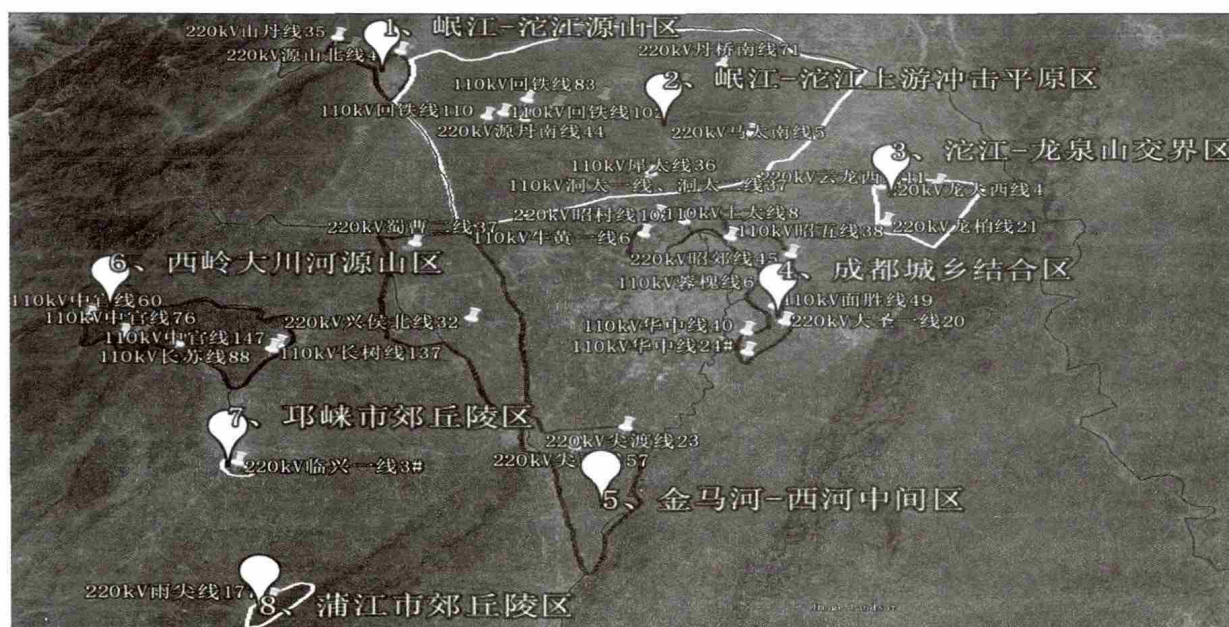


图2 2005—2014年成都地区110 kV和220 kV输电线路的雷击跳闸点位分布情况

3 降低雷击跳闸的防雷措施分析

为了更有效地避免成都地区高压输电线路的雷击跳闸事故,应研究并采取合理可行的防雷措施。针对成都地区输电线路雷击跳闸的特点,提出多种减少雷击跳闸事故的对策。

3.1 降低接地电阻

降低接地电阻能够显著提高线路的反击耐雷水平,降低反击跳闸率。岷江—沱江上游冲击平原区、金马河—西河中间区应当重点采取整治接地装置、降低接地电阻的方式开展防雷工作,对以上区域杆塔进行深入整治接地装置,将接地电阻控制在 $10\ \Omega$ 以内,可有效降低该区域的雷击故障次数。

3.2 安装避雷装置

避雷器是有效的雷电流泄放装置,能确保输电线路在遭受雷击后将雷电流疏导到相邻杆塔同时泄放,防止雷击后线路发生跳闸事故;但是线路避雷器价格昂贵,保护范围较小,只能确保安装的杆塔不发生雷击故障,因此应当在相邻前后共三基杆塔上同时安装。为了有效防雷,应对处于岷江—沱江源山区、沱江—龙泉山交界区、成都城乡结合区及西岭大川河源山区的线路选取高杆塔安装避雷器。

3.3 整治绝缘子

成都电网部分地区的杆塔由于所使用的绝缘子出现了家族性劣化缺陷,应更换绝缘水平较高的优质绝缘子;同时应加强带电检零,定期观测绝缘子耐

雷水平的变化,确保有效防雷。

在邛崃、蒲江市郊丘陵区,可采用整治绝缘子的方式来提高杆塔的耐雷水平。

3.4 成都地区输电线路的防雷措施效果分析

根据上述分析,结合成都电网各雷电易击区的自身情况,成都供电公司输电运检工区从2012年开始有针对性地成都电网各雷电易击区进行防雷综合整治,使雷电跳闸率出现了不同程度的下降,整治结果如表2所示。

对比表2中2010—2012年度和2012—2014年度的雷击跳闸数据,可以明显看出:岷江—沱江源山区、沱江—龙泉山交界区及西岭大川河源山区在雷电易击点位加装避雷器后,雷击故障大幅下降,基本实现了零故障;岷江—沱江上游冲击平原区、金马河—西河中间区由于土质问题,虽然经过接地装置的不整治,但是效果不理想,有明显的反弹迹象;成都城乡结合区通过不断地进行避雷器整治,已经能控制雷击故障的增加趋势,但是这种控制力十分有限;邛崃、蒲江市郊丘陵区的线路雷击显然具有随机性,只能通过提高绝缘性能来提高其耐雷水平。

3.5 其他防雷措施分析

实际工作中,适当增加绝缘子片数,加强线路绝缘水平,亦可达到减少雷击跳闸的目的。杆塔的绕击耐雷水平与其50%放电电压密切相关,其表达式是 $I = 2U_{50\%}/Z$ 。式中: I 为能引起绕击的最小雷电流; Z 为线路波阻抗。根据该公式可以看出,增加线路绝缘(如增加绝缘子片数)对减少绕击率是有利的;

表 2 成都地区输电线路防雷整治效果对比表

片区	整治措施	2010—2012 年跳闸次数	2012—2014 年跳闸次数	同比
1. 岷江—沱江源山区	加装避雷器	3	0	-100.00%
2. 岷江—沱江上游冲击平原区	整治接地电阻	7	4	-42.86%
3. 沱江—龙泉山交界区	加装避雷器	2	1	-50.00%
4. 成都城乡结合区	加装避雷器	6	6	0.00%
5. 金马河—西河中间区	整治接地电阻	2	3	50.00%
6. 西岭大川河源山区	加装避雷器	4	3	-25.00%
7. 邛崃市郊丘陵区	整治绝缘子	0	1	100.00%
8. 蒲江市郊丘陵区	整治绝缘子	1	0	-100.00%

然而必须注意的是,加强线路绝缘水平时应考虑加强绝缘后线路的绝缘配合和安全距离的问题;因为增加绝缘子片数,导致绝缘子串长度增加,因此需要重新校核空气间隙。

除了降低接地电阻、安装线路避雷器和加强绝缘水平外,还有一些措施可以对输电线路的防雷性能起到改善作用,如增加耦合地线和采用侧向避雷针等。

增加耦合地线的作用主要是提高线路的反击耐雷水平、降低反击跳闸率,因此耦合地线主要应用在接地电阻较高的线路。耦合地线提高耐雷水平的机理包括两方面:

1) 耦合地线可以增加导线和地线间的耦合作用,导致雷击塔顶时在导线上产生更高的感应电压,从而减小绝缘子串承受的冲击电压。

2) 耦合地线可以降低杆塔的分流系数,特别是在接地电阻较高时,可使雷电流易于通过邻近杆塔的接地装置散流,从而降低塔顶电位。但从总体效果来看,采用耦合地线对改善耐雷水平的效果不太明显,与增加两片绝缘子的作用基本相同;而从增加耦合地线的经济性来看,增加耦合地线的费用包括增加耦合地线的材料和施工费用、杆塔基础和重量增加的费用等,其费用远远超过增加绝缘子片数等措施,因此在线路防雷改进时,需综合比较各种方法的技术经济比,选取最合适的方法增加绝缘水平。

减小边导线保护角亦可有效降低绕击概率。在山区可采用负保护角塔,这样会实现较好的避雷效果。在塔上横担处加装避雷针可有效屏蔽线路的边导线,使绕击雷击在侧向避雷针上,从而减少雷击次数。

此外,为了降低雷电跳闸率,还应不断完善输配电管理工作,总结雷击跳闸规律,提出相应的防雷措施,提高输电线路运行的可靠性;同时,还需加强新型导线及绝缘子的研究,进一步提高输电线路的耐雷水平。

4 结 论

依据成都电网高压输电线路 2005—2014 年的雷击跳闸数据,对成都电网高压输电线路的雷击跳闸规律进行研究,分析影响成都地区输电线路雷击跳闸的各类因素,并提出相应的提高杆塔耐雷水平的措施,得到以下结论:

1) 成都电网高压输电线路的雷电易击区为:①岷江—沱江源山区;②岷江—沱江上游冲击平原区;③沱江—龙泉山交界区;④成都城乡结合区;⑤金马河—西河中间区;⑥西岭大川河源山区;⑦邛崃市郊丘陵区;⑧蒲江市郊丘陵区。

2) 影响成都电网高压输电线路雷击跳闸的因素与杆塔所处的地理位置及杆塔本身的耐雷水平有关,研究表明,位于山区、大川河流上游冲积平原区的杆塔及杆塔高度较高而绝缘配置较低的杆塔更易遭受雷击。

3) 根据成都电网各地区的杆塔雷击跳闸情况,可采取降低接地电阻、安装避雷装置及加强线路绝缘水平等措施来进一步提高杆塔的耐雷水平,降低线路的雷击跳闸率,确保成都电网的稳定运行。

参考文献

[1] 黄中华,韩民晓,王伟.输电线路雷击跳闸原因分析与防雷措施介绍[J].电工电气,2012(4):62-64.

- [2] 孙鹞鸿,任晋旗,严萍,等. 架空输电线路雷击跳闸率影响因素研究现状[J]. 高电压技术, 2004(12): 12-14.
- [3] 李川. 架空输电线路雷击跳闸分析及防雷探讨[J]. 广东科技, 2011(8): 56-58.
- [4] 张仕名,张先怡,许安,等. 220 kV 输电线路防绕击侧针防护效果研究[J]. 四川电力技术, 2013, 36(4): 75-79.
- [5] 吴玉麟,高建勇. 高压输电线路雷击跳闸率的计算[J]. 四川电力技术, 2008, 31(3): 16-18.
- [6] 童杭伟,金祖山,赵伟,等. 影响输电线路雷击跳闸的环境因素分析[J]. 浙江电力, 2013(5): 1-3, 25.
- [7] 童杭伟,李思南,杨立川. 以雷电日和落雷密度为参数的输电线路雷击跳闸率计算的对比分析[J]. 浙江电力, 2006(1): 48-49, 68.
- [8] 金祖山,吴健儿. 220 kV 同塔双回输电线路雷击跳闸原因分析[J]. 浙江电力, 2009(1): 51-53.
- [9] 毛峰. 山区输电线路防雷相关问题的探讨[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
- [10] 植芝豹. 柳州电网输电线路防雷研究与实践[D]. 南宁: 广西大学, 2005.
- [11] 贺含峰,张仕名. 四川 500 kV 线路雷击跳闸情况分

- 析[J]. 四川电力技术, 2003, 26(1): 1-5.
- [12] 金祖山,胡文堂,龚坚刚,等. 浙江电网降低高压输电线路雷击跳闸率的措施分析[J]. 浙江电力, 2010(11): 1-5.
- [13] 郭志红,程学启,李树静,等. 山东省输电线路雷击跳闸分析及反措[J]. 高电压技术, 2001(6): 66-69.
- [14] 刘家芳,许飞. 超高压输电线路雷击跳闸典型故障分析[J]. 高电压技术, 2006(4): 114-115.
- [15] 张志劲,司马文霞,蒋兴良,等. 超/特高压输电线路雷电绕击防护性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2005(10): 1-6.
- [16] 王云飞. 输电线路的选择性及其影响因素的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.

作者简介:

黄江龙(1987), 学士, 主要从事高压输电线路防雷应用与技术监督研究;

李倩竹(1989), 硕士, 主要从事输电线路在线监测及防雷措施分析。

(收稿日期: 2015-07-31)

(上接第 11 页)

配网 GIS 平台中, 从而可以调用潮流计算程序计算出潮流结果。结合实例分析验证了模型的正确性。

不足之处是: 利用网基矩阵方法从配电网络的变结构特点出发, 能有效地表示配电网络拓扑; 但它是基于矩阵的表示方法, 而配电网络的矩阵稀疏程度很高, 占用了较大的存储空间, 无法快速跟踪和识别网络故障。下一步将研究 GIS 系统数据存储的问题, 在电力系统公共信息模型(CIM)的基础上建立配电网 GIS 模型, 从而解决了数据存储空间不足的问题, 进一步为配网自动化的改造工作提供参考依据。

参考文献

- [1] 曹英丽,郑伟,周云成. 基于 GIS 平台的配电网潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 125-127.
- [2] 陈根永,陈永华. 基于 GIS 平台的配电网故障诊断算法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 71-74.
- [3] 刘青海,杨建华,杨普,等. 基于 GIS 组件的配电网规

划与改造软件[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 106-109.

- [4] 周云成. 基于 GIS 的 10kV 配电网络电气连通性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 83-87.
- [5] 周云成,许童,朴再林. 基于 CIM 的配电网 GIS 数据模型存储与维护方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 104-108.
- [6] 汤红卫,王华,郭喜庆. 一种基于地理信息系统的配电网规划方法[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 79-82.

作者简介:

张东明(1987), 硕士, 研究方向为电力系统稳定与控制;

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

刁海勇(1973), 高级工程师, 研究方向为输变电检修技术;

王维庆(1959), 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统自动化和风力发电机组的智能控制;

任华(1985), 硕士, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2015-08-10)

超特高压交流紧凑型输电线路带电作业试验分析

彭勇, 肖宾, 雷兴列, 刘凯, 刘庭, 吴田, 苏梓铭, 唐盼
(中国电力科学研究院 湖北 武汉 430074)

摘要: 为保障超、特高压交流紧凑型输电线路带电作业安全、有效的开展, 通过布置典型带电作业工况并进行操作冲击放电试验, 对比分析了500 kV、750 kV和1 000 kV交流紧凑型线路带电作业间隙放电特性; 分析了多种作业人员进入超、特高压交流紧凑型输电线路等电位的作业方式, 通过试验提出采用塔上吊篮法为最优化进出等电位作业方式; 研制了超、特高压交流紧凑型输电线路带电作业用保护间隙装置, 推荐了相应电压等级线路的带电作业用保护间隙技术参数, 并经试验验证保护间隙的安全可靠性。研究成果可为超、特高压交流紧凑型输电线路运行维护提供参考依据。

关键词: 超、特高压输电线路; 紧凑型; 操作冲击放电特性; 保护间隙

Abstract: In order to guarantee the safety and effectiveness of live-line working on EHV/UHV compact transmission line, the typical live-line working conditions of actual operation are arranged, and the gap discharge characteristics during live-line working on 500 kV, 750 kV and 1 000 kV AC compact transmission lines are compared and analyzed. Several methods of entering into equipotential area on EHV/UHV AC compact transmission line are discussed, and the optimal way of entering into/getting out equipotential area is proposed that is the basket method. In addition, the protective gap device is developed for live-line working on EHV/UHV AC compact transmission line, the technical parameters of the corresponding voltage level are recommended, and the reliability of the designed protective gap device is verified through the test. The research results can provide a reference for the operation and maintenance of EHV/UHV AC compact transmission lines.

Key words: EHV/UHV transmission line; compact line; switching impulsive discharge characteristic; protective gap

中图分类号: TM723 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-33-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.008

0 引言

带电作业是保障输电线路安全稳定运行的重要手段。中国超、特高压输电工程已广泛建设, 在输电走廊紧张的地区, 架设紧凑型的超、特高压输电线路成为一种优选方案, 同时对带电作业工作提出了新的挑战。

超、特高压交流紧凑型输电线路与常规的单回或者双回超、特高压输电线路有较大区别, 其三相导线紧凑布置在同一塔窗内; 且相间无接地构件, 塔窗内空气间隙较小, 给线路带电检修工作造成一定的困难, 因此有必要对超、特高压交流输电线路带电作业展开相应的研究, 为中国超、特高压交流紧凑型输电线路的运行维护工作提供技术支撑。

针对交流500 kV、750 kV及1 000 kV 3个电压等级的紧凑型输电线路, 主要的研究内容包括: 1)

结合超、特高压交流紧凑型线路带电作业典型工况, 试验研究并对比分析不同电压等级紧凑型线路带电作业间隙操作冲击放电特性; 2) 分析多种进入超、特高压交流紧凑型输电线路等电位方法, 并通过试验确定最优化作业方式; 3) 对超、特高压紧凑型线路带电作业用保护间隙展开研究, 获取带电作业用保护间隙技术参数。

1 带电作业间隙操作冲击放电特性研究

1.1 试验方法

根据实际运行或规划设计的超、特高压紧凑型交流输电工程, 结合导线参数、杆塔型式、绝缘子串型等准备试品开展带电作业操作冲击放电试验。相地试验中采用波前时间为250 μ s的操作冲击波进行放电试验, 相间操作冲击放电电压试验时, 在构成放电间隙的两相分别施加+250/2 500 μ s

波形操作波和 $-250/2\ 500\ \mu\text{s}$ 波形操作波, 波形系数 $\alpha = 0.33^{[1-6]}$ 。

IEC 60071-2-1996 推荐的空气间隙缓波前过电压绝缘特性由式(1)、式(2)给出。

$$U_{50} = KU_{50Rp} \quad (1)$$

$$U_{50Rp} = 500d^{0.6} \quad (2)$$

式中: U_{50} 为间隙的操作冲击 50% 放电电压; d 为空气间隙距离; K 为间隙系数; U_{50Rp} 为相应电压波形及间隙距离下棒-板间隙操作冲击 50% 放电电压。由式(1)、式(2)可确定不同空气间隙下的放电间隙系数。

根据 GB/T 16927.1-2011《高电压试验技术》的试验方法, 在本试验中采用升降法求取空气间隙操作冲击 50% 放电电压, 操作冲击加压 40 次, 试验结果依据标准进行气象修正。每次试验前后对温度、湿度和气压 3 个参数进行测量, 取各参数的平均值作为本试验数据的气象条件。

1.2 试验布置

1 000 kV 特高压紧凑型线路目前没有实际工程, 根据前期研究成果, 考虑采用 $10 \times 500\ \text{mm}^2$ 导线, 分裂间距取 400 mm; 750 kV 电压等级参考西北电网 750 kV 紧凑型线路设计参数, 考虑采用 $8 \times 400\ \text{mm}^2$ 导线, 分裂间距取 400 mm; 500 kV 电压等级以河南辛荻线 500 kV 紧凑型线路为例, 采用 $6 \times 240\ \text{mm}^2$ 导线, 分裂间距取 375 mm。试验中模拟导线采用不锈钢管加工成硬质导线, 分别模拟 6 分裂、8 分裂、10 分裂导线, 长度为 20 m。根据不同塔窗设计参数, 采用 1:1 模拟真型塔窗。试验用模拟人由铝合金制成。

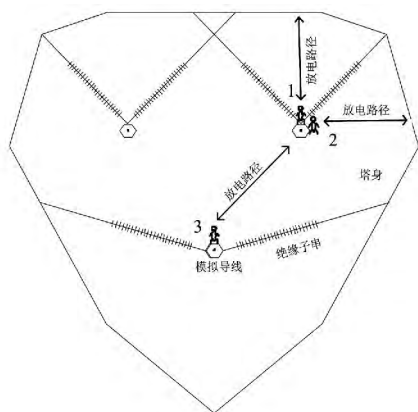


图1 等电位工况试验布置示意图

根据国内外大量带电作业研究经验, 超、特高压输电线路带电作业典型作业工况中, 等电位作业工况的间隙放电电压比地电位工况小^[7-8]。从严考

虑, 重点比较各电压等级线路下典型等电位作业工况, 试验布置如图1所示。

图1中工况1表示作业人骑于上相导线, 此时主要可能发生等电位人头顶对杆塔上横担放电; 工况2表示等电位人在导线侧方, 此时可能发生人体对塔架侧身放电; 工况3表示人骑于下相导线, 此时可能发生等电位人头顶对上相导线放电。

1.3 试验结果与分析

试验中调整各工况下带电作业间隙距离, 施加标准操作冲击电压, 获取不同间隙距离的 50% 放电电压值并进行数据拟合, 获取放电特性曲线如图2~图4所示。

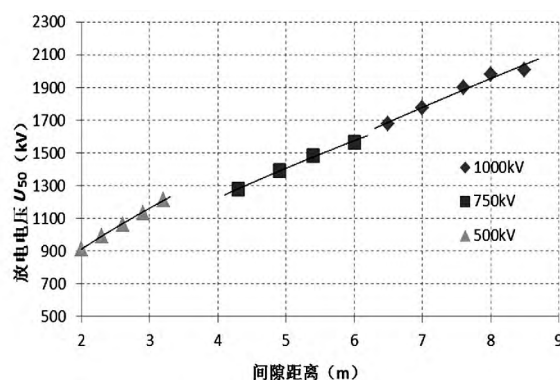


图2 工况1放电特性曲线

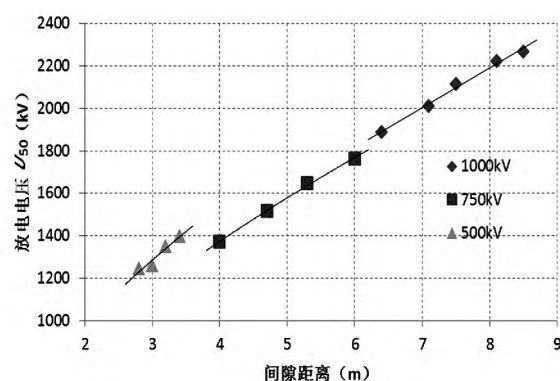


图3 工况2放电特性曲线

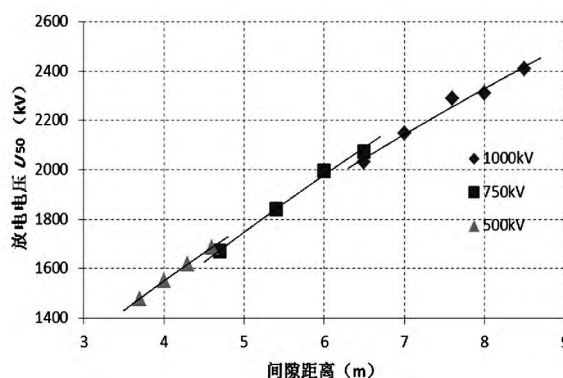


图4 工况3放电特性曲线

由不同工况的间隙操作冲击放电特性曲线趋势可以看出,在工况 1、工况 2 以及间隙距离相同的条件下,500 kV 紧凑型线路带电作业间隙操作冲击放电电压比 750 kV、1 000 kV 紧凑型线路大;在工况 3 下,3 种电压等级紧凑型线路的带电作业间隙操作冲击放电特性曲线趋向一致。

间隙形状的不同会直接影响放电特性,需用间隙系数来反映间隙形状对放电电压的影响。一般来说,在同一间隙长度下棒-板结构的放电电压最低,其间隙系数 K 为 1。根据试验曲线拟合,计算出 3 种作业工况下的放电间隙在不同电压等级下的最小间隙系数 K ,如表 1 所示。

表 1 间隙系数值

作业工况	1 000 kV	750 kV	500 kV
工况 1	1.09	1.06	1.20
工况 2	1.23	1.19	1.34
工况 3	1.32	1.32	1.35

由表 1 可知,在作业工况 1、工况 2 下,500 kV 电压等级的间隙系数比 750 kV 及 1 000 kV 大 9%~13%,750 kV 与 1 000 kV 的间隙系数相差不大;在作业工况 3 下,3 种电压等级的间隙系数基本一致。

工况 1、工况 2 放电间隙结构分别为“人头顶-上横担”和“人后背-侧面塔身”,类似于“棒-板”电极结构模型,其电极间隙构成的电场类型为极不均匀电场。工况 3 放电间隙结构类似于“棒-棒”电极架构,为稍不均匀场。因此,工况 1、工况 2 较工况 3 放电电压更低,比较 3 种电压等级线路,工况 3 的间隙系数均比工况 1 和工况 2 大。

工况 1 和工况 2 间隙试验的板电极分别为塔上方横担和塔侧身构架。500 kV 紧凑型杆塔上方横担以及塔侧身构架尺寸比 750 kV、1 000 kV 紧凑型杆塔明显较小,根据塔身宽度对间隙放电电压的影响^[9],杆塔上方横担及塔侧身构架尺寸减小时,对应作业工况 1、工况 2 的放电电压增大。因此,500 kV 紧凑型线路带电作业工况的放电间隙系数值均为最大。

2 进入等电位方式

输电线路进入直线塔等电位的常用方法包括塔

上吊篮法、塔上软梯法、滑轨吊椅法、地面吊篮法、绝缘硬梯法等^[10-12]。

根据图 1 作业工况可知,超、特高压紧凑型输电线路带电作业进入等电位包括进入上相等电位和进入下相等电位两种情况。由于超、特高压线路绝缘子串较长,采用塔上软梯法时,作业人员沿软梯进入等电位的路径长,作业人员劳动强度太大;采用滑轨吊椅法时,由于杆塔横担长,相应的滑轨等硬质工具尺寸、重量加大,不利于工器具的使用、运输以及传递等;采用地面吊篮法时,超、特高压杆塔、线路离地较高,地面辅助人员传递作业人员进入等电位的路径长,劳动强度大。考虑到上述因素,超、特高压带电作业进入上相等电位推荐采用塔上吊篮法,进入方式如图 5 所示。

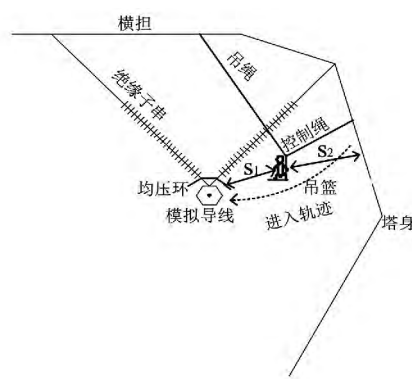


图 5 塔上吊篮法进入上相等电位

超、特高压输电线路进入下相等电位除了可以采用塔上吊篮法外,还可根据各塔形结构尝试采取其他不同的方法。500 kV 紧凑型线路杆塔高度相对较小,下相进入等电位可采用从塔窗架下方爬硬质绝缘梯斜向进入等电位,如图 6 所示。750 kV、1 000 kV 紧凑型线路可采取从下相导线下方塔架沿绝缘软梯进入等电位,如图 7 所示。

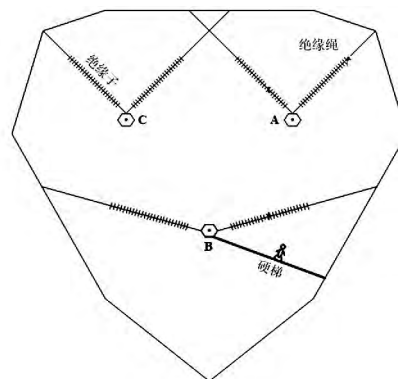


图 6 硬梯法进入下相等电位

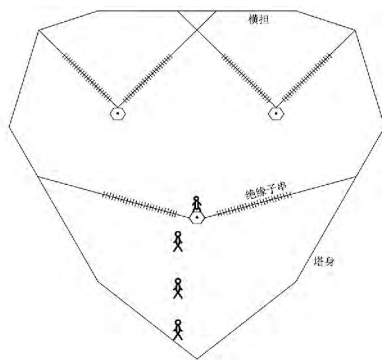


图 7 软梯法进入下相等电位

经过大量试验证明,组合间隙最低放电位置均出现在模拟人距离导线 0.4 m 位置处。确定最低放电位置,开展不同方式下进入等电位的组合间隙放电试验,获取放电间隙系数如表 2 所示。

表 2 进入等电位的放电间隙系数

进入方法	1 000 kV	750 kV	500 kV
吊篮法	1.22	1.19	1.23
软梯法	1.20	1.16	—
硬梯法	—	—	1.14

对比发现,采用软梯法或硬梯法时的放电间隙系数均比采用塔上吊篮法的间隙系数小,其间隙发生放电现象一般为沿绝缘工具表面发生的沿面闪络,放电电压比纯空气间隙低,即对应的组合间隙放电电压更低,意味着为保证等电位作业人员的安全,需要更大的组合间隙距离,因此,推荐进入超、特高压紧凑型输电线路上下相、导线等电位时均采用塔上吊篮法。

3 保护间隙研究

由于受到杆塔结构及导线布置型式的限制,超、特高压紧凑型塔窗内空气间隙距离有限;且带电作业过程中需考虑一定的人员活动范围,因此,紧凑型杆塔塔头空气间隙距离可能无法满足带电作业最小安全距离、最小组合间隙等技术参数的要求。为进一步确保超、特高压交流紧凑型线路带电作业的安全性,提出加装保护间隙的作业方式。

保护间隙的设计应满足:放电电压稳定、可重复、可恢复;保护间隙可调且轻巧,便于安装、操作;保护功能不受导线、杆塔等类型的影响等条件^[13-15]。保护间隙的放电电压上限应低于作业间隙放电电压的下限,且在最高工作电压下不动作。

国内外保护间隙的相关研究表明,保护间隙采用接地端电极为 Φ80 mm 球电极、高压端为 Φ35 mm 球电极的电极结构较为合适。

所设计的便携式带电作业保护间隙由金属插夹、绝缘支杆、接地引流线、固定电极、可调电极等部分组成,如图 8 所示。保护间隙的整体重量不超过 5 kg,单段长度不超过 3 m,可方便地拆卸和组装,便于运输。

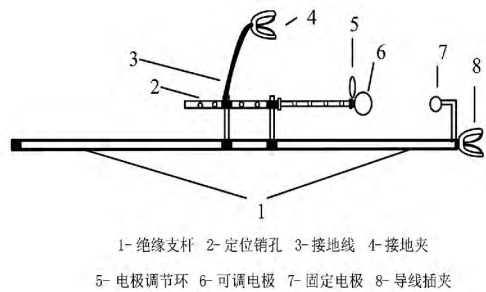


图 8 保护间隙结构图

保护间隙的试验包括工频耐压试验和标准操作冲击电压放电试验,试验结果如图 9 所示。

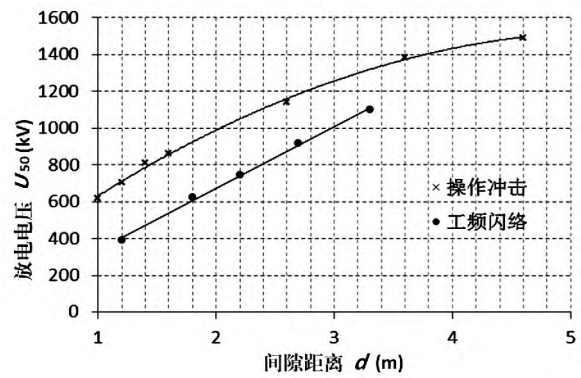


图 9 保护间隙电气试验结果

设系统相电压幅值为 $U_{\max}$,则系统正常运行时最大相对地电压为 $U_{\max}/\sqrt{3}$ 。根据保护间隙的工频闪络特性曲线,可以确定保护间隙设定值的下限间隙值,如表 3 所示。按照对应电压等级的最大相地电压进行工频耐压试验 30 min,保护间隙不发生闪络。

表 3 保护间隙设定值下限值

电压等级/kV	500	750	1 000
间隙距离/m	1.1	1.6	2.0

表 4 保护间隙整定值

电压等级/kV	500	750	1 000
间隙距离/m	1.3	2.3	3.6

根据保护间隙操作冲击放电曲线,可计算出最小间隙系数 K 为 1.3。考虑到保护间隙的设计要求,

表 5 1 000 kV 特高压紧凑型线路等电位作业试验加装保护间隙的放电试验结果

试验结果	1 000 kV 保护间隙试验			
	作业间隙 /m(上相)	保护间隙 /m	作业间隙 /m(下相)	保护间隙 /m
	6.3	3.4	7.1	3.4
放电电压 /kV	1 327.4		1 334.6	
变异系数 /%	2.8		2.3	
放电次数	0	19	0	19
危险率 /10 ⁻⁶	安装前	8.68	6.9	
	安装后	0.069 7	0.070 1	

当保护间隙的放电间隙系数大于表 1 和表 2 求出的带电作业间隙系数时,保护间隙的整定值应当根据带电作业危险率计算并要求留有一定的裕度;当保护间隙系数小于空气间隙系数时,相同间隙距离下遇到过电压时优先从保护间隙放电,此时保护间隙整定值略低于空气间隙最小值即可,推荐标准气象条件下的保护间隙距离整定值见表 4。

在不同电压等级的紧凑型线路模拟杆塔上进行等电位作业试验中,将保护间隙垂直安装在杆塔横梁与导线之间,模拟人身穿屏蔽服,处于等电位作业位置。在导线上施加操作冲击电压,并观察放电路径和放电次数,以 1 000 kV 交流线路带电作业用保护间隙为例,试验结果如表 5 所示。

从试验结果可以看出,在不同的作业工况下,当出现过电压时,放电路径均经由保护间隙,避免了作业人员所在的等电位工况发生放电危险;且加装保护间隙后的危险率明显降低,证明保护间隙可有效保护作业人员的安全。

4 结 论

1) 通过操作冲击放电试验,500 kV 紧凑型线路在上相导线等电位作业工况 1 和工况 2 的放电间隙系数比 750 kV、1 000 kV 大 9%~13%,即相同间隙距离的放电电压更大。在下相等电位带电作业时,3 种电压等级下工况 3(等电位人头顶-上相导线)的间隙系数相差不大。

2) 通过试验分析,提出了采用塔上吊篮法进入超、特高压紧凑型输电线路,上相、下相导线等电位为最优方案。

3) 研究设计了超、特高压紧凑型线路带电作业保护间隙装置,确定了相应电压等级保护间隙装置的技术参数,试验表明,加装保护间隙后放电路径只

经过保护间隙,保证了带电作业的安全性。

参考文献

- [1] 胡建勋,刘凯,刘庭,等. 500 kV 高海拔紧凑型输电线路带电作业试验研究[J]. 高压电器, 2010, 46(4): 35-39.
- [2] 胡毅,聂定珍,王力农. 500 kV 紧凑型双回线路的安全作业方式研究[J]. 高电压技术, 2001(6): 31-33.
- [3] 郝旭东,龚延兴. 500 kV 紧凑型输电线路带电作业研究[J]. 电力设备, 2005, 6(2): 29-32.
- [4] 邓春,王珣,郝旭东,等. 500 kV 紧凑型输电线路带电作业在高海拔地区适应性应用研究[J]. 中国电力, 2009(8): 24-26.
- [5] 肖宾,王力农,刘凯,等. 750 kV 同塔双回紧凑型线路带电作业技术试验分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2863-2868.
- [6] 徐涛,霍锋,万启发,等. 1 000 kV 交流紧凑型输电线路相间空气间隙放电特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1850-1856.
- [7] 刘凯,胡毅,肖宾,等. 1 000 kV 交流紧凑型输电线路带电作业安全距离试验分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1857-1861.
- [8] 王力农,胡毅,刘凯,等. 500 kV 高海拔紧凑型输电线路带电作业研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 12-14.
- [9] 刘庭,胡毅,刘凯,等. 超高压交流/特高压直流同塔多回输电线路塔宽及离子流对带电作业间隙放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3261-3267.
- [10] 胡毅,聂定珍,王力农. 500 kV 紧凑型双回线路的安全作业方式研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(6): 31-33.
- [11] 刘振,郭洁,项阳,等. 750 kV 单回紧凑型线路带电作业方式试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2876-2880.

