

★四川省一级期刊

• 万方数据数字化期刊群入网期刊

• 《中国学术期刊(光盘版)》入编期刊

• 《中国期刊全文数据库》收录期刊

• 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊

• 北极星 中华期刊网入网期刊

• 中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊

• 中国农村电气化信息网

• 重庆维普中文科技期刊数据库

• 《超星数字图书馆》入网期刊

• 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录

四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



广元电网

ISSN 1003-6954



9 771003 695005

四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

Vol.32

2009
No.6

《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 邬小端

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:

ISSN 1003-6954
CN 51-1315/TM

2009 年第 32 卷第 6 期(总 203 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

四川电力试验研究院

发行范围:公开

主 编:胡 灿

副 主 编:吴小冬 谢 舫

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力试验研究院情报室

地 址:成都市青华路 24 号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传 真:(028)87314278

E-mail:cdscdlj@163.com

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册 6.00 元

[期刊基本参数] CN 51-1315/TM* 1978 *
b* A4* 94* 24* P* ¥6.00* 4300* 26 *

2009-06

目 次

·基金专栏·

粒子群算法在机组组合中的应用综述 赵辛欣 陈维荣 叶 震(1)

基于双馈风电模型的电压稳定性研究 郭虎奎 李凤婷(4)

·500 kV 专栏·

V 型串在 500 kV 单回线路中的应用 王从斌 王 刚(7)

500 kV 黄岩变电站三菱公司 HGIS 运行状况分析及处理 杨 兵(10)

11.29 事件引发对天广直流无功控制的深层分析 刘 洋 黎张文(13)

·输配电技术·

10 kV 线路断线事故的分析 熊昌荣 严 峻(16)

关于输电线路耐雷水平的综合研究分析 曾 奕(20)

变电站直流系统接地告警方式设计 李俊儒 刘 玲 赖民昊(24)

高压隔离开关触指压力的测试 蒋 平 李 晶(26)

配电网谐波潮流计算 钟 茜(29)

采用串联谐振原理优化设计 110 kV 变压器和 GIS 耐压装置 黄建康(33)

一种基于新的相模变换矩阵的输电线路故障测距改进算法

..... 郭 亮 吕飞鹏 罗长亮等(38)

架空线—电力电缆混合线路特性及保护配置探讨

..... 江少成 岳亚丽 潘震宇等(42)

电力变压器铁心剩磁检测方法研究 陈文臣 雷晓燕 王 磊(45)

·发电技术·

125 MW 汽轮机振动处理 张亚平(49)

攀煤 135 MW 机组余汽技术改造 王金柱 陈立伟 彭久兵等(50)

浅析绿色照明在发电厂中的应用 胡 蓉(55)

300 MW CFB 机组低负荷运行研究 唐 俊 魏志全(59)

除氧器乏汽回收技术在节能减排中的应用 刘明宝(62)

湿法烟气脱硫系统特殊运行方式 何绍洪 何 强(64)

·综述评论·

架空输电导线覆冰及舞动在线监测技术综述

..... 宁 妍 黄 琦 张昌华等(67)

电力系统电压稳定性分析综述 赵周芳 李华强 张希猛(71)

强磁弱电系统中一起保护误动作分析 杨先义 王 华 陈 漫(75)

非电量在线检测技术在状态检修中的应用 徐克华(79)

泸州电网实时可视化分析与预警系统 高 剑 余兴祥 刘友波(82)

雷电回击 DU 模型等效电路仿真 张凤鸣(86)

2009 年 1~6 期、增刊总目录 (90)

CONTENTS

Summary of Application of Particle Swarm Optimization to Unit Commitment	Zhao Xinxin Chen Weirong Ye Zhen(1)
Study of Voltage Stability Based on Doubly-fed Wind Power Model	Guo Hukui Li Fengting(4)
Application of V-type Insulator String to 500 kV Single-circuit Transmission Line	Wang Congbin Wang Gang(7)
Analysis and Treatment for Operating Condition of HGIS Manufactured by Mitsubishi Corporation in 500 kV Huangyan Substation	Yang Bing(10)
Analysis of DC Reactive Power Control in TianShengqiao Converter Station Caused by 11.29 Events	Liu Yang Li Zhanqwen(13)
Analysis on Wire Breakage of 10 kV Urban Line	Xiong Changrong Yan Jun(16)
Comprehensive Research and Analysis on Lightning Withstand Level of Transmission Line	Zeng Yi(20)
Design of Grounding Alarm Mode for DC System in Substation.....	Li Junru Liu Ling Lai Minhao(24)
Test on Contact Pressure of High Voltage Disconnecter	Jiang Ping Li Jing(26)
Harmonic Power Flow Calculation for Distribution Network.....	Zhong Qian(29)
Design Optimization of Withstand Voltage Test Device for 110 kV Transformer and GIS Using Series Resonance Theory	Huang Jiankang(33)
An Improved Algorithm for Transmission Line Fault Location Based on New Phase-Mode Transformation Matrix	Guo Liang Lv Feipeng Luo Changliang et al(38)
Discussion on Characteristics of Power Cable with Transmission Line and Its Protection Configuration	Jiang Shaocheng Yue Yali Pan Zhenyu et al(42)
Study on Residual Magnetism Detection Method of Power Transformer Core	Chen Wenchun Lei Xiaoyan Wang Lei(45)
Treatment for Vibration of 125 MW Steam Turbine	Zhang Yaping(49)
Technical Transformation Using Surplus Steam of 135 MW Units to Ensure Mine Security	Wang Jinzhu Chen Liwei Peng Jiubing et al(50)
Preliminary Analysis on Application of Green Lighting to Power Plant.....	Hu Rong(55)
Study on Part-load Operation of 300 MW CFB Unit	Tang Jun Wei Zhiquan(59)
Application of Waste Steam Recovery Technique of Deaerator to Energy Saving and Emission Reduction	Liu Minghao(62)
Particular Operating Mode of Wet Flue Gas Desulfurization System	He Shaohong He Qiang(64)
Research Situation and Development of Online Monitoring Techniques for Icing and Galloping of Transmission Lines	Ning Yan Huang Qi Zhang Changhua et al(67)
Review on Voltage Stability Analysis of Power System	Zhao Zhoufang Li Huaqiang Zhang Xineng(71)
Analysis of Relay Trip in Magnetically-strong and Electrically-weak System	Yang Xianyi Wang Hua Chen Man(75)
Application of Online Detection of Non-electrical Quantities to Condition-based Maintenance.....	Xu Kehua(79)
Real-time Visualization Analysis and Early Warning System of Luzhou Power Grid	Gao Jian Yu Xingxiang Liu Youbo(82)
Equivalent Circuit Simulation of Deindorfer Uman Model for Lightning Return-stroke	Zhang Fengming(86)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2009 Vol.32 No.6

(Ser. No. 203)

Bimonthly Started in 1978

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

Postcode: 610072

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Test and Research Institute of Electrical Power

Editor in chief: Hu Can

Editor & Publisher

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

粒子群算法在机组组合中的应用综述

赵欣欣¹, 陈维荣¹, 叶震²

(1 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031, 2 龚嘴水力发电总厂, 四川 乐山 614900)

摘 要: 在深入探讨电力系统机组组合问题的数学模型和粒子群算法的基础上, 加以分类总结, 从粒子群算法和粒子群与其他算法结合两个方面, 详细评述了粒子群算法在电力系统机组组合问题中的应用, 并重点介绍了各种方法对约束的处理。

关键词: 负荷分配; 机组组合; 电力系统; 粒子群算法; 优化

Abstract: Based on the in-depth study of unit commitment problem in power system with the mathematical models and the particle swarm optimization (PSO), the classification and the summary are presented. The main research of applying PSO to unit commitment is overall described in detail from two aspects: the application of PSO and the application of PSO combined with other algorithm, and the focuses are the ways to deal with the constraints.

Key words: load dispatch; unit commitment; power system; particle swarm optimization; optimization

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0001-03

0 引言

电力系统机组组合问题是一个大规模混合整数非线性优化问题, 从 20 世纪 40 年代初人们就开始对这一问题的求解进行研究, 目前用于求解机组组合的算法主要有: 优先次序法、混合整数规划、动态规划、拉格朗日松弛法、模拟退火算法、禁忌搜索、系统进化法、遗传算法、蚁群算法和粒子群算法等^[1]。另外, 令各种算法各擅所长的混合算法也逐渐被用于机组组合算法的求解。

粒子群算法是 (particle swarm optimization, PSO) 是 1995 年 Eberhart 博士和 Kennedy 博士提出的, 它源于对鸟群觅食行为的研究, PSO 算法收敛速度快, 参数简单容易控制, 这些优点使它广泛用于电力系统的各种优化问题^[2]。

针对电力系统机组组合问题的求解, 从粒子群算法和粒子群算法与其他算法结合两个方面总结了粒子群算法求解电力系统机组组合问题的方法。

1 电力系统机组组合问题的数学模型

电力系统机组组合问题是在满足系统负荷和系

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (6087004)

统备用要求以及机组运行技术条件约束的情况下, 确定未来一定期间内各机组的开、停机时间并在机组间进行负荷分配, 以使系统在未来计划周期 (通常是 24 h) 内的总费用最小。其目标函数可表达为

$$\min F = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [u_{it} F_i(P_{it}) + F_{si}(t) u_{it} (1 - u_{i,t-1})]$$

式中, F 为发电总成本; T 为系统调度期间的时段数; N 为系统内的机组数; u_{it} 为机组 i 在时段 t 的状态, $u_{it}=1$ 表示开机, $u_{it}=0$ 表示停机; p_{it} 为机组 i 在时段 t 的有功出力; $F_i(p_{it})$ 为机组 i 在时段 t 的运行费用, 多用二次函数表示 $F_{it}(P_{it})=a_i P_{it}^2+b_i P_{it}+c_i$, a_i 、 b_i 和 c_i 为机组 i 的运行费用参数; $F_{si}(t)$ 为机组 i 在时段 t 的启动费用 $F_{si}(t)=S_{i,j}+S_{i,j}(1-e^{-T_{i,j}^{off}/\tau_i})$, $S_{i,j}$ 、 $S_{i,j}$ 和 τ_i 为机组 i 的启动费用参数。

约束条件如下。

- ① 系统负荷平衡约束: $\sum_{i=1}^N u_{it} P_{it} = P_{Dt}$, 式中, P_{Dt} 为 t 时段系统的负荷。
- ② 系统旋转备用约束: $\sum_{i=1}^N u_{it} P_{i,max} \geq P_{Dt} + P_{Rt}$, 式中, P_{Rt} 为 t 时段系统所需备用大小。
- ③ 机组出力上下限约束: $P_{i,min} \leq P_{it} \leq P_{i,max}$, 式中, $P_{i,min}$ 和 $P_{i,max}$ 分别为发电机组 i 的最小和最大出力。
- ④ 机组爬坡速率约束: $-R_{Dri} \leq P_{it} - P_{i,t-1} \leq R_{Uri}$, 式中, R_{Dri} 为机组 i 爬升率的上限; R_{Dri} 为机组 i 爬升率的下限 (不包括机组的启停)。

⑤最小开停机时间约束: $T_{it}^{on} \geq T_{im_in}^{on}$, $T_{it}^{off} \geq T_{im_in}^{off}$,