(下转第 55 页)

低压加压试验,检查阀侧末屏电压值正确,波形正常无畸变,阀侧加 10 kV 电压时保护所录波形如图 10 所示。



图 9 更换电压采集模块现场照片

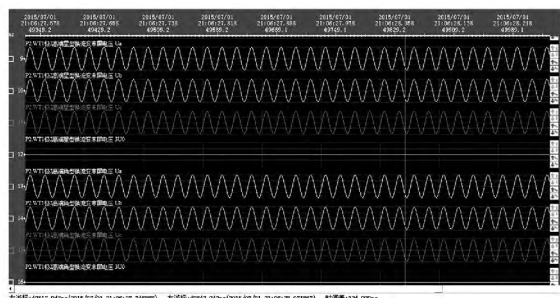


图 10 更换电压采集模块后阀侧加 10 kV
电压保护所录波形

5 总 结

分析了许继电压采集变换模块上电压取量元件谐振,导致换流变压器阀侧电压测量异常事件,认为许继末屏电压互感器缺少必要的阻尼回路和补偿回路;当一次电压发生突变时,二次 PT 过励饱和、阻

抗下降,等效电容和等效电感在某个特定频率发生谐振,导致信号畸变,严重时测量电压会超出正常电压数倍,使二次 PT 铁心过载发热,甚至烧毁,因此建议改进末屏分压回路设计,增加阻尼和补偿回路,并通过仿真以避免谐振现象的产生,保障直流系统的稳定运行。

参考文献

- [1] 刘耀,王明新. 高压直流输电系统保护装置冗余配置的可靠性分析[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 51 - 54.
- [2] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1990: 122 - 136.
- [3] 刘国福,张润丹. 电容式电压互感器故障分析[J]. 电力安全技术, 2006(9): 26 - 27.
- [4] GB/T 4703 - 2007, 电容式电压互感器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 15 - 21.
- [5] 陆晓春. 变压器状态检修技术方案的可靠性研究[J]. 上海电力学院学报, 2003(2): 26 - 32.
- [6] 严璋. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 231 - 255.
- [7] 齐旭,曾德文,史大军,等. 特高压直流输电对系统安全稳定影响研究[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 1 - 6.

作者简介:

孙 文(1980), 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;

禹 佳(1983), 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;

陈 伟(1991), 助理工程师, 研究方向为特高压直流输电技术。
(收稿日期: 2015 - 08 - 04)

(上接第 37 页)

- [12] 肖宾,胡毅,刘凯,等. 1 000 kV 交流紧凑型输电线路等电位进入方式[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1868 - 1874.
- [13] 舒印彪,胡毅,王力农. 500 kV 紧凑型线路带电作业用保护间隙研究[J]. 中国电力, 2003, 36(5): 51 - 53.
- [14] 胡毅,王力农,舒印彪. 带电作业保护间隙的放电特

性研究[J]. 高电压技术, 2002(11): 17 - 18.

- [15] 刘凯,胡毅,王力农,等. 1 000 kV 输电线路带电作业保护间隙的研究[J]. 高电压技术, 2006(12): 83 - 88.

作者简介:

彭 勇(1984), 硕士, 工程师, 主要从事输电线路运行维护、带电作业技术研究。

(收稿日期: 2015 - 09 - 22)

强电磁场对 1 000 kV 等电位在线 验电器的影响和防护措施

张大堃¹ 张文胜²

(1. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 乐山 614000)

摘要: 等电位在线验电器在运行过程中受强电磁场的干扰。在 1 000 kV 的特高压线路上, 干扰尤为明显。其现象包括 LED 亮起后无法完全关断、闪烁间隔时间不稳定等。从强电磁场对等电位在线验电器的干扰入手, 根据高压试验测量的数据, 分析强电磁场对 LED 元件和控制元件的影响, 并寻求相应的防护措施。试验结果表明, 加装屏蔽防护金属网和采取多芯片堆放再厚膜封装的电路集成, 可有效减少强电场对验电器的干扰。通过优化电路板设计、增加铁磁材料金属箔、前端增加瞬变抑制二极管等辅助措施, 可进一步保证 1 000 kV 等电位在线验电器在强磁场和瞬时过电流的环境下仍能正常、稳定工作。

关键词: 等电位在线验电器; 强电磁场; 防护措施; 金属网屏蔽; 瞬时过电流; 厚膜封装

Abstract: Equipotential on-line electroscope is prone to the interference by high electromagnetic (EM) field during its operation, especially in 1 000 kV UHV transmission line. The interference makes LED cannot be completely switched off and leads to irregular LED flashing. In order to overcome these problems, the influence of high EM field on LED components and control components is analyzed according to the measured data of HV test, and the corresponding protective measures are found out. Test results show that it can effectively reduce the interference to electroscope from high EM field by installing metallic mesh as shielding and using the integration of circuits with multi-chip module and thick-film package. Through optimizing the design of circuit board, adding metal foil of ferro-magnetic material and installing transient voltage suppressor, it can ensure the normal and stable operation of 1 000 kV equipotential on-line electroscope under the interference of high EM field and transient over-current.

Key words: equipotential on-line electroscope; high electromagnetic field; protective measure; metal-shielded mesh; transient over-current; thick-film package

中图分类号: TM835.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-38-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.009

0 引言

等电位在线验电器作为近年来应用于电网的新装置, 其主要功能是检验验电器所接触的导体是否带电。当导体带电时, 验电器通过闪烁发光警示工作人员该处带电; 当导体不带电时, 验电器则不再闪烁发光。等电位在线验电器与传统抽拉杆式验电器不同点在于, 其等电位的安装在高压带电体上, 即等电位在线验电器长期悬挂于高压带电体上, 与带电体处于同一电位。这样的设计方便了运维人员的验电工作, 既无需随身携带拉杆验电器, 又无需举起绝缘杆验电。而传统抽拉杆式验电器在验电过程中需

要举起绝缘杆验电的操作, 这对于离地距离很高的 330 kV 及以上电压等级设备的验电是非常困难的。根据《国家电网公司电力安全工作规程(变电部分)》(简称《安规》)规定, 330 kV 及以上的电气设备, 可采用间接验电方式进行验电。根据《安规》释义, 该规定是由于这类特高压电气设备的“验电器过于笨重, 操作不便, 有的还没有成熟的产品”^[1], 因此, 采用间接验电无疑是退而求其次的选择。1 000 kV 等电位在线验电器的设计, 解决了传统直接验电所用的验电器笨重、雷雨天气无法直接验电等问题, 填补了没有成熟验电产品的空白, 其等电位的设计同时也杜绝了设备由于验电器绝缘表面积污或绝缘老化发生对地闪络或击穿的隐患。

然而, 等电位在线验电器因其工作环境恶劣, 给

设计带来了许多新的难点和挑战。目前,并没有对等电位带电验电器在交流 1 000 kV 电压下工作特性的研究前例,该研究属于首例,并将对在此电压等级下工作的验电器受到的强电磁场环境影响及防护措施作出基于试验数据的分析和建议。由于验电器长期处于高电位,随着电压等级的不断升高,所处的电磁场环境也越来越强烈,电磁干扰对其控制系统的正常工作带来严峻挑战,整体设计必须进行相应的调整。下面将着重对等电位在线验电器在强电磁场环境下的干扰问题和抗干扰设计问题进行研究和讨论。

1 等电位在线验电器基本原理

1.1 静电感应原理

放入电场中的导体,其中的自由电荷在电场力的作用下发生定向移动使导体两端分别出现等量异性电荷——感应电荷。在工频强电场的作用下,导体会产生大量静电感应电荷。

1.2 耦合原理

电容接在交流电路中,当电容器两端的电压逐渐正向升高时,电荷将在电容器的两个极板聚积;当电容器两端的电压逐渐下降并反向升高时,在两个极板上聚积的电荷逐渐减少到零,然后反极性电荷再在电容器的两个极板聚积。电容器的两个极板是绝缘的,整个过程并没有电流通过电容器;但随着两个极板电位差的升高、降低而集聚和释放电荷的现象,看起来则像是有电流通过,因此,它能把直流隔离,而将交流信号以两端电压升高和降低的形式耦合过来,传给下级的电路元件。

1.3 1 000 kV 等电位户外固定式在线验电器能量采集设计

1 000 kV 等电位户外固定式在线验电器系统中的能量采集,是通过收集环境中产生的高压线路耦合能量,然后将这种能量转换成调节良好的输出,为发光元件提供能量。该能量采集模块使电荷能够在存储电容器上积累,直至降压型转换器可以高效率地将一部分存储的电荷传送给输出为止,在无负载休眠状态时,可调节输出电压,同时连续给存储电容充电。

能量采集系统采用集成芯片,输出电压为可调节的,经过 LDO 可实现具有限流和过热关断功能,可实现恒压恒流充电^[2]。如图 1 所示,两个迟滞比

较电路分别用于检测能量采集器的工作状态,其输出端作用于集成芯片的充电使能控制端,控制芯片的开断,选通控制电路检测两个迟滞比较器的输出状态,并通过电平控制 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 、 Q_6 的开断状态,调整切换能量采集器的工作状态。

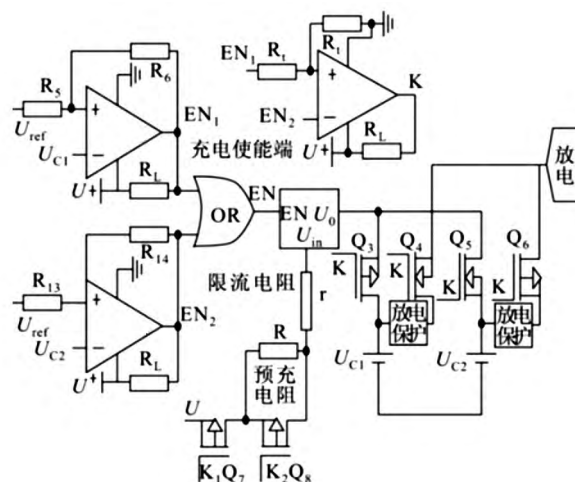


图 1 能量采集电路示意图

K 为充放电选通电平, K_1 为线路电流检测电平,在能量采集装置供能不足时,通过 K_1 控制 Q_8 关断充电电路,优先保证负载的供电需求; K_2 为预充电控制电平,在储能设备的电压低于安全电压 U_N 时, Q_8 截止,充电电流经预充电电阻 R 充电。此外,为了防止能量采集器过度放电造成损坏,增加放电保护电路,当储能设备电压 $< U_N$ 时,关断能量采集器对负载的放电。

能量采集器经 DC/DC 升压后,通过 MOS 管与供电端相联,供电不足或者停电时, MOS 管导通,能量采集器供电电路接入,使电源的输出受电网状态影响较小,保证供电的稳定;由于能量采集器放电电路始终处于准接入状态,短时间内向外输出功率能提升一倍,可适应各种苛刻的能耗环境。

2 1 000 kV 强电磁场对等电位在线验电器的影响

2.1 强电磁场对控制回路中电子元件的影响

1 000 kV 等电位户外固定式在线验电器的控制回路包括图 2 中方框内的部分,即功率放大、能量储存和频率控制部分。

1) 工频电磁场

在 1 000 kV 的输电线路周围,电磁场强度非常强。根据国内其他研究仿真计算表明,假设初始条件如下:

运行电压为交流1 000 kV 运行电流为259.0 A 导线采用8分裂500 mm²导线,分裂导线间距为0.4 m,线路对地最小距离21 m。水平排列的导线,在导线上方1 m处的电场强度最大值为161.6 kV/m,磁场最大强度达到502 μ T;对于三角形排列的导线,在导线上方1 m处的电场强度最大值为149.8 kV/m,磁场最大强度达到484 μ T^[3]。

强电场会产生强感应电压。强大的工频电场,足以使验电器内部电子元件、集成电路中的金属件间产生放电,并最终导致元件损坏、控制失灵。

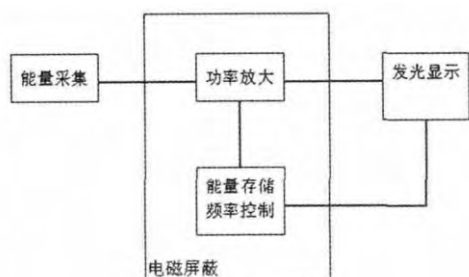


图2 等电位在线验电器控制回路示意图

2) 无线电干扰

由于强电场在导线和金具周围产生的电晕放电,以及金具联接接触不良产生的间隙火花放电,会产生频率大于工频的无线电干扰。无线电信号的主要频率范围为5~30 MHz。频率越低,干扰越大^[4]。等电位在线验电器内部的电子元件并没有使用通信模块或无线电模块,受到无线电干扰的因素较小,再加上该频率段的电磁波干扰功率远远低于工频电磁波的功率,因此将不考虑无线电对验电器的干扰^[5-6]。

2.1.1 强电场对发光元件的影响及防护

在1 000 kV 电场环境下,为防止电路板、电子元件等金属件被高电压击穿,需要使用多种方式对验电器内部电子元件进行整体屏蔽,包括增强电磁屏蔽、减弱干扰耦合、增加电子元件的抗干扰能力等等。用一个法拉第笼将整个控制组件屏蔽起来,作为电场屏蔽,是一种简单有效的方式,但仍有其局限性^[7-8]。然而,仅仅将控制回路部分用金属包裹起来,当高压试验电压加至对地460 kV左右时,验电器的闪烁频率有明显紊乱,频率控制受到干扰;LED发光元件无法完全断开熄灭。验证试验在中国电科院检测中心高压实验室进行,加压设备及等电位验电器的布置如图3所示,带电显示器在箭头所指处。



图3 实验现场布置

实验中,验电器搭载德州仪器(Texas Instrument)的电压测量模块ADS1015对单个LED灯芯两侧电压进行在线测量,如图4所示。

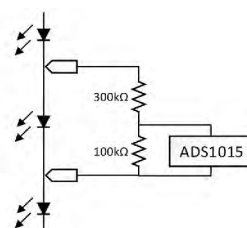


图4 LED电压测量回路

经换算后测量的LED两端实际电压如图5。

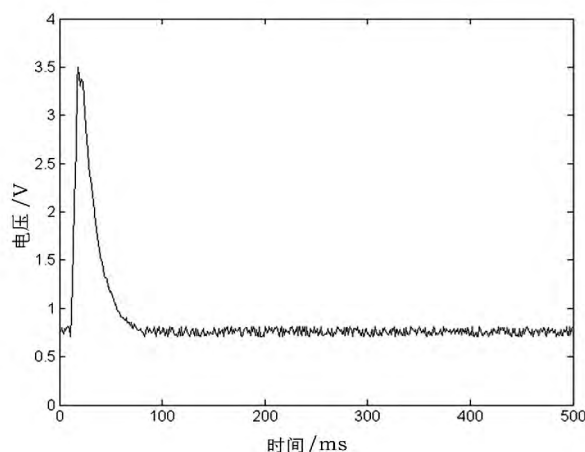


图5 LED两端电压采样示意图

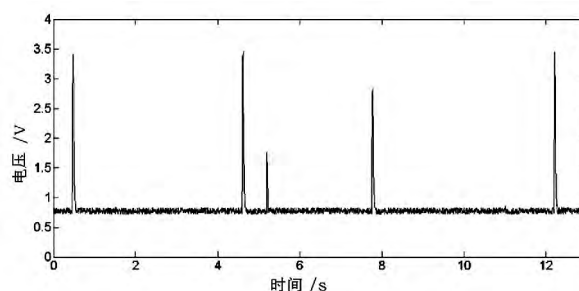


图6 测量的LED脉冲示意图

由图6可见,闪烁频率不规律,且两次闪烁间的半导体结电压仍保持在0.7 V左右,并有大量干扰信号出现。在5 s位置,二极管PN结有提前打开的现象,但因储能不够,未能达到LED正常工作的2~4 V电压(根据颜色不同,LED工作电压不同,实验中使用的绿色LED,额定电压3.4 V,额定电流250 mA)。

上述测试结果说明,电场产生的感应电压足以使发光二极管导通,并阻碍了LED的正常关断。这就是为什么发光元件在控制器断开供电电源后,在闪烁间隙仍微弱发光,无法完全熄灭的原因。

要解决发光二极管的屏蔽问题,不能简单地使用金属箔包裹LED,否则LED的光线将无法透出。既能对LED进行屏蔽,又不会遮挡LED发出的光线,采用了在LED灯板面上放置一层金属网格,金属网格的边缘进行倒角圆滑处理。金属网格的电场屏蔽效果虽然没有使用铜箔进行屏蔽的效果好,但由于需要有孔洞透出LED灯光,这是一个折衷的办法。由于金属网的屏蔽效果与电磁场频率成正比,对于30 MHz的电磁波,16目筛孔为1.180 mm的不锈钢金属网屏蔽效能可达88.6 dB^[9]。不锈钢金属网从对电磁场屏蔽效果和性价比来讲,不锈钢网是最优选择^[10]。

采用金属网格对LED灯板进行屏蔽后,再次实验测量得到的结果是:在控制器切断电源供应的时间段,LED两端的电压基本为0,不再有强电场在LED芯片两端产生感应电压的情况,且发光元件可以可靠关断,但频率仍然不稳定。

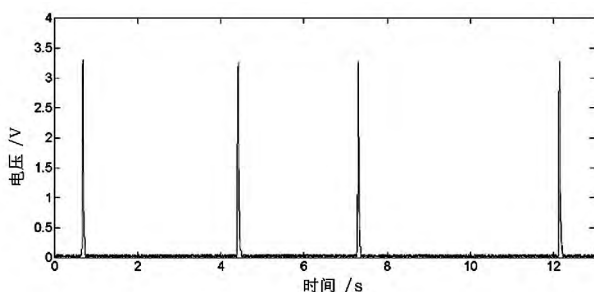


图7 采用金属网格屏蔽后的LED脉冲示意图

2.1.2 强电场对控制元件的影响及防护

发光元件闪烁频率无规律的直接原因,在于外界电场产生的感应电压大于控制储能电容充放电的三极管门极开断电压(一般为0.7 V),使三极管受干扰打开。由于感应电压有很大的不确定性,开断频率并非是由频率控制部分来主动控制,而是由感

应电压升高随机性导致了发光元件的不稳定闪烁和频率紊乱。

深入研究三极管受外间电场影响打开的问题,发现强电场对所有电子元件的影响都是类似的。在强电场环境中工作的电子元件,由于在接线脚间产生感应干扰信号远强于电子元件本身的动作信号,导致电子元件无法正常工作。

通过在控制用电子元件周围采用金属屏蔽的方式,很大程度上可以缓解这样的干扰问题;然而在实际实验中发现,当线路的工作电压上升到对地450 kV时,验电器便开始发生不稳定的闪烁现象。增加金属屏蔽层厚度的效果并不明显,解决这一问题必须采用电磁屏蔽、电路设计和芯片设计多重组合方式才能实现。

在实际设计中,因为使用有包括不可控整流电路、输出滤波器、串联谐振电路等电路组成的频率控制系统,其中微电子集成电路(integrated circuit)占比较大比例,由于本身尺寸很小(微米级),根据电压的定义:

$$\Delta V_{BA} = \int_B^A \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1)$$

尺寸的缩小,直接减小了在电场中的感应电压。再由于将电路封装在接于同一电位的厚金属膜中,所受到的干扰比独立电子元件(discrete component)要小得多,从而减少电位差。比如说,在同样的1 000 kV电场下,一个微米级的二极管在完全未屏蔽的环境中感应电压仅为毫伏级,远小于半导体开断电压的0.4~0.8 V。对于没有集成的电子元件,将采用多芯片堆放(MCM)的方式,将电子元件的微米级芯片直接集成到同一个半导体基板上后,并进行统一的厚金属膜的封装,以达到相同的效果。如图8所示。

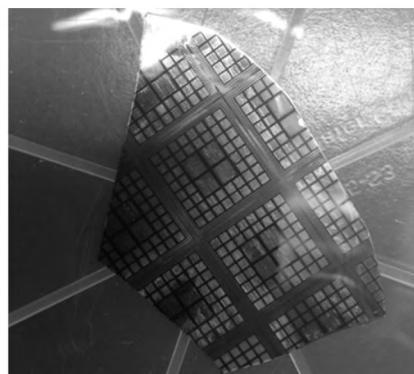


图8 成型后的MCM裸芯切片

2.1.3 强磁场对验电器的影响及防护

在交流 1 000 kV 导线周围的磁场强度超过 500 μT ,基于楞次定律,高压输电线路负载电流在导线周围产生的工频磁场,将在控制电路中的闭合回路里产生感应电流,而在非闭合回路的开口两端产生感应电压。若不对由该工频磁场引起的感应电流和感应电压进行限制,将造成控制电路工作不稳定,或对电子元件烧坏^[11]。因此在电路板设计时,不应采用在一般情况下用于电路板屏蔽的地线非闭环环绕电路板的方式,或进行电路板接地敷铜箔的方式,以免引起环流发热或非闭环回路开口处电压烧损。由于工频磁场频率低(仅 50 Hz),为了有效屏蔽强磁场,除采取上述电路设计措施外,在验电器外壳内,还敷设了一层由高导磁材料做成的金属箔作为磁场屏蔽层。将铁磁材料金属箔做成非封闭环,边沿作圆滑处理,且非封闭环平面不与磁通垂直,以减小感应电压^[12]。

由于验电器控制回路中的电流最高仅为毫安级,因此不考虑由安培定律引起的在强磁场下的电动力效应。

2.2 瞬时过电流引起的强磁场干扰

强磁场对等电位在线验电器的干扰有一种特殊的情况,即在发生雷击或线路出现短路大电流的瞬间。虽然这类事件发生的概率小,但对验电器的长期、稳定、可靠工作,有着非常重要的影响。这里进行简短说明此类干扰的影响及防护措施。

当发生雷击或线路出现短路大电流的瞬间,输电线路周围的磁场突然变强,能量采集系统会感应出一个很高的冲击电压,这对后端电路的安全工作极为不利。为了保护后端线路,在能量采集系统两端接一个瞬变抑制二极管(transient voltage suppressor, TVS),以限制能量采集系统输出的冲击电压。TVS 具有响应速度快、瞬态功率大、漏电流小的特点,它能够以高达 10^{-12} s 量级的速度将两极的高阻抗转变为低阻抗,使两极电压钳位在选择值上。TVS 对浪涌功率的吸收有特别好的作用,可避免因过电压冲击造成控制电路损坏^[13-14]。

2.3 抗电磁干扰的元件设计

对现有多种电力电子方案进行综合参数和实验对比后,采用定制高压低漏电率的半导体材料,结合合适的成品封装工艺,直接在低漏电率的半导体基体上堆放的各元件的裸芯,通过多芯片组装(MCM),

将各芯片连接后,再统一进行厚金属膜封装。将多个独立的电子元件,集成到一块更小的区域,并封装成型,可更好地屏蔽强电场干扰,降低局部放电和感应电流的概率,降低对信号处理芯片的输入信号质量的干扰,最终达到提升控制电路主体的抗干扰能力。此外,这样的结构还能提高芯片的散热效率、减少体积,并极大地增强系统的防潮、防震等特性,这使得验电器具备了长时间在户外恶劣环境下工作的可能。

在完成上述对元件的集成后,验电器在对地 577 kV(相当于相间 1 000 kV)的环境下,闪烁频率稳定。整个验电器的回路示意图如图 9 所示。

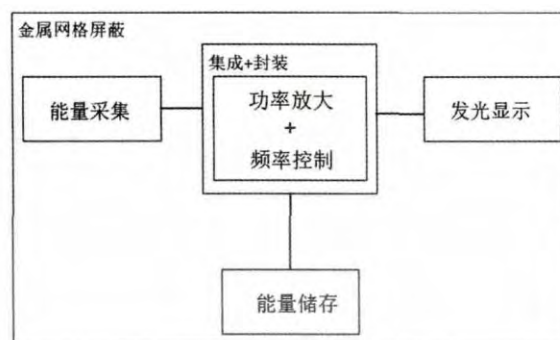


图9 验电器回路示意图

3 结 论

在交流 1 000 kV 强电磁场环境中,为保证等电位在线验电器的正常工作,对其内部电子元件选择和整体结构的设计都提出了更为苛刻的要求。前面论述了在交流 1 000 kV 强电磁场环境下,造成等电位在线验电器异常工作的原因,以及减少电磁场对在线验电器干扰的防护措施。通过理论分析和实验表明,强电磁干扰必须从金属屏蔽、电路设计、电子元件选择、集成电路结构布置、外部均压和整体设计等方面来综合解决,从而使等电位在线验电器可以长期、稳定、可靠地应用于交流 1 000 kV 的设备和线路上。通过实验,可以得出以下结论:

1) 在强电场作用下,电子元件和发光二极管的引脚间产生的感应电压将超过元件的关断电压,导致控制系统的电子元件和发光二极管无法正常开断,最终造成在线验电器闪烁频率紊乱、发光二极管无法完全关断等现象;

2) 加装屏蔽防护金属网,可以有效降低强电场
(下转第 50 页)

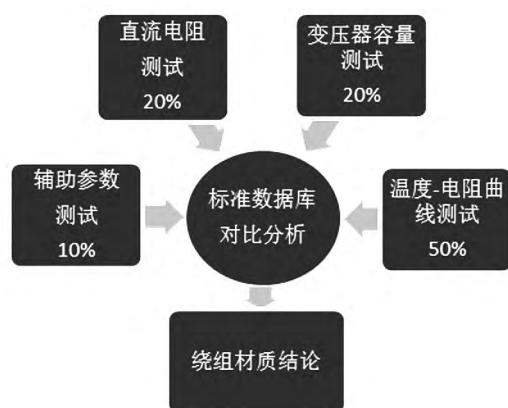


图 4 绕组参数权重因子设定

基于上述方法,测试了 S9-200 与 S11-400 两台典型配电变压器,发现其绕组材质为铜的概率分别为 82% 和 76%。随后通过金属化学成分分析,发现两台配电变压器的绕组材质确实为铜,这表明所提方法能准确有效地诊断出配电变压器的绕组材质。

3 结 论

基于变压器绕组体积、质量、容量、直流电阻及其温升曲线等绕组参数,将实验配电变压器绕组参数数值与其标准数据库进行比对,并根据不同绕组参数的影响因子,建立分析模型计算了绕组材质为铜的概率,判定了变压器绕组的材质。通过实际测试 S9-200 与 S11-400 两类典型的铜绕组配电变压器,发现该方法能够准确诊断出配电变压器的绕组材质。

参考文献

- [1] 陈民铀,李霞,王平,等. 配电变压器短路和开路损耗在线测量系统[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(3): 36-41.
 - [2] 张仁奇,李小军,蒋欣,等. 配电变压器线圈用材的 X 射线鉴别方法[J]. 无损检测, 2015, 37(1): 49-55.
- (收稿日期: 2015-08-10)

(上接第 42 页)

在 LED 芯片两端产生的感应电压,且发光元件可以可靠关断,但闪烁频率仍不稳定;

3) 采取电路集成化、多芯片堆放(MCM)再厚膜封装等措施,可显著提升控制元件的抗干扰能力,控制电路可以稳定工作,闪烁频率得到有效控制;

4) 通过增加铁磁材料的金属箔、前端增加瞬变抑制二极管(TVS)的措施,可进一步减小强磁场和瞬时过电流对验电器的影响;

5) 电磁干扰必须从金属屏蔽、电子元件集成和封装、电路设计等各方面整体设计来综合解决。

参考文献

- [1] 国家电网公司. 国家电网公司电力安全工作规程(变电部分)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 王凤歌. 一种 LDO 线性稳压器的研究与设计[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- [3] 沈建,刘伟东,刘鸿斌,等. 直升机巡视 1 000 kV 交流特高压线路的安全作业距离[J]. 中国电力, 2011, 44(5): 41-45.
- [4] 万保权,鄢雄,张广洲,等. 特高压变电站的电磁环境影响[C]. 中国电机工程学会高电压专业委员会 2009 年学术年会, 2009.
- [5] 邵方殷. 我国特高压输电线路的相导线布置和工频电磁环境[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 1-7.

- [6] 万保权,路遥,鄢雄,等. 500 kV 同塔 4 回线路无线电干扰和工频电场[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 113-116.
- [7] 王洪泽,杨丹. 论法拉第笼的防雷作用及其局限性[J]. 广西电力建设科技信息, 2006, 29(2): 13-16.
- [8] 袁宝生,杨柳湖. 漫谈电磁屏蔽方舱[J]. 方舱与地面设备, 2004(3): 1-10.
- [9] 蔡建爽. 高压变电站无线测温装置的电磁兼容性和有限元分析[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [10] 程丽丽,江玲,黄铜和,不锈钢丝网电磁屏蔽效能的研究[J]. 电子质量, 2006(9): 72-74.
- [11] 张国宾. 强磁场对典型电子器件影响机理的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [12] Azizi H, Belkacem F, Tahar, Moussaoui D. Electromagnetic Interference from Shielding Effectiveness of a Rectangular Enclosure With Apertures - circuitual Approach, FDTD and FIT Modeling[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2014, 28(3): 494-514.
- [13] 沈雪梅,姜宁浩,肖保明. 变电站中通信设备的电磁兼容问题研究[J]. 电工电气, 2013(12): 10-12.
- [14] 黎明秀,贾颖,陈凯. 瞬变电压抑制器的发展与应用[J]. 电子元器件应用, 2009, 11(4): 77-80.

作者简介:

张大堃(1991), 硕士, 从事高电压设备传感器和智能电网研究;

张文胜(1969), 高级工程师, 从事高压电技术研究。

(收稿日期: 2015-09-22)

高压开关柜过热原因分析及监测措施

夏志军

(国网泸州供电公司,四川 泸州 636064)

摘要: 35 kV 及以下封闭式高压开关柜在电网中日益广泛运用,封闭式高压开关柜比常规户外式开关在减少占地、防止设备锈蚀等方面具有较大优势,但也因此存在动静触头等部分部件无法直观观测的致命弱点。在设备长期运行过程中,开关柜中的动静触头结合部等部位会由于种种原因引起发热,由于开关柜处于封闭状态导致这些发热部位的温度无法观测,过热缺陷日积月累便会最终导致设备损毁等事故发生。通过对封闭式高压开关柜过热原因进行分析,在此基础上研究提出了在线监测措施,希望能对防范高压开关柜过热事故提供一些帮助。

关键词: 高压开关柜; 过热; 监测

Abstract: Enclosed high-voltage switch cabinet at 35 kV and below is widely used in power grid, and it has great advantages in less space and anti-corrosion for equipment than the conventional outdoor switchgear. But there is a fatal weakness in the presence of partial components that cannot be directly observed. In the long-term running process of equipment, the junction parts of dynamic and static contacts in switch cabinet will be caused overheating due to various reasons, the temperature of these heating parts cannot be observed because the switch cabinet is enclosed, and the overheating defects which accumulate for a long time will eventually lead to equipment damage and other accidents. The on-line monitoring measures are proposed based on the cause analysis on overheating of enclosed high-voltage switch cabinet, which is helpful to prevent overheating accident of high-voltage switch cabinet.

Key words: high-voltage switch cabinet; overheating; monitoring

中图分类号: TM591 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-43-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.010

0 引言

伴随社会经济的飞速发展,当今社会对电力的依赖越来越强,对电力可靠性的要求也随之越来越高。近年来大规模的水电、火电等常规能源和太阳能、风能等新能源发电项目建设,让电力短缺的日子渐渐远去,保证电力持续可靠供应的主要焦点已从发电转移到电网。如何保证电网安全稳定和经济运行,保证对电力客户的持续可靠供电,自然成为电网企业的首要使命。而保障电网安全稳定运行,除强化电网网架结构完善外,更主要的任务是保证现有电力设备的安全稳定运行。

随着技术的进步及土地资源的日益珍贵,目前 35 kV 及以下配电系统已广泛采用封闭式高压开关柜。运行中封闭式高压开关柜比常规户外式开关在减少占地、防止设备锈蚀等方面具有较大优势,但也存在动静触头等部分部件无法直观观测的致命弱

点,设备长期带电运行时,开关柜中的动静触头结合部、刀闸结合部、母线连接点、电缆头 T 接点等部位会由于设备制造、安装不良及设备自然老化引起接触电阻过大而发热,这些现象在大电流开关柜如总路进线柜、母连柜上尤为突出;如果这些发热部位的温度无法监测,则最终发热严重会导致烧毁开关柜的事故。近年来,国家电网公司系统有变电站已发生过开关柜因过热而烧毁的事故,甚至是“火烧连营”,造成整个开关间设备损毁,酿成大面积停电。开关柜更换涉及停电范围广,施工周期长;若遇整个开关间设备损毁的严重局面,按目前中国大部分地区的配电网状况来看,若遇一个变电站 10 kV 全停,配电网根本无力转供所有负荷,特别是在电网迎峰度夏和迎峰度冬等大负荷时节。因此,分析清楚封闭式开关柜过热的主要原因,实时掌控开关柜内部件特别是手车触头等元器件结合部的温度状况,提前发现封闭式高压开关柜的过热异常状况,提前采取检修措施,对保证电网安全稳定运行、保证对

电力客户的持续可靠供电具有重要的现实意义。

1 封闭式高压开关柜过热故障及原因分析

电力设备的过热往往是在接头产生,根据电工理论,在电路中,1个电气接头的热量是用 $Q = I^2 R t$ 表示的。式中: Q 为产生的热量;通过截面的电流为 I ;接头的电阻为 R ; t 为电流作用的时间。实际运行中的设备,不管应用哪种材料哪怕是超导材料,都有材料电阻值存在,电流流过导体就会产生热量。当某一接头的电阻过大,热量在这一部位就会特别突出,若散热热量无法抵消发热量,就会使热量在这一点集中,使本部位的温度升高,当温度超过了材料的允许温度值或温升,设备就会因过热而烧损。运行中的电气设备不同程度地会发生发热现象,如不及及时发现并处理,最终会导致开关柜烧毁等严重后果。下面以KYN28-12高压开关柜为例,分析开关柜过热故障形成的原因。

1.1 封闭式高压开关柜主要构成

以电力系统目前应用较多的KYN28-12出线柜为例,封闭式高压开关柜的一次设备分布在3个相互独立的隔室内,分别是断路器室、母线室、出线室,二次设备独立设置在继电器室内,结构示意图如图1。

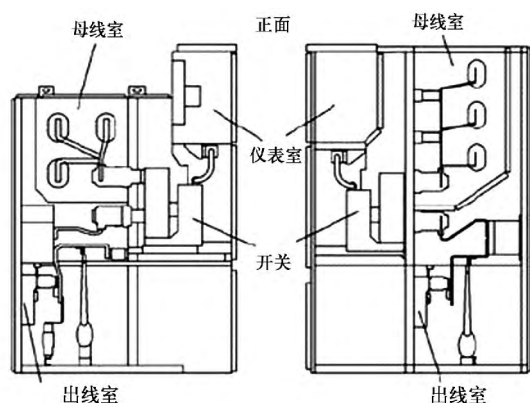


图1 KYN28-12开关柜结构示意图

1.2 封闭式高压开关柜过热主要原因分析

1个KYN28-12高压开关出线柜一般至少会有18个接头部位通过大电流,分别是:在断路器室内一般有6个主接头(即手车触头),每个触头有10多个流过负荷电流的连接点(即手车触指);在出线室有连接出线电缆的3个主接头、连接电流互感器的6个主接头;在母线室有支路与主母排的3个T

接点。上述接头部位除避雷器连接点外均有负荷电流通过,遇负荷电流较大时,存在隐患的连接点就会发热;而这些连接点中,根据电力系统运行经验,发热部位主要出现在6个手车触头、3个出线电缆T接点等两处位置,这两处发热点特别是手车触头发热点由于在密封柜内,封闭式高压开关柜运行中的柜门禁止打开,值班人员无法通过正常的肉眼巡视或红外测温等监视手段发现热缺陷,发热严重时接头会膨胀、变红、甚至熔断,最终酿成事故。

导致封闭式高压开关柜发热缺陷的原因比较多,综合起来主要包含以下几个方面:

1) 电气连接部位接触不良,导致发热。

①造成封闭式高压开关柜电气连接部位接触不良的原因,大都是因检修安装人员工作失误或安装工艺存在缺陷有关。施工中如果未严格执行工艺标准,安装工艺出现了问题,便为封闭式高压开关柜埋下了过热隐患。如母线室的母线在加工、连接以及安装环节当中,若出现母线表面不光滑、不平整、有油污和氧化、搭接面不足宽度的1.5倍、搭接压力不足、未使用专用导电膏加工处理等等纰漏,均会造成母排联接点接触电阻增大,导致发热。再如出线室电缆T接时,若出线电缆与开关引出线的连接处接触面不足,或连接压力不足,甚至铝排与出线电缆未采用铜铝过渡措施,均会引发电缆接头发热。因此,需要强化对封闭式高压开关柜安装工作质量的监督,确保严格依照厂家提供的安装说明以及相关的技术标准、工艺进行施工,才能把好开关柜发热故障的第一道关口。

②电气接头和设备线夹接触面氧化,造成发热。各运用中的电气设备接触面无论压接多紧,总会有一定缝隙,运行时间长后,一层氧化膜就会发生在接触面。接头氧化后接触电阻就会增加,运行时接触电阻的增加会引起该接触面变热,变热又会加速接触面的氧化反映,如此反复循环,最后叠加酿成发热故障。

2) 手车触头接触不良,导致发热。

手车触头发热多数是因为长期运行,触指压紧弹簧疲劳或者弹簧锈蚀老化功能减退,引起触头与触指的接触压力不足,触指与触头接触不充分,引起接触电阻增加和有效载流截面变小造成发热。并且运行中由于触指压紧弹簧长期受压缩,在电流作用下弹簧会产生发热,加上触头由分到合或由合到分

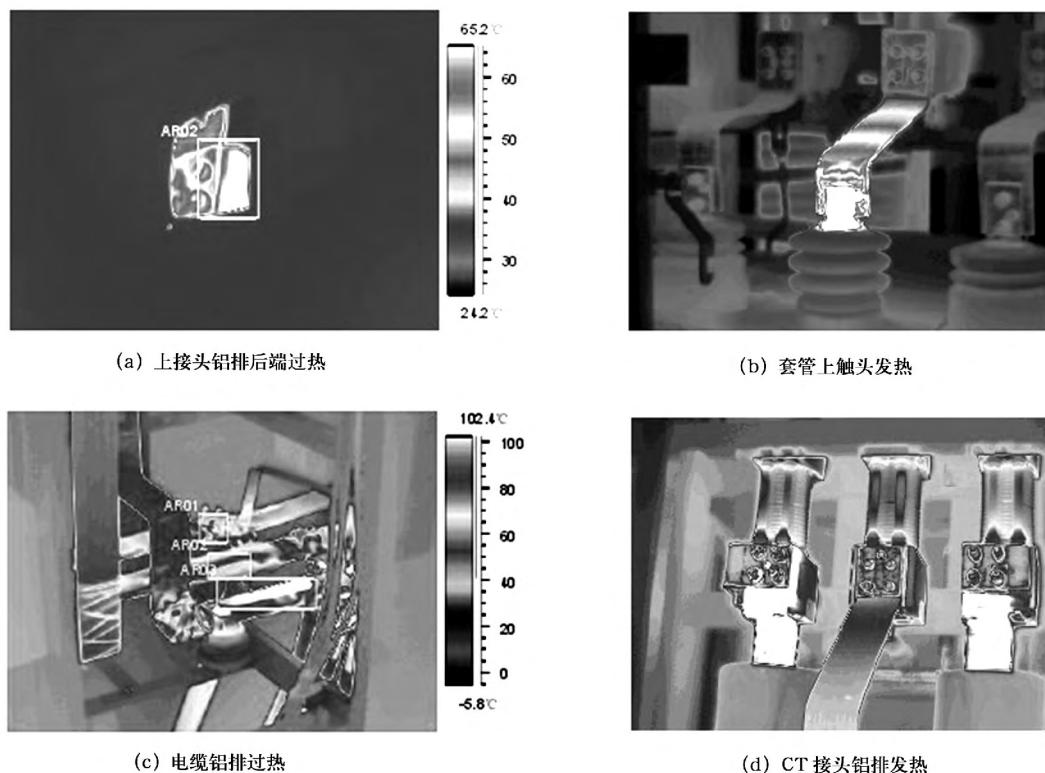


图 2 高压开关柜的典型过热故障

产生的电弧烧伤,运行时间久后弹簧的弹性会变差进而造成触指压紧弹簧压紧力不足,压紧力不够引起手车动静触头接触不充分又会发热加剧,如此反复恶性循环造成触头发热日益严重,最终甚至会造成压紧弹簧断裂触头散落,动静触头接触极差而烧毁。此外,部分封闭式高压开关柜内的手车操作机构行程不当造成不能将手车完全摇至预设位置,从而在手车动静触头间插入深度不够,因接触面不足而引起发热升温,造成了开关设备的损害。因此,为防范手车触头发热,在开关柜每次检修时都应仔细检查手车触头的烧损情况、检查压力弹簧是否完好、检查触头插入深度是否满足要求,且在每次检修都需要涂导电膏降阻防腐,从而防范因触头接触不良而引起发热。

3) 负荷电流过大,导致发热。

①设备本身质量问题。许多老旧变电站的封闭式高压开关柜在建设时,受当时经济发展等因素影响导致当时规划设计裕度不高,造成所选的开关设备容量与后期实际运行的容量不匹配,导致在后期运行过程中,随着用电负荷的不断增长,开关动静触头的载流量无法满足负荷增长的需求,且加上动静触头日久氧化,接触电阻增大,触头会出现局部温升

现象。

②负荷电流突变,导致发热。依据 DL/T 593 - 2006《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》,开关柜触头温升不应超过 35℃,即在室温最高为 40℃时,其最高运行温度不应超过 75℃。正常运行时,其负荷电流产生的热量经空气冷却后处于热平衡状态,温度升高不会超过允许值;但当遭遇比平时增加 1 倍或几倍的负荷电流突变时,特别是线路遭受短路电流冲击后,设备温度急剧增加,温升超过允许值,其薄弱部位就会过热,产生氧化等物理或化学变化,又会增大接触电阻,经过多次反复的恶性循环,接头的接触电阻越来越大,过热情况越来越严重,最后造成接头熔毁。

4) 环境温度高,造成散热不良。

为防止人体接近封闭式高压开关柜的高压带电部位和触及运动部位造成伤害,以及避免敞开式开关柜容易进入异物引起开关柜短路的危险,根据《户内封闭式高压开关柜订货技术条件》第 6.5.2 条规定,在最高防护等级 IP5X 时,开关柜的缝隙小到能防止影响设备安全运行的大量尘埃进入,如此严密的防护,在夏季高温季节室内环境温度过高,将造成开关柜散热困难。电气设备接头(母线连接、

电缆T接等)一般常用螺栓连接,螺栓一般为钢材质,而母排或电缆设备线夹采用铝或铜材质,钢材质的螺栓膨胀系数比铝排或铜设备线夹小,遇温度变化时母排与螺栓由于膨胀或收缩比率不一致,就会逐步造成接触压力降低→接触电阻增加→接触电阻升高发热又使接触面氧化→氧化膜的形成又使接触电阻更大,如此温度变化的恶性循环。

2 封闭式高压开关柜温度监测

2.1 目前封闭式高压开关柜温度监测主要手段

封闭式高压开关柜内部过热现象已成为开关柜使用中的常见问题,如果不加以控制,过热程度会不断加剧,引起开关柜寿命加速老化,性能大幅降低,严重时将引起设备故障,甚至造成事故。目前国内外已有大量关于封闭式高压开关柜测温方面的技术研究,从测温元件与被测设备的接触方式划分主要分为接触式测温和非接触式测温两种。按照各种测温方法的主要特征,目前主要有如下4种测温方法。

1) 测温片测温法:这是一种最传统的测温方法,属接触式测温法,此种方法是通过在电力设备接触点粘贴示温蜡片或在设备表面涂一层发光材料,发光材料的颜色能随温度变化,不同的颜色变化即代表不同的温度,设备的温度情况通过由运行人员看颜色变化来大致确定。

2) 红外测温法:基于辐射定律,任何温度高于绝对零度的物体都会不停地向空间发出红外辐射能量,而且温度越高发出的红外辐射能量越强,因此只要运用适当的红外检测仪器,检测设备发出的红外辐射能量,再经过专门的信号处理系统进行处理,就可以获得设备表面的温度分布状况,并进一步获取设备运行状态信息,这是红外检测的基本原理。由于红外测温能方便地实现电力设备带电状态下对设备的温度状况进行直观形象的检测,测试过程简单方便,劳动强度低、监测面积广、监测效率高,因此电力系统目前已将红外测温作为带电检测主要技术手段。

3) 光纤测温法:这是一种目前在封闭式开关柜上应用较多的接触式测温法之一,按照光纤测温的基本原理和作用,光纤测温分为光纤光栅测温技术与光纤分布测温技术。光纤分布式测温技术是在20世纪70年代末提出,其测温原理是利用光纤后

向拉曼散射的温度效应和光时域反射技术(OTDR)来获取空间温度分布信息的检测方法,测温范围可以达到 $0^{\circ}\text{C} \sim 370^{\circ}\text{C}$ 。光纤光栅测温技术是通过光纤光栅感温探测信号处理器,通过检测光栅反射光的波长变化,从而测得被测物体温度。

4) 无线测温法:无线测温法是目前在封闭式开关柜上应用较多的接触式测温法之一。一般无线测温系统通常由分布式测温传感器、温度采集器、后台监控分析系统等3部分组成。其中分布式测温传感器直接安装在被测部位,与高压电气设备直接接触,温度采集器放置在高压室外,分布式测温传感器与温度采集器之间的信号传输采用无线通讯方式进行数据的传输,这样一来既实现了直接接触测温,确保了采集数据的可靠性,又解决了传统直接接触测温的高压、低压隔离的问题,因而该测温法目前已在封闭式开关柜测温技术中得到广泛应用。

2.2 各测温方式的主要优缺点

1) 测温片测温:常规的示温片测温法是通过观察示温蜡片是否溶化掉落或热敏材料示温片的颜色变化程度来大致确定温度范围的一种方法。这种方法虽较为直观,但由于其不能准确体现出设备的具体温度值,只能在温度过高时提供“设备过热严重”的定性判断,不能进行定量测量,而且需要人工定时察看,因此此种测温方法效果较差。而热电阻、热电偶等测温方式,工作时需要通过金属导线对外传出信号,不能实现高低压隔离,因此不能用于封闭式高压开关柜。

2) 红外测温:目前常用的手持式红外热成像仪是一种非接触式测温方法,它通过检测待测物体表面的辐射热能值来获得待测物体的温度值,测试时要求被测物体与测试仪器之间部门有物体遮挡。为保证安全封闭式开关柜在运行过程中柜门是不能开启的,因此红外测温仪器便不能透过开关柜外壳直接测量到开关柜内部温度情况,无法反映高压开关柜运行过程中内部的真实温度情况。且由于红外测温仪器需人工操作,因此无法实现不间断在线测量,且测温数据受测试人员的人为影响较大,如检测距离远近、辐射系数的选择都会影响测试结果的准确性。

3) 光纤测温:光纤测温法也是一种直接接触测温法,光纤温度传感器采用光导纤维传输信号。由于光纤自身具有优异的绝缘性能,因此可以直接将

(下转第67页)

参考文献

- [1] 刘俊勇,沈晓东,田立峰,等. 智能电网下可视化技术的展望[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 7-13.
- [2] 段刚,杨东,吴京涛,等. 综合智能电力系统动态监视平台及其应用[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(2): 21-26.
- [3] 周宏,李强,林涛,等. 基于 WAMS 量测数据的电网扰动和操作类型识别[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 7-11.
- [4] 张晓莉,周泽昕,张道农,等. 同步相量测量装置的测试与评估[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(2): 31-36.
- [5] 杨洪耕,明娇,代海波. 地区电网智能告警系统的实现[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(2): 105-109.
- [6] 王尔玺,童渊,关杰. 上海电网调度智能告警应用研究[J]. 华东电力, 2012, 40(5): 779-782.
- [7] 沈国辉,孙丽卿,游大宁,等. 智能调度系统信息综合

可视化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 129-134.

- [8] 宋晓娜,毕天姝,吴京涛,等. 基于 WAMS 的电网扰动识别方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 24-28.
- [9] 毕天姝,刘灏,杨奇逊. PMU 算法动态性能及其测试系统[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 62-67.
- [10] 贺春,任春梅. 相量测量单元综合矢量误差指标分析[J]. 电力系统自动化, 2012(4): 110-113.
- [11] 许勇,张道农,于跃海,等. 智能变电站 PMU 装置研究[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(2): 37-43.
- [12] 童旭,王珮璐,孙雅平. 智能变电站时间同步系统在线监测技术的研究[J]. 华东电力, 2012, 40(12): 2184-2186.

作者简介:

温丽丽(1982),硕士,从事电网调度自动化工作;

赵 静(1982),博士,从事电网调度自动化工作;

郭 亮(1982),硕士,从事电网调度自动化工作。

(收稿日期:2015-08-14)

(上接第 46 页)

光纤温度传感器安装在开关柜内的高压设备上,实现对高压设备运行温度的准确测量;然而,光纤具有易折、易断、不耐高温等弱点,要在结构紧凑的开关柜内布线难度较大,若光纤运行时间久积累灰尘后导致光纤沿面放电,有引起开关柜发生内部短路的危险。此外,光纤测温系统配置元件成本较高,系统投资相对较大。

4) 无线测温:无线测温是最近几年开始推广的测温方法,它也是一种直接接触测温法。采用将感知温度的测温元件——温度传感器紧贴在被测物体表面,与被测物体为高电位工作,接收模块处于低电位工作,两者之间采用无线通讯传输数据,两者之间彻底物理隔离,绝缘水平满足规程要求。传感器安装简便、方案可行,且不会破坏原开关柜结构(如解体开关柜部件、在母线上打孔等),不会影响原开关柜性能(如绝缘水平、安全距离、动稳定性、热稳定性、散热功能等)。目前,国内已广泛采用无源无线测温,无源无线测温系统采用的传感器无需电池(电源)驱动,从而提高了系统的可靠性、安全性,由于无需考虑功耗,因此在数据提取频次上也可不受限制,可以实现不间断在线监测;同时没有了电池更换带来的维护成本和停电损失,保证了对外供电可靠性不受影响。无源无线温度传感器自身体积小,可根据需要制成多种样式,因此传感器可以不受封闭式开关柜紧凑结构的影响,能够方便地安装在开关柜母线 T 接点、断路器手车触头等狭小的电气节点中,直接接触设备测试其温度,因而其测量精度较高。

2.3 小 结

通过上述分析,不难看出,采用无线传感器技术的无线测温法在安全性、可靠性、环境适应能力强等方面拥有其他测温法无法比拟的优点。特别是近年基于声表面波技术的无源无线测温技术的发展,无线测温技术可以在高压开关柜内高电压、大电流、强磁场的环境下实现对触头的高精度、高稳定性的测量;且易于构成分布式测温系统对所有触头、引线等温度点进行实时在线式监测,因此是更加适合封闭式高压开关柜温度监测的技术手段。

3 结 论

造成封闭式高压开关柜过热的原因很多,通过加装无线测温装置等技术手段,实时监控开关柜内部元件特别是手车触头等元器件结合部的温度状况,提前发现封闭式高压开关柜的过热异常状况;提前采取检修措施,对防范过热故障导致封闭式开关柜损毁等事故发生,保证电网安全稳定运行具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 许伟琳. 高压开关柜的故障类型及其处理措施初探[J]. 科技资讯, 2010(27): 39-41.
- [2] 尚丽. 电气设备接头发热原因的分析及处理[J]. 大众用电, 2002(10): 26-27.
- [3] 许一声,顾霓鸿. 高压开关柜触头温度在线检测仪[J]. 高压电器, 2005, 41(2): 139-140.

(收稿日期:2015-07-31)

一种用于配电变压器绕组材质诊断的新方法

何良,刘隆晨,毛强

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610072)

摘要: 为了诊断配电变压器绕组材质,基于变压器绕组体积、质量、容量、直流电阻及其温升曲线等绕组参数提出了一种用于判定变压器绕组材质的新方法。此方法通过绕组参数测量与实验数据收集,建立配电变压器绕组参数标准数据库,并将实验配电变压器绕组参数数值与标准数据库进行比对,得到绕组参数分布的概率密度曲线,再根据绕组参数的影响因子,建立分析模型综合判定变压器绕组的材质。测试了S9-200与S11-400两类典型的配电变压器,通过上述方法诊断发现变压器绕组材质均为铜,这与绕组的金属化学成分分析结果一致,故该方法能够准确诊断出配电变压器的绕组材质。

关键词: 绕组材质; 直流电阻; 电阻温升曲线; 概率密度函数

Abstract: In order to diagnose the material of distribution transformer winding, a new method is proposed based on the winding parameters such as the volume, mass, capacity, DC resistance and temperature-rise curve. By measuring the winding parameters and collecting the test data, the standard database for winding parameters of distribution transformer is established. Through comparing the winding parameters of testing distribution transformer with standard database, the probability density curve of winding parameter distribution is obtained. And then according to the impact factor of winding parameters, the analysis model is established to determine the material of transformer winding comprehensively. S9-200 and S11-400 distribution transformers are tested, and the winding material of these two typical distribution transformers is diagnosed to be copper by the proposed method, which is consistent with the results of metal chemical composition analysis. So the proposed method can accurately diagnose the material of distribution transformer winding.

Key words: coil material; DC resistance; temperature-rise curve of resistance; probability density function

中图分类号: TM41 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-0047-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.011

0 引言

随着国民经济的快速发展,电力需求日益增长,配电变压器的需求越来越大^[1]。然而,近年来原材料价格上涨,铜线价格大幅攀升,变压器生产成本越来越高,而受市场约束变压器的销售价格却不能同幅度上涨。这就促使部分不负责任的企业造假,用铝线代替铜线生产变压器,却不按照标准JB 3837-2010《变压器类产品型号编制办法》规定变压器绕组含铝的型号。目前,这种趋势现已蔓延到了部分干式变压器,部分厂家的变压器采用半铝制造,如绕组一次为铝、二次为铜,或绕组一次为铜、二次为铝,甚至个别厂家全部改用铝线制造变压器。这种以次充好的行为,严重扰乱了变压器市场,不仅给消费者造成了经济上的损失,也给变压器运行带来了安全

和事故隐患。

目前,国内外对变压器绕组材质检测已开展了研究,并取得了一定进展。最直接的方法是对绕组进行破坏取样,再进行金属化学成分分析,但这种破坏性检验的人力及时间成本巨大,还给电网运维人员带来了极大不便。部分研究人员利用直流电源对变压器绕组通电,得到绕组的电阻时间曲线,再与其标准曲线对比,但其忽略了温升对绕组电阻的影响,效果不佳。此外还可利用X射线探伤机和工业射线胶片对配电变压器绕组拍照,将被测变压器绕组材料的X射线衰减系数与透照厚度曲线同铜、铝的标准曲线进行比对^[2]。由于这种方法会产生辐射,对人体健康威胁很大,且价格昂贵,现场使用不便。

因此,在不拆解变压器、不破坏绕组的前提下,掌握一种能便捷有效地检测配电变压器绕组材质的技术方法具有重要的工程实用价值。由于铜和铝物理

性质的差异性,绕组材质的改变将会影响变压器的体积质量、容量、直流电阻及其温升曲线等参数。基于上述绕组参数提出了一种用于判定变压器绕组材质的新方法,可准确有效地诊断出变压器绕组的材质。

1 绕组材质诊断依据

电阻率是描述导体导电特性的物理量,与导体长度、横截面积等因素无关,仅与温度有关。电阻温度系数是指当温度变化时电阻值的相对变化,不同材料的电阻温度系数不同。实际中,通常采用平均电阻温度系数的概念,如公式(1)所示。铜或铝的电阻率和电阻温度系数如表1所示。

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)} \quad (1)$$

式中 R_1 、 R_2 分别表示温度为 T_1 、 T_2 时的导体电阻值。

表1 铜和铝的电阻率和电阻温度系数

电学参数	铝	铜
电阻率/($\Omega \cdot m$)	$2.83e-8$	$1.75e-8$
电阻温度系数/ $^{\circ}C$	$1/225$	$1/235$

由于铜和铝热学、电学性能存在差异,若同型号配电变压器绕组采用不同的材质,将导致绕组参数(直流电阻、容量、体积、质量、电阻温升曲线等)存在明显不同。

对于固定型号与容量的配电变压器,由于国标严格规定了其设计与制造流程,故绕组直流电阻值存在固定范围。若绕组材质发生改变,其直流电阻值也会发生变化,即直流电阻与绕组材质直接相关。其次,改变绕组材质后,变压器的通流能力、容量也会发生变化。再次,当绕组材质改变时,若要保证变压器电阻、损耗等变化不大,必须改变绕组导线的截面积或者长度(匝数),这会导致变压器体积发生变化。最后,由于不同材料的电阻温度系数不同,不同材质绕组的电阻温升曲线也不相同。综上,绕组直流电阻、容量、体积、质量、电阻温升曲线等参数与绕组材质密切相关。

在厂家变压器绕组造假中,通常会出现以下情况:1) 为保证铝绕组变压器的直阻、损耗与同型号铜绕组变压器的对应参数相等,在变比和铁心相同的情况下,部分厂家或增大铝导线截面,这会导致变压器体积增大;或减少线圈匝数,即减小线圈长度,这将导致变压器阻抗电压发生改变。2) 保证变压

器器身及体积基本相同,部分厂家减小铝线截面,这将导致绕组直流电阻、损耗增大;或者在保证变比一致的情况下,减少线圈匝数,这将会导致变压器容量发生变化。

综上,不难看出,通过对比变压器的直流电阻、容量、体积、质量、电阻温升曲线等参数,可以为诊断绕组材质提供依据。因此,可将直流电阻、容量、辅助参数(体积、质量)、电阻温升曲线等参数与标准数据库进行对比,结合绕组参数分布的概率密度曲线,再根据绕组参数的影响因子,建立概率分析模型,综合判定变压器绕组的材质。用于变压器绕组材质分析的总概率函数如式(2)所示。

$$P = p_1 F(r) + p_2 F(s) + p_3 F(f) + p_4 F(t-r) \quad (2)$$

式中: $F(r)$ 、 $F(s)$ 、 $F(f)$ 、 $F(t-r)$ 分别表示直流电阻、容量、辅助参数、电阻温升曲线的概率函数; p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 分别表示上述4个概率函数的权重,满足 $p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1$ 。

2 绕组材质诊断试验方法与结果分析

2.1 绕组材质诊断试验方法

绕组材质诊断试验流程如图1所示,先测量变压器的体积与质量,再用高精度直流电阻测试仪测量绕组直流电阻,然后通过测量短路阻抗得到变压器容量。用短路法对变压器加热,待温度稳定后自由冷却,同步测量温度和电阻值,得到电阻温升曲线。最后将试验结果与标准数据进行对比,综合判断变压器绕组材质。

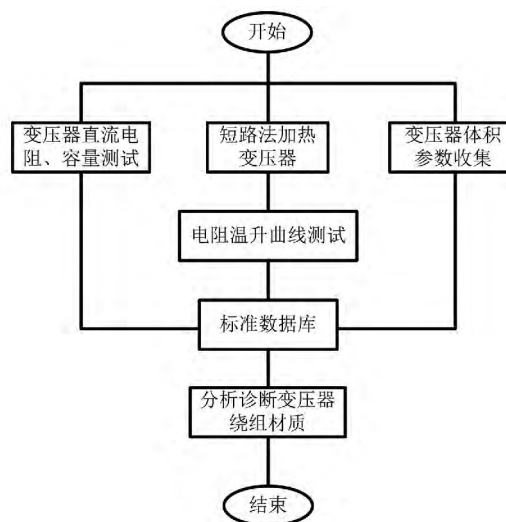


图1 配电变压器绕组材质诊断试验流程图

2.2 绕组材质诊断试验结果

选取两台典型配电变压器,按照上述试验方法进行
现场测量,其铭牌参数及部分试验结果如表 2
所示。

表 2 配电变压器铭牌参数及试验结果

型号	额定容量 /kVA	短路阻抗 /%	实测容量 /kVA	直流电阻 /Ω	体积 /m ³	重量 /kg
S9-200	200	4%	212.3	6.457	0.722	918
S11-400	400	4%	411.7	2.312	1.301	1 415

本次试验中两台配电变压器的电阻温升曲线如图 2 所示。由图 2 不难看出,电阻和温度呈近似线性关系。通过线性拟合,S9-200 与 S11-400 两台配电变压器电阻温度曲线的拟合函数分别如式 (3)、式 (4) 所示。

$R=0.025\ 9T+5.941$ (3)

$R=0.011\ 1T+2.076$ (4)

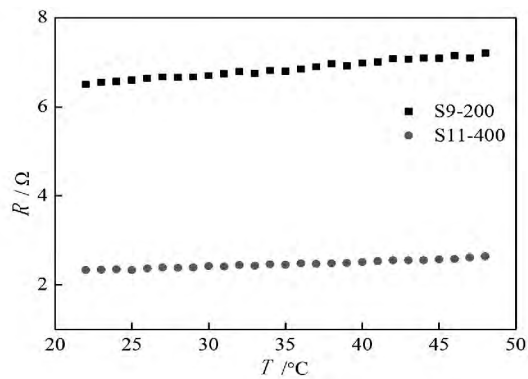


图 2 配电变压器电阻温升曲线

2.3 绕组材质诊断结果分析

一般而言,直流电阻不仅与绕组材质相关,还与焊接工艺、触头间接触电阻等相关;变压器容量与绕组材质相关,同时还受铁心截面、导线散热等因素影响;变压器体积、质量亦如此,其与产品设计直接相关。因此,为研究绕组材质对上述参数的影响,通过大量试验数据统计,建立了标准数据库,再将测试结果与标准数据库进行对比。配电变压器绕组参数数值的典型分布如图 3 所示。图 3 中,柱状图为绕组参数数值分布的实验统计结果,实线为参数实验统计数据的对数正态分布(log-normal)拟合曲线。统计结果表明,直流电阻、容量、体积、质量等参数数值分布均近似服从对数正态分布函数。对数正态分布的概率密度函数如下。

$f(d)=\frac{1}{\sqrt{2\pi d\log\sigma_g}}\exp\left[-\frac{(\log d-\log D_{50})^2}{2(\log\sigma_g)^2}\right]$ (5)

式中: d 为参数数值; D_{50} 为参数的几何平均值,即

$\log D_{50}=\frac{\sum n_i\cdot\log d_i}{\sum n_i}$ (6)

σ_g 为参数的几何标准偏差,即

$\log\sigma_g=\sqrt{\frac{\sum n_i\cdot(\log d_i-\log D_{50})^2}{\sum n_i}}$ (7)

n_i 为统计样本中数值 d_i 的数目。

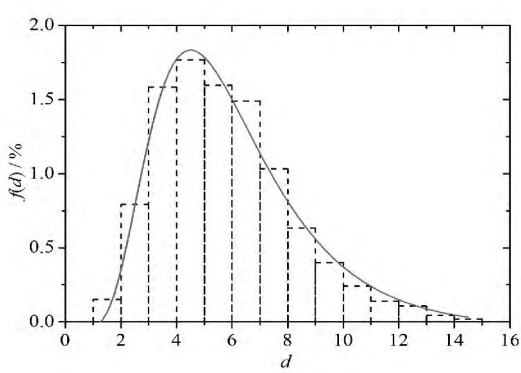


图 3 变压器绕组参数的典型对数正态分布

所涉及的两种铜绕组配电变压器统计参数如表 3 所示。其中,S9-200 与 S11-400 配电变压器的电阻温升曲线拟合函数分别如式 (8)、式 (9) 所示。

$R=0.026T+6.074$ (8)

$R=0.009\ 8T+2.306$ (9)

表 3 铜绕组配电变压器统计参数

型号	参数	D_{50}	σ_g
S9-200	直流电阻/Ω 20℃	6.6	0.4
	容量/kVA	208	7.3
	体积/m ³	0.721	0.000 9
	质量/kg	922	8.6
S11-400	直流电阻/Ω 20℃	2.5	0.3
	容量/kVA	407	8.1
	体积/m ³	1.3	0.001 2
	质量/kg	1 410	9.8

如前面所述,在判断绕组材质时,直流电阻、容量、辅助参数(体积、质量)、电阻温升曲线等参数所占的权重存在差异。如图 4 所示,通过多次研究发现,设定电阻温升曲线权重为 50%,直流电阻权重为 20%,容量权重为 20%,辅助参数权重为 10%,能有效地诊断绕组材质。

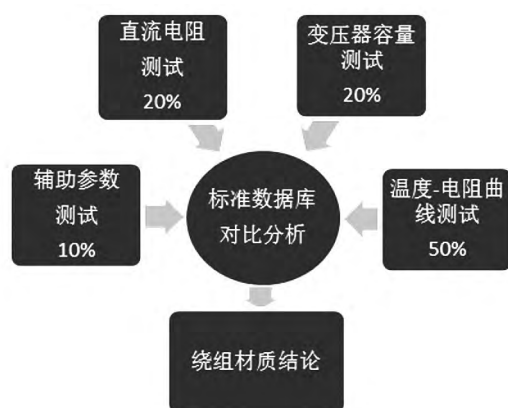


图 4 绕组参数权重因子设定

基于上述方法,测试了 S9-200 与 S11-400 两台典型配电变压器,发现其绕组材质为铜的概率分别为 82% 和 76%。随后通过金属化学成分分析,发现两台配电变压器的绕组材质确实为铜,这表明所提方法能准确有效地诊断出配电变压器的绕组材质。

3 结 论

基于变压器绕组体积、质量、容量、直流电阻及其温升曲线等绕组参数,将实验配电变压器绕组参数数值与其标准数据库进行比对,并根据不同绕组参数的影响因子,建立分析模型计算了绕组材质为铜的概率,判定了变压器绕组的材质。通过实际测试 S9-200 与 S11-400 两类典型的铜绕组配电变压器,发现该方法能够准确诊断出配电变压器的绕组材质。

参考文献

- [1] 陈民铀,李霞,王平,等. 配电变压器短路和开路损耗在线测量系统[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(3): 36-41.
 - [2] 张仁奇,李小军,蒋欣,等. 配电变压器线圈用材的 X 射线鉴别方法[J]. 无损检测, 2015, 37(1): 49-55.
- (收稿日期: 2015-08-10)

(上接第 42 页)

在 LED 芯片两端产生的感应电压,且发光元件可以可靠关断,但闪烁频率仍不稳定;

3) 采取电路集成化、多芯片堆放(MCM)再厚膜封装等措施,可显著提升控制元件的抗干扰能力,控制电路可以稳定工作,闪烁频率得到有效控制;

4) 通过增加铁磁材料的金属箔、前端增加瞬变抑制二极管(TVS)的措施,可进一步减小强磁场和瞬时过电流对验电器的影响;

5) 电磁干扰必须从金属屏蔽、电子元件集成和封装、电路设计等各方面整体设计来综合解决。

参考文献

- [1] 国家电网公司. 国家电网公司电力安全工作规程(变电部分)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 王凤歌. 一种 LDO 线性稳压器的研究与设计[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- [3] 沈建,刘伟东,刘鸿斌,等. 直升机巡视 1 000 kV 交流特高压线路的安全作业距离[J]. 中国电力, 2011, 44(5): 41-45.
- [4] 万保权,鄢雄,张广洲,等. 特高压变电站的电磁环境影响[C]. 中国电机工程学会高电压专业委员会 2009 年学术年会, 2009.
- [5] 邵方殷. 我国特高压输电线路的相导线布置和工频电磁环境[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 1-7.

- [6] 万保权,路遥,鄢雄,等. 500 kV 同塔 4 回线路无线电干扰和工频电场[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 113-116.
- [7] 王洪泽,杨丹. 论法拉第笼的防雷作用及其局限性[J]. 广西电力建设科技信息, 2006, 29(2): 13-16.
- [8] 袁宝生,杨柳湖. 漫谈电磁屏蔽方舱[J]. 方舱与地面设备, 2004(3): 1-10.
- [9] 蔡建爽. 高压变电站无线测温装置的电磁兼容性和有限元分析[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [10] 程丽丽,江玲,黄铜和,不锈钢丝网电磁屏蔽效能的研究[J]. 电子质量, 2006(9): 72-74.
- [11] 张国宾. 强磁场对典型电子器件影响机理的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [12] Azizi H, Belkacem F, Tahar, Moussaoui D. Electromagnetic Interference from Shielding Effectiveness of a Rectangular Enclosure With Apertures - circuitual Approach, FDTD and FIT Modeling[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2014, 28(3): 494-514.
- [13] 沈雪梅,姜宁浩,肖保明. 变电站中通信设备的电磁兼容问题研究[J]. 电工电气, 2013(12): 10-12.
- [14] 黎明秀,贾颖,陈凯. 瞬变电压抑制器的发展与应用[J]. 电子元器件应用, 2009, 11(4): 77-80.

作者简介:

张大堃(1991), 硕士, 从事高电压设备传感器和智能电网研究;

张文胜(1969), 高级工程师, 从事高压电技术研究。

(收稿日期: 2015-09-22)

宜宾站换流变压器阀侧电压测量故障分析及处理

孙 文 禹 佳 陈 伟
(国家电网公司运行分公司宜宾管理处 四川 宜宾 644000)

摘 要: 宜宾站自调试起,多次出现换流变压器末屏电压测量故障。基于 2015 年 7 月 1 日换流变压器阀侧电压测量故障,在回路原理和等效电路的基础上,分析了末屏电压异常的原因,提出了多种解决末屏电压畸变的办法和措施。消除末屏电压发生谐振和畸变将有利于直流系统和保护设备运行的可靠性,对现有的直流工程中末屏电压测量出现回路的改造,以及未来直流工程中末屏电压互感器的设计,提供参考依据。

关键词: 直流输电; 换流变压器; 末屏电压; 畸变; 电压互感器; 铁磁谐振

Abstract: Since the commissioning for Yibin converter station begins, several voltage measurement faults at bushing tap occur frequently. Based on the valve-side voltage measurement fault of converter transformer in 1st July, 2015, the abnormal reasons for voltage at bushing tap are analyzed on the basis of circuit principle and equivalent circuit, and some methods and measures to solve the voltage distortion at bushing tap are put forward. Eliminating the voltage resonance and distortion at bushing tap will be conducive to the operation reliability of DC system and protection device, and it provides a reference for the transformation that the circuit occurs during voltage measurement at bushing tap in the existing HVDC project, as well as the design of voltage transformer at bushing tap for the future HVDC project.