式中, T_{it}^{on} 为机组 i 在时段 t 的连续运行时间; T_{it}^{off} 为机组 i 在时段 t 的连续停运时间; $T_{im_in}^{on}$ 为机组 i 启动后必须保持运行状态的最短时间; $T_{im_in}^{off}$ 为机组 i 停机后必须保持停运状态的最短时间。

此外很多专家学者对机组组合问题进行了深入研究,提出了包含考虑系统安全稳定性、市场环境下,含分布式发电电力系统,水火电混合系统及含风电的电力系统机组组合的数学模型,这里不作详细叙述。

2 粒子群算法

假设在 M 维搜索空间 (解空间) 里, 有 s 个粒子组成的粒子群。

其中第 i 个粒子位置可表示为 M 维向量: $x_i(n) = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iM})$, j 表示变量 x_i 的第 j 维分量; 粒子飞行速度为 $v_i(n) = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ij}, \dots, v_{iM})$, 该粒子所经历的个体最佳位置 (个体极值) 可表示为 $p_i(n) = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ij}, \dots, p_{iM})$, 在整个粒子群中, 所有粒子经过的最佳位置 (全局极值) 为 $g_i(n) = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{ij}, \dots, g_{iM})$, 当第 i 个粒子从 $n-1$ 代迭代到 n 代时, 采用下式进行速度位置: $v_i(n) = \omega v_i(n-1) + k_{rand} [p_i(n-1) - x_i(n-1)] + k_{rand} [g_i(n-1) - x_i(n-1)]$, $x_i(n) = v_i(n) + x_i(n-1)$, 式中 ω 为惯性权值; k_{rand} 为在 $[0, 1]$ 范围内变化的随机数; n 为迭代次数; 粒子数 $i=1, 2, \dots, s$ 。迭代中止条件一般选为达到最大迭代次数或粒子群目前搜索到的最优位置满足预先设定的最小适应度值。

近年来, 人们对粒子群算法作出了许多的改进, 力求克服其容易陷入局部最优的缺点, 以达到更好的搜索效果。

3 粒子群算法在电力系统机组组合中的应用

粒子群算法本身是一种无约束的优化, 但电力系统机组组合问题是一个高维数多约束的优化问题, 把粒子群算法应用到约束优化问题的求解中, 其关键在于如何处理好约束, 即解得可行性。基于 PSO 算法的约束优化可以用罚函数法或设定特定的进化操作或修正约束因子。

粒子群算法用于求解电力系统机组组合的方法主要分为两类: 一是直接用粒子群算法或改进的粒子

群算法进行求解, 另一类是将粒子群算法和其他算法结合, 综合利用各种算法的长处进行求解。

3.1 粒子群算法求解机组组合问题

由于电力系统机组组合问题涉及到连续变量 (发电机组出力) 和离散变量 (发电机启停状态) 的优化, 在用粒子群算法求解的时候通常将机组启停状态或机组出力作为控制变量, 一般有以下两种思路: 一种是将连续变量和离散变量作为整体同时优化; 另一种是将机组组合问题看作机组启停优化和机组输出功率优化两个子问题分层进行优化。对于各种约束的处理, 许多学者也使用了巧妙的方法。同时, 考虑到粒子群算法自身容易陷入局部最优的缺点, 在求解过程中一般也对粒子群算法做了或多或少的改进。

文献 [3] 通过在算法迭代过程中对松弛后的 0、1 变量与机组有功出力变量并行地进行优化, 避免了由于决策变量过多造成的维数灾难; 引入变动阈值, 解决了在寻优过程中粒子的值出现振荡时可能会丢失机组有效启停状态的问题; 在粒子群优化算法中引入启发式变异技术, 有效地处理了机组启、停时间的约束并提高了粒子群优化算法的全局收敛能力。文献 [4] 对机组组合问题的 0、1 变量进行松弛, 相对于文献 [3] 增加了变量把开停机时间表示为开停机状态的函数, 粒子群算法的状态变量为有功出力、开停机状态、开停机时间。采用罚函数方法对约束条件进行处理, 最终将机组组合问题转化为无约束问题, 然后采用改进的粒子群算法求解。文献 [5] 采用改进离散二进制粒子群算法和标准粒子群算法相结合的双层嵌套方法, 分别对外层机组的启、停状态变量和内层功率经济分配进行交替迭代优化求解。同时在算法中引入基于机组优先顺序的变异技术和修补策略, 能有效地对出力机组的最短启、停时间约束, 并提高算法的全局寻优能力和计算效率。文献 [6] 采用固定阈值处理表示机组运行状态的 0、1 整型变量, 从而可直接应用粒子群算法求解机组组合问题, 避免求解各时段中的经济负荷分配子问题; 在粒子群算法迭代过程中应用变异操作更新进化速度缓慢的粒子, 增强了算法的搜索能力; 算法收敛后, 采用基于优先列表的贪婪搜索机制做进一步寻优。文献 [7] 仅将机组的启停状态用 0、1 编码, 在产生粒子时考虑最小开停机时间约束, 以保证只在可行解空间内寻优, 借鉴优先顺序法确定优化窗口 (需要优化的那一部分机组) 同时引入启发式规则来保证负荷及旋转备用约

束的满足并进一步提高算法的精度。文献 [8] 采用二维实数矩阵对发电机组的出力进行编码, 将引入经典控制理论中的反馈机制和闭环控制概念并充分考虑粒子在每一步迭代中的自身特性和信息的闭环粒子群算法用于求解电力系统机组组合问题。根据机组出力状态来确定启停状态, 并借鉴优先顺序法的思想, 将平均成本微增率降低且启动成本较高的机组赋予较高的优先级。文献 [9] 采用整数序列对机组的运行状态进行编码, 正数表示运行时间, 负数表示停运时间, 有效减少了粒子群算法求解机组组合问题所需要的控制变量并且仅在变量初始化的时候就能限制其开停机时间, 从而轻松实现了对最大最小开停机时间的约束, 并用参数自适应的粒子群算法求解。文献 [10] 提出一种二进制和实数编码混合的 HPSO 算法。用 UC 问题解决机组组合问题, RCP SO 解决负荷分配问题, 两种算法同时优化。文献 [11] 提出了考虑发电机出力的机组组合数学模型, 模型将可靠性需求和旋转备用约束在优化过程中合并, 并对机组组合这个混合整数规划问题用含有二进制粒子群和连续变量粒子群的混合粒子群算法求解。文献 [12] 提出了迭代最佳的思想, 并将其引入到粒子群算法中, 提出了迭代粒子群算法 (IPSO)。用提出的算法求解概率备用的机组组合, 对一个含有 48 台机组的电力系统进行仿真, 该方法能根据电力系统的停电成本来自自动决定开机数目和旋转备用水平, 用该算法求解概率备用机组组合问题符合有效、经济和安全的要求。

3.2 粒子群算法和其他算法结合求解机组组合问题

将粒子群算法和其他算法结合用于机组组合问题, 较常见的是将机组组合问题, 分成机组启停状态优化和机组出力优化两个子问题来求解, 将粒子群算法和其他算法结合可以使各种算法各擅所长, 以达到更好的优化效果。

文献 [13] 将离散二进制粒子群算法结合优先顺序法进行机组启停状态的优化, 并采用启发式变异进行旋转备用约束和最大最小运行、停运时间约束的处理。采用修正灰色区域的方法减小开停机费用, 最后用 equal lambda - iteration 方法进行负荷分配并计算运行费用和开停机费用。算法耗时较短并且随机组数量增加较少。文献 [14] 将机组组合解编码为机组操作序列, 降低了蚁群算法搜索的难度, 使其空间复杂度由指数型降为线性型, 使采用蚁群算法求解更大规模的机组组合问题成为可能。采用协同粒子群算

法求解多时段负荷的经济分配问题时, 用一个粒子群处理一个时段的优化问题, 通过共享粒子群间的惩罚项解决了机组爬升率的约束问题。文献 [15] 采用二进制粒子群优化方法解决机组状态组合问题, 用遗传算法结合启发式技术解决经济分配问题, 在算法中, 将机组的最小开停机时间作为搜索机组开停机的最小单元, 这样就大大的降低了搜索时间。文献 [16] 对机组启停状态优化和负荷经济分配问题, 分别用改进的离散粒子群算法 (DPSO) 与基于等微增率原理的经典拉格朗日乘子法的组合来解决机组启停优化问题, 即先采用改进的 DPSO 优化算法给出调度周期机组的状态组合, 然后根据等微增率原理利用拉格朗日乘子法求解负荷经济分配。对于机组启停优化中的约束条件, 机组爬坡速率利用 K-T 最优性条件处理, 对于最小开停机时间约束引入一个启发式的拟变异机制对优化搜索过程进行干预。文献 [17] 提出了一种粒子群算法与拉格朗日松弛法相结合的机组组合算法。用拉格朗日松弛方法将优化问题在各个机组之间解耦, 对于单台机组的采用动态规划法进行优化, 用粒子群算法优化拉格朗日乘子的取值。

4 结 语

粒子群算法作为一种新兴的群智能算法, 在各个领域得到了广泛的应用, 从粒子群算法以及粒子群算法与其他算法结合的算法两个方面, 对粒子群算法在电力系统机组组合问题中的应用进行了总结, 其中重点说明了各种使用方法对约束的处理。

参考文献

- [1] 陈皓勇, 王锡凡. 机组组合问题的优化方法综述 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(4): 51-56.
- [2] 袁晓辉等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 2005, 28(19): 14-19.
- [3] 胡家声, 郭创新, 曹一家. 一种适用于电力系统机组组合问题的混合粒子群优化算法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 24-28.
- [4] 赵波, 曹一家. 电力系统机组组合问题的改进粒子群优化算法 [J]. 电网技术, 2004, 28(21): 6-10.
- [5] 袁晓辉, 王乘, 袁艳斌, 等. 一种求解机组组合问题的新型改进粒子群方法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 34-38.

(下转第 37 页)

龙华变电站、110 kV 西郊变电站等进行试验后,各方面保护功能完善,试验过程安全,各项试验操作都满足试验需求,只需要不到 10 kVA 的电源容量,与采用大功率试验变压器相比,还大大减少了试验运输等费用,试验效率也得到了极大的提高。

随着串联谐振耐压试验技术的不断发展,充分利用串联谐振试验装置具有的操作简单、损耗低、重量轻、维护简单、对电源需求低、保护完善等优点,逐步开展大容量设备的耐压试验势在必行。串联谐振耐压试验技术已经非常的成熟,对于容性试品的耐压试验,原有笨重的大功率变压器耐压试验设备必将被轻型的串联谐振耐压试验设备所替代,可在工程中大量采用。

参考文献

[1] 张豫仁. 高电压实验技术 [M]. 北京:清华大学出版社, 1982.

[2] 孙力勇,张焰,蒋传文. 求解机组组合问题的嵌入贪婪搜索机制的粒子群优化算法 [J]. 电网技术, 2006, 30 (13): 44—48.

[3] 刘涌,侯志俭,蒋传文. 求解机组组合问题的改进离散粒子群算法 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 35—39.

[4] 韩恺,赵均,钱积新. 电力系统机组组合问题的闭环粒子群算法 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 36—40.

[5] V. S Pappal I Erlich A New Approach for Solving the Unit Commitment Problem by Adaptive Particle Swarm Optimization [J]. Power and Energy Society General Meeting — Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE 20—24 July 2008: 1—6.