Key words: HVDC transmission system; converter transformer; end shield voltage; distortion; voltage transformer; ferromagnetic resonance

中图分类号: TM721.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-0051-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.012

0 引 言

在高压直流输电系统中,换流变压器是最重要的设备之一,这是由于其处在交流电和直流电互相变换的核心位置以及在设备制造技术方面的复杂性和设备费用的昂贵等所决定的。作为直流输电换流站的主要设备,换流变压器承担换能的重要作用。对换流变压器电压进行在线监测,实时获得换流变压器的电压波形特征,是保证直流输电工程安全运行的重要手段。

近几年投运的特高压直流输电工程,如锦苏直流、宾金直流、复奉直流等都采用电容式套管,从电容式套管的末屏处抽取电压信号用于在线监测和录波以及中性点偏移保护。

1 故障简述

2015 年 7 月 1 日 01 时 11 分,宜宾站极 II 高端阀组由充电转连接过程中,阀组 A、B、C 3 套保护同

时发“YD 换流变阀侧电压互感器 A 相故障”告警,现场万用表检查 3 套保护装置 UVD 电压分别为 141.27 V、141.19 V、141.12 V,运行人员申请将极 II 高端换流变压器转至检修状态。故障后宜宾管理处立即组织检修人员、国网四川省电力公司电力科学研究院、设备厂家开展现场分析处理工作。23 时 19 分,宜宾站极 II 高端换流器在线投入正常,主要事件列表如表 1 所示。

表 1 主要事件记录

时间	主机	事件
01:11:23	极 2 高端阀控系统 A(B)	阀组连接命令
01:11:45	极 2 高端阀控系统 A(B)	P2. WP. Q11(80212)/极 2 高端低压隔刀合位产生
01:11:45	极 2 高端阀控系统 A(B)	P2. WP. Q11(80212)/极 2 高端低压隔刀分位消失
01:11:45	极 2 高端阀组保护系统 A	YD 换流变阀侧电压互感器 A 相故障
01:11:45	极 2 高端阀组保护系统 B	YD 换流变阀侧电压互感器 A 相故障
01:11:45	极 2 高端阀组保护系统 C	YD 换流变阀侧电压互感器 A 相故障

现场检测 Y/D - A 相换流变阀侧套管电容值

C_1 、 C_2 合格, SF_6 分解产物及微水含量正常, 换流变压器离线油色谱检测正常, 末屏二次回路及板卡检测正常。通过对故障录波分析, 判断该次测量异常是由于系统扰动导致许继电压采集变换器内铁心饱和, 于特定的情况下形成动态稳定的谐振现象, 现场更换了极 II 高端 Y/D - A 相换流变压器 a 套管末屏分压板, 和与该板卡对应的 A、B、C 3 套测量接口屏内的电压采集变换模块。

更换后进行低压加压试验, 控制保护系统及故障录波采样正常。

2 故障检查

2.1 现场检查

1) 一次设备试验情况

① SF_6 气体相关检测

对极 2 高 Y/D - A 相换流变压器 a 套管 SF_6 进行了微水、分解产物检测, 检查结果正常, 如表 2、表 3 所示。

表 2 SF_6 分解产物记录表

名称	含量/($\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$)	名称	含量/($\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$)
甲烷	3.39	乙烯	0.25
乙烷	0.34	乙炔	0.12
氢气	9.69	一氧化碳	158.09
二氧化碳	343.06	总烃	4.10
分析意见		含量未发现异常	

表 3 SF_6 微水记录表

名称	含量/($\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$)	名称	含量/($\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$)
SOF_2	0.0	HF	0.00
H_2S	0.00	CO	34.2
微水	162.3		
分析意见		含量未发现异常	

检测结束后对套管压力进行实测, 测量结果为 3.8 bar, 与上次实测结果相同。恢复现场密度继电器后, 对接头进行检测, 未见异常。

②本体油色谱分析

对本体取底部油样并开展离线油色谱分析, 结果未见异常, 详见表 4。

③电气测试

表 4 本体底部油样离线油色谱分析记录表

单位	宜宾换流站	设备名称	极 II 高端 Y/D - A
相别	A	取样及分析日期 2015 - 07 - 01	
甲烷	3.39 $\mu\text{l/L}$	乙烯	0.25 $\mu\text{l/L}$
乙烷	0.34 $\mu\text{l/L}$	乙炔	0.12 $\mu\text{l/L}$
氢气	9.69 $\mu\text{l/L}$	一氧化碳	158.09 $\mu\text{l/L}$
二氧化碳	343.06 $\mu\text{l/L}$	总烃	4.10 $\mu\text{l/L}$
分析意见		含量未发现异常	

对极 2 高 Y/D - A 相换流变压器 a 套管进行了末屏绝缘、套管介损、电容测试, 测试结果与 2015 年年度预防性试验对比无异常。

末屏绝缘测试结果为 31.8 G Ω , 满足绝缘要求。2015 年年度预防性试验结果见图 1。

1、绝缘电阻测量:(单位:G Ω)

测量日期	2015.3.10	环境温度	15℃	空气湿度	50%
使用仪器	XD2905 绝缘电阻表				
标准要求	主绝缘, 不小于出厂值的 70%; 末屏对地, 不低于 1000MΩ; 末屏对地绝缘电阻小于 1000MΩ时, 应测量末屏对地的介质损耗因数 (tanδ), 其值不大于 0.02				
套管相别	测量部位	施加电压 (kV)	2015 预试		
a	一次~末屏	2.5	41.0		
	末屏~地	1	12.3		
b	一次~末屏	2.5	26.7		
	末屏~地	1	8.22		
结论	合格				

图 1 2015 年年度预防性试验末屏绝缘测试结果
套管介损、电容测试采用正接法测试, 测试结果见表 5 及图 2。

表 5 套管介损及电容量测试结果记录表

测量日期	2015 - 07 - 01	接法	正接线
F	45/55 Hz	U_{cx}	10.05 kV
C_x	472.4 pF	T_g	+0.279%

2. 介质损耗正切值及电容量测量:

测量日期	2015.3.10		环境温度		15℃		空气湿度		50%	
使用仪器	AI-6000E 介损测试仪									
标准要求	电容值与出厂值比较变化超过 +5% 时, 要查明原因; 20℃时 $\tan\delta$ 不大于: 0.008									
套管相别	测量部位	施加电压 (kV)	$\tan\delta$ (%)			Cx (pF)				
			出厂值	2014 交接	2015 预试	出厂值	2014 交接	2015 预试	ΔCx (%)	
a	一次~末屏	10	0.262	0.286	0.354	471.4	477.3	474.2	0.59	
b	一次~末屏	10	0.276	0.252	0.307	472.0	476.5	475.7	0.78	
备注	本年预试将出厂值作为参考值									
结论	合格									

图 2 2015 年年度预防性试验套管介损及电容量测试结果
根据以上试验结果可以判断现场一次设备无异常。

2.2 二次回路检查情况

换流变压器阀侧末屏分压器采用电容分压原理, 套管自身的电容 C_1 和末屏电容 C_2 与末屏分压

器电容值进行匹配,得到二次控制保护系统所需的 57.7 V 额定电压,具体如图 3 所示。

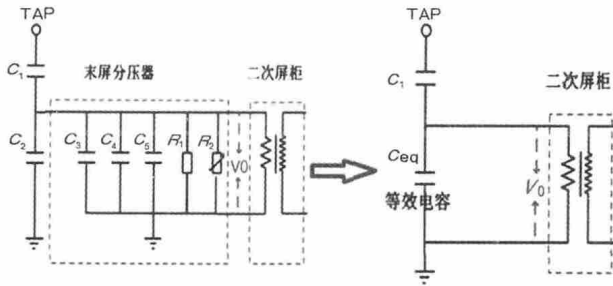


图 3 换流变压器阀侧套管末屏分压器原理图

换流变压器阀侧末屏分压器只有一路电压输出,在就地端子箱并接出三路电压分别到测量接口屏 A、B、C,其中到 B 屏的电压回路又并接至故障录波屏,如图 4 所示。

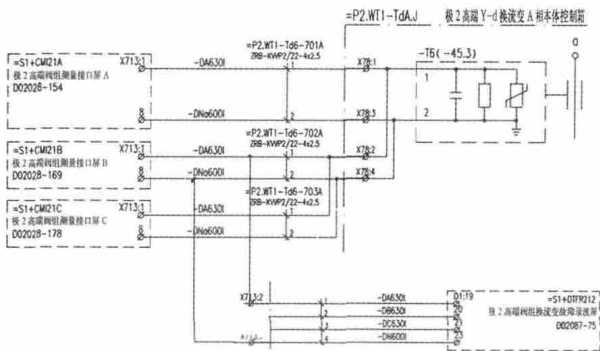


图 4 换流变压器阀侧套管末屏分压器接线图

现场对 Y/D-A、Y/D-B 相末屏分压器进行隔离检测,测量其自身的电容值和电阻值,并与备品进行比较,测量结果如表 6 所示。

表 6 末屏分压器自身电容及电阻测量记录表安装位置

安装位置	Y/D-A	Y/D-B	备用末屏分压器
等效电容/ μF	0.759	0.765	0.751
等效电阻/ $\text{M}\Omega$	0.998	1.006	0.996

现场对电压采集变换模块进行了采样检测,模块采样未发现异常情况,试验记录如表 7 所示。

表 7 电压采集变换模块采样检测记录表

二次加量/V	保护采样值(A相)/kV	保护采样值(B相)/kV
57.7	88.6	88.6
100	156.5	155.6
120	185.6	184.2

现场在换流变压器阀侧进行低压加压试验,检查阀侧末屏电压值正确,波形正常无畸变(同时对 Y/D 换流变压器三相进行加压,三相波形一致),如图 5 所示为阀侧加 10 kV 电压时手动触发的故障录

波图。

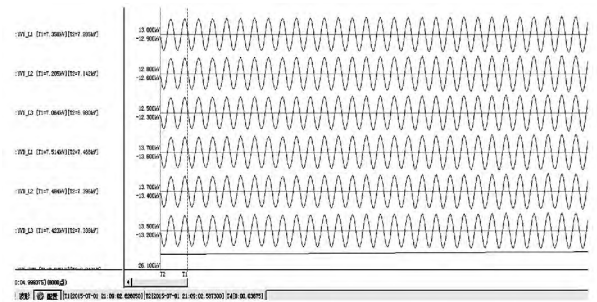


图 5 阀侧加 10 kV 电压时保护所录波形

综上所述,在单独对一次设备、二次设备进行检查性试验都没有发现任何异常情况。

3 故障原因分析

3.1 理论分析

换流变压器阀侧末屏电压测量环节基本原理如图 6。

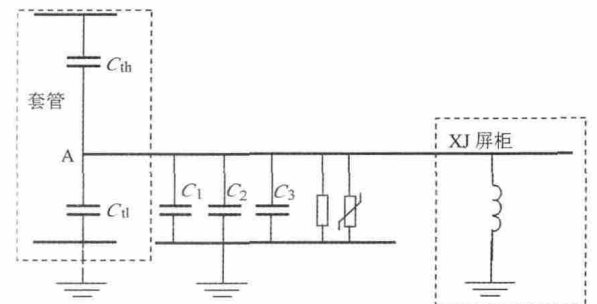


图 6 末屏电压测量原理图

图中 C_{th} 、 C_{th1} 为套管电容值, $C_{th} = 759 \mu\text{F}$ 、 $C_{th1} = 4.6 \text{ nF}$ 。套管电容和 C_1 、 C_2 、 C_3 共同构成末屏电压测量 PT(电容分压器), $C_1 = 0.681 \mu\text{F}$ (小)、 $C_2 = 47.5 \text{ nF}$ (中)、 $C_3 = 22.1 \text{ nF}$ (大), C_1 、 C_2 、 C_3 电容耐压 250 V DC。

末屏电压 PT 的负载为 XJ 屏柜中的电压变送器。该电压变送器的原边是 200 V,副边 4 V,由于该电压变送器采用的是铁心变压器,存在饱和的可能性。当电压变送器运行于线性区时,电感稳定且较大,当电压变送器进入饱和后,从原边看,其等效电感值将减少。

末屏电压电容分压器带上负载后,由于负载为感性 Z_L 会增大。随着电压的升高,电压变送器逐渐进入饱和区,负载电感进一步减小, Z_L 会进一步增大。随着 Z_L 的增大,电压变送器更加容易饱和。电感变化对 Z_L 的影响见式(1)。

$$Z_L = \frac{1}{\omega C - \frac{1}{\omega L}} \quad (1)$$

电压变送器工作于线性区时,电感较大且稳定;电压变送器一旦进入饱和区,电感减小,流过电压变送器的电流将大大增加,且电压变送器的恢复将十分困难。

3.2 现场原因分析

从原理电路图可以看出,末屏电压互感器采用电容分压。由于二次 PT 采用电磁式互感器,实际是一个电感,因此,等效电容和等效电感会在某个特定频率谐振,导致信号畸变,严重时测量电压会超出实际信号数倍,使二次 PT 铁心过流发热。

末屏电压互感器实际上就是一种特殊的电容式电压互感器(CVT)。一般国内厂家在设计和生产 CVT 时,都会考虑与次级电磁式 PT 配套使用时所产生的铁磁谐振问题。产品内部一般装设中压变压器,并装设有阻尼回路和补偿电抗器,阻尼回路用来抑制谐振,补偿电抗器用来补偿接入电感元件后的转换误差。即使 CVT 不接入二次 PT,也不装设中压变压器,由于 CVT 自身电路存在的寄生电感、线路电感等感性元件,也存在谐振问题。

查看故障时刻录波,换流变压器网侧交流系统三相电压正常,Y/Y 及 Y/D 换流变压器阀侧三相电压均出现短时畸变,持续时间约 100 ms,之后除 Y/D A 相故障持续外,其余五相均恢复正常,如图 7、图 8 所示。在进行解锁阀组连接时,高端的阀组的星侧和角侧均出现超过 200 V 的电压,均超过了设计电压值,但由于产品个体的差异性,星侧变送器瞬间恢复,角侧变送器导致信号畸变。

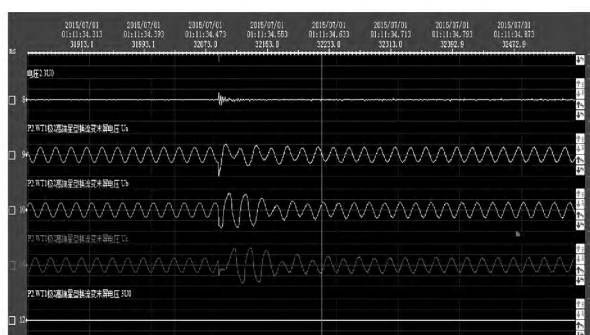


图 7 故障时刻换流变压器网侧交流侧电压

故障时刻网侧交流系统未发生明显扰动,初步排除交流系统干扰原因。阀侧星接、角接线换流变

压器均出现短时扰动,结合当时事件记录判断在极 II 高端阀组转连接时,阀侧一次设备有短时冲击。冲击过后 Y/D A 相换流变压器持续出现异常故障电压,Y/D B 相、Y/D C 相电压恢复正常,但角接绕组中阀侧无故障电流,判断故障原因为二次测量元件问题。

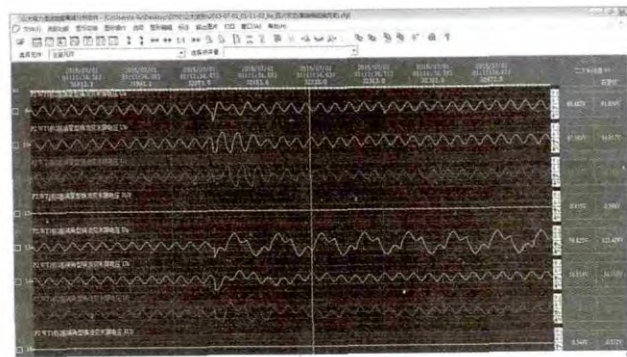


图 8 故障时刻换流变压器阀侧交流侧电压、电流

在双极高端调试期间,YD 换流变压器末屏分压器连接的许继电压采集变换模块就多次出现过饱和谐振现象,后在 2015 年 3 月年度检修期间在极 I、极 II 高端阀组测量接口屏更换了 Y/D 换流变压器对应的电压采集变换模块,增加了模块的抗饱和能力,最大采样值由 140 V 改为 200 V。

基于宜宾站调试期间发生过二次铁磁谐振的情况,在换流变压器充电或其他系统扰动情况导致阀侧电压异常偏高,超出控制保护测量模块的正常工作范围,造成测量元件铁磁饱和,饱和后的测量元件在特定的情况下与末屏分压回路形成动态稳定的谐振现象。分析认为许继电压采集变换模块上电压取量元件采用铁磁式结构是导致产生谐振现象的主要原因。

4 故障处理

为确保安全,更换了末屏分压器、电压采集变换模块,更换后再次进行低压加压实验。

1) 更换末屏分压器、电压采集变换模块

现场更换了极 II 高端 Y/D - A 相换流变压器 a 套管末屏分压器,同时更换了极 II 高端测量接口屏 A、B、C 内的 A 相电压采集变换模块,见图 9,更换后测量回路的绝缘电阻合格。

2) 低压加压试验记录及波形

更换电压采集模块完成后,现场对阀侧进行

低压加压试验,检查阀侧末屏电压值正确,波形正常无畸变,阀侧加 10 kV 电压时保护所录波形如图 10 所示。



图 9 更换电压采集模块现场照片

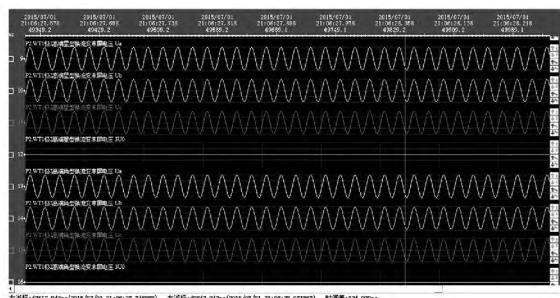


图 10 更换电压采集模块后阀侧加 10 kV
电压保护所录波形

5 总 结

分析了许继电压采集变换模块上电压取量元件谐振,导致换流变压器阀侧电压测量异常事件,认为许继末屏电压互感器缺少必要的阻尼回路和补偿回路;当一次电压发生突变时,二次 PT 过励饱和、阻

抗下降,等效电容和等效电感在某个特定频率发生谐振,导致信号畸变,严重时测量电压会超出正常电压数倍,使二次 PT 铁心过载发热,甚至烧毁,因此建议改进末屏分压回路设计,增加阻尼和补偿回路,并通过仿真以避免谐振现象的产生,保障直流系统的稳定运行。

参考文献

- [1] 刘耀,王明新. 高压直流输电系统保护装置冗余配置的可靠性分析[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 51-54.
- [2] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1990: 122-136.
- [3] 刘国福,张润丹. 电容式电压互感器故障分析[J]. 电力安全技术, 2006(9): 26-27.
- [4] GB/T 4703-2007, 电容式电压互感器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 15-21.
- [5] 陆晓春. 变压器状态检修技术方案的可靠性研究[J]. 上海电力学院学报, 2003(2): 26-32.
- [6] 严璋. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 231-255.
- [7] 齐旭,曾德文,史大军,等. 特高压直流输电对系统安全稳定影响研究[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 1-6.

作者简介:

孙文(1980), 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;
禹佳(1983), 工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;
陈伟(1991), 助理工程师, 研究方向为特高压直流输电技术。
(收稿日期: 2015-08-04)

(上接第 37 页)

- [12] 肖宾,胡毅,刘凯,等. 1 000 kV 交流紧凑型输电线路等电位进入方式[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1868-1874.
- [13] 舒印彪,胡毅,王力农. 500 kV 紧凑型线路带电作业保护间隙研究[J]. 中国电力, 2003, 36(5): 51-53.
- [14] 胡毅,王力农,舒印彪. 带电作业保护间隙的放电特

- 性研究[J]. 高电压技术, 2002(11): 17-18.
- [15] 刘凯,胡毅,王力农,等. 1 000 kV 输电线路带电作业保护间隙的研究[J]. 高电压技术, 2006(12): 83-88.

作者简介:

彭勇(1984), 硕士, 工程师, 主要从事输电线路运行维护、带电作业技术研究。

(收稿日期: 2015-09-22)

变电站铜铝过渡线夹超声相控阵检测工艺及应用

王 志¹ 王红梅² 陶 勇³ 林雪松¹ 蔡志强¹

(1. 四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610072;

2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 3. 国网德阳供电公司, 四川 德阳 618000)

摘 要: 针对国家和行业均无铜铝过渡线夹焊缝检测相关标准的问题进行了研究, 寻找到并确定了变电站铜铝过渡线夹超声相控阵检测工艺, 通过现场应用可以有效地检出铜铝过渡线夹焊缝的缺陷。

关键词: 变电站; 铜铝过渡线夹; 超声相控阵; 检测工艺; 应用; 焊缝

Abstract: Because there is no related national and industrial standards for welds inspection of copper to aluminum terminal connector, the detection technology of ultrasonic phased array for copper to aluminum terminal connector of substation is determined, which can effectively detect the weld defects of copper to aluminum terminal connector by field application.

Key words: substation; copper to aluminum terminal connector; ultrasonic phased array; detection technology; application; welds

中图分类号: TM85 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-0056-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.013

0 概 述

铜铝过渡线夹是变电站重要连接部件, 在变电站应用广泛, 由于变电站早期设备出线端子多为铜材, 而输电线往往是铝, 为了避免电化学腐蚀, 通常采用铜铝过渡线夹来避免两种材料之间连接的电化学腐蚀。铜铝过渡线夹的结构形式主要有闪光对接焊、摩擦对接焊、钎焊和爆炸焊4种对接型式。

近年来, 国家电网公司发生多起电力设备铜铝过渡线夹断裂事故, 对电网的安全稳定运行造成了相当大的影响。据某集团公司2000年至2007年的不完全统计, 发生设备线夹断裂事故16次, 造成设备停电故障7次。已发生的16次线夹断裂, 除1次为铸铝线夹外, 其余均为铜铝过渡线夹, 并且都是采用铜铝对焊方式, 断裂部位基本都在铜铝结合部位。2006年江西省电力公司在昌东变电站220 kV线夹断裂, 引线掉落引起220 kV母差保护动作, 造成多个220 kV变电站母线或主变压器失压, 南昌地区损失负荷133.4 MW, 占比8.2%; 南昌用户停电7.5万户, 占比4.27%, 造成了极大的社会影响。

铜铝过渡设备线夹在变电站广泛应用, 据统计, 四川省内变电站在役钎焊和爆炸焊对接型式线夹铜

铝过渡线夹约为5万个, 闪光焊对接型式线夹总数量约为5万个。涉及面广, 短期内无法全面进行更换。对铜铝过渡线夹无损检测技术进行研究, 寻找铜铝过渡线夹有效的无损检测方法, 从而保证电网的安全运行, 势在必行。

从国家电网和四川电网在役铜铝过渡线夹断裂情况来看, 发生断裂的铜铝过渡线夹主要是闪光焊对接型式线夹。经对断裂线夹相关失效分析, 发现铜铝过渡线夹断裂主要是焊缝存在焊接缺陷, 在外力和焊缝焊接应力的作用下, 焊缝缺陷不断扩展, 最终导致线夹断裂。因此要防止线夹断裂, 重点是对该类线夹焊缝缺陷的检测。

当前, 国家和行业均无铜铝过渡线夹焊缝检测的相关标准, 也没有现成的检测方法可以借鉴。于是开展了大量工作, 对渗透(PT)技术、声纵波法、横波法、表面波法、爬波法、导波法等多种方法进行了深入的试验和研究, 最终确定采用超声相控阵检测技术和工艺, 可以有效地检测出铜铝过渡线夹焊缝的缺陷。

1 超声相控阵波检测技术

超声相控阵技术采用了全新的发射与接收超声

波的方法,通过控制换能器阵列中各阵元的激励(或接收)脉冲的时间延迟,改变由各阵元发射(或接收)声波到达(或来自)物体某点时的相位关系,实现焦点和声束方位的变化,完成声成像的技术。

波束聚焦是通过软件控制每一个晶片的触发时间,使波前在指定位置叠加实现的。焦点取决于所用晶片的大小和数量以及晶片的激发频率,如图1所示。

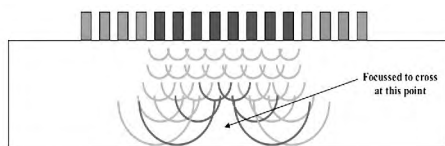


图1 波束聚焦

波束的偏转是通过软件控制每一个晶片激发的延时使波阵面沿特定角度传播来实现的,如图2所示。

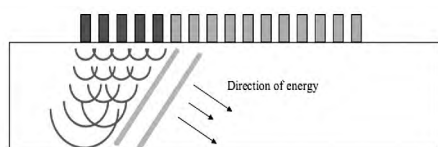


图2 波束的偏转

超声相控阵是超声探头晶片的组合,由多个压电晶片按一定的规律分布排列,然后逐次按预先规定的延迟时间激发各个晶片,所有晶片发射的超声波形成一个整体波阵面,能有效地控制发射超声束(波阵面)的形状和方向,能实现超声波的波束扫描、偏转和聚焦。它为确定不连续性的形状、大小和方向提供出比单个或多个探头系统更大的能力。

超声相控阵检测技术使用不同形状的多阵元换能器产生和接收超声波束,通过控制换能器阵列中各阵元发射(或接收)脉冲的不同延迟时间,改变声波到达(或来自)物体某点时的相位关系,实现焦点和声束方向的变化,从而实现超声波的波束扫描、偏转和聚焦。然后采用机械扫描和电子扫描相结合的方法来实现图像成像。

2 铜铝过渡线夹超声相控阵检测工艺

2.1 超声相控阵探伤仪的选择

由于中国现无超声相控阵探伤仪的相关技术标准,设备选择时可参考 ASTM E2491《评估性能特征的相控接收阵列超声波检验仪器和系统的标准指

南》的相关技术要求外,还应满足以下要求:

1) 功能强大。内置聚集法则计算器,可根据工件需求自由选择聚集方式,如深度/声程/投影面/任意面聚集,可实现线性/扇形等多种扫查方式。配备高亮高分辨率彩色液晶触摸屏,在可图像化同时显示多种扫查方式的检测结果之外,既能保证检测结果的可靠性,又方便监控、存档与作进一步的缺陷分析。

2) 高性能指标。相控阵探伤仪具有多通道,通道达到32/128,兼具双独立通道高性能 TOFD 和常规超声波检测功能;负方波发射脉冲,脉宽精度达到2.5 ns,脉冲重复频率达20 kHz;仪器带宽0.5~15 MHz,可兼容多种频率的相控阵探头。

3) 完善的数据处理能力。实时数据采集,在线或离线进行数据分析;支持不少于1 024个聚集法则,能满足高速扫查,避免漏检;数据存储可选择SD卡可外接USB设备;检测报告可在仪器上直接生成。

4) 测量更为精确。可对每个声速进行延迟、灵敏度及TCG校准。

2.2 超声相控阵探头的选择

探头的性能参数满足 JB/T 11731-2013《无损检测 超声相控阵探头通用技术条件》,针对铜铝过渡线夹宜选择自聚焦探头,探头频率为7.5 MHz,阵元数为16,阵元中心距离为0.5,阵元长度为10。

2.3 超声相控阵试块的选择

选择为本项设计的超声相控阵试块 TLXJ-1 金属试块(如图3所示)和对比试块。

超声相控阵试块 TLXJ-1 金属试块主要用于探伤设备、探头灵敏度的测试。主要测试设备、探头能否有效地检测出 TLXJ-1 加工的孔,检测出来的孔的位置参数与 TLXJ-1 金属试块已知位置的参数误差能否满足超声相控阵无损检测的要求,TLXJ-1 加工的孔的图像是否清晰,分辨率是否满足要求。

超声相控阵对比试块是用在役的铜铝过渡线夹加工制作的,其声学性能与实际线夹是一致的,对比试块的相关特性代表了实际工件,除表面补偿外不再进行相关声学性能的补偿。通过对比试块上的人工缺陷(加工的孔和槽)的调校,确定在役的铜铝过渡线夹超声相控阵无损检测的探伤灵敏度。

2.4 超声相控阵耦合剂的选择

宜选用粘度较大的、对铜铝线夹不存在腐蚀的耦合剂,如浆糊、机油等。

2.5 超声相控阵探伤前的准备工作

2.5.1 宏观检查

为节约资源,在对在役的铜铝过渡线夹进行超声相控阵探伤前,首先进行宏观检查,按照铜铝过渡线夹相关标准的要求,发现超过标准要求的不合格铜铝过渡线夹(如线夹表面裂纹、机械损伤超、线夹焊缝裂纹、表面开孔的气孔、表面夹渣、焊缝错边超标等)应进行更换,不再进行超声相控阵探伤检测。

2.5.2 检测面的选择和准备

通过对比试验发现,由于在役的铜铝过渡线夹铝基体是铸铝,铸造缺陷较多,铝晶粒较大,使得声速发现畸变,因此主要在线夹铜侧进行线夹焊缝探伤。

为保证检测面具有良好的声耦合,要去除线夹表面氧化层、毛刺、油污、焊接飞溅,准备好的检测对象要再次进行宏观检查,发现超标缺陷的线夹要进行更换,不再进行超声相控阵探伤检测。

2.6 超声相控阵无损检测

2.6.1 探头和仪器灵敏度校准

采用 TLXJ-1 金属试块,根据所采用探头和楔块的种类,在仪器中输入相关参数,选择适当的聚焦法则,对准已知的孔,已知标准孔的位置、尺寸、大小能否在超声相控阵设备上完整反映。在最大检测位置探头和仪器组合灵敏度余量不小于 10 dB,探头和仪器组合分辨率不小于 10 dB,如图 3 和图 4 所示。

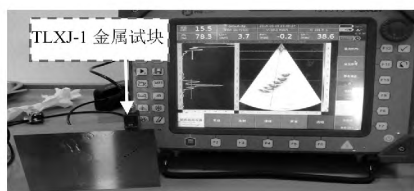


图3 纵波超声相控阵探头和仪器灵敏度的测试校准图

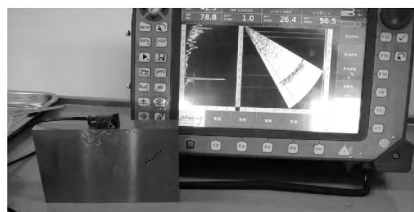


图4 横波超声相控阵探头和仪器灵敏度的测试校准图

2.6.2 检测灵敏度调校

根据聚焦法则,在仪器上输入工件相关参数,利用加工的铜铝线夹的对比试块进行调校,根据工件厚度,对声速进行修正。

根据工件厚度选择铜铝线夹的对比试块,对准对比试块加工的 1 mm 人工切槽,将对试块上检测最大声程处深的 1 mm 人工切槽最大反射波,调整至 A 扫描显示满幅波高的 80%,作为基准灵敏度,再增益 6 dB 作为检测灵敏度,根据工件表面状况,可对表面进行 0 ~ 3 dB 的表面补偿。

2.6.3 铜铝过渡线夹超声相控阵检测

根据选择的设备、仪器、探头及设备调校后,对铜铝过渡线夹进行超声相控阵检测。

2.7 缺陷测量

1) 缺陷测长:缺陷长度一般用端点半波高度法测定,即根据探头沿焊缝长度方向移动时,由缺陷左右两端的最大波幅降低一半时的移动距离确定。

2) 缺陷测高:缺陷高度可依据 S 扫描或 B 扫描图像,用 6 dB 降落法测定。首先找到缺陷的最高波,调至基准波高(80%),然后改变探头角度,找到一半波高位置(40%),并通过测量线进行测量。

2.8 焊缝缺陷评定

1) 危害性缺陷如裂纹、未熔合缺陷不允许,一律判为废品。

2) 非危害性缺陷如焊缝内容或表面夹渣、气孔等,单个缺陷直径 $\Phi \geq 2$ mm,不允许。单个缺陷直径 $\Phi < 2$ mm,但缺陷长度 ≥ 5 mm 不允许。焊缝中多个缺陷,其间距小于缺陷本身的尺寸,按同一缺陷进行评定,即缺陷长度是缺陷本身长度和间距之和。

2.9 检测记录和报告

检测记录:记录的目的是为工件无损检测质量评定(编发检测报告)提供书面的依据,并提供质量追踪所需的原始资料。记录的内容应尽可能全面。主要包括检测设备信息、工件信息、检测缺陷信息。

检测报告:检测报告可采用表格或文字叙述的形式。其内容至少应包括被检工件名称及细节、扫描面和表面状态、图号及编号、检测规程的编号、相控阵超声仪器细节、相控阵探头细节(①探头阵元数;②频率;③阵元间距;④焦距)、楔块细节(①声速;②入射角;③几何尺寸)、虚拟窗孔的使用(即使用的阵元数和阵元宽度)、聚焦法则使用的阵元数

及设置细节、仪器调整方法及细节、验收标准,超标缺陷的位置、尺寸、评定结论、操作者姓名及检测日期等。报告中最重要的一部分评定结论,需根据显示信号的情况和验收标准的规定进行评判。若出现难以判别的异常情况,应在报告中注明并提请有关部门处理。

3 应用

根据所研究的铜铝过渡线夹超声相控阵检测工艺,对铜铝过渡线夹进行了超声相控阵检测,具有较好的检测效果。

3.1 模拟缺陷检测

取铜铝过渡线夹实物,根据铜铝过渡线夹不同厚度加工了一系列对比试块,在对比试块上加工了不同类型的、不同位置的缺陷来模拟实际缺陷,通过超声相控阵技术,可以很好地检出模拟缺陷,见图 5 和图 6 所示。

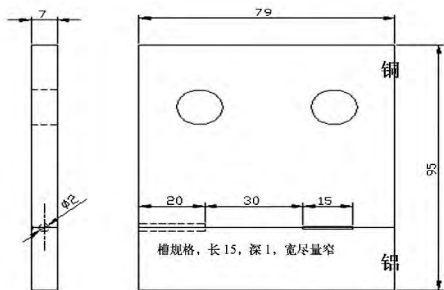


图 5 对比试块(T1502081)上的模拟缺陷

图 5 是编号为 T1502081 对比试块,在对比试块上加工了模拟铜铝线夹的内容缺陷的孔和表面缺陷的槽。

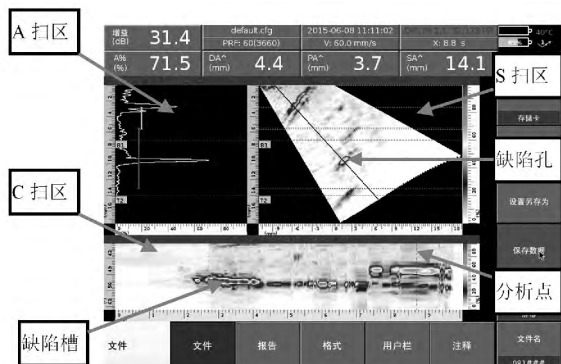


图 6 对比试块(T1502081)上的模拟缺陷
超声相控阵检测截图

T1502081 试块上加工的孔和槽可以从 S 扫和 C 扫上清晰地分辨。且可以从 S 扫和 C 扫上精确地测量试块上孔和槽尺寸。通过测量,模拟缺陷位置、缺陷尺寸误差在 0.1 mm 左右。

3.2 现场应用

通过对数个变电站所使用铜铝过渡线夹进行检测,发现了大量的缺陷。图 7 为其中一个铜铝过渡线夹现场检测情况截图。

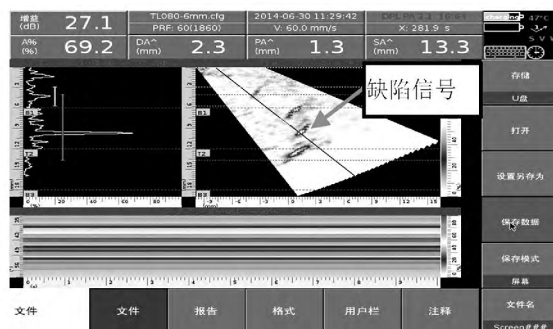


图 7 现场实际检测截图

该铜铝过渡线夹用在某变电站隔离开关支柱绝缘子上,其厚度为 6 mm。通过检测发现在工件深约 2.3 mm 处有一个长约 8 mm 缺陷,缺陷幅值为 27.0 dB。根据所研究的“变电站铜铝过渡线夹超声相控阵检测工艺”中质量标准,该缺陷超标,变电站对该铜铝过渡线夹进行了更换。

4 结论

根据对比试块的模拟检测和现场实际应用检测,所制定的变电站铜铝过渡线夹超声相控阵检测工艺符合工程实际,可以有效地检测出变电站铜铝过渡线夹焊缝中缺陷,从而保证电网的安全。

参考文献

- [1] 钟相源. 变电站铜铝过渡设备线夹断裂分析[J]. 中国电力 2010 43(12): 27-30.
- [2] 郑晖, 林树青. 超声检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社 2008.

(收稿日期: 2015-07-31)

四川电网实时发电计划与 AGC 闭环控制策略研究

周 剑¹, 于昌海², 吴继平², 滕贤亮²

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211000)

摘 要: 四川电网是一个以水电资源为主的区域电网, 发电机组调节性能差异大, 为了在具有较好控制性能指标的同时保证机组日前发电计划能够得到较好的执行, 提出了实时调度计划与自动发电控制(AGC)协调的闭环控制策略。运行结果验证了所述方法的有效性。

关键词: 自动发电控制; 实时发电计划; 协调控制; 控制模式切换

Abstract: Sichuan power grid is a regional power grid mainly on hydroelectric power, so the regulation performance of generating units varies widely. In order to achieve a better control performance target and good execution of day-ahead generation schedule, a coordinated control strategy with real-time generation scheduling and automatic generation control (AGC) is proposed. The operation results show the validity of the proposed strategy.

Key words: automatic generation control (AGC); real-time generation scheduling; coordinated control; control mode switching

中图分类号: TM73 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-0060-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.014

0 引 言

四川电网装机规模持续快速增长, 截止 2014 年年底全网统调装机总容量达 45 186 MW, 其中水电占比为 70.5%, 火电占比为 28.4%, 水电总装机容量远超火电。随着电网规模的日益扩大和自动化水平的不断提高, CPS 评价机制的引入及“三公”调度的进一步深入, 对调度运行和自动发电控制(automatic generation control, AGC)的功能优化提出了更高的要求。

近年来, 网省调逐步推进日前、日内和实时发电计划建设工作, 与 AGC 相互衔接, 在实现扰动调节的多级协调和多时间尺度优化中发挥了积极作用^[1-4]。机组日前发电计划由计划部门根据负荷预报结果、机组检修开停机及电力市场等因素得到。在日前计划的基础上, 根据短期负荷预测和超短期负荷预测的结果对日前计划进行一定程序的修正得到日内计划和实时计划^[5-6]。负荷预测结果与区域内实际负荷肯定会有一定的偏差, 在 AGC 实时控制时必然会有区域控制偏差(area control error, ACE)需要机组参与调节。实时计划与 AGC 控制周期重合、控制对象相互影响, 实时计划若未充分考虑电网

调节性能要求, 将增大 AGC 调节压力, 不利于控制行为的优化。AGC 若未考虑实时计划的趋势指导作用, 仅根据 ACE 事后反馈调节, 在未来时段难以保持其最优调节能力。

在发电机组参与调节电网负荷波动的同时, 使其调节动作能够较好地反映发电计划特征, 是“三公”调度的基本要求, 也是提高发电机组投入 AGC 控制积极性的重要手段。此外, 实际运行中不同类型、不同控制目标机组运行模式转换频繁, 如何根据电网不同运行状态, 发挥 AGC 机组和实时调度机组的作用, 组织各类机组实现控制角色和调节容量的优化调控是提升电网控制性能的又一关键。

针对 ACE 调节行为对机组运行状态造成的影响, 提出了 AGC 机组基于发电计划闭环的改进控制算法; 同时, 为保证足够的 AGC 调节备用还提出机组控制模式配置方案, 以及模式切换策略, 以适应电网不同工况下的扰动平衡的需要, 进一步提升电网动态控制效果, 优化系统控制性能指标。

1 基于机组控制模式的发电计划闭环控制策略

1.1 基于动态调节步长的 SCHER 控制模式

机组的控制模式由基点功率模式和调节功率模式组成,其目标出力由基点功率和调节功率构成。考虑到区域 ACE 实时变化,机组调节功率在调节步长限定的调节区间内实时调整,其出力的动态调节过程将围绕基点功率上下波动。根据基点来源不同,将控制模式分为以下两类:

1) 固定基点模式: 基点功率由日前、实时计划方式或人工给定。前两项由负荷预测、联络线交换计划制定,用于跟踪负荷变化趋势,实现超前调节。

2) 浮动基点模式: 参与区域 ACE 调节,基点功率取实际出力或可调容量比例分配值,调节功率由区域实际调节需求分配得到,属于滞后闭环控制,跟踪实时的负荷变化和功率平衡。

通过机组基点功率和调节功率两类指令的协调,如 SCHER 控制模式,实现实时发电计划(机组基点功率)与 AGC 调节需求(机组调节功率)的协调,是实时发电计划与 AGC 闭环控制的有效手段。

大型水电机组具有容量大、调节速率快、响应时间短等特点,其参与 ACE 调节常用的控制模式为 SCHER 模式。该模式下,水电机组目标指令是由计划值叠加调节量得到的。当调节需求位于死区范围时,机组将完全跟踪计划曲线;否则,在计划值的基础上承担调节功率。

水电机组的调节速率非常快,区域调节需求超出死区时,可实现 ACE 快速调节,定义该过程为主动调节过程;但是在区域调节需求回到死区后,机组出力需返回计划值,定义该过程为返回调节过程,当多台水电机组同时进入返回调节过程时,可能给电网造成新的功率扰动。

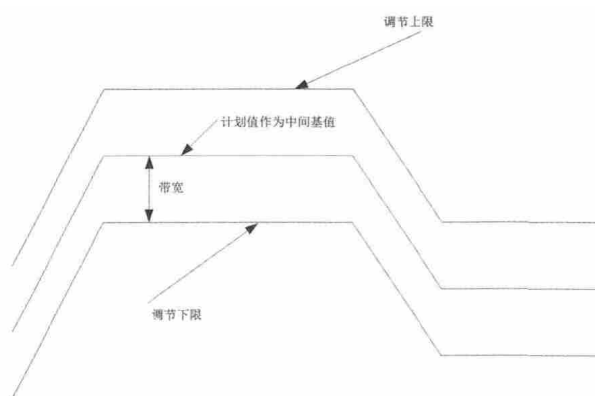


图 1 SCHER 模式机组调节示意图

因此,有必要区分 SCHER 模式的主动调节和返回调节过程,并采用不同的控制参数和控制逻辑。

1) 主动调节过程

主动调节过程可采用较大调节步长,目的为实现 ACE 快速调节。为避免机组长时段调节导致实际出力偏离发电计划太远,以机组的发电计划为基准,上下扩充一定的带宽,形成计划值调整带,作为机组的实时调节范围。为保证事故状态下机组能够提供快速的功率支援,在紧急控制区可考虑暂时取消计划带宽的限制。

2) 返回调节过程

返回调节过程中,采用较小的返回调节步长,减小每次调节带来的扰动;返回调节过程中,为减缓机组的返回调节,每次下发指令的命令间隔也应作限制,以达到与其他调节资源动态置换的配合效果。

1.2 计划带宽约束的 AGC 控制策略

一般自动控制模式下,机组基点功率始终为当前实际出力,与发电计划无关联。机组根据承担的调节功率,在整个调节范围内上下调节。如果在一段时间内,区域的调节需求方向相对单一,机组出力可能会很大程度地偏离发电计划。如果要求机组跟踪计划,又必须预留出一部分调节空间参与全网 ACE 控制时,可采用上述的按需调整的计划模式,但按需调整的计划模式在 ACE 小于控制死区时要求机组的实际出力重新回到计划值,会导致机组的来回调整。为减少机组的来回调整,可采用计划带宽模式。计划带宽模式以机组的发电计划为基准,上下扩充一定的带宽,形成计划值调整带,作为计划带宽模式机组的实时调节范围。在正常情况下,机组只能在此计划值调整带范围内上下调节,只有当计划值无效,才恢复机组固有的调节范围。

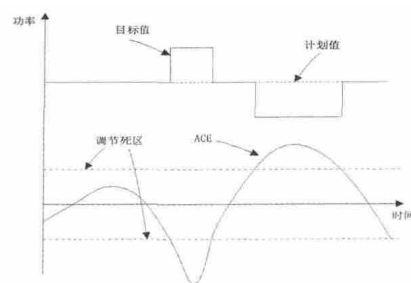


图 2 计划带宽约束示意图

调整带生成方法如下: 假设计划值为 P_b , 机组调节上限为 $P_{\max}$, 机组调节下限为 $P_{\min}$, 带宽为 w , 调整带上限为 $B_{\max}$, 调整带下限为 $B_{\min}$ 。

调整带边界为

$$B_{\max} = P_b + w \quad (1)$$

$$B_{\min} = P_b - w \quad (2)$$

同时要根据以下条件进行修正:

$$\text{当 } P_b + w > P_{\max} \quad B_{\max} = P_{\max} \quad (3)$$

$$\text{当 } P_b - w < P_{\min} \quad B_{\min} = P_{\min} \quad (4)$$

通过上述方法计算机组的调节范围,机组可以在这个调节范围内自由调节,而不用在调节 ACE 后返回计划值,可减少不必要的来回调节。

2 适应电网多复杂工况的机组控制模式自动切换策略

现阶段 AGC 机组作为电网基本调控单元,其实时调整能力与电网频率和联络线交换功率密切相关,一旦失去调节能力,CPS 指标将严重恶化。实时运行控制中需要足够的调节备用以应对未来负荷调整和突发扰动的调节需求。现有调度控制系统中,AGC 机组的控制模式由调度员依据运行经验人工设定和决策修改,这就导致预留 AGC 备用具有不确定性,预留备用过多或过少都难以兼顾系统经济性和安全性的要求。

于是提出了一种电网工况自适应机组模式自动切换方案。根据电网不同工况下负荷调整需要,适时调整机组控制模式:负荷爬坡时段,通过增加固定基点机组,超前跟踪负荷波动,减少机组调整压力,满足负荷爬坡要求;负荷平稳时段,合理配置浮动基点机组,满足区域调节备用需求,保证区域 ACE 和 CPS 指标控制要求。大功率区外来电失去、大机组跳闸事故扰动发生时,电网实时功率缺额反映在 ACE 上,而实时发电计划仅能更新未来 15 min 计划值点,此时需要更多的浮动基点机组参与紧急 ACE 调节,以快速平抑扰动。

实时运行控制中需要足够的调节备用以应对未来负荷调整和突发扰动的调节需求,因此将电网分为正常和紧急两种工况,建立适应两种工况下的机组模式切换方案。为避免切换机组选择的无序性,将系统中部分机组作为可在固定基点和浮动基点模式间自由转换的机组,该类机组定义为缓冲机组。方案数据流程如图 3 所示。

自适应模式切换功能实时监视电网运行工况、负荷波动和 AGC 调节备用信息,正常工况下,当系统负荷快速爬坡或 AGC 调节备用无法满足最小调节备用限值时,则启动模式切换策略,以提高负荷快速跟踪和扰动调节能力。当监测到直流输电故障或

大机组跳闸等紧急工况发生时,则启动 ACE 紧急控制策略,将固定基点模式的缓冲机组转为浮动基点模式,应对功率紧急缺口。在紧急工况退出或 AGC 调节容量恢复后,浮动基点模式缓冲机组分批依次返回固定基点。

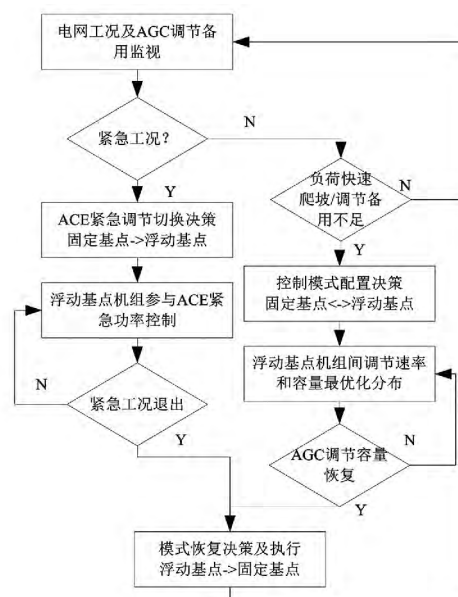


图 3 自适应控制模式切换数据流程框图

3 试验及运行

所提出的优化策略已在四川电网 D5000 智能调度控制系统 AGC 软件中实施应用,在调度生产实际中取得了良好的控制效果。

图 4 为四川电网某 SCHER 模式水电机组采用动态调节步长后的调节跟踪过程。从图 4 中可以看出该机组大步长参与 ACE 调节、小步长返回计划值,且控制爬坡速率,减小了对电网冲击。

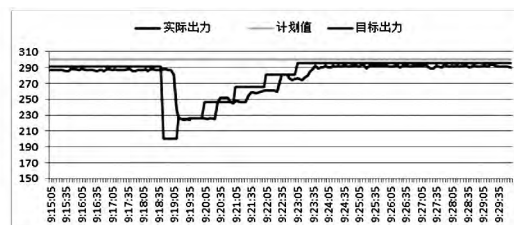


图 4 动态调节步长控制跟踪过程

为进一步检验 AGC 调节对机组发电计划的影响,对瀑布沟水电站在策略执行前后两年同一日电量完成情况比对分析结果见表 1 所示。数据表明新策略实施以后,AGC 调节机组的计划电量完成情况 (下转第 71 页)

应用(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2009.

[7] 陈小平. 母线负荷预测的实用算法[J]. 四川电力技术, 2012, 35(1): 66-68.

[8] 高峰,康重庆,程旭. 短期负荷预测相关因素的自适应训练[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(18): 6-10.

作者简介:

吴茵(1979),硕士,高级工程师,主要从事电网运行方式策划管理工作;

杨小卫(1982),硕士,高级工程师,主要从事电网调度运行管理工作;

岳菁鹏(1985),硕士,助理工程师,主要研究电网负荷预测、分布式发电等;

罗欣(1983),硕士,工程师,主要研究电力市场分析、电网负荷预测等。

(收稿日期:2015-07-06)

(上接第62页)

也得到显著改善。

表1 瀑布沟电站计划电量完成率

日期	策略执行前(2014年)			策略执行后(2015年)		
	计划 电量 /MW	实发 电量 /MW	电量 完成率 /%	计划 电量 /MW	实发 电量 /MW	电量 完成率 /%
3/1	21 100	26 142	123.9	14 000	14 056	100.4
3/2	17 250	24 844	144	14 000	15 513	110.8
3/3	20 200	26 109	129.3	14 000	13 914	99.4
3/4	21 350	18 468	86.5	14 000	17 263	123.3
3/5	16 700	25 926	155.2	17 175	16 041	93.4
3/6	19 800	17 503	88.4	16 025	14 189	88.5
3/7	18 700	22 499	120.3	15 325	18 374	120

CPS1 指标体现了控制区域对互联电网频率质量贡献的大小,该策略执行前后相邻年份某同一月份的 CPS1 日平均值对比情况如图 5 所示。从图中 CPS1 曲线可以看出,启用新策略后四川电网 CPS1 考核指标亦有所改善。

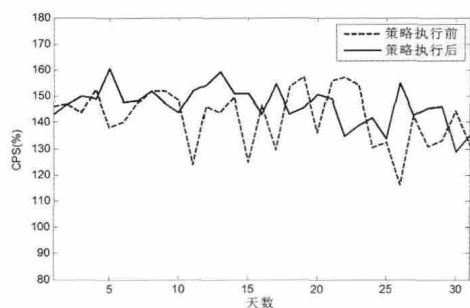


图5 CPS1 日平均值曲线对比

4 结 语

AGC 应用作为电网实时控制的重要环节,承担着安全稳定运行、频率稳定和联络线、电量考核的重

要职责。从机组有功控制模式着手,探索实时发电计划与 AGC 闭环控制策略,并阐述了 AGC 控制模式切换方案及多工况下模式切换策略,通过备用在不同控制模式机组间相互转移,促进不同控制模式机组调节备用的合理分布,降低了机组整体调节成本。

参考文献

- [1] 张伯明,吴文传,郑太一,等. 消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 1-6.
- [2] 周劭英,张伯明,尚金成,等. 河南电网实时调度系统若干功能与算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 99-104.
- [3] 滕贤亮,高宗和,张小白,等. 有功调度超前控制和在线水火电协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22): 16-20.
- [4] 李予州,张伯明,吴文传,等. 在线有功调度协调控制系统研究与开发[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 12-16.
- [5] 徐帆,丁怡,谢丽荣,等. 实时发电计划闭环控制模型与应用[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3187-3192.
- [6] 邓勇,朱泽磊,黄文英,等. 日内及实时发电计划的递进协调方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 141-146.

作者简介:

周剑(1972),硕士,高级工程师,研究方向为智能电网调度控制;

于昌海(1987),硕士,工程师,研究方向为电网调度自动化、新能源协调控制;

吴继平(1984),硕士,工程师,研究方向为智能电网调度自动;

滕贤亮(1978),硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化、新能源运行控制。

(收稿日期:2015-08-10)

综合智能可视化告警与 WAMS 一体化 应用的研究与实现

温丽丽, 赵 静, 郭 亮

(国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 电网设备故障时, 调度自动化系统各应用功能推送出大量的告警或分析信息, 如何提取重要监视数据, 直观表达核心故障是提高系统应用价值的重要途径。综合智能可视化告警应用基于告警合并、关联事件推理、告警规则智能筛选等关键技术, 有效整合、挖掘电网设备告警信息, 并以可视化智能方式准确定位故障。基于动态数据变化特征故障诊断技术, 优化 WAMS 扰动识别告警策略及参数设置, 提升 PMU 装置动态数据质量, 有效提高设备故障识别正确率, 为调控生产提供了准确可靠的技术支撑手段。

关键词: 综合智能可视化告警; WAMS; 在线扰动识别; PMU 动态数据质量

Abstract: When equipment failure occurs in power grid, every application function of dispatching automation system pushes out a large number of alarms or analysis information. How to extract important monitoring data and intuitively describe core failure is an important way to improve the application value of the system. Integrated intelligent visual alarm is based on some key technologies, such as alarm merging, related event inference, intelligent filtering of alarm rules. It can achieve the effective integration and mining of alarm information for power grid equipment, and can accurately locate the fault in a visual and intelligent way. Based on fault diagnosis technology of dynamic data feature, the alarm strategy and parameter setting of WAMS disturbance identification are optimized, and the dynamic data quality of PMU is promoted so as to effectively improve the accuracy of equipment fault identification, which provides an accurate and reliable technical support for dispatching control.

Key words: integrated intelligent visual alarm; WAMS; on-line disturbance identification; dynamic data quality of PMU

中图分类号: TM73 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-0063-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.015

0 引 言

随着特高压电网的不断发展, 四川电网已从局部电网跃升为北联西北、东送华东、南接南网, 特高压交直流混联运行的枢纽电网。一次电网的迅猛发展对调度自动化系统提出了更高要求, 需要调度自动化系统提供准确的信息服务和可靠的分析决策支撑。

文献[1]综合分析智能电网和电网调度的发展状况, 提出“以调度员思维模式为框架, 以可视化界面为功能模块, 以互动计算为系统核心”的智能调度构架, 指出了在人机一体化协同决策模型、数据融合、态势可视化等领域需要解决的关键技术问题。文献[2]提出基于虚拟中心数据库的多数据源综合智能电力系统动态监视平台, 该平台基于虚拟中心

库实现不同应用系统的界面统一和数据共享, 而不需对数据进行大量的转移和复制。文献[3]阐述了基于 WAMS 量测数据和模式识别方法进行电网扰动和操作类型识别的过程, 主要包括基于联络线的扰动和操作区域判定、WAMS 量测数据的预处理、模式特征的提取以及模式匹配。文献[4]建立了 PMU 装置测试与评估综合系统, 包括测试平台、测试方法和评价体系, 提出专门的静态和动态性能测试方法和测试程序。

智能电网调度控制系统将调控中心原十大系统整合为一个基础平台、四大类应用, 但由于一体化特点, 电网设备故障时, 各应用推送出大量离散的告警或分析信息, 对调度员造成一定困扰, 延误事故处理。首先介绍了基于智能电网调度控制系统一体化平台(D5000)的综合智能可视化告警应用关键技术, 通过告警智能合并、关联事件推理、告警规则筛

选等技术手段,汇集和分析处理各类告警信息,并以形象直观的智能可视化方式提供全面综合的告警提示。其次,WAMS应用作为其重要告警来源,通过优化在线扰动识别策略,提升PMU装置动态数据质量等方式提高设备故障识别正确率,效果显著,有效提高了电网安全预警水平。

1 综合智能可视化告警

为了更好地为大运行体系“调控一体化”建设提供坚强技术支撑,基于智能电网调度控制系统D5000平台,建设了综合智能分析与可视化告警应用,为调度员提供更加可靠和直观的电网故障处理辅助手段^[5],有效提高电网安全运行水平。

1.1 结构框架

综合智能可视化告警应用综合分析和处理电网运行稳态监控、WAMS在线扰动识别、二次设备在线监视与分析、设备集中监控、变电站告警直传等应用提供的电网一、二次设备告警信息,判断出更加准确、智能的综合告警信息,实现电力系统在线故障诊断,并以形象直观的可视化方式展示分析结果,给调度员以准确、及时、简练的告警提示。

该应用包含了告警信息综合处理、告警智能分析与推理、可视化展示和数据输入输出等功能模块。

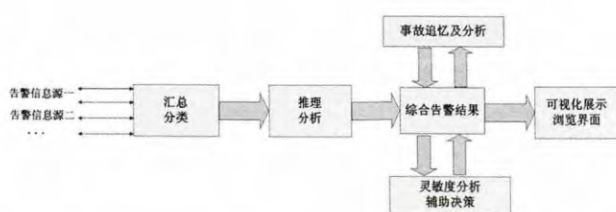


图1 综合智能可视化告警结构框架

1.2 关键技术

1.2.1 应用告警智能合并

对于一次电网故障,多个告警源将各自的告警信息发送给综合智能可视化告警,按照故障时间和设备关联情况进行合并处理,提供给调度运行人员一条综合告警信息,内容涵盖了各应用发送的告警内容。

合并处理功能支持同一线路的交流线段与交流线段端点的合并、直流系统两侧换流器的合并、设备(发电机、母线、变压器、线路)与相关开关的合并等。合并过程中,按各应用的优先级更新综合告警

信息中的故障描述、发生时间、故障性质、故障相别等,保证了综合信息的完整性和正确性。例如:电网发生母线跳闸故障,系统原来的告警方式是将所有与母线相连开关的遥信变位、SOE、保护动作信号等诸多告警信息罗列展示。而该应用依据故障时间、拓扑关联、信号优先级,实现了设备与开关的合并,即只推送一条告警信息:X母线故障跳闸。

1.2.2 关联事件智能推理

当电网发生故障时,每个应用系统都能从不同角度检测到电网的变化^[6],然后将其中的异常情况用告警的方式发送到综合智能可视化告警,主要是设备故障、系统异常、系统故障类告警。

通过共享系统平台和基础应用提供的公用模型、数据等信息,基于离散告警事件的推理,可对同一段时间内不同告警事件综合归纳,根据各个告警事件的关联信息,如开关遥信变位、事故总和相关保护信号,进行综合分析判断,验证出是否发生故障。

1.2.3 告警规则智能筛选

根据同一个时间段内各个应用对电网故障描述的一致性程度和每个应用对各类故障的不同敏感度,提供告警信息规则库,用于存放告警信息处理分析的规则和各个告警源的可信度及可信度限值。

以稳态监控、WAMS扰动识别、二次设备在线监视与分析、变电站集中监控等应用的数据作为判断依据,计算综合告警的可信度数值,如果结果大于阈值,认为可信,推出告警;否则,认为不可信,存储到商用数据库中,从而实现对电网故障的准确告警。

1.2.4 告警触发智能联动

传统的调度自动化系统各应用模块之间的关联性较弱,通常以固定周期进行分析、计算。综合智能分析与告警实现了在电网故障时,各个应用模块之间的智能联动。某类事件发生时,通过控制序列的方式启动关联应用模块,及时触发相关分析计算,为下一步决策提供可靠依据。

1.2.5 告警信息统一智能展示

汇集和分析处理各类告警信息,并进行分类管理,对不同需求形成不同的告警显示方案,从故障信息中分析出诸如故障类型、设备、位置等准确信息,利用形象直观的方式提供全面综合的告警提示。

1.3 可视化智能告警展示

基于统一的可视化平台^[7],综合展示电网稳态、动态、暂态安全的监视、分析、预警和智能辅助决

策信息。以基于地理信息的全景潮流图为基础,以厂站图、表格图、树状图、曲线图等画面为补充,以闪烁、高亮、区域等高线、饼图等可视化效果为手段,全方位、多层次展现告警结果及相关信息。可视化智能告警界面主要由全景地理图、设备的状态及主要量测值,以及各告警源的详细信息组成。设备故障类告警主要包括发电机、母线、变压器和线路的事故跳闸。

以线路故障跳闸告警界面为例,主画面为已定位到故障位置的电网动态全景地理潮流图。利用挂牌、闪烁、高亮、区域等高线等可视化手段,清晰展现告警发生的地理位置。

左上方为综合告警信息,包括故障设备名称、故障时间、故障相别、故障性质等信息,显示内容与该条告警的数据来源有关,如果该条告警只有稳态监控一个来源,则故障相别、性质、测距等信息不会显示。

左下方为各个告警源发送的告警详细信息,包括来自稳态监控的遥信、SOE信息,WAMS在线扰动识别信息,以及二次设备在线监视的保护简报。来自不同应用的告警信息内容不同,可以进行的操作也不同。动态监视的告警信息可以调用故障设备的PMU曲线;录波的告警信息显示录波简报内容,并可以调用录波曲线;告警直传显示变电站侧故障告警信息。

通过左下方的标签页,可以切换到关联告警和调度策略页面,关联告警页面显示与该故障相关的越限信息和突变信息,调度策略页面显示针对该故障的灵敏度分析结果。右下方包括故障前后的系统潮流变化分析,以及故障厂站主接线图。

2 WAMS在线扰动识别

将WAMS应用机组跳闸、线路短路等告警信息实时传送给综合智能可视化告警模块,基于动态数据变化特征故障诊断技术,不断优化完善告警策略及参数设置,实现对故障相别和重合闸动作的准确判断,提高了电网一次设备的故障识别告警正确率,有效提升了WAMS系统实用化水平。

WAMS在线扰动识别功能对PMU采集的实时动态数据进行特征提取,与表征不同扰动类型的特征进行匹配,以确定电网发生的扰动并告警^[8]。

2.1 短路扰动识别

短路扰动识别根据PMU量测的三相电压和三相电流相量,提取表征短路扰动的特征信息,对短路故障的类型、相别、重合闸类型、重合成功与否等信息进行在线识别,并发出告警。

曲线特征法,包括以下3个必要条件:

- 1) 故障前电压、电流均处于正常数值范围;
- 2) 发生故障时有较大冲击电流且大于阈值;
- 3) 短路期间有电流归零,电压较正常运行时有明显降低。

2.2 重合闸识别

传统EMS系统只能获取开关和保护装置动作状态,WAMS在线短路扰动能推断短路的时间、相别、重合闸类型以及成功与否,帮助调度员及时了解开关动作的原因及故障状态,从而辅助调度员做出正确的安全稳定控制决策。

2.2.1 重合闸相别

1) 单相重合闸单相短路故障,故障相有低电流,其他相无低电流。

2) 三相重合闸:单相短路故障,故障相和其他相均有低电流。两相或三相短路故障,故障相有低电流。

2.2.2 重合闸动作情况

1) 未重合闸:故障相无正常负荷电流,且未出现电流突变。

2) 重合闸成功:故障相有正常负荷电流,且未再次出现电流突变。

3) 重合闸失败:故障相有正常负荷电流,且再次出现电流突变。

2.3 机组出线跳闸识别

机组出线跳闸识别根据PMU量测的机组电流相量、有功功率,监视机组停机情况,并区分故障跳闸停机和和其他停机情况,对故障跳闸情况发出告警,主要包括以下功能:

- 1) 识别发电机停运情况;
- 2) 通过有功功率变化过程判断机组停机是否属于出线跳闸引起的停机;
- 3) 对可能产生的电磁感应导致的电流残值进行过滤,避免因残值造成发电机停机误判;
- 4) 触发长期保存故障时刻历史数据。

本功能使调度人员及时掌握由于线路跳闸引起的发电机非正常停机故障,从而采取合理的电网控

制措施。

3 PMU 动态数据质量

同步相量测量装置(PMU)具有毫秒级的数据刷新率且全网同步,可直接获得表征电网同步运行特征的相角信息,成为大区互联电网动态过程监测、分析的基础,在电力系统得到广泛应用与推广^[9],是 WAMS 应用分析、预警的基础。

目前,四川电网共接入 PMU 子站 132 个,设备投运时间小于 3 年占 53.4%、3~5 年占 39%、6~10 年占 7.6%。运行中主要存在信息接入不完整、设备命名不规范、TA 变比等配置参数不正确、回路接线错误、时钟对时异常等问题,严重影响电网动态数据质量,因此关于 PMU 装置动态行为规律及其性能评估的研究尤为重要。

为确保 PMU 信息及时、准确、可靠地反映电网运行状态,提出了同步相量测量装置(PMU)现场检验方案,规范 PMU 信息的接入,核查 PMU 量测数据的完整性和正确性,全面检查配置参数、测量回路接线、通信表及转换系数等内容,确保电网运行动态数据的可靠采集和使用。

3.1 现场检验范围

同步相量测量装置(PMU)数据集中处理器、采集单元、对时设备、网络设备及通信链路、装置测量回路接线等。

3.2 现场检验项目

从时钟同步性、光纤通信链路、以太网通信链路及内网交换机、二次回路、PMU 设备功能、静态精度、装置接线、信息配置和定值整定等方面,对 PMU 装置及其测量数据进行质量分析,重点对 PMU 装置运行稳定性、对时准确性、数据通信可靠性进行分析,发现问题及时整改。

现场检验需要进行的试验项目如表 1 所示。

3.3 关于 PMU 时钟同步问题的探索

以协调世界时间或世界标准时间(UTC)为基准进行同步采样并转换而得的相量称为同步相量。电网同步相量之间的相位关系反映了电网相应交流电气量的实际相位关系,因此 PMU 装置时标的准确性非常重要^[10]。

目前,智能变电站 PMU 装置^[11]采用站端统一时钟同步系统 IRIG-B 码等单向时间信号提供的

同步信息,因此验证 PMU 装置时间信号的准确度、精度和稳定度是确保动态数据可靠性的重要基础^[12]。

表 1 PMU 现场检验测试内容

序号	测试内容
1	外观检查
2	时钟同步性检查
3	光纤通信链路检查
4	电压回路检测
5	电流回路检测
6	电源回路检测
7	直流输入量回路检测
8	通道配置功能检查
9	实时记录功能检查
10	触发录波功能检查
11	离线数据召唤功能检查
12	静态精度测试
13	信息配置和定值整定检查
14	现场和主站系统联调

下一步工作中将深入研究 PMU 装置时间同步监测功能技术要求,实现时钟接口状态、对时服务状态、时间跳变侦测状态等的在线监测,切实提高电网动态监视基础数据水平。

4 结 论

智能电网调度控制系统是电网运行监视与控制的重要技术支撑平台,该系统包含 52 个应用模块,电网设备故障时不同应用推送出大量的告警或分析信息,对调度员造成困扰。所提出的综合智能告警功能为各个监视和分析应用提供统一集中的信息输出接口,有效整合、挖掘电网设备故障信息,并以可视化智能告警方式准确定位故障。WAMS 应用作为重要告警源,通过优化在线扰动策略,提升 PMU 装置动态数据质量等方式,实现对故障相别和重合闸动作的准确判断,并推送至综合智能告警,直观表达核心故障。目前,该成果已成功应用于国网四川省电力公司电力调度控制中心,实现了 220 kV 及以上电网故障告警向华中分中心实时推送的功能,为调度安全生产提供了灵活坚强的技术保障。

参考文献

- [1] 刘俊勇,沈晓东,田立峰,等. 智能电网下可视化技术的展望[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 7-13.
- [2] 段刚,杨东,吴京涛,等. 综合智能电力系统动态监视平台及其应用[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(2): 21-26.
- [3] 周宏,李强,林涛,等. 基于 WAMS 量测数据的电网扰动和操作类型识别[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 7-11.
- [4] 张晓莉,周泽昕,张道农,等. 同步相量测量装置的测试与评估[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(2): 31-36.
- [5] 杨洪耕,明娇,代海波. 地区电网智能告警系统的实现[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(2): 105-109.
- [6] 王尔玺,童渊,关杰. 上海电网调度智能告警应用研究[J]. 华东电力, 2012, 40(5): 779-782.
- [7] 沈国辉,孙丽卿,游大宁,等. 智能调度系统信息综合

可视化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 129-134.

- [8] 宋晓娜,毕天姝,吴京涛,等. 基于 WAMS 的电网扰动识别方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 24-28.
- [9] 毕天姝,刘灏,杨奇逊. PMU 算法动态性能及其测试系统[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 62-67.
- [10] 贺春,任春梅. 相量测量单元综合矢量误差指标分析[J]. 电力系统自动化, 2012(4): 110-113.
- [11] 许勇,张道农,于跃海,等. 智能变电站 PMU 装置研究[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(2): 37-43.
- [12] 童旭,王珮璐,孙雅平. 智能变电站时间同步系统在线监测技术的研究[J]. 华东电力, 2012, 40(12): 2184-2186.

作者简介:

温丽丽(1982),硕士,从事电网调度自动化工作;

赵 静(1982),博士,从事电网调度自动化工作;

郭 亮(1982),硕士,从事电网调度自动化工作。

(收稿日期:2015-08-14)

(上接第 46 页)

光纤温度传感器安装在开关柜内的高压设备上,实现对高压设备运行温度的准确测量;然而,光纤具有易折、易断、不耐高温等弱点,要在结构紧凑的开关柜内布线难度较大,若光纤运行时间久积累灰尘后导致光纤沿面放电,有引起开关柜发生内部短路的危险。此外,光纤测温系统配置元件成本较高,系统投资相对较大。

4) 无线测温:无线测温是最近几年开始推广的测温方法,它也是一种直接接触测温法。采用将感知温度的测温元件——温度传感器紧贴在被测物体表面,与被测物体为高电位工作,接收模块处于低电位工作,两者之间采用无线通讯传输数据,两者之间彻底物理隔离,绝缘水平满足规程要求。传感器安装简便、方案可行,且不会破坏原开关柜结构(如解体开关柜部件、在母线上打孔等),不会影响原开关柜性能(如绝缘水平、安全距离、动稳定性、热稳定性、散热功能等)。目前,国内已广泛采用无源无线测温,无源无线测温系统采用的传感器无需电池(电源)驱动,从而提高了系统的可靠性、安全性,由于无需考虑功耗,因此在数据提取频次上也可不受限制,可以实现不间断在线监测;同时没有了电池更换带来的维护成本和停电损失,保证了对外供电可靠性不受影响。无源无线温度传感器自身体积小,可根据需要制成多种样式,因此传感器可以不受封闭式开关柜紧凑结构的影响,能够方便地安装在开关柜母线 T 接点、断路器手车触头等狭小的电气节点中,直接接触设备测试其温度,因而其测量精度较高。

2.3 小 结

通过上述分析,不难看出,采用无线传感器技术的无线测温法在安全性、可靠性、环境适应能力强等方面拥有其他测温法无法比拟的优点。特别是近年基于声表面波技术的无源无线测温技术的发展,无线测温技术可以在高压开关柜内高电压、大电流、强磁场的环境下实现对触头的高精度、高稳定性的测量;且易于构成分布式测温系统对所有触头、引线等温度点进行实时在线式监测,因此是更加适合封闭式高压开关柜温度监测的技术手段。

3 结 论

造成封闭式高压开关柜过热的原因很多,通过加装无线测温装置等技术手段,实时掌控开关柜内部元件特别是手车触头等元器件结合部的温度状况,提前发现封闭式高压开关柜的过热异常状况;提前采取检修措施,对防范过热故障导致封闭式开关柜损毁等事故发生,保证电网安全稳定运行具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 许伟琳. 高压开关柜的故障类型及其处理措施初探[J]. 科技资讯, 2010(27): 39-41.
- [2] 尚丽. 电气设备接头发热原因的分析及处理[J]. 大众用电, 2002(10): 26-27.
- [3] 许一声,顾霓鸿. 高压开关柜触头温度在线检测仪[J]. 高压电器, 2005, 41(2): 139-140.