[6] Ting T. O, Rao M. V. C, Loo C. K A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle swarm optimization [J]. IEEE Trans on PWRs, 2006, 21 (1): 411—418.

[7] Lingfeng Wang Chanan Singh Unit commitment considering generator outages through a mixed—integer particle swarm optimization algorithm [J]. Applied Soft Computing, 2009, 9: 947—953.

[8] Tsung—Ying Lee Chun—Lung Chen Unit commitment

1982.

[2] GB/T 16927. 1—1997, 高电压试验技术第一部分:一般试验要求 [S].

[3] 国家技术监督局. 电气装置安装工程电气设备交接试验标准 [M]. 中国计划出版社, 2006.

[4] DL/T 474. 4—2006, 现场绝缘试验实施导则 交流耐压试验 [S].

[5] 西南电业管理局试验研究所. 高电压设备试验方法 [M]. 北京:中国水利电力出版社, 1993.

[6] DL/T 555—1994, 气体绝缘金属封闭电器现场耐压试验导则 [S].

[7] 中华人民共和国能源部. 电业安全工作规程 [S]. 北京:中国电力出版社, 1991.

作者简介:

黄建康 (1976—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统自动化及高压试验。

(收稿日期: 2009—10—14)

(上接第 3 页)

with probabilistic reserve: An IPSO approach [J]. Energy conversion and management, 2007, 48: 486—493.

[13] Xiaohui Yuan Hao Nie Anjun Su Liang Wang Yanbin Yuan An improved binary particle swarm optimization for unit commitment problem [J]. Expert System with Applications, 2009, (36): 8049—8055.

[14] 陈焯,赵国波,刘俊勇等. 用于机组组合优化的蚁群粒子群混合算法 [J]. 电网技术, 2008, 32(6): 52—56.

[15] 蒋秀洁,吴永华,杨敏. 基于 PSO—GA 算法的电力系统机组组合研究 [J]. 继电器, 2006, 34(5): 34—38.

[16] 娄素华,余欣梅,熊信良,等. 电力系统机组启停优化问题的改进 DPSO 算法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (8): 30—35.

[17] P. Sriyanyong Y. H. Song Unit Commitment Using Particle Swarm Optimization Combined with Lagrange Relaxation [J]. Brunel Inst of Power Syst, Brunel Univ, Uxbridge UK; Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE 12—16 June 2005, 3: 2752—2759.

作者简介:

赵幸欣 (1985—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行。

(收稿日期: 2009—09—18)

基于双馈风电模型的电压稳定性研究

郭虎奎, 李凤婷

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008)

摘要:在电力系统仿真软件 PSASP 6.25 中建立了基于双馈式风力发电机组的模型, 仿真计算了新疆达坂城风电场中风机模型为双馈式风电机组模型条件下, 在阵风、渐变风、随机风时风电场接入对电网电压稳定性的影响。

关键词:风电机组; 双馈机组; 风速

Abstract: The type of doubly-fed wind turbine model is established in power system simulation software PSASP 6.25. The simulated wind turbine model in DaBancheng wind farm of Xinjiang is the doubly-fed. When the wind is the gust, the asymptotic wind or the random wind, the impact on the voltage stability of the large power grid with the access of wind farm is calculated.

Key words: wind turbine unit; doubly-fed unit; wind speed

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0004-03

0 引言

双馈发电机也称交流励磁发电机, 它在结构上类似于绕线式感应电机, 包括绕线式异步电机本体、变频器和控制环节。其定子绕组直接接入电网, 转子采用三相对称绕组, 经背靠背的 PWM 双向电压源变频器与电网相连, 给发电机提供交流励磁, 可实现发电机有功、无功和转速的独立调节。该发电机具有良好的稳定性和较强的进相运行能力^[1]。

以下模拟分析了新疆达坂城风电场风机模型为双馈式风力发电机时, 风电场风能接入对主电网电压稳定性的影响。作为风电场的基本组成单元, 风电机组模型对整个风电场的电压稳定性将产生重大影响。同时考虑到风力发电出力随风速大小等因素而变化, 所以在风电场并网运行时必然会影响电网的电压质量和电网的电压稳定性。

风力发电对电网电压的影响主要有慢的(稳态)的电压波动、快的电压波动(即闪变)、波形畸变(即谐波)、电压不平衡(即负序电压)、瞬态电压波动(即电压跌落和凹陷)等^[2]。

1 空气动力学及风速模型

1.1 空气动力学模型

$$\begin{cases} P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\beta, \lambda) V_{eq}^3 \\ T_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_p(\beta, \lambda) V_{eq}^2 / \lambda \\ C_p(\beta, \lambda) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5.0 \right) e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, P_w 是从风电机组从风中获取的能量转化为的风力机械功率 (W); T_w 是从风中获取的能量转化为风力机械转矩 ($N \cdot m$); ρ 为空气密度 (kg/m^3); R 为风机叶轮半径 (m); $\lambda = R\omega_{mr}/V_{eq}$ 为叶尖速比; β 为桨距角 (deg); ω_{mr} 为风力机叶轮的转速 (rad/s); C_p 为风机的风能转换效率系数, 是 λ 与 β 的函数; V_{eq} 为等效风速^[3]。

1.2 风速特性^[4,5,6]

为了较精确地描述风的随机性和间歇性的特点, 这里采用风力三分量模型, 各分量分别为阵风 V_A 、渐变风 V_B 和随机风 V_C 。

A 阵风: 描述风速突然变化的特性。

$$V_A = \begin{cases} 0 & (t < T_{IG}) \\ V_s (T_{IG} \leq t \leq T_{IG} + T_G) \\ 0 & (t > T_{IG} + T_G) \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$V_s = (\max G / 2) \{ 1 - \cos[2\pi(t/T_G) - (T_{IG}/T_G)] \}$
 V_A , T_{IG} , T_G , $\max G$ 分别为阵风风速 (m/s), 起动时间 (s), 周期 (s) 和最大值 (m/s)。

国家重点实验室: “电力系统及发电设备控制和仿真”重点项目 (SKLD09KZ01)

B 渐变风:表示风速的渐变特性。

$$V_B = \begin{cases} 0 & (t < T_{1R}) \\ V\gamma(T_{1R} \leq t < T_{2R}) \\ \max R & (T_{2R} \leq t \leq T_R + T_{2R}) \\ 0 & (t \geq T_R + T_{2R}) \end{cases} \quad (3)$$

其中,

$$V\gamma = \max R [1 - (t/T_{2R}) / (T_{1R} - T_{2R})]$$

式中, V_B , $\max R$, T_{1R} , T_{2R} , T_R 分别为渐变风风速 (m/s)、最大值 (m/s)、起动时间 (s)、终止时间 (s) 和保持时间 (s)。

C 随机扰动风:风速的随机性一般用随机噪声风分量来表示。

$$V_c = 2 \sum_{i=1}^N [S_v(\omega_i) \Delta \omega]^{1/2} \cos(\omega_i + \varphi_i) \quad (4)$$

其中,

$$\begin{cases} \omega_i = (i - \frac{1}{2}) \cdot \Delta \omega \\ S_v(\omega_i) = \frac{2K_N F^2 |\omega_i|}{\pi^2 [1 + (F\omega_i / \mu \pi)^2]^{4/3}} \end{cases}$$

式中, φ_i 指 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀分布的随机变量; K_N 指地表粗糙系数; F 指扰动范围 (m^2); μ 指相对高度的平均风速 (m/s); N 指频谱取样点数; ω^i 指各个频率段的频率。

2 算例分析

仿真计算在一个由 6 台风电机组构成的风电系统中进行,风电场和大电网连接的等值电路如图 1 所示。

风电场包含 3 台相同型号的 750 kW 风电机组和 3 台相同型号的 1.5 MW 风电机组。风电机组采用单台机组单台变压器的接线方式,每台风电机组出口电压为 690 V,经变压器升压到 10 kV。各台机组之间用地下电缆相联接。风电场出口经升压变压器升压至 110 kV,然后经双回 150 km 架空线路与远方电网相连。

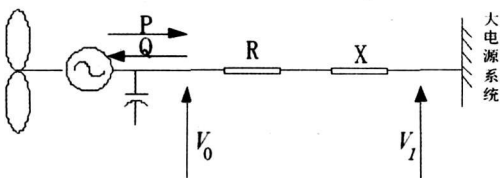


图 1 风电场接入电力系统的等值电路原理图

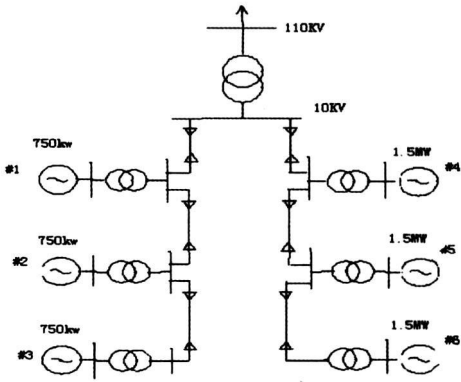


图 2 风电场内部接线图

2.1 双馈风电系统在不同风系扰动下的运行情况下风电场特性分析

2.2.1 阵风扰动下的风电机组特性分析

图 3 是阵风的仿真曲线。其中曲线 (1) 代表阵风风速随时间的变化,曲线 (2) 代表双馈式风电机组无功出力随时间的变化情况。从图 3 可以看出,当风速从 11.5 m/s 增大到 23.3 m/s 的过程中,其无功出力从 0.1 pu 减小到 0.036 pu。在风速从 23.3 m/s 增大到 24.3 m/s 然后重新变小的过程中,其无功出力开始增大。从图 3 也可以看到采用双馈发电机的风电机组一直相当于是一个无功负荷,因为其输出的无功功率为负值。即双馈感应电机能够实现有功、无功的解耦控制,能够给系统电压提供一定的无功支持,有利于维持系统电压稳定。

图 4 为阵风时风电场与系统连接点的电压变化曲线,其中曲线 (1) 是双馈式风电机组出口电压,曲线 (2) 是风电机组随着风速的变化的有功变化曲线。从仿真结果还可以看出,在 1~3 s 随着风速的增大风电场输出有功出力增加,即双馈式风力发电机的转速可随风速的变化及时的做出相应调整,使双馈式风力机以最佳叶尖速比运行,产生最大的电能输出。结

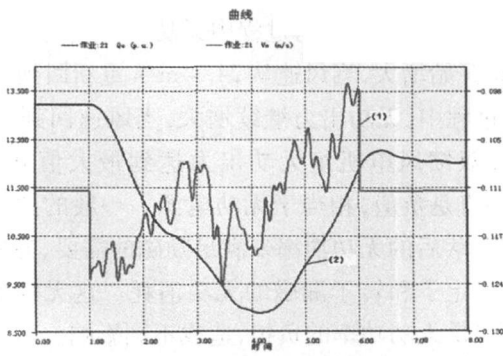


图 3 阵风时风电场输出无功功率的变化曲线

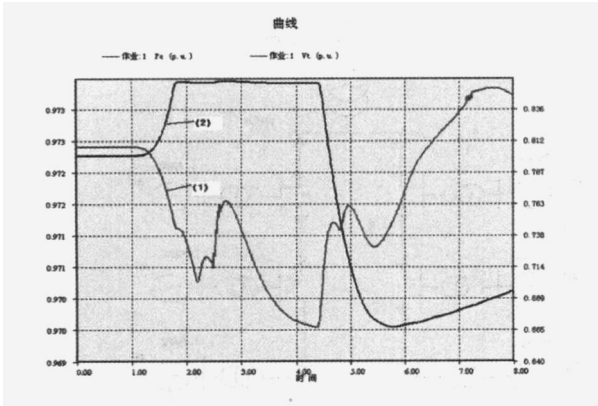


图 4 阵风时风电场与系统连接点的电压变化曲线

合上面的无功曲线图可知,随着风速增大其无功出力减小,因此风电机组出口处电压随之降低。在 4.3 s 后随着风速减小,有功出力减小,其无功出力开始大幅增大,因此机组出口处电压也开始增大,使系统电压接近于最佳状态。