(收稿日期:2015-07-31)

基于自适应 FCM 算法的智能母线负荷聚类特性研究

吴茵¹ 岳菁鹏² 罗欣² 杨小卫¹

(1. 广西电网公司, 广西南宁 530023; 2. 北京清软创新科技有限公司, 北京 100085)

摘要: 随着新一轮的科技革新和电力体制改革的不断深入, 电力调度的智能化和工作精细化的要求不断提高。以母线负荷数据的有效信息提取和应用为主线, 结合广西省母线负荷数据, 基于自适应 FCM 算法对区域电网母线建立聚类 C 模型, 从而针对不同母线的负荷特征进行分析, 为精确的负荷预测提供了一种新思路 and 算法参考。

关键词: 自适应 FCM 算法; 母线聚类; 负荷预测

Abstract: With a new round of technological innovation and the deepening of power system reform, the requirements for intelligent and refined power dispatching continue to increase. Taking the effective information extraction and application of bus load data as the main line and combined with the bus load data of Guangxi province, the C model of regional power grid is established based on adaptive FCM algorithm, and then the load characteristics of different buses are analyzed. It provides a new idea and algorithm reference for the accurate load forecasting.

Key words: adaptive FCM algorithm; bus clustering; load forecasting

中图分类号: TM76 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-0068-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.016

0 引言

广西电网地处“西电东送”主要通道的中部位置, 是南方电网的重要组成部分。广西电网供电面积达到 23.67 万平方公里, 供电服务人口 5 200 多万人, 供电客户数 960 多万户。广西省母线数量庞大, 覆盖面广, 母线种类错综复杂; 对于其特性也较难把握, 导致母线负荷预测难度较大, 而精确的母线负荷预测可以提高电网智能化调度水平, 所以做好负荷分类与特性分析工作是提高负荷预测的根本和前提条件。

目前母线负荷预测主要有两大类方法: 一类是基于母线负荷自身变化规律的预测方法。这类方法全网负荷的分析相似, 根据母线负荷自身的变化规律, 用全网预测的某些方法进行负荷预测; 但由于母线符合的波动性和不稳定性, 用此种方法预测可能会产生较大误差。另一类是基于系统负荷分配的预测方法, 该方法首先取得全网某一时刻的预测值, 然后按照一定的比例因子将其分配到每一条母线上。此方法便捷易用, 但缺少独立的母线负荷规律性分析和预测手段^[1-2]。

电网中母线数目众多, 各个母线负荷具有不规

律波动性和变化模式复杂性等特点, 提高母线预测精度的途径之一是通过不同的母线特征进行分析, 研究自适应策略。利用自适应 FCM 算法找到科学合理的母线聚类数 C , 将区域电网母线进行分类, 进而对不同的母线负荷特征进行分析, 为进一步精确快速的母线负荷预测提供了有效算法。

1 母线负荷模型与数据

母线负荷建模即构建母线负荷对象, 基本模型一般为树状结构, 可以描述为分区、厂、母线负荷的层级关系, 其定义依据源自 EMS 电网模型。母线负荷模型可以通过电网模型中的负荷组定义、主变压器端点定义或者线路端点定义进行创建^[5]。如图 1 采用的母线负荷分层树状结构中, 第一层为系统负荷, 第二层为区域负荷, 第三层为变电站负荷, 第四层为母线负荷。

母线负荷在数据统计上可以关联到电力元件测量值, 采用状态估计或 SCADA 数据作为数据源, 通常情况下针对日 96 点(每 15 min 一点)的有功和无功负荷进行统计和预测。其中单母线负荷在时段的相对误差为

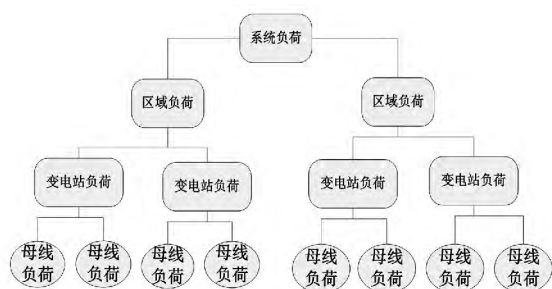


图 1 母线负荷分层树状结构图

$$\frac{|i. \text{时段预测值} - i. \text{时段实际值}|}{i. \text{时段负荷基准值}} \times 100\% \quad (1)$$

平均日母线负荷预测准确率

$$\left(1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N A_k^2}\right) \times 100\% \quad (2)$$

2 自适应 FCM 算法思想及关键技术

2.1 自适应 FCM 算法

FCM 算法是基于聚类的划分算法,其思想是认为同一类的分析对象相似度最大,不同类之间相似度最小。用普通 FCM 算法可以对数据集进行有效聚类,但聚类数需事先人为给出,聚类的“好坏”需进行有效验证。

将 FCM 算法和自适应方法进行结合,在数据划分上采用柔性模糊划分,数据分类时尽可能将类间距离增大,而同类的数据点距离减小,下面给出自适应 FCM 算法的具体函数。

总体样本的中心量为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m x_j}{n} \quad (3)$$

聚类数 C 的自适应函数为

$$L_{(C)} = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m \|v_i - \bar{x}\|^2 / (c-1)}{\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m \|x_j - v_i\|^2 / (n-c)} \quad (4)$$

式中 $L_{(C)}$ 的分子表示类与类之间的距离,分母表示类内数据点与该类中心之间的距离,因此 $L_{(C)}$ 的值越大,说明分类越合理,对应 $L_{(C)}$ 值最大的 C 为最佳值。

2.2 自适应 FCM 算法步骤及实现

2.2.1 自适应 FCM 算法的具体步骤

首先初始化:给出迭代标准 $\varepsilon > 0$,聚类数 $C = 2$,聚类数 1 的自适应函数 $L_{(1)} = 0$,初始分类矩阵 $V^{(0)}$, $K=0$ 。

1) 用式(3)计算 $U^{(K)}$

$$u_{ij}^{(k)} = \frac{1}{\sum_{r=1}^c \left(\frac{d_{ij}^{(k)}}{d_{ij}^{(r)}} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (5)$$

如果存在 j, r , 使得 $d_{ij}^{(k)} = 0$, 则令: $u_{ij}^{(k)} = 1$ 。

2) 用式(4)计算 $V^{(K+1)}$

$$v_i^{(k+1)} = \frac{\sum_{j=1}^n (u_{ij}^{(k)})^m x_j}{\sum_{j=1}^n (u_{ij}^{(k)})^{(m)}} \quad (6)$$

3) 用一个矩阵范数 $\|\cdot\|$ 比较 $V(K+1)$ 与 $V(K)$, 若 $\|V(K+1) - V(K)\| \leq \varepsilon$, 则停止迭代, 否则, 置 $k = k+1$, 转向步骤 1)。

4) 计算 $L_{(C)}$, 在 $c > 2$ 并且 $c < 2$ 的情况下, 若 $L_{(c-1)} > L_{(c-2)}$ 并且 $L_{(c-1)} > L_{(c)}$, 则聚类过程结束, 否则, 置 $c = c+1$, 转向步骤 1)。

FCM 算法基于局部寻找点最小, 故只需要在局部数据比较 $L_{(C)}$ 。

2.2.2 系统实现

系统根据离线的历史负荷数据来独立操作来完成自适应网络训练。自适应系统应具备按照外部环境的变化进行调整和自身不断学习的能力。通过循环训练过程以找到一套合理的预测参数和聚类数 C , 将负荷进行分类后进行预测, 其效果明显优于固定参数估计的方法。

自适应 FCM 预测技术是采用反馈型的预测思路, 把得到合理的预测参数作为自适应过程得到的模型参数, 用于未来时间的母线负荷预测, 这个过程构成了预测行为的闭环和反馈。

主要实现过程如图 2。

由于母线节点数量多, 预测参数及模型组合复杂等原因, 基于自适应机制实现的母线负荷预测计算量和实现难度较大, 其中自适应预测天数、母线的数量、母线的梳理预测模型库中模型的数量、参数优化组合、各模型参数的数量等因素决定了预测计算量的大小, 并且随着预测节点的增加自适应训练的计算量也会成倍增长。因此只有借助计算机软件平台才能完成如此大的计算量, 且应在负荷较轻的时间段完成训练。

3 应用算例分析

选取广西省某区域电网 120 条 220 kV 母线的

96 点负荷为观测样本 ,利用 Matlab 进行 FCM 聚类分析。目标函数在循环 68 次后收敛 ,选择的聚类数 C 为 2 类 ,图 3 列出了两种类型的负荷聚类曲线。



图 2 系统实现流程

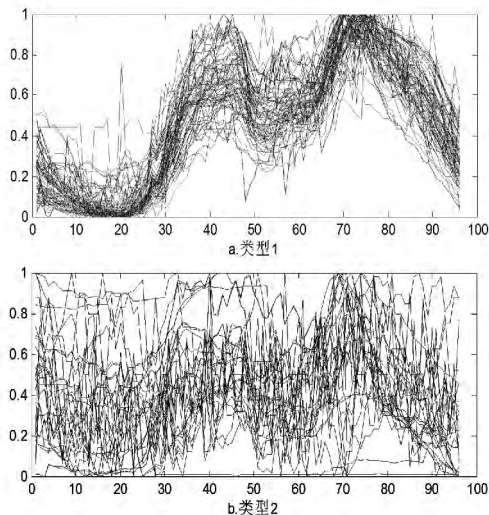


图 3 220 kV 母线 96 点负荷聚类图

表 1 将两种类型进行了统计 ,具体统计如下。

表 1 母线分类情况统计表

	类型 1	类型 2
120 条	88 条	32 条
平均日负荷率	0.6	0.42
平均日峰谷差率	0.8	0.35

由表 1 可知 ,本区域母线负荷大多为类型 1 ,为 88 条 ,占总母线数量比为 73.3% ,类型 2 有 32 条 ,占总量的 26.7% 。

由表 1 还可知 ,类型 1 的平均日负荷率达到 0.6 ,负荷曲线在 0 到 30 点为较低值 ,在 65 到 85 点为较

最高 ,同时平均峰谷差为 0.8 ,可以判断类型 1 受时间的影响较大 ,应以民用电为主。类型 2 的平均日负荷率为 0.42 ,且平均日峰谷差率为 0.35 ,可以判断应以连续生产或三班倒的企业为主 ,受时间的影响较小。在电网运行中的一项基本原则是 ,尽量提高负荷率、降低峰谷差。根据聚类后母线负荷特性的分析结果 ,可以对突变较大的负荷采取有效方法来应对峰谷差 ,进行“削峰平谷” ,使供电企业有较好的经济性能及有利于电网的稳定安全运行。

基于以上结果 ,对同一或相似区域电网母线或进行负荷预测时 ,可将此区域电网负荷与已经聚类好母线进行对比 ,由于不同类型母线影响其负荷的因素不同 ,在对母线特征进行综合分析后 ,选择成熟的有针对性的方法进行预测 ,也可以有效提高母线负荷预测速度和准确度。

4 结 论

针对广西省某一区域电网母线数量多、不规律波动及模式多样性的特点 ,通过自适应 FCM 算法对母线进行聚类 ,根据聚类的结果对日负荷率和峰谷差率进行分析。根据实例仿真 ,算法可以完成对该区域母线负荷较科学的分类 ,在下一步进行预测中根据不同的母线类型分别进行负荷预测 ,提高了预测速度和精度。对广西地区母线负荷类型具有针对性的掌控 ,同时也为进一步建设“无人值守”的预测机制和智能化母线负荷预测平台提供了参考。

参考文献

[1] 康重庆,夏清,刘梅. 电力系统负荷预测[M]. 北京: 中国电力出版社,2007.

[2] Espinoza M , Joye C , Belmans R , et al . Short - term Load Forecasting Profile Identification and Customer Segmentation: A Methodology Based on Periodic Time Series [J]. IEEE Trans on Power Systems ,2005 20(3) :1622 - 1630.

[3] 廖峰. 220 kV 母线负荷特性缝隙及其预测的研究[D]. 长沙: 湖南大学 2012.

[4] 李光珍. 电网短期母线负荷数据预处理及预测模型研究[D]. 保定: 华北电力大学 2009.

[5] 赵燃,康重庆,刘梅,等. 面向节能发电调度的母线负荷预测平台[J]. 中国电力 ,2009 42(6) : 32 - 36.

[6] 牛东晓 ,曹树华 ,卢建昌 ,等. 电力负荷预测技术及其

应用(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2009.

[7] 陈小平. 母线负荷预测的实用算法[J]. 四川电力技术, 2012, 35(1): 66-68.

[8] 高峰,康重庆,程旭. 短期负荷预测相关因素的自适应训练[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(18): 6-10.

作者简介:

吴茵(1979), 硕士, 高级工程师, 主要从事电网运行方式策划管理工作;

杨小卫(1982), 硕士, 高级工程师, 主要从事电网调度运行管理工作;

岳菁鹏(1985), 硕士, 助理工程师, 主要研究电网负荷预测、分布式发电等;

罗欣(1983), 硕士, 工程师, 主要研究电力市场分析、电网负荷预测等。

(收稿日期: 2015-07-06)

(上接第 62 页)

也得到显著改善。

表 1 瀑布沟电站计划电量完成率

日期	策略执行前(2014 年)			策略执行后(2015 年)		
	计划 电量 /MW	实发 电量 /MW	电量 完成率 /%	计划 电量 /MW	实发 电量 /MW	电量 完成率 /%
3/1	21 100	26 142	123.9	14 000	14 056	100.4
3/2	17 250	24 844	144	14 000	15 513	110.8
3/3	20 200	26 109	129.3	14 000	13 914	99.4
3/4	21 350	18 468	86.5	14 000	17 263	123.3
3/5	16 700	25 926	155.2	17 175	16 041	93.4
3/6	19 800	17 503	88.4	16 025	14 189	88.5
3/7	18 700	22 499	120.3	15 325	18 374	120

CPS1 指标体现了控制区域对互联电网频率质量贡献的大小,该策略执行前后相邻年份某同一月份的 CPS1 日平均值对比情况如图 5 所示。从图中 CPS1 曲线可以看出,启用新策略后四川电网 CPS1 考核指标亦有所改善。

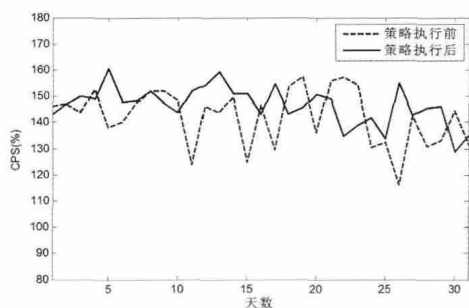


图 5 CPS1 日平均值曲线对比

4 结 语

AGC 应用作为电网实时控制的重要环节,承担着安全稳定运行、频率稳定和联络线、电量考核的重

要职责。从机组有功控制模式着手,探索实时发电计划与 AGC 闭环控制策略,并阐述了 AGC 控制模式切换方案及多工况下模式切换策略,通过备用在不同控制模式机组间相互转移,促进不同控制模式机组调节备用的合理分布,降低了机组整体调节成本。

参考文献

- [1] 张伯明,吴文传,郑太一,等. 消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 1-6.
- [2] 周劭英,张伯明,尚金成,等. 河南电网实时调度系统若干功能与算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 99-104.
- [3] 滕贤亮,高宗和,张小白,等. 有功调度超前控制和在线水火电协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22): 16-20.
- [4] 李予州,张伯明,吴文传,等. 在线有功调度协调控制系统的研究与开发[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 12-16.
- [5] 徐帆,丁怡,谢丽荣,等. 实时发电计划闭环控制模型与应用[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3187-3192.
- [6] 邓勇,朱泽磊,黄文英,等. 日内及实时发电计划的递进协调方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 141-146.

作者简介:

周剑(1972), 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能电网调度控制;

于昌海(1987), 硕士, 工程师, 研究方向为电网调度自动化、新能源协调控制;

吴继平(1984), 硕士, 工程师, 研究方向为智能电网调度自动;

滕贤亮(1978), 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网调度自动化、新能源运行控制。

(收稿日期: 2015-08-10)

基于 K-means 聚类算法的风电场 机群划分方法

徐立亮¹, 胡仁祥¹, 张毅¹, 常喜强², 闫亚东¹

(1. 国网吐鲁番供电公司 新疆 吐鲁番 838000;

2. 国网新疆电力调度通信中心 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 针对风电场动态等值建模的难题,采用 K-means 聚类算法,探讨了风电场机群划分问题,致力于达到风电场并网运行点特性的一致性。为减小等值算法带来的误差,在风力机功率转换特性不变的前提下,采取只对同一机型的风电场进行等值划分的方式来完成。并以某实际风电场为例进行算例仿真,结果表明,等值前后风电场并网运行点特性保持一致,等值算法能够准确反映风电场机组的动态响应特性。

关键词: 聚类算法; 风电场; 等值参数; 等值模型

Abstract: For the problem of dynamic equivalent modeling for wind farms, K-means clustering algorithm is adopted, and the partitioning issues of wind turbine grouping are discussed, which is devoted to achieve the consistency for the characteristics of parallel operation point of wind farms. For reducing the error brought by the equivalent algorithm, and on the premise that the power conversion characteristics of wind turbine are unchanged, it completes equivalence partitioning only on the same type of wind farms. And the example simulation is carried out taking an actual wind farm for example. The results show that the characteristics of parallel operation point consist with each other before and after the equivalence of wind farms, so the equivalent algorithm can accurately reflect the dynamic response characteristics of wind turbines in wind farms.

Key words: clustering algorithm; wind farm; equivalent parameters; equivalent model

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-0072-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.017

0 引言

随着能源紧缺和空气污染指数不断上升,风电等新能源的大力发展已成为社会发展的必然趋势。但由于风能等清洁能源受约于空气稀薄因素的影响,呈现出间歇、突变的特性,致使风电不能快速发展。同时,风机在运转的过程中受制于地理位置的约束,一般表现出不同的出力特性。而对于实际的风电场并网分析过程,在计算精度最高化的指标限制下,如对每台风电机组均采用详细的模型进行建模仿真,显然会增加数据的规模,致使计算难以继续。正是在这种背景下,提出风电场等值算法,为准确分析大容量风电场对电力系统稳定运行的影响提供方法,对含风电等新能源的电力系统仿真分析具有一定的理论参考价值。

近年来,国内外学者对风电场等值问题进行了诸多研究,均是采取将整个风电场等风速的理论,在

前人的分析过程中无一对大型风电场进行分区计算^[1-2]。文献[3]对近年在风电场等值方面的研究进行了总结,在各种方法研究的基础上采用了最小二乘法对风电场等值过程中的参数进行优化。文献[4]在考虑风电机组的运行方式和机组类型的前提下应用潮流计算的方法对同时含有双馈风机与直驱风机的风电场进行等值计算。文献[5]对风电场等值方法进行了阐述,在等值的过程中仅依据风机捕获风速的不同而进行分群,并没有考虑风电机组阻抗等内部因素的等值。文献[6]在风电场开机方式和单机运行点改变时,对风电机组及并网区域系统的相互影响进行研究,从而达到简化等值模型的目的。风电场的等值计算,其本质是在整个风电场有功功率不变的前提下进行的,而传统的等值计算过程都是利用某台风机在实测风速下的功率乘以该风电场风电机组的台数来近似表示此风电场的实际出力,显然在计算的过程中并没有考虑到地理位置的差异性,从而忽略了各区域风速的变化。因此,严格来讲

此处风电机组的计算风速并非实测风速,根本无法达到从源头消除误差的目的。

针对此风电场等值建模的难题,提出基于 K-means 聚类算法的风电场机群划分方法。其中,在对风电场进行等值计算时,为了追求计算速率,同时保证计算结果的准确性,采取对风电场中同一类型的风电机组进行等值计算的策略。另外,出于精度最优化的考虑,在实际的等值计算中,采取从当地的风资源分布情况、风电场等值机群的划分及风电场内部的电网参数等三方面进行等值划分^[7-8]。最后,为了验证等值计算的准确性,应用电力系统综合程序 PSASP 对某典型地区的风电场进行详细模型的搭建,并应用聚类算法对该风电场进行等值建模,希望通过两种建模方式的对比,对一些参数分析调整,得到一组适应于风电场不同运行状态时的一组等值参数,为以后的风电场计算提供一定的捷径。

1 风电场机组的聚类方法

1.1 风电机组的运行区域划分

风电机组的机械功率输出方程为

$$P_m = 0.5\rho\pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

由于自然风在利用的过程中并不能完全转化为可用的机械能,引入风能利用系数 C_p 表征风能的捕获效率,其随叶尖速比、桨距角的变化曲线如图 1 所示。

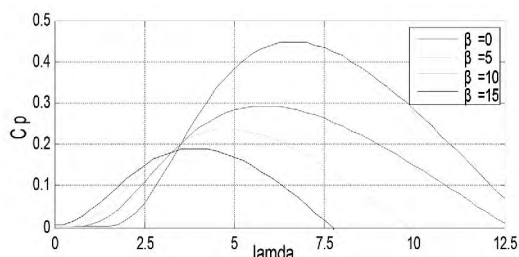


图 1 风能利用系数图

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_1} - 0.4\beta - 5 \right) \cdot e^{-\frac{12.5}{\lambda_1}} \quad (2)$$

式中:

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

λ 为叶尖速比; β 为桨距角。

风电机组在运行的过程中,受本身机械强度以及电力电子器件容量的制约,风电机组在运行过程中受的功率与转速的可以分为以下 4 个运行区域。在运行过程中功率—风速曲线如图 2 所示。图 2

中, V_{in} 是切入风速, V_r 是额定风速, V_{out} 是切出风速。

由图 2 可以看出风力发电机运行在 4 个区域中。

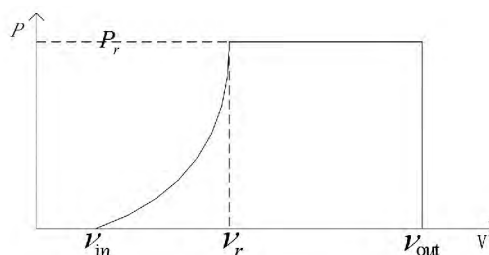


图 2 风机输出功率与风速的关系

1) 当风速 $V < V_{in}$ 时,风机不能正常启动产生能量。

2) 当风速 V 满足 $V_{in} \leq V < V_r$ 时,风机输出功率随着风速的增加而呈现出大幅上升的趋势。在此阶段一直处于最大功率跟踪运行中,风能利用系数一直处于最大值,叶尖速比也处于最佳状态,即 $C_p(\lambda, \beta)$ 已经处于定值,输出功率只随风速 V 的改变而变化。

3) 当风速 V 满足 $V_r \leq V < V_{out}$ 时,功率保持在额定功率 P_r ,不随时间的变化而发生变化。当运行当此阶段时输出功率已经达到了最大值,为了保护设备以及处于安全性的考虑,随着风速的增加,桨距角开始动作使得风力机功率保持在额定功率。

4) 当风速 $V > V_{out}$ 时,为了保障风机的安全运行,此时转换的功率为 0 即风机停止运行。

1.2 聚类算法

聚类算法又称为群分析法,是统计学中研究分类问题的方法之一。K-means 算法是基于欧氏距离的聚类算法,在计算过程中应用欧氏距离作为相似度的评价指标。该算法的具体计算过程如下^[1]:

- 1) 选取 K 个对象作为初始聚类的中心;
- 2) 每个对象代表一个簇的初始平均值,将剩余的对象划分到对应距离最近的初始簇中;
- 3) 循环步骤 2) 在迭代的过程中若第 n 次测量函数的值与第 $n-1$ 次迭代相同,表明已达到迭代目的,迭代终止。

2 风电机组动态参数聚合

2.1 风力机及控制参数等值^[9-11]

所用的风力机都是同种型号的,故每个风力机的内部构建都是相同的。整个风电场的风速模型可以定义为

$$v = \sqrt[3]{\sum v_i^3 / n} \quad (3)$$

式中 v_i 表示每台风机所捕获到的风速; n 表示风电场中风机的台数; v 表示等效后风电场的风速。

将风电场的扫风面积近似等效为各个风机扫风面积的求和得

$$A = \sum A_i \quad (4)$$

在等值的过程中,为了保证整个风电场在等效模型与详细模型下的输出功率一致性,将风力机的转速等效模型定义为

$$\omega = \sqrt[3]{\sum \omega_i^3 / n} \quad (5)$$

可以求出等值后的叶尖速比

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} = \frac{\sqrt[3]{\sum \omega_i^3 / n R}}{\sqrt[3]{\sum v_i^3 / n}} \quad (6)$$

由以上的分析可以看出等值后的风力机与风力机群中每台风力机的最佳叶尖速比是相同的。被等值机群风力机机械之和为

$$\begin{aligned} \sum P_{mi} &= \frac{1}{2} \rho A_i R^3 \sum \omega_i^3 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda^3} \\ &= \frac{1}{2} \rho A R^3 \frac{1}{n} \sum \omega_i^3 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda^3} \end{aligned} \quad (7)$$

由于等值是针对距离比较相近的风力机组进行计算的,它们都是通过同一根母线并网的,等值风电场的容量、有功功率以及无功功率等参数都可以直接用各个风电机群的相关参数求和的形式表示。

2.2 风电场模型等值参数计算^[12]

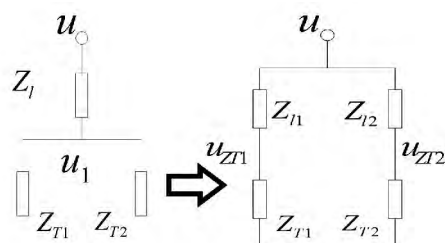


图3 风电场内部电网变换图

在风电场等值电路的计算中,需保持变换前后端子的端电压恒定不变。

为了使端电压保持不变,在变换的过程中应该满足等式:

$$u_1 = u_{ZT1} = u_{ZT2} \quad (8)$$

有恒等式:

$$\frac{u(Z_{T1} // Z_{T2})}{Z_l + Z_{T1} // Z_{T2}} = u \frac{Z_{T1}}{Z_{l1} + Z_{T1}} = u \frac{Z_{T2}}{Z_{l1} + Z_{T1}} \quad (9)$$

$$Z_{l1} = \frac{Z_{T1} Z_{T2}}{Z_{T1} // Z_{T2}} \quad (10)$$

$$Z_{l2} = \frac{Z_{T2} Z_{l1}}{Z_{T1} // Z_{T2}} \quad (11)$$

为了使实际风电场内部接线图简化的方便,将同一机群中相同的阻抗值用 $Z_{l1}, Z_{l2}, \dots, Z_{ln}; Z_{T1}, Z_{T2}, \dots, Z_{T(n+1)}$ 两组不同的参数表示。风电场实际内部接线图如图4所示。

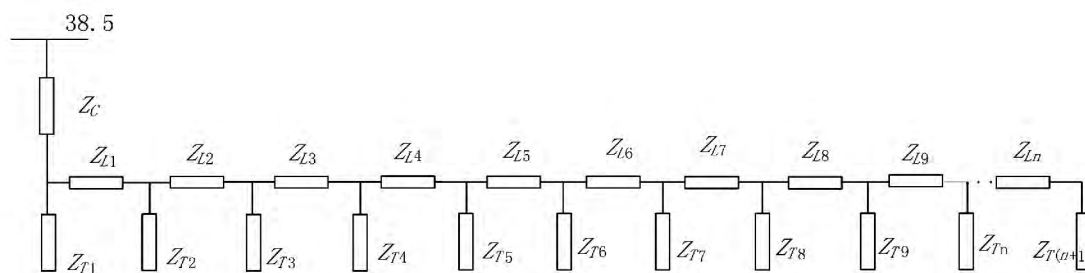


图4 实际风电场内部接线图

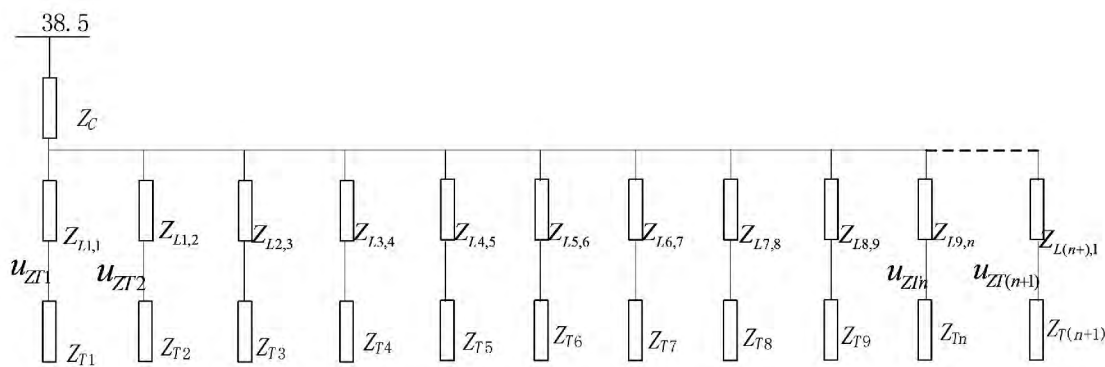


图5 简化后的风电场内部接线图

表 1 不同出力下的稳态仿真结果

机组出力	模型 类型	数值 100%	相对 误差	数值 75%	相对 误差	数值 50%	相对 误差
有功 /MW	详细	199.3	0.3%	149.84	0.33%	100.1	0.4%
	等值	198.7		149.3		99.69	
电压 /(p.u.)	详细	35.518	0.15%	36.219	0.08%	36.732	0.02%
	等值	35.573		36.25		36.746	

表 2 不同功率因数的稳态仿真结果

功率 因数	模型 类型	数值 0.98	相对 误差	数值 0.99	相对 误差	数值 1	相对 误差
有功 /MW	详细	195.46	0.2%	197.43	0.32%	199.32	0.31%
	等值	195.83		196.79		198.7	
电压 /(p.u.)	详细	37.022	0.08%	36.586	2.6%	35.518	0.15%
	等值	37.053		36.629		35.573	

由于等值是针对运行点相近的机群,且这些机群并联接到同一母线上。由式(9)的恒等关系可以将图4所示的实际风电场内部接线图简化成图5所示的简化接线图。

将图5中的 Z_{T1} 、 Z_{T2} 、 $\dots$ 、 $Z_{T(n+1)}$ 做出如下的修正:

$$Z'_{T1} = Z_{T1} + Z_{L1,1} \quad (12)$$

$$Z'_{T2} = Z_{T2} + Z_{L1,2} \quad (13)$$

由于等值机群中风机型号相同,故有

$$Z_{L1} = Z_{L2} = \dots = Z_{Ln} = Z_L \quad (14)$$

$$Z_{T1} = Z_{T2} = \dots = Z_{T(n+1)} = Z_T \quad (15)$$

将式(14)和式(15)依次代入式(12)和式(13)

可得

$$Z'_{T1} = Z'_{T2} = \dots = Z'_{T(n+1)} = Z'_T \quad (16)$$

将式(14)~式(16)代入式(10)和式(11)中可得

$$Z'_T = Z_T + \frac{Z_T \times Z_L}{Z_T // Z_T} \quad (17)$$

通过上面的转换可以得到

$$\begin{aligned} Z &= Z_C + Z'_{T1} // Z'_{T2} // \dots // Z'_{T(n+1)} \\ &= Z_C + \frac{1}{\underbrace{\frac{1}{Z'_T} + \frac{1}{Z'_T} + \dots + \frac{1}{Z'_T}}_{n+1}} \end{aligned} \quad (18)$$

为了表征所建等效模型的准确性,在所做的分析中提出了利用相对误差来反应等效方法可信程度的策略。将详细模型与等值模型之间的差异性用相对误差来表示,其中,详细模型的数值定义为 V_{detail} ,等值模型的数值定义为 $V_{\text{equivalent}}$,相对误差值定义为 V_{relative} ,则相对误差可用式(19)来表示。

$$V_{\text{relative}} = \frac{|V_{\text{equivalent}} - V_{\text{detail}}|}{V_{\text{detail}}} \times 100\% \quad (19)$$

3 算例分析

为了验证等值模型的正确性,对风电场出口的潮流计算结果进行比较。在 PSASP 中进行计算验证,计算过程中所用风机额定功率为 1.5 MW,变流器额定功率为 0.59 MW,PSASP 中采用风机出口电压 0.69 kV,通过变压器变到 20 kV,再经过升压变压器升到 110 kV,接入无穷大系统。该地区风场风机属于双馈风电机组,控制方式为“功率因素”控制方式。

表1为机组不同出力情况下,等值模型与详细模型在 35 kV 汇流母线处的有功功率和电压值。表2为在不同功率因数运行状态下,等值模型与详细模型在 35 kV 汇流母线处的有功功率和电压值。实验结果表明,在两种运行状态下,等值模型与详细模型的相对误差都比较小,从而验证了等值模型的正确性。

4 结 论

分析了大型风电场等值建模的方法,从风能分布模型、等值机群的划分及风电场内部的电网参数等三方面进行等值划分。为了验证所建立等值模型的正确性,在两种不同运行方式下计算等值模型与详细模型的相对误差,通过对比分析可以看出等值模型与详细模型间的误差非常小,为实际工程应用中风电场等值计算提供了捷径,具有一定的参考价值。

(下转第 84 页)

4 结 论

改进了现有的电能质量在线监测方案,并通过多组实例对改进方案进行了验证,得出以下结论:

1) 所改进的电能质量在线监测方案在一定程度上避免了错误遥测、遥信信号造成的设备状态误判,具有较好的适应性;

2) 所改进的方案在设备负荷变化明显时,具有更好的适应性及可行性。

下一步工作中,将同时从技术与管理两个角度出发,对电能质量在线监测方案进行优化,在技术上研究负荷变化较小的情况下设备状态的判断方法,从管理上研究杜绝错误信息上送的手段,双管齐下,进一步提升电能质量在线监测的水平。

参考文献

- [1] Q/GDW 649-2011 电能质量监测系统技术规范[S].
- [2] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(一)——电能质量一般概念[J]. 电力自动化设备,2003,23(10):1-4.
- [3] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(二)——供电网谐波的测量与分析[J]. 电力自动化设备,2003,23(11):1-4.
- [4] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(三)——电力系统的电压凹陷[J]. 电力自动

化设备,2003,23(12):1-4.

- [5] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(四)——电压波动与闪变的测量分析[J]. 电力自动化设备,2004,24(1):1-4.
- [6] 刘俊勇,杨洪耕,肖先勇. 电能质量问题的研究和技术进展(五)——电能质量监测与数据管理. 电力自动化设备,2004,24(2):1-4.
- [7] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(六)——电能质量控制技术进展[J]. 电力自动化设备,2004,24(3):1-4.
- [8] 肖先勇,杨洪耕,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(七)——电力市场环境下的电能质量问题[J]. 电力自动化设备,2004,24(4):1-4.
- [9] 符玲,何正友,麦瑞坤,等. 小波熵证据的信息融合在电力系统故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报,2008(13):64-69.
- [10] 郭创新,彭明伟,刘毅. 多数据源信息融合的电网故障诊断新方法[J]. 中国电机工程学报,2009(31):1-7.
- [11] 王勇,刘金宁,曹曼,等. 基于概率论与证据理论的风电场电能质量评估方法研究[J]. 华北电力大学学报,2012,39(3):65-70.