2.2.2 渐变风扰动下的风电机场特性分析

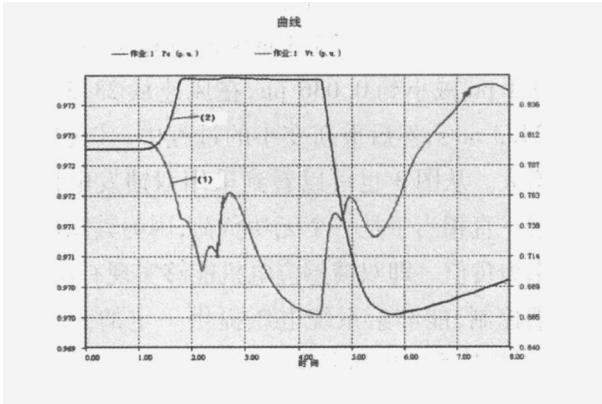


图 5 渐变风时无功功率变化曲线

图 5 为渐变风时无功功率变化曲线,其中曲线 (1) 代表渐变风风速随时间的变化,曲线 (2) 代表双馈式风电机组无功出力随时间的变化情况。可以看到风速在 11.6 m/s 增大到 24.4 m/s 时,双馈风电机组的无功出力从 0.10 pu 减小到 0.036 pu。当风速达到 23 m/s 时,无功出力减小到最小值。而风速从 23 m/s 增大到 24.4 m/s 的过程中无功出力不再继续减小,而是开始增大,当风速从 24.4 m/s 重新回到 11.6 m/s 的过程中,无功出力继续增大,当风速回到 11.6 m/s 时,双馈风电机组无功出力达到最大值 0.109 pu 且一直是负值,相当于无功电源。一般的感应发电机需要落后的无功功率来满足励磁的需要,另外也为了供应定子和转子漏磁的无功消耗。这无疑加重了电网提供无功功率的负担,造成不利影响。而双馈式风力发电机,相当于一个无功电源,能向电网提供无功功率,这是它很大的一个优点。

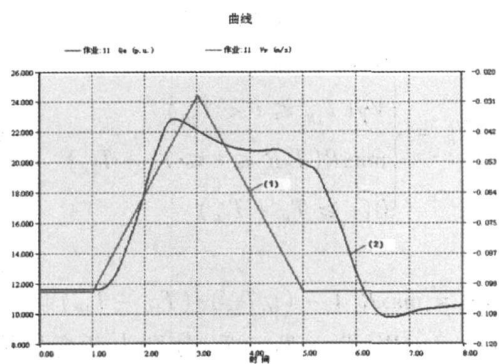


图 6 渐变风时电压变化曲线

图 6 为渐变风时电压变化曲线,其中曲线 (1) 是渐变风时双馈式风电机组出口处的电压曲线,曲线 (2) 为其有功出力曲线。可以看出,从 1.2 s 开始双馈风电机组有功出力开始增大,无功出力开始减小,其出口处电压开始降低。在 4.5 s 处其电压降低到最小值。然后随着风速降低,无功出力开始增大,机组出口处电压开始恢复到 0.97 pu 的稳定状态。

2.2.3 随机风扰动下的风电机场特性分析

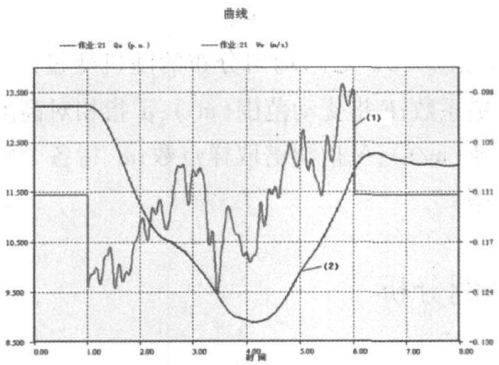


图 7 随机扰动风时无功功率变化曲线

图 7 为随机扰动风时无功功率变化曲线。曲线 (1) 代表随机扰动风风速的变化,曲线 (2) 表示这一时间段内双馈式风电机组无功出力的变化。由于风电机组本身的惯性,风电机组出力以及由此引起的无功变化并不在时间上与随机风一致。

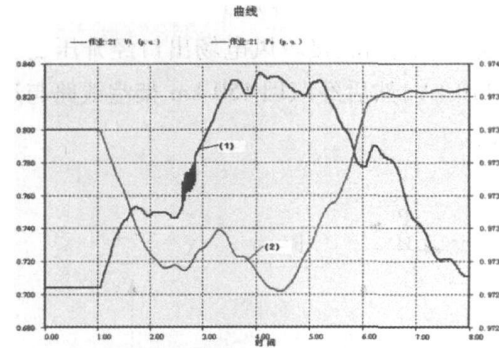


图 8 随机扰动风时电压变化曲线

(下转第 12 页)

可能造成刀闸直阻增大,刀闸的绝缘破坏。

4.2 刀闸半分合闸的处理措施

按照日本厂方要求 50332 刀闸做直流回路电阻测试和绝缘电阻测试,经测试这两项参数均正常。为了防止刀闸电机回路熔断器再次熔断,该站 HGIS 刀闸电机电源回路所有熔断器已换成空气开关。

5 HGIS 机构箱液压表连接管漏油

2008 年 4 月 25 日,该站值班员巡视设备时发现 5013 开关 A 相机构箱液压表连接管处漏油,经过几天观察发现漏油不止。分析是天气变热后机构箱油压力增大,并未得到及时释压,加上连接管本身制造工艺问题,内部有毛刺小孔,所以 5013 开关 A 相机构箱液压表连接管发生了漏油。

5.1 开关机构箱液压表连接管漏油的危害

(上接第 6 页)

图 8 为随机扰动风时电压变化曲线。其中曲线 (1)是双馈式风电机组出口电压,曲线 (2)是风电机组随着风速的变化的有功变化曲线。从仿真结果看出,由于随机风速的幅值变化不大,它所引起风电场出力以及电压的波动并不显著,引起风电场出力大幅度变化的是阵风和渐变风等风速变化幅值较大的扰动。

3 结 论

以上仿真分析了双馈式风电机组接入无穷大母线时,在各风速分量作用下,风电机组输出的无功及机端电压的变化。

可以得出双馈式风力发电机的转速可随风速的变化及时的做出相应的调整,使双馈式风力机以最佳叶尖速比运行,产生最大的电能输出。

基于双馈风电模型的风电机组,相当于一个无功电源,风电接入主电网的电压稳定性要远远好于异步式风电场接入时的对主网电压稳定性的影响,更有利于维护主网的电压稳定性。

参考文献

[1] 王纯琦,晁勤.达坂城无功补偿分析 [D].乌鲁木齐:新

如果开关机构漏油越来越多,将导致开关液压力不足,可能造成开关不能正常分合闸,甚至跳合闸闭锁,事故情况下将造成扩大停电范围。

5.2 开关机构箱液压表连接管漏油的处理措施

在 5013 开关停电状态下,由日本厂方更换了 5013 开关 A 相液压机构压力表连接管。目前尚未发现其他开关机构漏油。

6 小 结

以上对 500 kV 黄岩变电站 HGIS 一年半多来运行中的异常和缺陷进行了介绍和分析,并对这些异常和缺陷产生的危害和整改方案进行了阐述。给同类设备的异常和缺陷处理提供了一套明确的处理方案,尽快隔离和消除故障,保障电网的安全运行。

(收稿日期:2009-07-07)

疆大学,2006.

[2] 迟永宁,戴慧珠,王伟胜.大型风电场接入电网的稳定性问题研究 [D].中国电力科学研究院,2006.

[3] 范高峰,王纯琦,乔元,等. SVC 补偿型定速风电机组模型及其特性分析 [J]. 电网技术,2007, (11): 31-22.

[4] 陈树勇.大型并网风力发电场规划方法研究 [D].中国电力科学研究院.

[5] Wu Xueguang et al. Application of models of the wind energy conversion system to wind power dynamic analysis. Power System Technology, 1998. Proceedings POWER-CON '98. International Conference on, 1998, (2): 1406-1411.

[6] 潘文霞,陈允平.风电系统及其电压特性研究 [J].河海大学学报,2001, 29(1): 88-92.

作者简介:

郭虎奎 (1984-),男,汉族,硕士研究生,主要从事电力系统稳定与控制研究;

李凤婷 (1965-),女,汉族,教授,硕士生导师,主要从事并网型风力发电系统研究。

(收稿日期:2009-10-10)

V 形串在 500 kV 单回线路中的应用

王从斌, 王 刚

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610061)

摘 要:在四川平原及丘陵地区,经济相对发达,人口集中,房屋分布密集,且无规则分布,再加之其他建筑设施众多,线路走廊选择非常困难。路径在满足城乡规划后,局部优化的最大制约因素就是如何避让房屋,减少房屋拆迁量,从而降低线路投资,减少因房屋拆迁带来的社会影响。缩小线路的走廊宽度,无疑是最直接和有效的手段。如何采用 V 形串缩小线路走廊宽度、优化铁塔结构设计、降低铁塔钢材耗量进行了总结介绍。

关键词: V 串;铁塔结构优化;线路走廊

Abstract In the plain and hill area of Sichuan province the economy is relatively developed the population is concentrated and the buildings and houses in the villages are spread over randomly It is very difficult to select the corridor for the transmission line After the satisfaction of the general plan of the township the major optimization point shall be the avoidance of dismantling of the houses hence to reduce the cost and social impact of the transmission line construction Shortening the width of the corridor shall be the most direct and effective way undoubtedly The application of V-type insulator string in this regard to shortening the width optimizing the structure design of the tower and reducing the quantity of the steel for the tower are introduced

Key words V-type insulator string tower structure optimization; transmission line corridor

中图分类号: TM723 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0007-03

0 概 述

常规 500 kV 单回线路,直线塔导线布置一般采用水平排列的酒杯型塔和三角形排列的猫头塔,前者直接占用通道宽度(两边线投影间距离)在 22~25 m 之间,后者一般在 15~17 m 之间,但根据以往设计经验,同等使用条件下,前者的单基铁塔耗钢量要比后者低约 6%~8%,因此各有千秋,应根据不同环境情况进行选择使用。

以四川电力设计咨询有限公司设计的紫坪铺水电站—华阳 500 kV 线路工程为例,该线路工程初期设计时沿线经过了都江堰、彭州、郫县、温江、崇州、大邑、双流,长约 140 km,待彭州、崇州 500 kV 变电站建成时再开接进去,形成成都 500 kV 双环网中的一部分。线路所经地区无规则分布的房屋密集,规划区域、乡镇企业及其他建筑设施众多,房屋拆迁量大、通道选择困难,如何再进一步缩小线路走廊宽度,在本工程中具有非常重要的技术、经济和社会意义。

在进行塔型规划时,吸收了近年国内同类工程中

先进的铁塔设计思路,设计了中相为 V 形串布置的猫头塔,以限制导线摇摆,缩小塔窗尺寸,改善铁塔受力,从而达到既缩小线路走廊宽度,又减少铁塔耗钢量的目的。

根据实际应用效果总结,在缩小线路走廊宽度方面,与三相水平排列、中相 V 串布置的酒杯型塔相比较,缩小线路走廊宽度 7.2~9.3 m,缩小线路走廊面积约 23%,大大降低了电磁环境宽度及走廊清理费用,少拆迁房屋约近 28 000 m²,在当时建设条件下仅此项费用即节约投资约 1 000 万元。

铁塔单基耗钢量方面,以本工程中 4×500 导线段新设计使用的直线塔 ZMA51 为例,36 m 呼称高重量为 11.646 t 与其他同类 500 kV 线路中使用 4×LGJ-400/35 导线、三相 I 串猫头塔相比较,还轻 3.129 t。

1 塔头优化

1.1 中相 V 串夹角的优化确定

在满足静态电气间隙要求后,中相悬垂绝缘子串

摇摆角是控制塔窗尺寸的主要因素,中相采用 V 串后,可有效限制摇摆角,减小塔窗尺寸。V 串的夹角大小又直接影响塔窗尺寸的大小,夹角越大,中相横担长度越长,因此合理的 V 串夹角是塔头尺寸优化设计的前提。过去认为 V 型串背风肢串不宜受压,夹角一般取最大摇摆角的 2 倍,即取 $95^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 。前苏联认为其夹角应以绝缘子盘间不危险接近或破碎为条件,此时,风偏角可以比 V 串夹角的一半大 6° 。

根据本工程地形主要以平丘为主,档距不大且分布较均匀,垂直档距与水平档距比值接近为 1 的特点,V 串夹角可取较小值。同时结合近年来国内有关单位对 V 串绝缘子串受压的试验研究,得出的背风支串可以承受一定压力的结论,经反复比较计算,最终确定 V 串夹角按 90° 设计。

以 ZMA511 直线塔为例,经多次比算,最终结果使中横担上口长度由以前相似设计条件的 Z11 猫头型直线塔(三相 I 串)的 10.3 m 减小为 9.4 m,塔窗宽度缩小了 0.9 m。

1.2 中相横担形式的优化

因 V 型串挂点设置在顶面横担与上曲臂内侧连接处,塔窗顶面横担不再受中相导线荷载,主要起连梁作用。为此,将其设计为对称拱形结构,起拱后虽将增大拱脚推力,但由于 V 串挂点与拱脚共点,两串拉力产生的水平力始终指向横担中心,可抵消拱脚推力。顶面横担采用拱形结构后更易满足塔窗内 V 串上部电气间隙要求,缩小上下曲臂尺寸,减小塔窗高度。同时在满足电气要求的前提下,将地线支架与中横担合为一体,降低塔头尺寸。

仍以 ZMA511 塔为例,最终结果塔头高度由以前相似设计条件的 Z11 塔的 12.4 m 减小为 10.8 m,减小了塔头高度 1.6 m,且地线荷载均有减小。

ZMA511 塔头布置如图 1 所示。

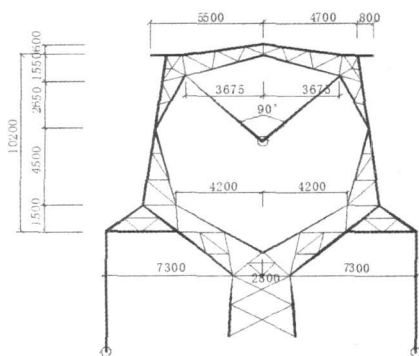


图 1 ZMA511 塔头布置及尺寸图

2 塔身优化

2.1 塔身断面

塔身断面一般有矩形和方形,通常采用矩形比方形钢材节约 4% 左右。但为满足环保要求,铁塔均应采用全方位不等高腿,以减少塔基开方,方形塔身的设计和加工方面有明显优势。为此本工程直线塔塔身断面采取“上矩下方”的形式,即继承了矩形塔顺线路方向几何尺寸小、经济省料的优势,又发挥了方形塔在塔腿部分的种种长处。

2.2 塔身坡度及根开

塔身的坡度和布材对铁塔重量的影响至关重要,它直接影响主材、斜材的规格以及基础的经济指标。合理的塔身坡度应使塔身主材应力分布的变化与材料规格的变化相协调,使主材受力均匀。

塔身坡度越大,主材受力越小、基础作用力也越小,但斜材长度和辅助材长度增加,结构布置较复杂;反之,主材受力加大、基础作用力也加大,但斜材长度减小。在对塔身坡度和根开进行了多方案组合优化后,使其中部分塔身段主材规格下调,塔重下降较显著。

2.3 塔身横隔面设置及优化

铁塔结构设计技术规定要求:同一塔身坡度范围内,横隔面的设置间距一般不大于平均宽度的 5 倍,也不大于 4 个主材分段。

合理的设置塔身横隔面,对于向下传递由于结构上部外荷产生的扭力、减小塔重、均匀塔身构件内力具有一定的作用。

在以往的设计中,为了便于施工时很方便地组装铁塔,往往人为地增加横隔面的数量。但不合理设置横隔面会引起局部结构受力复杂,塔身斜材规格增大。所以本工程对横隔面的设置原则是:塔身变坡截面(塔身由矩形变方形的部位)必须设,对可设可不设的构造或施工横隔面一律不设。同时,横隔面采用周边密集布置,减小构件计算长度,减小构件规格。

以 ZMA511 塔为例,最终结果为 45 m 呼称高,塔身也仅有一个塔身变坡横隔面。

3 塔腿优化

3.1 长短腿级差的优化确定

铁塔长短腿塔最大使用级差一般为 6.0~9.0 m,使塔重单基指标上升,通过对以往工程铁塔计算

表 1 使用 ZMA511 与其他类似条件塔型主要技术经济比较表

比较内容	三相 I 串水平 排列酒杯塔	中相 V 串 水平排列酒杯塔	三相 I 串猫头塔	中相 V 串猫头塔
典型塔型 ($L_H=450, L_V=600\text{ m}$)	ZB1(某设计院)	ZVB21(某设计院)	Z11(某设计院)	ZMA511(本工程)
两边相线间距离(水平投影)/m	$12\times 2=24$	$10.9\times 2=21.8$	$7.3\times 2=14.6$	$7.3\times 2=14.6$
呼称高 36 m 的铁塔单基重量 /t	12.921	11.163	14.775	11.646
呼称高 36m 的铁塔根开 /m	7.226×7.226	7.91×7.91	9.5×9.5	8.7×8.7
单基占地面积 / m^2 (根开 +1 m)	67.7	79.4	110.2	94.1
呼称高 36 m 的铁塔全高 /m	41.0	40	48.4	46.2
线路走廊	房屋拆迁宽度 (m) (按边线 5 m)	34	31.8	24.6
	电磁环境宽度 (m) (边导线 11 m 高, $E\geq 4\text{ kV/m}$)	50	50	38

结果分析,同一接身的一组长短腿中,最短腿刚度最大,其主材内力和斜材长细比决定了本组腿主要受力材的规格。工程中一般按“短身长腿”的原则配置塔位接腿,所以每组腿中的最短腿实际用量很少,若级差设计过大,腿部材料强度利用率就低,单基塔重不理想。本工程为平丘地形,因此确定长短腿级差取 1.0 m,最大使用级差取 4.0 m,最短腿长度不小于 3.0 m。从最终施工图结果统计,这一设计思路完全符合工程实际情况,减少了单基耗钢量。

3.2 公共接腿与非公共接腿的比选

公共接腿是指同一组接腿可通过不同接身段与本体连接成不同呼称高的方式。这种方式制图量少,加工施工较方便;不足之处在于塔腿接身段刚度较大,且构造复杂,重量较重,同时部分斜材受力不合理。

非公共接腿是指一组接腿仅能与不同本体连接形成不同呼称高,无接身段。这种方式材料利用率较高,无接身断面,塔重较轻。但塔腿制图工作量较大,加工施工较复杂。

通过对加工单位加工工艺及包装的调研,加上最大使用级差的限制,使塔腿数量相对较少。最终决定采用非公共接腿,为进一步减轻塔重奠定了基础。

4 主要技术经济比较

以本工程使用量最多的塔型 ZMA511(中相 V

串、猫头型直线塔),与其他同类 500 kV 线路中实际使用过的、使用条件基本相当的水平排列的酒杯型塔、三相使用 I 串的猫头型塔进行技术经济比较。

由表 1 比较结果可知,在经济指标上,除 ZVB21 的单基耗钢量略轻外(仅相差约 4.3%),其余均比 ZMA511 重,但占用走廊宽度却减少了 7.2 m,大大降低了电磁环境宽度及走廊清理费用,走廊面积仅是 ZVB21 的 77.3%,具有明显优势。

根据最终拆迁房屋结果统计,全线指标仅 680 m^2/km ,在本地区同类线路中,该项指标最先进(在四川地区处于平丘地形的 500 kV 线路,房屋拆迁指标一般在 850~1 500 m^2/km),该项成果在本工程中具有重要的技术、经济、社会意义,大大减轻了房屋拆迁带来的社会问题,也为该工程评为国网公司优质工程提供了有力的技术支撑,同时在四川后期建设的平丘地形单回 500 kV 线路中广为使用。

参考文献

[1] 电力工程高压送电线路设计手册 [s]. 中国电力出版社.
[2] 架空送电线路杆塔结构设计技术规定 [s]. 中国电力出版社.

(收稿日期: 2009—08—31)

欢迎订阅《四川电力技术》

500 kV 黄岩变电站三菱公司 HGIS 运行 状况分析及处理

杨 兵

(广安电业局, 四川 广安 638000)

摘 要: 广安 500 kV 黄岩变电站是四川采用日本三菱公司 HGIS 的唯一 500 kV 变电站, 黄岩变电站在四川电网乃至华中电网中都具有非常重要的地位。HGIS 运行状况的好坏势必影响电网的安全。从黄岩变电站 HGIS 一年半来的运行状况看, HGIS 也发生了一些异常与缺陷, 对这些异常与缺陷都进行了仔细分析, 并对其完成了处理措施。

关键词: 500 kV HGIS 运行状况; 异常缺陷; 分析; 处理

Abstract: Guangan 500 kV Huangyan Substation is the only one substation using hybrid gas insulated switchgear (HGIS) in Sichuan. Huangyan Substation has a very important position in Sichuan Power Grid and even in Central China Power Grid. The operating condition of HGIS will affect the security of power grid. Looking from the operating condition of HGIS in Huangyan Substation for more than a year and a half, there are some abnormalities and defects occurring in HGIS. All of the abnormalities and defects have been analyzed carefully and the measures have been adopted to deal with them.