作者简介:

赵 静(1982),博士,研究方向为调度自动化;
温丽丽(1982),硕士,研究方向为调度自动化;
郭 亮(1982),博士,研究方向为调度自动化。

(收稿日期:2015-08-15)

(上接第75页)

参考文献

- [1] 林俐,潘险险. 基于分裂层次半监督谱聚类法的风电场机群划分方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):8-14.
- [2] 陈迎. 基于运行数据的风电场等效建模研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
- [3] 闫广新,晁勤,刘新刚,等. 含变速双馈风电机组风电场的等值问题[J]. 可再生能源,2008,26(1):21-23.
- [4] 张元,郝丽丽,戴嘉祺,等. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(6):138-146.
- [5] 米增强,苏勋文,杨奇迹. 风电场动态等值模型的多机表征方法[J]. 电工技术学报,2010,25(5):162-170.
- [6] 辛拓,申洪,李扬絮,等. 一种实用的风电场等值方法研究[J]. 广东电力,2012,25(4):59-64.
- [7] 贾彦,刘璇,李华,等. 考虑尾流效应对风电场机组布

局的影响分析[J]. 可再生能源,2014,32(4):429-435.

- [8] 孙蕾. 变速恒频风力发电机组建模与控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2009,47-52.
- [9] 李芸,王德林. 大型风电场的等值模型及其改进研究[J]. 电工电能新技术,2014,33(7):11-17.
- [10] 付蓉,谢俊,王保云. 风速波动下双馈机组风电场动态等值[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(15):1-6.
- [11] 袁贵川,倪林,陈颖. 大型风电场等值建模与仿真分析[J]. 广东电力,2010,23(11):6-9.
- [12] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2010.

作者简介:

徐立亮(1990),硕士,从事电网运行工作。

(收稿日期:2015-08-14)

自升压标准电压互感器的误差测量方法

蒋映霞¹ 吴德永¹ 孙 军² 徐 灿²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072;

2. 武汉磐电科技有限公司 湖北 武汉 430058)

摘 要: 随着自升压标准电压互感器的广泛使用,部分自升压标准电压互感器也暴露了设备自身存在的问题。在对自升压标准电压互感器进行误差测量或用其作为测量标准对被试互感器进行误差校验时,容易出现误差超差的现象。分析了这种现象,并通过试验证明产生的原因是升压器一次电流产生的磁场影响到了标准电压互感器的自身误差。为提高自升压标准电压互感器误差校验工作的准确性,结合当前自升压标准电压互感器的设计原理和误差校验方法,提出了一种适合于自升压标准电压互感器误差测量的合理方法。

关键词: 自升压; 标准电压互感器; 升压器; 误差测量

Abstract: With the wide application of self-boosting standard voltage transformer, a part of self-boosting standard voltage transformers has exposed their own problems. In the error measurement of self-boosting standard voltage transformer or the error calibration of the tested instrument as a measurement standard, the excessive error may occur easily. This phenomenon is analyzed, and it is proved by the tests that the cause is the magnetic field generated by primary current of booster which affects the error of standard voltage transformer. In order to improve the accuracy of error calibration for self-boosting standard voltage transformer, a new method for error measurement is proposed based on the current design principle and error measurement method of self-boosting standard voltage transformer.

Key words: self-boosting; standard voltage transformer; booster; error measurement

中图分类号: TM451 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-0076-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.018

0 前 言

自升压标准电压互感器是把升压电源和标准电压互感器合二为一,集成为一个整体的特殊标准电压互感器,减少了误差测量时的设备使用数量和接线数量,便于运输携带和现场操作。鉴于以上优点,自升压标准电压互感器被越来越多的使用于电压互感器的校准/测量中。目前,50 kV 及其以下的电压互感器的误差校准/测量,基本上都采用自升压标准电压互感器作为校准/测量用标准,使用量很大。随着自升压标准电压互感器的广泛使用,部分自升压标准电压互感器也暴露了设备自身存在的问题。下面详细描述了传统自升压标准电压互感器存在的问题,分析了问题产生的原因,并提出了一种适合于自升压标准电压互感器误差测量的合理方法。

1 自升压标准电压互感器易误差超差现象

在实验室对自升压标准电压互感器按照 JJG 314-2010《测量用电压互感器》进行误差测量或在现场用自升压标准电压互感器作为测量标准对被试互感器按照 JJG 1021-2007《电力互感器》进行误差测量时,容易出现误差超差现象。从实验室对自升压标准电压互感器的测量数据来看,表现为以下两种情况:

1) 使用自升压标准电压互感器作为标准器时,将其升压器用做测量系统的升压电源,经常会碰到被试电压互感器的误差数据超差的情况,但是如果改用实验室本身的升压电源,只选取自升压标准电压互感器的标准器部分用作系统标准,此时被试电压互感器的误差数据又能合格;

2) 使用自升压标准电压互感器作为被试互感

器,用自升压标准电压互感器的升压器作为系统电源,采用单极的标准电压互感器作为标准器时,被试的自升压标准电压互感器数据合格,但是改用双极的标准电压互感器(双极标准电压互感器负荷大于单级标准电压互感器)作为标准器时,被试的自升压标准电压互感的误差超差。

综合上述两种情况,认为是自升压标准电压互感中升压器所带的负荷不同,自升压标准电压互感的标准电压互感器误差测试数据就不相同,现通过理论和试验验证。

2 自升压标准电压互感器误差变化的原因分析

自升压标准电压互感器在工作时,升压器一次侧产生一次电流 I_0 , I_0 跟随一次侧所带负荷的大小和性质的改变而改变。 I_0 产生的磁通密度 B 可由毕奥-萨伐尔定律给出

$$B = \frac{\mu}{4\pi} \oint \frac{Idl \times r^0}{r^2} \quad (1)$$

式中: l 为电流 I 的路径; r^0 为自电流元指向观察点的单位矢量; r 为二者之间的距离; μ 为磁导率。

闭合载流导体上的电流产生的磁通与电流成正比。因为自升压标准电压互感器的结构设计原因,其中的升压器与标准电压互感器集成一体,距离很小,升压器一次电流 I_0 产生的磁通有部分流入了标准电压互感器的铁心。磁通流经标准电压互感器铁心后产生了感应电动势,由法拉第电磁感应定律感应电动势可知

$$E = 4.44fNBS \quad (2)$$

$B \propto E$ 标准电压互感器的误差表达式为

$$f = \frac{kU_2 - U_1}{U_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中: f 为标准电压互感器误差; U_1 为标准电压互感器一次电压,由升压器直接提供; k 为标准电压互感器的匝数比; U_2 为标准电压互感器的二次电压,由标准电压互感器中铁心的电磁感应产生。自升压标准电压互感器的磁通由升压器一次电流 I_0 产生的磁通与标准电压互感器自身产生的电压叠加形成,所以自升压标准电压互感器的误差受升压器一次电流影响。 I_0 跟随一次侧所带负荷的大小和性质的改变而改变,所以升压器一次侧所接的负载大小和性

质影响自升压标准的电压互感器的误差数值。当升压器一次电流产生的磁场的方向与标准电压互感器本身产生的磁场方向一致时,随着升压器一次电流增大,自升压标准电压互感器的误差正向偏离;当升压器一次电流产生的磁场方向与标准电压互感器本身产生的磁场方向相反时,随着升压器一次电流增大,自升压标准电压互感器的误差负向偏离。

3 自升压标准电压互感器误差变化原因的试验验证

选取一台准确度等级为 0.005 级的 35 kV 单级标准电压互感器作为标准器,其与互感器校验仪的参数如表 1 所示。选取一台准确度等级为 0.02 级的 35 kV 自升压标准电压互感器作为被试品,型号为 HJ-S35G2,其升压器用作误差试验的升压电源,试验原理如图 1 所示,采用高端测差法,在升压器带不同负荷条件下对被试品进行误差测量,得到表 2 和表 3 的误差数据。

表 1 试验用标准电压互感器及互感器校验仪参数

设备名称	设备型号/出厂编号	准确度等级	证书编号	有效期
精密电压互感器	HJ-B35G05/P100041	0.005 级	(计)字第 201311436 号	2015 年 12 月 25 日
互感器校验仪	HGQ-PD/P10006	2 级	(计)字第 201411219 号	2015 年 12 月 01 日

本次试验使用的自升压标准电压互感器 HJ-S35G2 中升压器的最大承载负荷为 600 VA。

$$P = \omega CU^2 \quad (4)$$

经计算升压器最可承受大电容量为 1 083 pF 的容性负荷。

$$P = \frac{U^2}{\omega L} \quad (5)$$

经计算升压器可承受最小电感量为 9 363 H 的感性负荷。

在升压器一次侧不外接负荷情况下测量 HJ-S35G2 误差,再在升压器一次侧分别接入 $C_1 = 250$ pF、 $C_2 = 500$ pF、 $C_3 = 1\ 000$ pF 3 种不同电容量的容性负荷进行 3 组误差试验。误差数据如表 2 所示。

$$I_c = \omega CU \quad (6)$$

$$I_l = \frac{U}{\omega L} \quad (7)$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (8)$$

表 2 升压器一次侧外接容性负载时被试标准电压互感器误差数据

外接容性负载 (标称值)	误差及 电容电流	20%	50%	80%	100%	120%
$C_0 = 0$ pF	$f/\%$	+0.000 4	+0.003 8	+0.005 5	+0.006 1	+0.005 8
	$\delta/(\text{'})$	+0.304	+0.143	+0.078	+0.051	+0.056
	$f/\%$	+0.001 7	+0.007 5	+0.009 0	+0.009 2	+0.009 4
$C_1 = 250$ pF	$\delta/(\text{'})$	+0.283	+0.149	+0.086	+0.072	+0.056
	I_c/mA	0.53	1.32	2.13	2.65	3.17
	$f/\%$	+0.007 6	+0.010 9	+0.012 6	+0.012 9	+0.012 6
$C_2 = 500$ pF	$\delta/(\text{'})$	+0.300	+0.146	+0.082	+0.054	+0.060
	I_c/mA	1.13	2.82	4.49	5.64	6.75
	$f/\%$	+0.013 5	+0.016 9	+0.018 5	+0.019 0	+0.018 8
$C_3 = 1\ 000$ pF	$\delta/(\text{'})$	+0.297	+0.143	+0.080	+0.054	+0.060
	I_c/mA	2.18	5.61	8.77	10.96	13.07

表 3 升压器一次侧外接感性负载时被试标准
电压互感器误差数据

外接感性负载 (标称值)	误差及 电感电流	20%	50%	80%	100%	120%
$L_0 = 0$ H	$f/\%$	+0.000 4	+0.003 8	+0.005 5	+0.006 1	+0.005 8
	$\delta/(\text{'})$	+0.304	+0.143	+0.078	+0.051	+0.056
	$f/\%$	-0.001 9	+0.001 5	+0.003 2	+0.003 8	+0.003 7
$L_1 = 40\ 600$ H	$\delta/(\text{'})$	+0.292	+0.132	+0.067	+0.040	+0.029
	I_l/mA	0.58	1.41	2.23	2.81	3.36
	$f/\%$	-0.005 4	-0.001 9	-0.000 3	+0.000 1	+0.000 1
$L_2 = 20\ 300$ H	$\delta/(\text{'})$	+0.285	+0.125	+0.060	+0.032	+0.019
	I_l/mA	1.11	2.75	4.35	5.44	6.61
	$f/\%$	-0.011 9	-0.008 4	-0.007 1	-0.007 0	-0.007 3
$L_3 = 10\ 150$ H	$\delta/(\text{'})$	+0.276	+0.119	+0.050	+0.020	+0.003
	I_l/mA	2.23	5.61	9.10	11.14	13.43

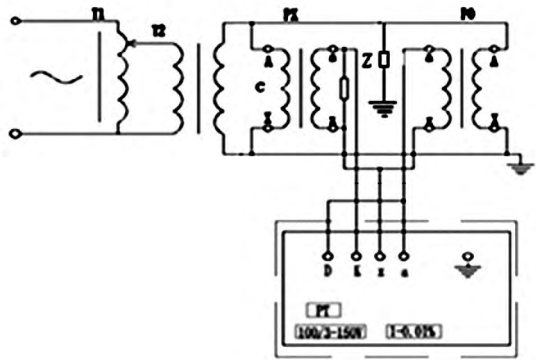


图 1 电压互感器误差测量接线图

由 I_l 、 I_c 表达式可知,当外接的电容和外接的电感两端电压相同时,如需流经电容的电流 I_c 与流经

电感的电流 I_l 大小相同,则需满足式(8)要求, $C_1 = 250$ pF 对应 $L_1 = 40\ 600$ H, $C_2 = 500$ pF 对应 $L_2 = 20\ 300$ H, $C_3 = 1\ 000$ pF 对应 $L_3 = 10\ 150$ H。在升压器一次侧接入 $L_1 = 40\ 600$ H、 $L_2 = 20\ 300$ H、 $L_3 = 10\ 150$ H 3 种不同电感量的感性负荷进行 3 组误差试验。误差数据如表 3 所示。

对 100% U_0 误差测量点比差数据进行比较,可知在试验回路中当升压器一次侧不外接负载时互感器校验仪读取的被试电压互感器的比差数据 $U_1 = 0.006\ 1\%$,当升压器一次侧分别接入 $C_1 = 250$ pF、 $C_2 = 500$ pF、 $C_3 = 1\ 000$ pF 3 组不同容性负荷时,互感器校验仪读取的被试电压互感器的比差数据 U_2

$=0.009\ 2\%$ $U_3=0.012\ 9\%$ $U_4=0.019\ 0\%$ U_1 与 U_2 之间差值 $\Delta U_1=0.003\ 1\%$ U_2 与 U_3 之间差值 $\Delta U_2=0.003\ 7\%$ U_3 与 U_4 之间的差值 $\Delta U_3=0.006\ 1\%$,可见 ΔU_1 、 ΔU_2 、 $\frac{1}{2}\Delta U_3$ 之间的差值基本相等 ,所以被试标准电压互感器比差值随着升压器一次侧接入的容性负荷的线性增加而线性增长。当升压器一次侧分别接入 $L_1=40\ 600\ \text{H}$ 、 $L_2=20\ 300\ \text{H}$ 、 $L_3=10\ 150\ \text{H}$ 3 组不同感性负荷时 ,互感器校验仪读取的被试电压互感器的比差数据 $U_4=0.003\ 2\%$ 、 $U_5=-0.000\ 3\%$ 、 $U_6=-0.007\ 1\%$, U_1 与 U_4 之间的差值 $\Delta U_4=0.002\ 9\%$, U_4 与 U_5 之间的差值 $\Delta U_5=0.003\ 5\%$, U_5 与 U_6 之间的差值 $\Delta U_6=0.006\ 8\%$, ΔU_4 、 ΔU_5 、 $\frac{1}{2}\Delta U_6$ 之间的差值基本相等 ,所以被试标准电压互感器比差值随着升压器一次侧接入的感性负荷的线性增加而线性减小。从以上数据还可看出 ΔU_1 、 ΔU_2 、 $\frac{1}{2}\Delta U_3$ 、 ΔU_4 、 ΔU_5 、 $\frac{1}{2}\Delta U_6$ 基本相等 ,所以升压一次侧的接入相同容量不同负荷性质对标准电压互感器的误差影响数值基本一样 ,方向相反。

4 自升压标准电压互感器误差测量新方法

通过以上理论分析和试验验证 ,说明在对自升压标准电压互感器进行测量或用其作为测量标准时 ,由于自升压标准电压互感器一次电流产生的磁场影响其标准电压互感器的误差 ,容易出现误差超差现象。而传统的对自升压标准电压互感器的测量方法是将自升压标准电压互感器当做被试电压互感器 ,其升压器一次基本没有电流 ,所以反映的是自升压标准电压互感器升压器没有一次电流产生的磁场对标准的影响时的误差数据。而当自升压标准电压互感器作为标准器使用时 ,其升压器带有被试电压互感器一次电流和测量系统一次回路产生的其他电流 ,影响标准电压互感器的误差数据。该电流的大小一方面取决于测量系统一次回路的电流大小 ,但又不能超过升压器本身的负荷能力。因此使用传统方法对自升压标准电压互感器进行误差测量的判定结果没有充分考虑到升压器对标准器的影响 ,在具体使用中不一定准确可靠。

鉴于上述情况 ,提出另一种自升压标准电压互感器误差测量方法 ,即在对自升压标准电压互

感器进行误差测量时 ,需要在升压器不带负荷和带额定负荷的情况下分别进行测量 ,其负荷性质可以是感性的 ,也可以是容性的。使用这种测量方法进行误差测量被判定合格的自升压标准电压互感器在用作标准器时 ,对于不同负荷的被检电压互感器 ,只要它给升压器所带来的负荷不大于升压器的额定负荷 ,标准电压互感器的本身误差变化在误差限值范围内 ,这样就可以保证校准/测量的准确性。

通过上述试验论证 ,在自升压标准电压互感器误差测量中接入负载 ,负载的大小影响被试自升压标准电压互感器中标准电压互感器的误差变化的数值 ,接入的负载性质影响误差变化的方向。由于实际对电压互感器的测量回路中 ,一次对地都是容性的 ,所以推荐在对自升压标准电压互感器进行误差测量时使用容性负荷进行试验。

5 结 语

分析了目前自升压标准电压互感器存在的问题 ,通过理论和试验论证分析了原因 ,并提出了一种自升压标准电压互感器误差测量的合理方法 ,即在对自升压标准电压互感器进行误差测量时不仅需要在升压器不带负荷的情况下测量 ,还需要在升压器带额定容性负载情况下测量 ,才能保证自升压标准电压互感器在实际使用过程中的数据准确性。

参考文献

- [1] JJG 1021-2007 电力互感器[S].
- [2] JJG 314-2010 测量用电压互感器[S].
- [3] 张仁豫,陈昌渔,王昌长. 高电压试验技术[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [4] 周克定,张文灿. 电工理论基础[M]. 北京:高等教育出版社,1994.
- [5] 赵修明. 带升压器的电压比例标准[J]. 仪表技术,1993(2):3-8.

作者简介:

蒋映霞(1974) ,高级工程师 ,长期从事互感器和数字电能计量的试验研究工作;

孙 军(1976) ,全国电工仪器仪表标准化技术委员会委员 ,长期从事互感器设计、校验和调试技术的研究工作;

徐 灿(1993) ,主要从事互感器校验和调试技术的研究工作。

(收稿日期:2015-10-09)

基于 D-S 证据理论的电能质量在线监测算法研究

赵 静 温丽丽 郭 亮

(国网四川省电力公司 四川 成都 610041)

摘 要: 电能质量水平高低是公司电网安全运行水平和优质服务水平的重要体现。现代电网不断发展, 提供了可靠性, 保证了供电质量, 但同时也带来了潜在的危险, 局部电网的某些设备或线路故障, 可能诱发恶性连锁反应, 并最终酿成大面积停电的重大系统事故, 严重影响供电可靠性。另一方面, 近年来随着节能环保和可持续发展观念的建立, 大量不可控制的电源点并入主网架, 给电网的安全与供电可靠性带来了巨大的挑战。因此, 研究和建立起一套高效的电网供电质量监测系统, 实现电网内电压、频率和可靠性数据的全局的在线监测, 对于提升安全运行与服务水平, 具有重要意义。

关键词: 电能质量; 在线监测; 证据理论

Abstract: The level of power quality is an important embodiment of safe operation and quality service of the company. The modern power grid continues to develop to provide the reliability and quality of power supply, but also brings the potential dangers. Some equipments or line failures in local power grid may cause a vicious chain reaction, eventually lead to power outages over a large area, and seriously impact on the reliability of power supply. On the other hand, in recent years, with the concept of energy saving, environmental protection and sustainable development, a large number of non-controllable power points are connected to the main power grid, which brings great challenges for the security and reliability of power grid. Therefore, it is important to study and establish an effective monitoring system for power quality, which can realize on-line monitoring for voltage, frequency and reliability of power grid and is of great significance to improving safe operation and service level.

Key words: power quality; on-line monitoring; D-S evidence theory

中图分类号: TM92 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-0080-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.019

0 引 言

电能质量水平高低是公司电网安全运行水平和优质服务水平的重要体现。随着现代电力系统已步入高电压、大电网和大机组时代, 电网规模不断扩大, 区域电网相互之间的耦合程度越来越紧密, 联网程度的增强可以提高电网的可靠性与供电质量, 但同时也带来了潜在的危险, 局部电网的某些设备或线路故障, 可能诱发恶性连锁反应, 并最终酿成大面积停电的重大系统事故, 严重影响供电可靠性。另一方面, 近年来随着节能环保和可持续发展观念的建立, 国家大力发展新能源技术, 大量不可控制的电源点并入主网架、气候等不可控制因素对电网的安全与供电可靠性带来了巨大的挑战。

因此, 研究和建立起一套高效的电网供电质量监测系统, 实现电网内电压、频率和可靠性数据的全局的在线监测, 对于提升安全运行与服务水平, 是十分

必要的。基于此, 国家电网公司于 2012 年年底开展了电能质量在线监测系统建设的试点工作。

电能质量业务涵盖电网频率、电压和可靠性三方面内容, 其中由省调度部门负责提供的数据主要为电网频率指标、中枢点电压指标以及设备停、带电状态。而这些电压、频率以及设备带电状态的数据主要取自主站调度控制系统中采集的站端基础生数据。虽然说近年来国网四川省电力公司调度控制中心(以下简称四川省调)一直着力抓好站端基础数据整治, 但仍无法保证数据 100% 的准确, 导致个别送出数据中显示错误的停电信息。目前此问题只能靠人工修改, 通过人工每日核对送入电能质量在线监测系统, 返回核查当时是否正正常停电还是数据错误导致的误送。

1 基本理论

1.1 电能质量在线监测范围

电能质量可以定义为: 导致用户设备故障或不能正常工作的电压、电流或频率偏差, 其内容涉及到频率偏差、电压偏差、电磁暂态、供电可靠性、波形失真、三相不平衡以及电压波动和闪变等。这次需要监测电能质量指标主要包括电网频率、电压和可靠性三大类指标。

从这三大类指标来分析, 频率指标将监控电网频率指标, 电压指标将监测中枢点电压指标和供电电压指标, 可靠性指标主要监测输变电系统可靠性指标和供电可靠性指标。

1.1.1 频率指标

电力系统频率是指电力系统统一的一种运行参数, 是电能质量的一个重要指标。中国电力系统的标称频率为 50Hz, GB/T 15945-2008《电能质量电力系统频率偏差》中规定“电力系统正常运行条件下频率偏差限值为 ± 0.2 Hz”。电网频率数据主要来自调度控制系统, 通过调度技术支持系统数据的采集, 实现电网频率的最大频率、最小频率情况和责任频率越限情况的统计, 完成电网频率合格率、越限指标等情况的在线监测。

1.1.2 电压指标

电压指标包括电网中枢点电压和供电电压两部分。电压是电能质量的主要指标之一, 也是电网运行的最重要指标之一。中枢点电压数据主要来自调度控制系统, 通过调度控制系统数据的采集, 实现母线运行的最高电压、最低电压情况和母线电压越限情况的统计, 并计算中枢点电压合格率等监测指标, 完成中枢点电压指标的在线监测。供电电压数据主要来自供电电压自动采集系统, 通过供电电压自动采集系统实现电压监测点的最高电压、最低电压和电压监测点越限情况的运行情况统计, 并计算各级单位的电压合格率, 完成供电电压指标的在线监测。

1.1.3 可靠性指标

电力系统可靠性取决于发供电设备和线路的可靠性、电力系统结构和接线、备用容量、运行方式(静态稳定和动态稳定储备)以及防止事故连锁发展的能力。可靠性指标主要监测输变电系统可靠性指标和供电可靠性指标。对应调度部门送出数据为一次设备的带电状态信息。

1.2 D-S 证据理论

D-S 证据理论是一种不确定性推理模型, 由 Dempster 和他的学生 Shafer 共同提出。它可以在已

知证据的情况下, 推断假设的确信程度, 当概率值已知的时候, 证据理论就演变成为概率论。D-S 证据理论的基本概念现介绍如下:

1) 证据的不确定性

设 U 的幂集 2^U 上定义了一个基本概率赋值函数 $m: 2^U \rightarrow [0, 1]$, 使 m 满足

$$m(\emptyset) = 0, \sum_{A \subseteq U} m(A) = 1 \quad (1)$$

基本概率赋值函数 $m(A)$ 表示了证据对 U 的子集 A 成立的一种信任程度。

信任函数定义为

$$Bel: 2^U \rightarrow [0, 1], Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (2)$$

2) 证据的组合

对于相同的证据, 由于来源不同, 可能得到不同的基本概率赋值函数。D-S 证据理论采取正交和来组合这些函数。

设 $m_1, m_2, \dots, m_n$ 是 2^U 上的 n 个基本概率赋值函数, 它们的正交和 $m = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n$, 且定义为

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ m(A) = K \sum_{\cap A_i = A} \prod_{i=1}^n m_i(A_i), A \neq \emptyset \end{cases} \quad (3)$$

其中,

$$K^{-1} = 1 - \sum_{\cap A_i = \emptyset} \prod_{i=1}^n m_i(A_i) = \sum_{\cap A_i \neq \emptyset} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)$$

3) 证据理论的推理

知识表示: 系统的推理规则表示为

$$A: IF \ E \ THEN \ H, CF$$

证据的描述: 对于任何命题 $A \subseteq U$, 其信任函数为

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) = \sum_{a \in A} m(a) \quad (4)$$

$$Bel(U) = \sum_{B \subseteq U} m(B) = \sum_{a \in U} m(\{a\}) + m(U) = 1$$

似然函数为

$$Pl(A) = 1 - Bel(\sim A)$$

$$= 1 - \sum_{a \in \sim A} m(\{a\}) = m(U) + Bel(A) \quad (5)$$

$$Pl(U) = 1 - Bel(\sim U) = 1 - Bel(\emptyset) = 1$$

类概率函数为

$$f(A) = Bel(A) + \frac{|A|}{|U|} [Pl(A) - Bel(A)] \quad (6)$$

4) 不确定性推理

匹配度函数:

$$MD(A, E) = \begin{cases} 1; & \text{如果 } A \text{ 的所有元素都出现在 } E \text{ 中} \\ 0; & \text{其他} \end{cases}$$

$$CER(A) = MD(A, E) \cdot f(A) \quad (7)$$

命题的逻辑组合的情况

合取:

$$\begin{aligned} CER(A) &= CER(A_1 \text{ and } A_2 \text{ and } \cdots \text{ and } A_n) \\ &= \min\{CER(A_1), CER(A_2), \cdots, CER(A_n)\} \end{aligned} \quad (8)$$

析取:

$$\begin{aligned} CER(A) &= CER(A_1 \text{ or } A_2 \text{ or } \cdots \text{ or } A_n) \\ &= \max\{CER(A_1), CER(A_2), \cdots, CER(A_n)\} \end{aligned} \quad (9)$$

如果几种规则支持同一命题,总的概率赋值函数定义为各规则假设得到的基本概率赋值函数的正交和,即

$$m = m_1 \oplus m_2 \oplus \cdots \oplus m_n \quad (10)$$

2 多决策融合电能质量在线监测算法原理

2.1 基本算法原理

图 1 展示了现有电能质量在线监测方案的基本原理,所有指标由四川省调位于安全 I 区的智能电网调度控制系统经由简单的逻辑判断,将电网频率、实时电压以及设备停电状态传输至位于安全 III 区的调度生产管理系统,调度生产管理系统再通过接口文件,将信息传输至国网电能质量在线监测系统。此方案优点在于直接利用现有 SCADA 信息,简单方便,但缺点也较明显,未经处理的 SCADA 生数据的可用度无法达到 100% 的要求,站端上送的瞬时跳零数据,导致误送设备停电状态。

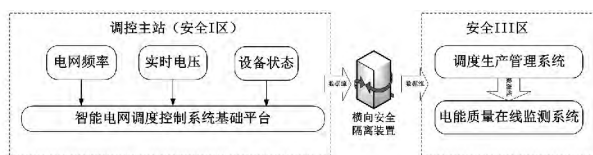


图 1 现有电能质量在线监测方案

图 2 所示为经过改进后的电能质量在线监测方案。它的原理在于采用智能电网调度控制系统现有的功能模块,对采集的电压、频率、设备状态等生数据进行融合判断,由调度生产管理系统进行多决策分析,确定电网各设备当前运行状态。

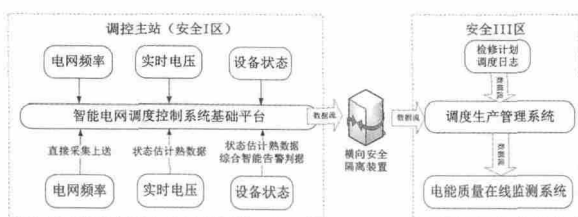


图 2 改进后电能质量在线监测方案

2.2 设备状态变化可信度设置

设备状态变化是基于 SCADA(稳态监控)网络拓扑分析结果的。即某一设备相关联的任一断路器由合闸到分闸,该设备的状态就会发生变化并发出设备状态变化告警。设备状态变化可信度设置如表 1 所示。识别框架: $\Theta = \{\text{设备停运、设备运行}\}$,可信度判断时间间隔为断路器变位时间前后 60 s 内。基于 D-S 证据理论的设备状态判断流程可如图 3 所示。

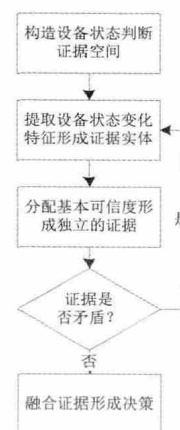


图 3 基于 D-S 证据理论的设备状态判断流程

表 1 设备状态变化证据

证据	开关变化	设备量测变化	本站间接量测变化	对侧潮流变化	状态估计合格率	PMU 量测	辅助系统
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7

各证据可信度应该按照设备所属厂站电压等级、装机容量、投运年限等原因进行设置,如投运年限短、站端监控系统版本较新的厂站上送的信息可信度更高,而处于边缘地区的厂站因为运维力量的差异以及设备工况的原因,上送数据的可信度也应相应较低。

各证据取值范围在 $(0, 1)$, 依据如下:

1) $m_1 \sim m_3$ 证据

由于本站数据有一定的错误概率,故设备停运与运行的证据相差不大,取 $m_1 \sim m_3\{\text{设备停运}\} = 0.6$, $m_1 \sim m_3\{\text{设备运行}\} = 0.4$ 。

2) m_4 证据

$m_4\{\text{设备停运}\} = 1 - \text{abs}(\text{对侧潮流变化率} - \text{本侧潮流变化率})$,其中潮流变化率 = $\text{abs}((\text{当前采样点} - \text{前一刻采样点}) / \text{当前采样点})$,本证据实质上是量度双侧潮流变化的一致性。

如果本侧潮流变化率小于 5%,取 $m_4\{\text{设备停运}\} = 0.5$ (即此证据不可用)。

表 2 A 电厂设备停运状态证据融合判断

项目	开关 变化	设备 量测变化	本站间接 量测变化	对侧 潮流变化	状态估计 合格率	PMU 量测	辅助 系统	组合 结果 m	决策 结果	是否 正确
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7			
设备停运	0.6	0.6	0.6	0.9	0.6	0.6	0.5	0.983	停运	是
设备运行	0.4	0.4	0.4	0.1	0.4	0.4	0.5	0.017		

表 3 B 电厂设备停运状态证据融合判断

项目	开关 变化	设备 量测变化	本站间接 量测变化	对侧 潮流变化	状态估计 合格率	PMU 量测	辅助 系统	组合 结果 m	决策 结果	是否 正确
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7			
设备停运	0.6	0.6	0.6	0.1	0.4	0.5	0.5	0.2	运行	是
设备运行	0.4	0.4	0.4	0.9	0.6	0.5	0.5	0.8		

3) m_5 证据

$m_5\{\text{设备停运}\} = 0.6$,当该站状态估计合格率大于 90% ,反之则取为 0.4 ,如当时全网状态结果不收敛 ,则取值为 0.5 ,当前证据无效。

4) m_6 证据

判断原则与 $m_1 \sim m_3$ 一致 ,如该站无 PMU 装置则取值为 0.5 ,当前证据无效。

5) m_7 证据

如该站相应时间段无检修计划 ,则取值 0.5 ,当前证据无效 ,如有检修计划 ,则取值 0.6。

结果 ,由于机组无出口断路器 ,故开关变化判据改为出口隔离刀闸判据。 m_4 证据因为本侧潮流变化率大于 5% ,则 $m_4\{\text{设备停运}\} = 1 - \text{abs}(\text{对侧潮流变化率} - \text{本侧潮流变化率})$,根据计算结果此处近似取为 0.9。该站状态估计合格率未低于 90% ,则 $m_5\{\text{设备停运}\}$ 取 0.6。其余证据按照上一节描述进行设置。则得到决策结果为设备停运的概率高达 98.3% ,与实际相符。

2) B 电厂于 2014 年 8 月 27 日 13:32 上送全站信息为 0 的信号。机组开关变为分位 ,有功量测 (含机组与出线) 变为 0 ,对侧厂站量测无明细变化。该站 PMU 信息未采集 ,调度生产管理系统中未检索到该站停电检修计划。

表 3 所示为 B 电厂机组停运的证据融合判断结果。 m_4 证据因为本侧潮流变化率大于 5% ,则 $m_4 = 1 - \text{abs}(\text{对侧潮流变化率} - \text{本侧潮流变化率})$,对侧潮流变化率与本侧潮流变化率不一致性较高 ,根据计算结果此处近似取为 0.1。其余证据按照上一节描述进行设置。则得到决策结果为设备运行的概率高达 80% ,与实际相符。

3 多决策融合算法实际应用分析

3.1 设备停运判断实例

1) A 电厂于 2014 年 9 月 9 日 00:16 分上送 61 号 F 刀闸状态为分 (此机组无出口断路器) ,经调阅曲线 61 号机组量测由 00:16 的 373.60 MW 跳变为 00:17 的 1.14 MW。两回送出线路的量测、全厂有功出力以及对侧潮流量测如图 4 所示。PMU 装置量测信息与稳态监控显示一致。调度生产管理系统中未检索到该站停电检修计划。

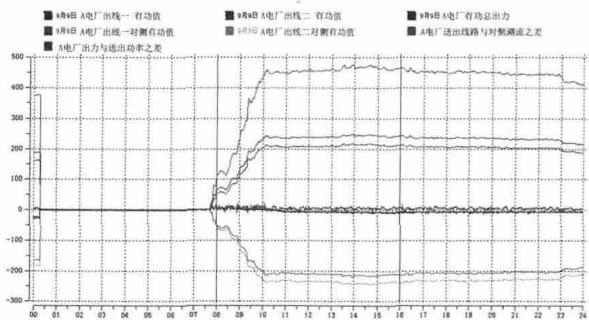


图 4 A 电厂 2014 年 9 月 9 日潮流情况

表 2 所示为 A 电厂机组停运的证据融合判断

3.2 算法适应性分析

该算法在一定程度上避免了站端错误上送遥测、遥信信号造成系统误判设备状态的情况 ,但如果当前厂站负荷潮流较轻 ,如有功长期停留在 0 MW 附近 ,则此时站端设备跳闸或计划停运 ,可通过保护动作信号或辅助系统进行判断状态。但如果是错误上送遥信变位信号 ,此时作为量测变化的直接或间接判据均不可用 ,无可避免地无法通过信号本身进行正确的设备状态判断 ,仅能通过站端的视频监控核实站端设备的实际情况。

4 结 论

改进了现有的电能质量在线监测方案,并通过多组实例对改进方案进行了验证,得出以下结论:

1) 所改进的电能质量在线监测方案在一定程度上避免了错误遥测、遥信信号造成的设备状态误判,具有较好的适应性;

2) 所改进的方案在设备负荷变化明显时,具有更好的适应性及可行性。

下一步工作中,将同时从技术与管理两个角度出发,对电能质量在线监测方案进行优化,在技术上研究负荷变化较小的情况下设备状态的判断方法,从管理上研究杜绝错误信息上送的手段,双管齐下,进一步提升电能质量在线监测的水平。

参考文献

- [1] Q/GDW 649-2011 电能质量监测系统技术规范[S].
- [2] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(一)——电能质量一般概念[J]. 电力自动化设备,2003,23(10):1-4.
- [3] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(二)——供电网谐波的测量与分析[J]. 电力自动化设备,2003,23(11):1-4.
- [4] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(三)——电力系统的电压凹陷[J]. 电力自动

化设备,2003,23(12):1-4.