Key words: 500 kV hybrid gas insulated switchgear; operating condition; abnormal defect; analysis; treatment

中图分类号: TM732 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0010-03

广安 500 kV 黄岩变电站 2007 年 7 月 23 日投运至今, 已安全运行了 571 d。黄岩变电站作为四川电网的重要枢纽变电站, 其重要地位显露无遗。该站 500 kV 设备的安全运行与否将影响整个四川电网甚至华中电网的安全。500 kV 出线共有 7 回, 两回与广安发电厂连接, 两回与南充变电站连接, 两回与重庆万县变电站连接, 一回与达州变电站连接, 共有两台主变压器。其中 500 kV 设备采用日本三菱公司的 HGIS。经过这一年半的运行, 下面将对 HGIS 运行中发生过的异常与缺陷进行分析, 并指出这些异常与缺陷带来的危害, 并针对这些异常与缺陷完成了相应的处理。

1 HGIS 开关和刀闸机构箱电缆绝缘 破损

1.1 开关机构箱电缆绝缘破损

2008 年 11 月 9 日, 该站值班员对 500 kV 广黄二线停电操作由热备用转冷备用时, 监控电脑反复发出 1 号直流屏接地、绝缘告警信号并复归, 并发出 5013 开关油压低跳闸闭锁信号和第一、二组控制回路断线信号, 然后发出 5033 开关直流接地。值班员立即向调度员申请拉开 5013 和 5033 开关控制电源空开, 拉

开 5013 和 5033 开关控制电源空开后 5013 开关油压低跳闸闭锁和直流接地信号复归。经过保护专业人员的查找, 最终发现 5013 开关发油压低跳闸闭锁信号系 5013 开关 B 相机机构箱插把内油压低闭锁跳闸控制电缆绝缘破损导致, 电缆绝缘层被磨穿, 有的甚至看见里面芯线。5033 开关发直流接地信号系 5033 开关 A 相机机构箱开关位置辅助接点回路电缆绝缘破损导致。

该站管理人员由此联想到其他 500 kV 开关是否也存在相同状况, 立即对已停电的广黄二线 5011、5012 开关机构箱插把电缆进行检查, 均发现不同程度的绝缘破损。该站对这一缺陷高度重视, 并书面报告广安电业局生技部。经过运行人员与保护人员的讨论分析, 导致绝缘破损的原因有: ①机构箱外部电缆与内部电缆是通过插把连接, 外部电缆穿进插把时必须经过一道约 90℃ 弯折的工艺, 而插把内壁是金属材质且有棱角, 插把内壁棱角与插把内电缆在运行时就紧贴着; ②平时开关分合闸过程, 尤其是分闸, 开关机构箱振动特别大。开关分合闸次数越多, 电缆与插把内壁棱角的摩擦越来越多, 电缆绝缘层便一点一点破损, 甚至完全破损至看见芯线; ③某一个开关的分合闸振动也将对同一串中其他开关机构电缆绝缘

造成影响,该站这次发生直流接地就是在操作开关之后造成同一串中的其他开关发出直流接地信号。这一缺陷被确定为日本三菱公司的设计缺陷。

1.2 开关机构箱电缆绝缘破损的危害

电缆绝缘破损的危害可造成绝缘降低,甚至直流接地。一点直流接地不会造成开关误动、拒动,若此时有寄生回路造成两点接地,则可能造成开关误动、拒动、保险熔断等情况。

1.3 开关机构箱电缆绝缘破损的处理措施

对于开关机构箱插把电缆绝缘破损问题,日本厂方给出了一套整改方案。在开关停电的情况下对机构箱插把内电缆先用绝缘胶布包扎,然后用橡胶套圈套在绝缘破损处,再用扎带扎紧橡胶套圈。目前,该站 500 kV 开关只有 5052 开关插把电缆进行了整改,整改效果怎样,仍有待观察。

1.4 刀闸机构箱电缆绝缘降低

2008 年 12 月 19 日,保护人员对黄达线 5053、5052 开关进行传动试验时,监控电脑发出 2 号直流屏接地信号。保护人员经过检查发现故障点在 5052 汇控柜内,报警信号一直存在,当把 5052 开关的控制电源空开拉开后,2 号直流屏接地信号复归。经过日本厂家的查找,发现 5052 开关汇控柜内的全部电缆绝缘均偏低,用摇表实测电缆绝缘值,发现测试绝缘值远远低于正常值。顺着 5052 开关汇控柜内电缆逐级往下查找,最终发现 50521 和 50522 刀闸机构箱电缆插把内部有凝露现象,部分插把内水珠较多,插把内螺丝生锈,还有发霉现象。经过分析,造成 2 号直流屏发接地信号系 50521 和 50522 刀闸机构箱插把内电缆密封不严造成凝露后绝缘降低导致的。

1.5 刀闸机构箱电缆绝缘降低的处理措施

对于 50521 和 50522 刀闸机构箱凝露问题,日本厂家采取临时措施,用电吹风吹干的方式处理,处理后目前尚未再发出接地信号。

2 HGIS 刀闸操作机构电机电源回路整流模块烧毁

HGIS 刀闸操作机构采用的是直流电机,而刀闸电机电源回路是交流电源,日本三菱公司设计采用整流模块将交流电源整流为直流。投运至今,HGIS 刀闸整流模块共烧毁 4 次。2007 年 7 月 25 日,广黄二线由冷备用转热备用时,监控电脑发出 DC/AC/MC-CB 故障,现场检查为 50111 刀闸马达空开跳闸,并且

不能合闸。经专业人员查找,50111 刀闸马达空开跳闸系 50111 刀闸 B 相机机构箱内整流模块烧毁。此后,广黄一线 50311B 相刀闸整流模块烧毁两次,1 号主变 50221 B 相刀闸整流模块烧毁一次,4 次故障的现象均相同。

2.1 刀闸操作机构整流模块烧毁的危害

刀闸整流模块烧毁后,将影响刀闸的正常分合闸操作,并且在事故情况下不能隔离开关故障。

2.2 刀闸操作机构整流模块烧毁的处理措施

刀闸机构整流模块烧毁后,将刀闸电机电源回路空开断开,就能够正常更换烧毁的整流模块。

3 HGIS 刀闸控制电源回路空开上下级不匹配

HGIS 刀闸控制回路用的是直流电源,而其控制电源空开额定电流 10 A,上级空开额定电流为 6 A (该空开为该间隔的开关控制电源空开),不满足选择性要求,这上下两级空开之间还经过一电源切换板。在该站投运调试阶段,曾发生刀闸控制空开未跳闸而上级电源切换板烧毁事件。

3.1 刀闸控制电源回路空开上下级不匹配的危害

当下级刀闸控制回路故障空开未跳闸时可能造成电源切换板烧毁,也可能造成上级空开跳闸(即开关控制电源空开跳闸),若开关控制电源空开跳闸时,则开关将不能跳合闸。

3.2 刀闸控制电源回路空开上下级不匹配的处理措施

此问题已与日本厂方磋商,但日本厂方不更改设计,只对扩建新上的 5053、5021 开关给予了整改,刀闸控制电源空开额定电流改成了 5 A。

4 HGIS 刀闸半分合状态

2007 年 11 月 30 日,在对黄万一线 50332 刀闸合闸时,发生了 50332 刀闸停留在半分合闸的状态,50332 刀闸气室内听到明显的较大放电声。经过仔细查找,系 50332 刀闸电机电源空开上级熔断器熔断导致。50332 刀闸电机回路熔断器共发生了 3 次熔断,刀闸每分合闸一次,刀闸电机回路电流便经过熔断器一次,长期操作后,熔断器就容易熔断。

4.1 刀闸半分合闸的危害

刀闸半分合闸时,刀闸动静触头之间还在放电,

可能造成刀闸直阻增大,刀闸的绝缘破坏。

4.2 刀闸半分合闸的处理措施

按照日本厂方要求 50332 刀闸做直流回路电阻测试和绝缘电阻测试,经测试这两项参数均正常。为了防止刀闸电机回路熔断器再次熔断,该站 HGIS 刀闸电机电源回路所有熔断器已换成空气开关。

5 HGIS 机构箱液压表连接管漏油

2008 年 4 月 25 日,该站值班员巡视设备时发现 5013 开关 A 相机构箱液压表连接管处漏油,经过几天观察发现漏油不止。分析是天气变热后机构箱油压力增大,并未得到及时释压,加上连接管本身制造工艺问题,内部有毛刺小孔,所以 5013 开关 A 相机构箱液压表连接管发生了漏油。

5.1 开关机构箱液压表连接管漏油的危害

(上接第 6 页)

图 8 为随机扰动风时电压变化曲线。其中曲线 (1) 是双馈式风电机组出口电压,曲线 (2) 是风电机组随着风速的变化的有功变化曲线。从仿真结果看出,由于随机风速的幅值变化不大,它所引起的风电场出力以及电压的波动并不显著,引起风电场出力大幅度变化的是阵风和渐变风等风速变化幅值较大的扰动。

3 结 论

以上仿真分析了双馈式风电机组接入无穷大母线时,在各风速分量作用下,风电机组输出的无功及机端电压的变化。

可以得出双馈式风力发电机的转速可随风速的变化及时的做出相应的调整,使双馈式风力机以最佳叶尖速比运行,产生最大的电能输出。

基于双馈风电模型的风电机组,相当于一个无功电源,风电接入主电网的电压稳定性要远远好于异步式风电场接入时的对主网电压稳定性的影响,更有利于维护主网的电压稳定性。

参考文献

[1] 王纯琦,晁勤.达坂城无功补偿分析 [D].乌鲁木齐:新

如果开关机构漏油越来越多,将导致开关液压力不足,可能造成开关不能正常分合闸,甚至跳合闸闭锁,事故情况下将造成扩大停电范围。

5.2 开关机构箱液压表连接管漏油的处理措施

在 5013 开关停电状态下,由日本厂方更换了 5013 开关 A 相液压机构压力表连接管。目前尚未发现其他开关机构漏油。

6 小 结

以上对 500 kV 黄岩变电站 HGIS 一年半多来运行中的异常和缺陷进行了介绍和分析,并对这些异常和缺陷产生的危害和整改方案进行了阐述。给同类设备的异常和缺陷处理提供了一套明确的处理方案,尽快隔离和消除故障,保障电网的安全运行。

(收稿日期:2009-07-07)

疆大学,2006.

[2] 迟永宁,戴慧珠,王伟胜.大型风电场接入电网的稳定性问题研究 [D].中国电力科学研究院,2006.

[3] 范高峰,王纯琦,乔元,等. SVC 补偿型定速风电机组模型及其特性分析 [J]. 电网技术,2007, (11): 31-22.

[4] 陈树勇.大型并网风力发电场规划方法研究 [D].中国电力科学研究院.

[5] Wu Xueguang et al. Application of models of the wind energy conversion system to wind power dynamic analysis. Power System Technology, 1998. Proceedings POWER-CON '98. International Conference on, 1998, (2): 1406-1411.

[6] 潘文霞,陈允平.风电系统及其电压特性研究 [J].河海大学学报,2001,29(1): 88-92.

作者简介:

郭虎奎 (1984-),男,汉族,硕士研究生,主要从事电力系统稳定与控制研究;

李凤婷 (1965-),女,汉族,教授,硕士生导师,主要从事并网型风力发电系统研究。

(收稿日期:2009-10-10)

11. 29 事件引发对天广直流无功控制的深层分析

刘 洋, 黎张文

(中国南方电网超高压输电公司天生桥局, 贵州 兴义 562400)

摘 要:介绍了无功功率控制在高压直流输电系统中的作用, 分析了天生桥换流站无功功率控制模式和无功控制功能方式、交流滤波器的配置及其投切控制, 通过对 11. 29 事件的分析来说明在高压直流输电系统运行和维护工作中无功控制应该注意的问题, 并针对天广直流无功控制软件存在的缺陷进行了分析。

关键词:高压直流输电系统; 交流滤波器; 无功控制; 缺陷

Abstract: The reactive power control in HVDC transmission system is introduced. The mode and the functions of reactive power control, the configurations of AC filter and its switching control in TianShengqiao converter station are analyzed. According to the descriptions of 11. 29 events, attention should be paid to the reactive power control in the operation and the maintenance of HVDC transmission system. And the defects existing in reactive power control software in TianShengqiao converter station are also analyzed.

Key words: HVDC; AC filter; reactive power control; defect

中图分类号: TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2009)06—0013—03

0 引 言

高压直流输电系统运行时, 无论是整流器还是逆变器都要消耗大量的无功功率, 其大小既与直流输送功率有关, 又与运行方式和控制方式有关。不管是整流侧还是逆变侧, 直流系统都需要从交流系统吸收容性无功, 即整流器对于交流系统而言总是一种无功负荷。整流器在实际换流过程中, 消耗大量无功, 并在交、直流侧都产生大量谐波, 对直流系统本身会产生危害, 对通信系统也会产生干扰, 因此为尽量保持系统无功平衡和滤除谐波, 换流站需要加装无功补偿和滤波装置^[1]。通常在额定负荷运行时, 换流器消耗的无功功率可达额定输送功率的 30%~60%, 需要投入大量无功功率补偿容量, 但当低负荷运行时, 换流器消耗的无功功率迅速减小, 如果补偿的无功功率不变, 则换流站过剩的无功功率将注入所连交流系统, 引起换流站交流母线电压升高。因此, 必须对投入的无功功率补偿容量进行控制, 无功补偿装置的投切控制主要有不平衡无功控制和交流电压控制两种方式^[2]。由此可见, 运行人员对无功控制系统的密切监视对高压直流系统的稳定运行起着尤为重要的作用。

1 无功控制概述

1. 1 直流站控的控制范围

直流站控的控制范围包括: (1)对高压直流设备、直流线路、接地极线路的控制和监视; (2)对换流站无功设备、交流母线电压的控制和监视。

1. 2 直流站控的主要功能

直流站控的主要功能包括: (1)完成对直流开关场高压设备的控制和监视; (2)完成换流站的无功控制, 即交流滤波器的投切功能。

1. 3 无功控制

无功控制是与站级相关的控制功能, 属于直流站控。它通过调整换流站装设的无功补偿设备的投运容量, 通过无功功率控制方式将换流站与交流系统交换的无功功率控制在规定的范围内, 通过交流电压控制方式将换流站交流母线电压控制在规定的范围内。直流站控通过投切交流滤波器和小组交流滤波器来满足设定的无功范围。其无功控制功能主要有两种控制模式, 即定无功功率控制和定交流母线电压控制。前者便于所联交流系统无功功率的平衡, 后者有利于弱受端交流系统的电压稳定性。

2 无功功率控制模式

无功功率控制有两种模式:自动模式和手动模式^[3]。正常情况下在自动模式运行,严禁改为手动模式。当无功功率控制设定为自动模式时,小组交流滤波器可以选择自动控制和手动控制。当选择为自动控制时,小组交流滤波器由无功功率控制投切;当选择为手动控制时,小组交流滤波器可以由运行人员决定其投退,在该方式下,如果该小组交流滤波器未投入运行,无功功率控制就认为该小组不可用,从而可能引起直流负荷受到限制。正常情况下,小组交流滤波器选择自动控制运行,在某小组交流滤波器检修时可选手动控制进行操作。

3 无功控制功能方式

无功控制功能有两种控制方式,即定无功功率控制和定交流母线电压控制^[2]。无功控制功能最重要的组成部分为小组交流滤波器的投切控制,其由直流站控控制。小组交流滤波器投切的判据如下:(1)交流母线电压的设定值;(2)所连接的滤波器的性能;(3)整个站无功的设定值^[4]。

3.1 定无功功率控制

定无功功率控制的原理为计算所有投入的交流滤波器的无功和两个换流器吸收的无功,可求出与交流电网间的无功交换量。根据无功的交换量来投切滤波器,投切限值可调整为最大值:滤波器投入时系统无功值(CMD_SET_QMAX)及最小值:滤波器退出时系统无功值(CMD_SET_QMIN)及根据电网承受能力设计的无功允许带宽(BANDWIDTH)。在无功控制中,无功功率供应和消耗的差额Q(QSYS)是利用已测得的换流器无功功率和已测得的滤波器组的无

功功率计算出来的。设定值CMD_SET_QMAX和CMD_SET_QMIN将由运行人员在工作站进行调整。如果 $QSYS - CMD_SET_QMAX > BANDWIDTH$,延时5s投入小组滤波器。如果 $QSYS < CMD_SET_QMIN$,则立即切除小组,无任何延时^[4]。

3.2 定交流母线电压控制

在电压控制中,为了进行交流电压控制,测量了母线电压U。高设定值U_{max/set}和低设定值U_{min/set}由运行人员在在直流工作站上调整。如果 $U < U_{min/set}$ 延时5s投入小组滤波器。如果 $U > U_{max/set}$ 延时5s切除小组滤波器^[5]。

3.3 交流电压限制控制

如果交流电压超过了“禁止连接”的设定值,为了避免超出电压的稳定状态和由于交流过电压保护而导致的跳闸,不允许投入更多的小组滤波器;如果交流电压超过了“隔离跳闸”设定值,将在一定延时而退出小组滤波器;如果交流电压降到“禁止隔离”的设定值,不允许退出更多的小组滤波器;如果交流电压达到“连接”的设定值,在一定延时而将会投入另外的小组滤波器^[5]。

4 交流滤波器投切控制

4.1 交流滤波器配置

天生桥换流站共有3大组交流滤波器,第一大组连接在第八串2082开关与2083开关间的出线上,第二大组连接在第二串2021开关与2022开关间的出线上,第三大组连接在第一串2012开关与2013开关间的出线上^[6]。

每组交流滤波器又分为3个小组,共9个小组,其中包括4小组A型滤波器、2小组B型滤波器和3小组C型滤波器(2小组C₄₈和1小组C₃₆),具体配置如表1。

表 1 交流滤波器配置情况

组 别	调度编号	滤波器编号	滤波器型号	额定容量 (Mvar)	调谐次数 (n)
第一大组	281交流滤波器	D61	B	80	DT(3/36)
	282交流滤波器	D62	A	80	DT(12/24)
	283交流滤波器	D63	C	80	单调谐(48次)
第二大组	271交流滤波器	D71	A	80	DT(12/24)
	272交流滤波器	D72	A	80	DT(12/24)
	273交流滤波器	D73	C	80	单调谐(36次)
第三大组	261交流滤波器	D81	A	80	DT(12/24)
	262交流滤波器	D82	B	80	DT(3/36)
	263交流滤波器	D83	C	80	单调谐(48次)

4.2 交流滤波器投切原则

交流滤波器小组由站控系统的无功功率控制完成,以补偿换流器无功功率和进行谐波滤波。交流滤波器小组自动投切遵循以下原则:解锁时按最小滤波器配置,投 A+B 型交流滤波器各一组,接下来根据系统需要再投入第二个 A+B 组;所有 A 型交流滤波器投入后, C 型交流滤波器才根据系统需要投入;如果某一型号的交流滤波器不可用,则取代的交流滤波器按 A→B→C₃₆→C₄₈的顺序替代;同种型号的交流滤波器按照“先投先退”的原则进行自动投切。交流滤波器小组的投切优先于电容器小组。首先投入所需的滤波器小组,然后再投入电容器小组。反之,先切除电容器小组再切除滤波器小组^[6]。

5 11.29 事件分析

5.1 事件过程

2008 年 11 月 29 日, 500 kV 直流双极运行, 负荷 1 300 MW。所有 9 个小组交流滤波器在投入状态, 263ACF 在试运行阶段, 并保持在非选择状态。10 时 02 分, 运行人员将 263 交流滤波器投入试运行, 并保持在非选择状态。11 时 34 分至 11 时 36 分, 双极功率从 1 300 MW 降至 1 100 MW 过程中, 283 交流滤波器自动退出, 11 时 47 分至 11 时 49 分, 双极功率从 1 100 MW 降至 900 MW 过程中无小组交流滤波器退出运行, 11 时 52 分至 11 时 54 分, 双极功率从 900 MW 降至 700 MW 过程中也无小组交流滤波器退出运行。11 时 55 分, 运行人员发现, 天广直流功率降到 700 MW 以后, 除 283 交流滤波器在退出以外, 其余 8 个小组交流滤波器在投入状态, 而且工作站未显示下一组将要退出的小组交流滤波器。而此时 220 kV 母线电压达到 238 kV, 无功过剩为 330 Mvar 直流工作站发无功越限轻微告警。运行人员立即投入 311、312 低压电抗器, 将 220 kV 母线电压调整至 236 kV。经过初步分析, 可能与 263 交流滤波器在非选择状态有关, 随即向调度申请将 263 交流滤波器操作到热备用状态, 随后 273 交流滤波器、271 交流滤波器、272 交流滤波器依次自动退出, 直流站控无功投退恢复正常, 运行人员退出 311、312 低压电抗器。

5.2 事件后果

天生桥换流站出现无功功率不能自动控制的情况, 产生无功大量过剩, 220 kV 及 500 kV 系统母线

电压偏高。影响电网的无功功率控制, 对通讯设备产生干扰, 使换流器的控制不稳定, 不利于降低电网网损, 严重时可能会引起电网局部的谐振过压, 危及电网安全稳定运行。

5.3 事件原因分析

1) 小组交流滤波器自动退出的原则是: 在没有其他型号 (A、B 型) 小组交流滤波器被选定为下一组退出的前提下, 优先选择 C 型为下一组退出的小组交流滤波器。而在有 C 型小组交流滤波器可以退出的前提下其他型号的小组交流滤波器不能被选择为下一组退出。小组交流滤波器配置组合如表 2。

表 2 小组交流滤波器配置组合情况

	A+B+C	A	B	C
CF01	2	1	1	0
CF02	3	2	1	0
CF03	4	2	2	0
CF04	5	3	2	0
CF05	6	4	2	0
CF06	7	4	2	1
CF07	8	4	2	2
CF08	9	4	2	3

2) 故障时 C 型小组交流滤波器的状态是: 283 交流滤波器刚刚自动退出; 273 交流滤波器在投入状态; 263 交流滤波器在手动投入状态。由于 283 交流滤波器在退出位置, 不可能再退出; 263 交流滤波器在手动投入状态, 无法由自动控制退出; 273 交流滤波器则满足自动退出条件。

3) 此时可以自动退出的只有 273 交流滤波器, 但是 273 交流滤波器退出的条件又不能满足, 273 交流滤波器分闸条件有 5 个, 其中有一个条件不能满足: 263 交流滤波器在分位或者已经发出 263 交流滤波器分闸信号。所以一直不能选定下一个退出的小组交流滤波器, 但是 C 型小组交流滤波器退出的条件又是满足的。

5.4 反事故措施

1) 小组交流滤波器投入试运行期间, 运行人员密切监视直流负荷变化情况、交流母线电压情况, ACF 自动投退预选情况以及自动投退情况。

2) 建议在检修后小组交流滤波器投入试运行的时间尽量选择在直流负荷稳定的时段。

3) 小组交流滤波器试投的时间不要过长, 不要跨越负荷峰谷时段。在需长时间试投的前提下, 建议

(下转第 32 页)

波模型,并系统分析了 GB/T 14549—93、GB/Z 17625.4—2000 对谐波限值以及谐波叠加方法的规定,以此为依据提出了在已知谐波源相位和未知谐波源相位两种情况下的配电网谐波潮流计算步骤。该方法可广泛应用于配电网系统谐波估算中。

参考文献

[1] GB/T 14549—1993,电能质量 公用电网谐波[S].
[2] GB/Z 17625—2000,中、高压电力系统中畸变负荷发射限值的评估[S].
[3] J Arrillaga D. A. Bradley P. S. Bodger 电力系统谐波[M].北京:中国矿业大学出版社,1991.
[4] 王猛.电牵引负荷谐波在三相电力系统中的分布与计算[D].成都:西南交通大学,2003.