- [5] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(四)——电压波动与闪变的测量分析[J]. 电力自动化设备,2004,24(1):1-4.
- [6] 刘俊勇,杨洪耕,肖先勇. 电能质量问题的研究和技术进展(五)——电能质量监测与数据管理. 电力自动化设备,2004,24(2):1-4.
- [7] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(六)——电能质量控制技术进展[J]. 电力自动化设备,2004,24(3):1-4.
- [8] 肖先勇,杨洪耕,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(七)——电力市场环境下的电能质量问题[J]. 电力自动化设备,2004,24(4):1-4.
- [9] 符玲,何正友,麦瑞坤,等. 小波熵证据的信息融合在电力系统故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报,2008(13):64-69.
- [10] 郭创新,彭明伟,刘毅. 多数据源信息融合的电网故障诊断新方法[J]. 中国电机工程学报,2009(31):1-7.
- [11] 王勇,刘金宁,曹曼,等. 基于概率论与证据理论的风电场电能质量评估方法研究[J]. 华北电力大学学报,2012,39(3):65-70.

作者简介:

赵 静(1982),博士,研究方向为调度自动化;

温丽丽(1982),硕士,研究方向为调度自动化;

郭 亮(1982),博士,研究方向为调度自动化。

(收稿日期:2015-08-15)

(上接第75页)

参考文献

- [1] 林俐,潘险险. 基于分裂层次半监督谱聚类法的风电场机群划分方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):8-14.
- [2] 陈迎. 基于运行数据的风电场等效建模研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
- [3] 闫广新,晁勤,刘新刚,等. 含变速双馈风电机组风电场的等值问题[J]. 可再生能源,2008,26(1):21-23.
- [4] 张元,郝丽丽,戴嘉祺,等. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(6):138-146.
- [5] 米增强,苏勋文,杨奇迹. 风电场动态等值模型的多机表征方法[J]. 电工技术学报,2010,25(5):162-170.
- [6] 辛拓,申洪,李扬絮,等. 一种实用的风电场等值方法研究[J]. 广东电力,2012,25(4):59-64.
- [7] 贾彦,刘璇,李华,等. 考虑尾流效应对风电场机组布

局的影响分析[J]. 可再生能源,2014,32(4):429-435.

- [8] 孙蕾. 变速恒频风力发电机组建模与控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2009,47-52.
- [9] 李芸,王德林. 大型风电场的等值模型及其改进研究[J]. 电工电能新技术,2014,33(7):11-17.
- [10] 付蓉,谢俊,王保云. 风速波动下双馈机组风电场动态等值[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(15):1-6.
- [11] 袁贵川,倪林,陈颖. 大型风电场等值建模与仿真分析[J]. 广东电力,2010,23(11):6-9.
- [12] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2010.

作者简介:

徐立亮(1990),硕士,从事电网运行工作。

(收稿日期:2015-08-14)

地市供电公司信息通信综合网控室的建立

罗晓战, 万烨松, 曾绍成

(国网四川省电力公司自贡供电公司, 四川 自贡 643000)

摘 要: 地市供电公司信息通信网控室的建立是基于网络 KVM 的应用与拓展, 实现信息通信各类网管系统集中监控、集中调度、故障统一处理、告警快速反应、远程维护控制和人机分离的管控模式。实例研究表明, 通过网络 KVM 在信息通信综合网控中的深入探索, 在优化人员配置、扩大监控范围、故障快速反应和网控室调度人员隔离机房高电磁辐射、高噪音等方面也得到了大幅的改善。

关键词: KVM; 集中监控; 人性化

Abstract: The establishment of integrated information communication network control room for prefectural - level power supply company is based on the development and application of network KVM, which can realize centralized monitoring and dispatching, unified fault processing, quick alarm response, remote maintenance control and the separation of man - machine control mode. Case study shows that through exploring the comprehensive information communication network control by network KVM, the optimization of staffing, the expansion of monitoring scope, the rapid response of fault, the isolation of high - level electromagnetic radiation for the dispatching staff in network control room etc. can be improved greatly.

Key words: KVM; centralized monitoring; humanization

中图分类号: TN915 文献标志码: B 文章编号: 1003 - 6954(2015)05 - 0085 - 03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.020

0 引 言

当前, 国网供电公司正在积极推进信息通信调度集约化建设工作。根据国网电力信息通信调度集约化实施方案的要求, 地市信通公司需设置信息通信综合网控室。在以往的信息通信监控工作中, 由于设备分散、管控系统较多、故障告警反映不及时、人员监控困难, 往往需要在监控室与各机房间频繁穿梭, 才能达到监控到位的要求, 而其产生的不良因素是故障告警发现较晚, 各类告警信息集中分析困难, 人员频繁进出机房受到高电磁辐射过多、高噪音等诸多问题。

所以建立一个现代化的信息通信综合网控室, 集成华为网管、ECI 网管、北塔网管、动态环境监测、TMS 等 10 多套在线监测系统, 达到集中监管、快速反应、人机分离的目标是当前迫切需要解决的问题。下面从网络 KVM 的应用和在电力信息通信监控中的拓展研究、应用实例 3 方面分析探讨了具体安装链接方案, 具有较高的参考价值。

1 信息通信网控室现状

1 期信息通信网控室采用的是单机 PC 终端直接对连 1 个服务器和 1 个监控屏, 使用 1 套键鼠单独操控 1 套管控系统, 人员操控通过一对一的方式进行故障告警监控及维护。旧信息通信网控室设备连接拓扑结构如图 1 所示。

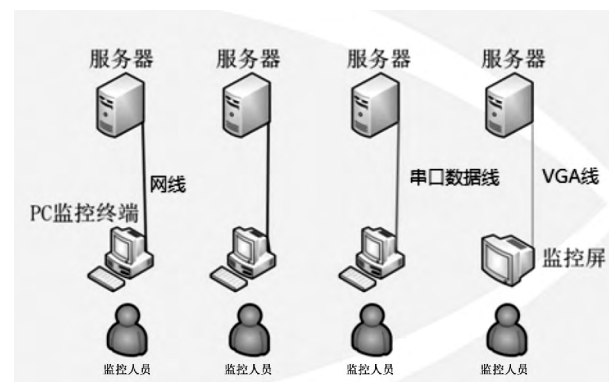


图 1 1 期信息通信网控室拓扑结构

监控系统拥有 3 种连接方式: 1) PC 监控终端与服务器用过网线对连; 2) PC 监控终端与服务器通过串口数据线对连; 3) 监控屏和键鼠直接与服务器连

接。设备的安放实行就近原则,大型服务器安装在机房内,小型服务器和PC监控终端安装在网控室内。

2 总体设计

2.1 设计理念

1) 设计理念采用基于KVM over IP基础设施管理系统,KVM(Kernel-based virtual machine)是Linux下x86硬件平台上的全功能虚拟化解决方案,包含1个可加载的内核模块kvm.ko提供和虚拟化核心架构和处理器规范模块。

2) KVM over IP将键盘、视频和鼠标数据数字化,并使用IP技术移动KVM数据。KVM over IP直接连接至任意计算机上的KVM信号,无需侵入计算机,无需添加软件/硬件。该技术利用了现有网络基础设施,支持本地和远程用户。

3) 基于KVM over IP的架构设计保证了数据的安全与维护。考虑到今后的设备及数据扩展、业务功能扩展及用户扩展需要,采用兼容性较好的多层架构设计,使将来的数据更新维护、新业务功能开发、多种设备并联都能单独进行,不会对运行中的其他设备造成影响,保证了网控设备在正常运维管理任务的同时可随时添加新系统、新设备。

2.2 设计原则

2013年,国网供电公司推进信息通信调度集约化建设工作。根据要求,自贡信通公司对新大楼信息通信综合网控室的建设进行了明确:

1) 监控终端、服务器与网控室隔离,架设在机房内,网控室内仅保留监控屏与操控键鼠;

2) 服务器的数据传输通过网络KVM进行数据集中并发送至监控屏;

3) 网控室内配置监控大屏,用于分析故障告警点。

3 总体架构

如图2所示,在设备安装施工前,应根据初步设计、施工图设计,编制网络实施方案,编制设备架设方案,明确各设备安装位置等各方面要求,为投产后的运维提供参考。

监控平台组建建立在以KVM over IP为开发平台之上,通过服务器VGA视频输出端口及分屏器使服务器视频输出信号分为多信号输出,同时传输至监控屏与操控屏,在维护操作时保证监控不间断。

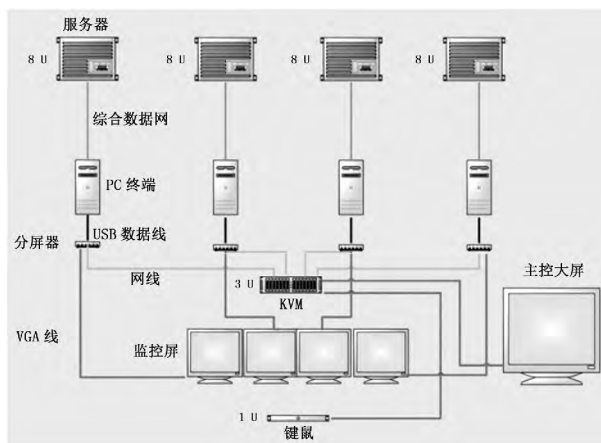


图2 信息通信网控室拓扑结构

1) 监控屏信号的传输:通过分屏器VGA接口直连监控屏,根据现场情况可添加VGA长线器以增强视频信号;

2) 操控屏信号的传输:通过分屏器与KVM-SIP模块把VGA模拟信号转换为数字信号通过网线传输至KVM over IP,再由KVM传输至操控屏;

3) 拓展连接:如监控服务器过多或服务器不在同一机房内,甚至需监控异地服务器,可将网络KVM接入综合数据网来实现远程操控维护。具体网络配置方法为:首先给KVM配置1个静态IP地址,然后接入综合数据网,通过综合数据网接入中的任何一台终端既可用WEB方式登录KVM实现远程监控。

3 信息通信综合监控室应用实例

利用数字网络KVM的现有功能,在实际应用中加入分屏器,改变各设备的连接方式来达到在实际工作中的要求。

1) 在自贡供电公司信通公司信息通信网控室,对18台服务器终端进行了监控,包括华为网管、ECI网管、华为接入、行政程控交换系统、电力调度程控交换系统、电力调度录音系统、白塔网管、动力环境监控、TMS通信管理系统等10多个不同的监管系统;

2) 共计使用数字网络KVM 3台、2口分频器18台、信号增强VGA高频线36根、监控屏18台、监控大屏2台、操控键鼠3套;

3) 由此组成的综合监控平台,可由3人同时对18台服务器进行监控操作维护,且能够把实时维护进度拓展于大屏便于综合分析;

4) 监控室内非常简洁,服务器及PC终端均被隔离在机房内,大大降低了电磁辐射、噪音等对监控

人员的危害。

4 新型信息通信综合网控室及数字网络 KVM 的拓展应用

1) 智能化: 新型信息通信综合网控室实现了多个服务器同时显示在监控屏幕,并在服务器之间切换操控时,各服务器监控画面不中断。在监控室,通过一套键鼠操控多台服务器,减少了人力的浪费。在远端,通过远程控制监控服务器,实现在办公室也能监控并维护机房中的服务器。

2) 人性化: 通过数字网络 KVM 的数字信号转换,使得视频信号能够传输非常远的距离,这样使服务器与监控屏有效的隔离,减少了人体接触电磁辐射的时间,减少了噪音对人体的危害。为监控人员 24 小时不间断值班提供了更加安全舒适

的工作环境。

3) 快捷: 新型信息通信综合网控室带来了更加高效、便捷的支撑。在故障告警发生时,监控值班人员和办公室专责等可同时看到监控画面告警信息,便于更加快捷地处理故障告警,且在远端就可以对简单故障做出操控维护,缩短故障处理时间,提高了工作效率。

5 结 语

新型信息通信综合网控室的建立,带来了智能化、人性化、快捷的服务,多屏操控、一键切换、单点放大使工作简单而高效。在电力信息通信监控工作中,不断地创新和改善有限的设备资源,才是符合今天电力企业稳定发展的总体方向及要求。

(收稿日期: 2015-06-01)

《四川电力技术》投稿须知

《四川电力技术》是四川省电力公司主管、四川省电机工程学会和四川电力科学研究院联合主办的国内外公开发行的综合性学术的电力科技期刊,主要刊登电力系统的科研、规划、生产运行、设备和系统维护等方面的研究报告、专题论述、应用研究、经验交流、技术讨论等文稿,尤其是科研创新方面的论文。本刊热诚欢迎投稿。根据科技论文规范化的要求,本刊对来稿提出以下要求:

1) 文稿内容应具有科学性、创新性和实用性;论点明确、数据可靠、说明严谨、数学推导简明;语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。学术论文请按 GB 7713-1987《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》书写,篇幅以版面不超过 6 000 字(包括图表所占篇幅)为宜。

2) 文稿须写有中文摘要、关键词。摘要内容包括研究目的、方法、结果和结论四要素。摘要在 150~300 字之内。关键词是反映论文的词组,选 3~8 个。摘要及关键词、文章题目均附英文译文。

3) 文稿表格尽量采用“三线表”。表格上方写表序和表名。表注放在表底。插图应清晰、少而精,插图下方应有图序和图名。能用文字和表格描述的尽可能不用插图。

4) 来稿计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》和符号。

5) 文中或公式中外文字母符号要注明文种、大小写、上下标、正体、斜体。

6) 参考文献应尽量选用公开发表的资料,按在正文中出现的先后次序列表于文后,以[1]、[2]……标识序号,且与正文中的指标序号一致。按 GB/T 7714-2005《文后参考文献著录规则》、CAJ-CD B/T 1-2006《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范》的要求著录文后参考文献。

文献类型及其标识为:普通图书[M];会议论文[C];报纸文章[N];期刊文章[J];学位论文[D];报告[R];标准[S];专利[P];汇编[G];档案[B];古籍[G];参考工具[K];其他未说明的文献类型,例如可公开的政府行政部门编号文件、行业或大公司的技术规范或工作手册[Z];网上期刊[J/OL];网上电子公司[EB/OL]。电子文献尚需在载体标记后加上发表或更新日期(加圆括号)、引用日期(加方括号)和电子文献网址。

7) 投稿可通过 E-mail 提供电子文件,邮箱为 cdsedljs@163.com。稿件上注明详细地址、邮政编码、联系电话,并请自留底稿,本刊一律不退稿。作者在投稿 3 个月后可致电或 E-mail 到编辑部了解审稿情况。

8) 本刊投稿自愿,文责自负。对录用稿件编辑部有权进行必要的删改,如不愿被删改,请在原稿上注明。

9) 本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、中国期刊网、北极星网站、万方数据库、《中国期刊全文数据库》等网站,稿件一经录用刊登,作者著作权使用费用及稿酬已一次付清,如作者不同意收录,请在来稿时提出声明,本刊将作适当处理。

10) 本刊不收取任何费用。任何以邮件、QQ、电话等其他形式要求收费行为均非编辑部所为。

来稿请寄:四川省成都市青羊区青华路 24 号《四川电力技术》编辑部

邮政编码: 610072

电话: (028) 87082036 87082037 87082282 87082308

投稿邮箱: cdsedljs@163.com

基于 RTDS 的发电机功率变送器录波性能试验

文一字

(国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要: 基于 RTDS 设计了发电机功率变送器录波性能试验方案。介绍了现有功率变送器的常规测试方法, 分析了使用 RTDS 开展功率变送器录波性能测试的必要性。详细介绍了一种基于 RTDS 的功率变送器录波性能试验方案, 包括仿真系统模型、硬件接线。采用该方案对某型功率变送器进行了实测, 针对试验结果进行了分析。试验结果表明, 该方案可作为功率变送器测试的有效方法。

关键词: 功率变送器; RTDS; 试验方案; 故障模块设计; 录波

Abstract: The test scheme for wave recording performance of power transducer is designed based on RTDS. The present situation of common testing methods for power transducer is introduced, and the necessity of wave recording performance test for power transducer with RTDS is analyzed. A test scheme for wave recording performance of power transducer is introduced in detail, including simulation model and hardware connection. The proposed scheme is used to test a certain type of power transducer, and the test results are analyzed. The results show that the proposed scheme is useful in the inspection of power transducer.

Key words: power transducer; RTDS; test scheme; design of fault module; wave recording

中图分类号: TM933.3 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-0088-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.021

0 引言

现阶段大型发电机组一般采用有功功率变送器来测量机组实发功率, 而功率变送器的量测功率信号是调速器控制和保护^[1-2]的重要参数之一。这就对功率变送器的录波性能提出了更高的要求, 而投产前的测试是检验变送器功能的重要手段。目前国内厂家很少从电网的角度考虑验证装置性能, 致使对变送器考察不够全面。文献[3]采用继保测试仪对功率变送器性能进行测试, 无法全面考察电网侧多种故障对其影响。因此开展功率变送器的数(动)模试验, 模拟实际电力系统中各种运行方式, 考核电网侧故障对功率变送器录波性能的影响, 是十分必要的。

电力系统实时数字仿真器 RTDS 可通过通讯接口与外部实际装置连接构成数字-物理闭环回路, 是进行数字物理闭环试验的理想工具。下面提出基于 RTDS 的发电机功率变送器录波性能测试试验方案, 可考察变送器在电网各工况下的录波性能, 并对某型变送器进行了实测试验。试验结果表明, 该

方案具有工程应用价值。

1 试验方案

1.1 仿真系统模型

根据图1所示的接线方式, 基于 RSCAD 软件平台搭建一台 220 kV 电压等级接入的汽轮机组, 通过一条同杆并架双回线路与无穷大电源相连。

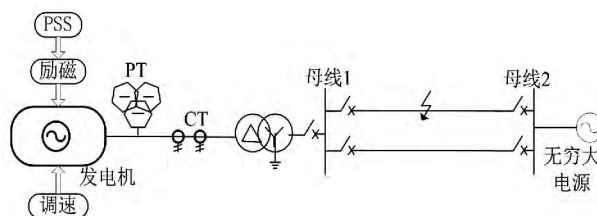


图1 功率变送器测试仿真模型示意图

其中, 发电机装机容量为 1 200 MVA, 机端额定电压为 15 kV, 机组励磁 (IEEE Type ST1)、PSS (IEEE Type 2)、调速 (IEEE Type 1) 均调用自 RSCAD 标准模型库。机端 PT 变比为 150/1, CT 变比设为 1 200/1。升压变压器变比为 15 kV/230 kV, 容量 1 220 MVA, 短路阻抗 4%。断路器在实验中均设置在合位。

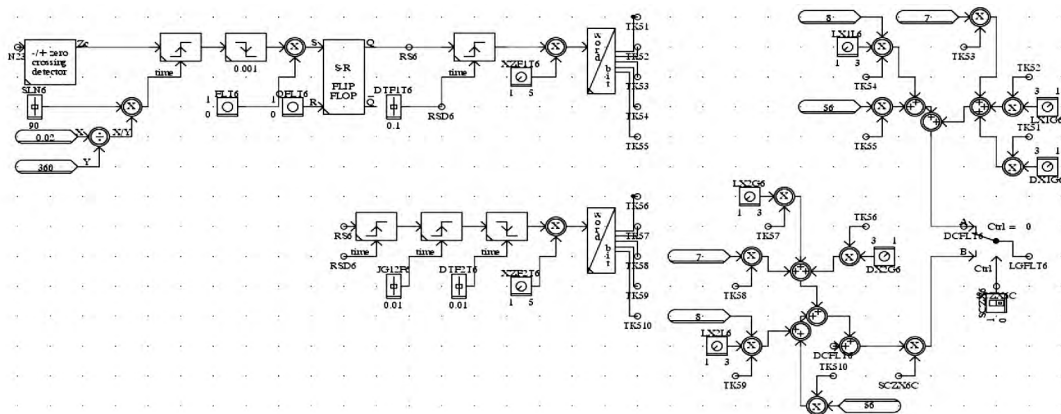


图 2 故障控制模块

1.2 故障控制设计

图 1 所示故障施加位置可根据需要在模型中进行变换。模型中对故障控制进行了优化。可根据需要进行单重故障或双重故障的模拟,并可对故障触发相角、持续时间、故障类型及故障相进行控制。故障控制逻辑如图 2 所示。

模型经编译通过后,可在 RUNTIME 模块中建立控制台,通过控制台可以实时对系统进行施加故障和控制参数的操作,并对系统实时数据进行监视。

1.3 试验硬件接线

RSCAD 软件平台经编译计算后,将发电机端的 PT 三相电压、CT 三相电流信号经 RTDS 的模拟量输出卡 GTA0 输出至功率放大器。功放将信号放大后同时输出至功率变送器和高速数据录波仪。功率变送器再将功率信号输出至高速数据录波仪。通过高速录波仪分析比对功放波形与功率变送器信号是否一致。

所提试验方案中采用便携式电量记录分析仪 WFLC-VI 来进行数据录波。由于功率变送器输出信号为毫安级的电流信号,因此在其功率信号输出端口增加一个电流转电压环节,减少信号损耗。由此构成图 3 所示的功率变送器测试试验系统。

2 装置的试验测试

选取某型功率变送器进行实测。测试主要针对在电网发生各种类型瞬时故障的情况下,功率变送器录得波形与实际机端功率的区别。为全面考察变送器的录波性能,模拟的故障类型包括:单相故障、三相故障及双重故障,同时考虑故障持续时间、故障类型的影响。试验初始条件下,发电机输出功率为 600 MW。

2.1 故障持续时间的影响

在图 1 所示的线路 50% 处分别施加三相接地

短路,故障持续时间分别取 0.01 s、0.1 s、0.2 s。

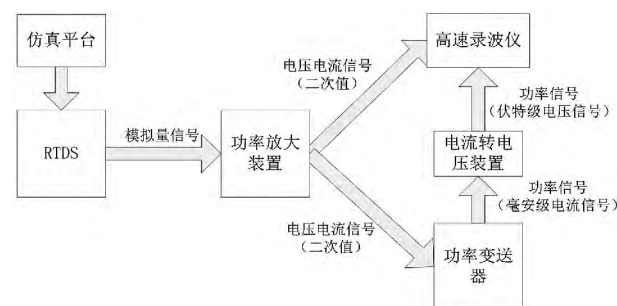


图 3 功率变送器测试硬件接线

图 4 ~ 图 6 为录波波形。其中 P 是经放大器直接输出的发电机功率信号,变送器 P 是从通过功率变送器输出量测功率信号。

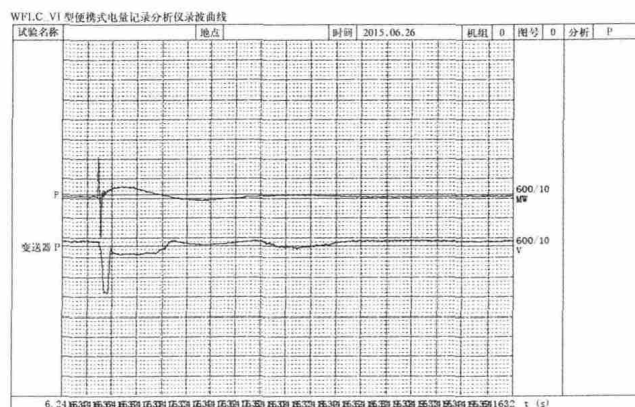


图 4 故障持续 0.01 s 时的测试结果

根据分析,故障持续时间对录波性能影响较大。图 4 中,故障发生前变送器录波值与实际值基本一致。但故障发生后,变送器波形变化延迟约 1 个周波,且滤除了实际功率首摆的波峰。在其后的变化中,变送器功率与实际波形有差距,某些时刻波形呈现与实际相反的情况。

图 5、图 6 中,功率变送器录波与实际波形变化趋势相似度较高。但变送器波形变化均延迟约 1 个周波,且功率首摆波峰被滤除。在功率摆动中,变送

器波形变化幅度与实际值相差 30 ~ 50 MW。

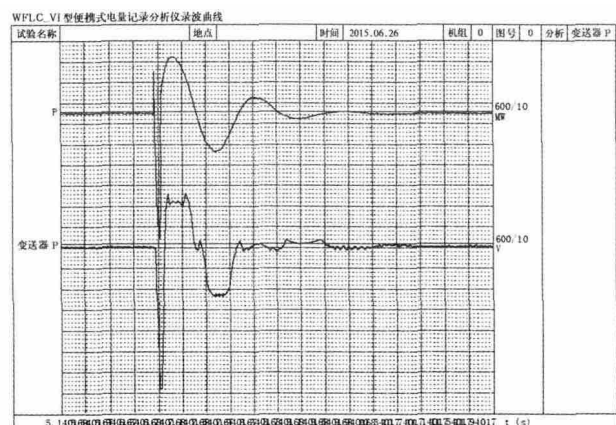


图 5 故障持续 0.1 s 时的测试结果

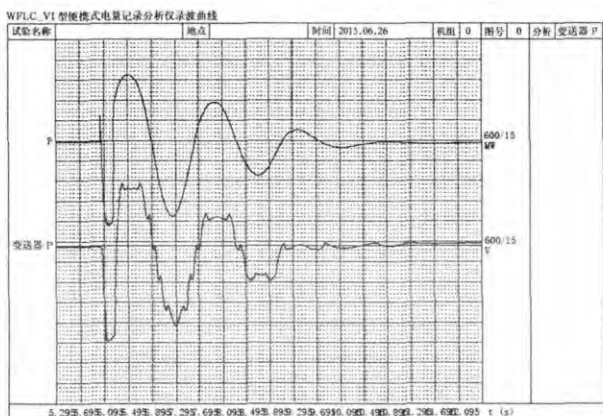


图 6 故障持续 0.2 s 时的测试结果

2.2 故障类型的影响

在如 2.1 节所述故障点分别为不同故障(包括单一故障和双重故障),故障持续时间均为 0.2 s。由于篇幅有限,此处仅列出两个代表性波形进行分析。图 7 为两相短路接地(单一故障)情况下的波形,图 8 为两相短路后,间隔 0.2 s 转为两相短路接地(双重故障)后的波形。

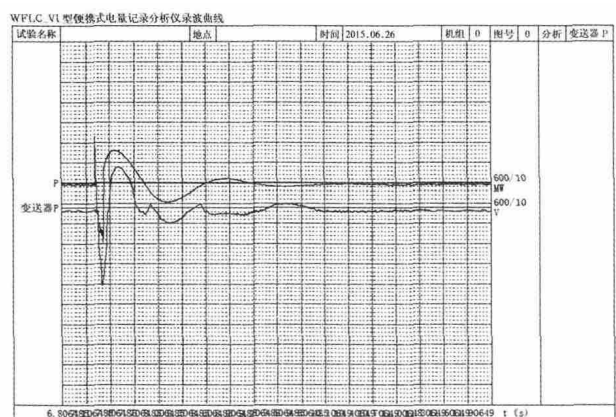


图 7 单一故障测试结果

根据结果可知,在不同故障类型情况下,功率变送器暂态录波与实际波形趋势大致接近。但变送器录波依然存在延迟 1 个周波,且首摆波峰被滤除。功率摆动中变送器变化幅度与实际值相差 20 ~ 50

MW 不等。

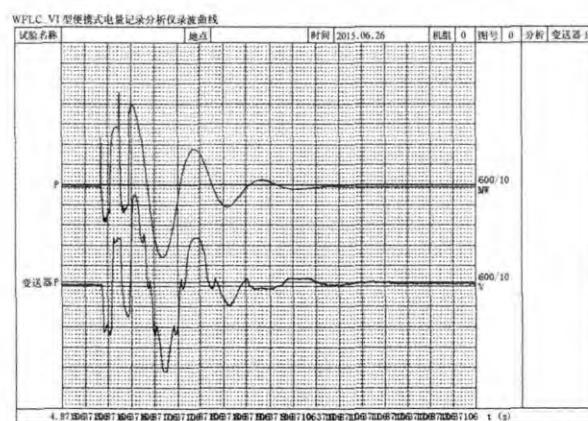


图 8 双重故障测试结果

3 结 论

基于 RTDS 设计了一种发电机功率变送器录波性能测试方案,用以测试变送器暂态录波特性。所设计的试验模型可模拟电网侧发生单一或双重组合故障,较为全面地考察电网发生瞬时故障时功率变送器录波是否准确。

按照所提出的方案,针对某型变送器开展了基于 RTDS 的数模试验,发现了一些问题:

- 1) 变送器稳态录波与实际一致,功率发生波动后其录波延迟约 1 个周波,且滤除了首摆波峰。
- 2) 变送器录波性能受故障持续时间影响。前述故障持续小于 0.1 s,变送器波形与实际差距较大;持续时间大于 0.1 s,波形与实际在趋势上基本一致,但在功率摆动过程中与实际值差距在 20 ~ 50 MW 之间。

所设计的试验方案可作为功率变送器测试的有效方法。

参考文献

- [1] 陈元锁,张明泽.功率变送器故障导致燃气轮机快速降负荷的分析及应对措施[J].燃气轮机技术,2011,24(4):56-60.
- [2] 徐学琴,郭玉恒,王秀梅,等.调速器功率变送器测量偏小导致机组有功功率波动分析[J].中国农村水利水电,2014(10):176-177.
- [3] 张宝,杨涛,项谨,等.电网瞬时故障时汽轮机汽门快控误动作原因分析[J].中国电力,2014,47(5):25-28,34.

作者简介:

文一宇(1984),硕士,工程师,从事电力系统稳定运行研究与故障分析。

(收稿日期:2015-07-31)

中国电力工程顾问集团西南电力设计院

西南电力设计院(以下简称西南院)成立于1961年6月, 隶属中国能源建设集团中国电力工程顾问集团公司, 综合实力雄厚, 工程经验丰富, 专家人才汇集, 具有国家首批颁发的工程设计综合甲级资质, 及电力工程、勘察、咨询、监理、总承包、环境影响评价、建筑工程等国家甲级资质, 拥有对外经营权和对外劳务许可证, 是国家高新技术企业。西南院连续十多年被评为“中国勘察设计单位综合实力百强”, 连续八年入选《工程新闻记录》(ENR)中国工程设计企业60强。建院以来, 在国内20多个省、市、自治区和东南亚、中东、非洲、欧洲等20多个国家, 先后完成了1000余项发、送、变电工程勘测设计; 30余项工程总承包、工程建设管理等项目。



1000 kV晋东南至南阳至荆门特高压交流试验示范工程

西南院坚持科技兴企发展战略, 紧紧围绕企业的核心竞争能力、科技成果转化产品的能力、核心产品转化为市场承认的产品营销能力、拥有自主知识产权的勘测设计技术、计算机软件和专利技术等开展科技创新工作。1978年以来共有266项科技成果获得各级奖励(其中国家级科技进步奖18项), 436项工程项目分获国家级和省部级奖励, 获得专利205项、专有技术11项、软件著作权23项。建立了二郎山覆冰观测基地、中国电力工程顾问集团公司智能电网研究中心。

西南院是国内第一个承担并取得三个 ± 800 kV特高压换流站及线路设计与投产业绩、第二个承担并取得750 kV交流输变电设计与投产业绩、第三个承担并取得单机容量百万千瓦火电机组勘测设计与投产业绩, 承揽国外电力设计项目最多的电力设计院。

在电力系统规划设计, 高参数大容量机组火电厂设计、大容量空冷机组研究设计、循环流化床锅炉电站设计、脱硫脱硝设计, 特高压交直流输变电设计、高海拔重冰区线路设计, 覆冰观测技术研究及工程应用, 智能电网设计, 三维设计技术应用等方面在国内处于领先水平。

西南院设计的四川白马循环流化床300 MW示范电站项目于2006年4月建成投产, 是当时世界上燃用劣质煤的单机容量最大的CFB机组。其成功的示范作用促进了我国CFB机组从100 MW等级向300 MW等级的升级换代, 引领了CFB技术在中国快速发展。

“300 MW CFB锅炉机组工程示范及国产化工程技术研究”荣获国家科技进步奖二等奖。2007年7月, 又承担了当今世界单机容量最大、具有完全自主知识产权的四川白马 1×600 MW超临界循环流化床电站的设计, 并同时开展了多项关键设计技术的研究。工程于2013年4月顺利投产。

西南院参与勘测设计的1000 kV晋东南至南阳至荆门特高压交流试验示范工程是中国第一条特高压交流输电线路, 代表国际高压输电的最高水平。线路全长约640 km。通过产、学、研、用协同攻关, 在电压控制、外绝缘配置、电磁环境控制、成套设备研制、系统集成、试验能力6大方面实现了创新突破, 掌握了特高压交流输电核心技术, 研制成功了全套关键设备。“特高压交流输电关键技术成套设备及工程应用”获国家科技进步奖特等奖。



四川白马 1×300 MW循环流化床示范电站工程

完成的代表性工程

通过科技创新引领, 西南院近年来顺利完成了一大批代表性工程, 取得了良好的经济效益和社会效益。

- (1) 四川白马 1×300 MW CFB示范电站
- (2) 四川白马 1×600 MW CFB示范电站
- (3) 浙江宁海电厂二期 2×1000 MW工程(国内第三个投产的1000 MW机组)
- (4) 贵州盘南 4×600 MW新建工程(西南地区第一个600 MW机组工程)
- (5) 达拉特四期 2×600 MW空冷电厂工程(环保型600 MW直接空冷机组)
- (6) 云南-广东 ± 800 kV特高压直流输电示范工程(世界上首条 ± 800 kV特高压直流输电线路、世界上首个 ± 800 kV特高压换流站)
- (7) 向家坝-上海 ± 800 kV特高压直流输电示范工程(世界上首条电压等级最高、输送容量最大、输送距离最长、技术水平最先进的直流输电工程)
- (8) 1000 kV晋东南-南阳-荆门特高压交流试验示范工程
- (9) 750 kV兰州东-平凉-乾县送电线路工程(国内首条重冰区、同塔双回750 kV输电线路)
- (10) 天广四回500 kV紧凑型送电线路(中国第一条高海拔500 kV紧凑型输电线路)
- (11) ± 400 kV青藏联网直流输电工程(世界上海拔最高、施工冻土区最长、高寒地区建设规模最大、施工难题最多的输电工程)
- (12) ± 500 kV昭通换流站新建工程(国内首个两个 ± 500 kV换流站同址建设的变电工程)



体验EX热成像的世界



FLIR EX系列

用于快速执行电气和机械检查的热像仪

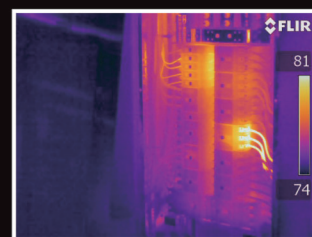


具有MSX®的热图像



没有MSX®的热图像

FLIR MSX 技术令FLIRT600, T400, Exx, Ex 系列热像仪获得的热图像内的细节纤毫毕现。



检测保险丝过热



更多其他型号供您选择.....

8800元起售

- 检测潜在问题，快速评估损耗，执行预防性检查
- 发现能源损耗和不良隔热
- 生成报告，利用易用软件对所发现进行分析和归档
- 带有MSX®功能获取超精确、清晰的热图像
- 4种不同型号可选：E4 / E5 / E6 / E8



*可在www.flir.com进行产品注册后享有



FLIR 中国公司总部：
前视红外光电科技（上海）有限公司
全国咨询热线：400-683-1958
邮箱：info@flir.cn
www.flir.com

FLIR 授权经销商：
成都英孚德科贸有限公司
咨询电话：028-8525 0223/8525 9930
邮箱：xdr_xiejun@163.com
www.cdinfrared.com

图片仅供说明之用，显示图像可能不代表该热像仪的实际分辨率。