[5] George J Walkileh 电力系统谐波——基本原理、分析方法和滤波器设计[M].北京:机械工业出版社,2003.
[6] Task Force on Harmonic Modeling and Simulation “Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonic in Electric Power networks”. IEEE Trans[J]. 1996, 11(1): 452—465.
[7] Vinay Shama R. J Fleming Leo Niekamp “An Iterative Approach for Analysis of Harmonic Penetration in the Power Transmission Networks”. IEEE Trans[J]. 1991, 6(4): 1698—1706.
[8] 张学松,柳焯,于尔铿,等.配电网潮流算法比较研究[J].电网技术,1998,22(4): 45—49.

(收稿日期:2009—07—07)

(上接第 15 页)
分段试投,避开负荷低谷时段。
4)分析控制软件是否存在缺陷,适当进行修改,避免类似情况发生。

6 结 语

目前天广直流运行在定无功功率控制功能方式和自动无功功率控制模式,当要将某小组交流滤波器进行手动操作时,应将该小组交流滤波器操作到非选择状态,然后才能对其进行操作。无功功率控制主要通过投退交流滤波器实现,直流系统将会根据负荷对无功的要求和对谐波的要求而确定正常运行时的滤波器小组数。在闭锁状态,直流站控检测交流滤波器小组的可用数目,如果可用的交流滤波器满足最小配置,直流站控将送一个确认的信号到极控,允许极解锁。在极解锁时,为了过滤交流谐波,将投入一个 A 型和一个 B 型小组滤波器。在无功控制自动模式下解锁时,极控将送一个整流器“解锁”状态信号到直流站控。直流站控将投入下一个 A 型和一个 B 型小组滤波器。如果即将投入的小组滤波器出现故障,则自动投入下一个可用的小组滤波器。在换流器解锁后大约 500 ms 滤波器最小数目配置完成。在解锁状态,如果由于滤波器小组不可用,不能满足正常运行负荷所需求的无功和谐波,将会发出“电流控制”的告警信号,此信号在一定延时之后会将降低电流的信号送到极控,极控收到信号后将会执行降低单极或

双极传输功率命令。因此,要求运行人员密切监视无功功率控制是否在自动模式,各个小组交流滤波器的状态以及交流滤波器投退情况能否满足直流系统的需求,尽量避免由于无功功率控制出问题而引起直流系统降负荷运行和强迫停运情形的发生。同时,特别注意小组交流滤波器检修后的试运行阶段应尽量安排在直流负荷稳定的时段,在试运行期间运行人员要密切其他小组滤波器的自动投退预选情况和自动投退情况是否正常。

参考文献

[1] 赵畹君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004.
[2] 曹继丰.高压直流输电现场实用技术问答[M].北京:中国电力出版社,2007.
[3] 2008 浙大直流组.直流输电[M].北京:电力工业出版社,1982.
[4] Siemens DC station control system information manual (Tianshengqiao Station). Germany Siemens 1999.
[5] Siemens AC filter and DC filter study report performance and rating (Tianshengqiao Station). Germany Siemens 1999.

作者简介:

刘 洋(1983—),男,吉林人,工学、理学双学士,助理工程师,主要从事高压直流输电的运行和维护工作。
黎张文(1979—),男,广西人,工学学士,助理工程师,主要从事高压直流输电的运行和维护工作。

(收稿日期:2009—08—05)

10 kV 线路断线事故的分析

熊昌荣¹, 严 峻²

(1 乐山电业局, 四川 乐山 614000; 2 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072)

摘 要:介绍了一条 10 kV 城区线路, 由于设计不合理, 线路 T 接点在高温、高热、重负荷的情况下发生断裂。描述了故障发生前的现象以及事故抢修人员、运行人员对事故处理的情况, 并对引起故障的原因进行了综合分析, 以及为防止此类事故重复发生而应采取的措施。

关键词:设计; 断线; 分析; 措施

Abstract: The breakage of a 10 kV urban line at the T joint point in the circumstance of high temperature and heavy load is introduced because of the unreasonable design. The reasons of the breakage are analyzed and the measures are proposed to prevent this kind of breakage through the descriptions of the phenomena before the failure and the disposal of the breakage by the emergency crew and operators.

Key words: design; wire breakage; analysis; measure

中图分类号: TM755 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0016-04

1 故障现象与经过

2006 年的中国大陆经受了 55 年来最热的夏天, 全年气温创下了 55 年来的最高纪录, 四川盆地橙色高温警报多次发出, 电力系统经历着高温、高热和高负荷的严峻考验。

2006 年 6 月 5 日 12 时 20 分, 运行中的 10 kV XX II 回 A 相导线在空中的 T 接点断裂后往下滑落, 断线点为 31 号杆至供电局支线“T”接处, 断落处刚好在一宾馆大门口, 断落在地面的高压线严重威胁着大街行人和来往车辆的安全。

高压线路在断线过程中, 由于发现及时, 处理预案及处理措施得当, 抢险行动迅速, 有效防止了行人的触电危险, 使万分危险的事故现场秩序迅速得以控制, 最终化险为夷, 确保了行人的的人身安全。

事故发生后, 乐山电业局及时更改了线路接线, 并将相关电力负荷进行了调整, 宾馆十字路口的安全隐患从此消失。

2 事故原因分析

该 10 kV 线路建于 1998 年初, 导线型号 JKLYJ-240, 线路全长 3.30 km。由于历史原因, 设计方案

不合理。在设计建设时, 线路主干线采用在空中“T”接方式连接分配负荷, 该线路最大负荷可达 470 A, 输送容量可达 8 000 kW h 以上, 而 90% 负荷均通过“T”接点分配。连接点对地距离 15 m, 且位于城市公路的十字路口中央。

由于 T 接点悬至空中 (该连接处从线路投入运行到事故发生已运行 8 年), 由于线路检修时无专用登高设备, 检修人员就放弃了此点的检查, 为线路的安全运行埋下了隐患。

10 kV XX II 回供电网络接线图见图 1。

2006 年的 6 月, 由于高温高热负荷猛增的原因, 电力负荷攀高不下, 该线路“T”接点长期通过较大负荷电流, 承受着高温高热和严重过载的考验。从线路断线后的残骸可以看出, 线路“T”接点在强大电流作用下, 导线及导线连接金具严重发热膨胀——连接处松动——接触不良——接触面放电——温度升高——恶性循环——导线绝缘碳化开裂——导线机械强度下降——断线 (见图 2)。

A 相断裂后, 由于绝缘层的作用, 导线导电部分并未与大地接触, 而是悬于地面约 10 mm, 见图 3。

电力系统中多发故障是短路或接地, 称横向故障。同时, 还可能发生断线故障, 也称纵向故障。单相断线或两相断线是纵向故障主要表现形式, 又称为非全相运行。在电力系统中非全相运行时, 会产生零

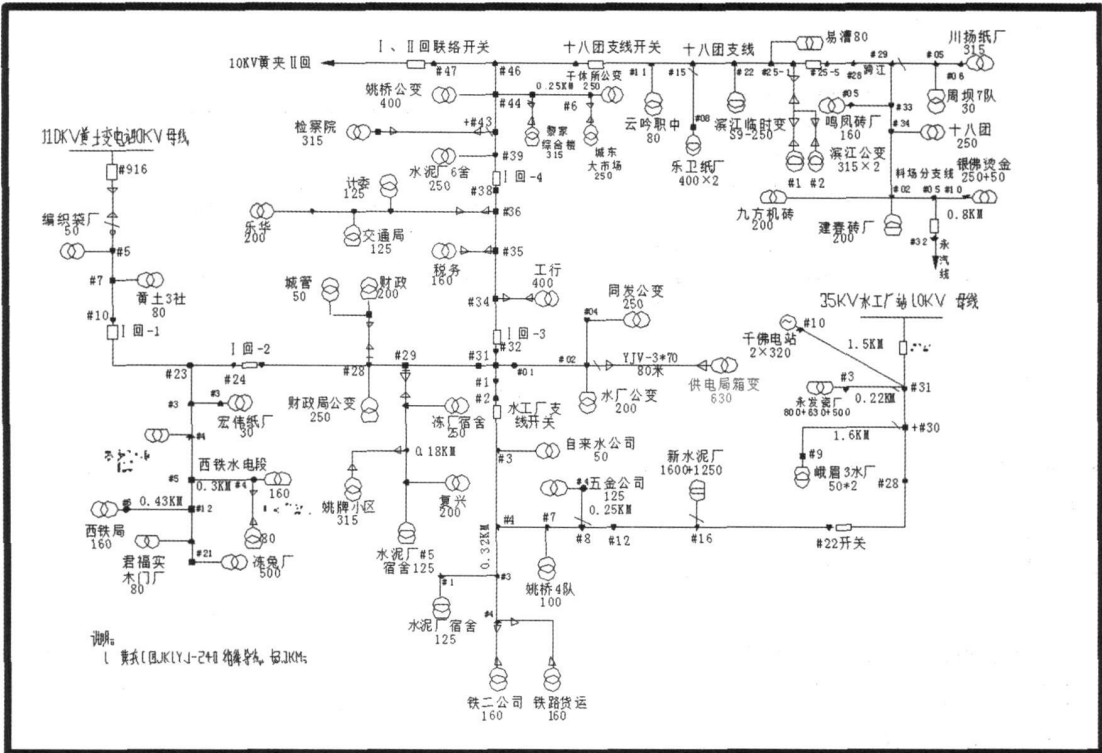


图 1 10 kV XX回线网络接线图

序和负序分量的电流,众所周知,负序电流对运行中的发电机转子有较大危害,零序电流对电力线路附近的通讯线路有较大干扰,有时还容易引起继电保护装置的误动等。如果系统中某处发生一相断线,将会引起三相线路中流通的电流不对称和三相断口两端的电压不对称,故称为纵向故障见图 4(a)所示。故障处线路中流通的三相不对称电流和断口两端的三相电压可以分解成各序分量如图 4(b)所示。

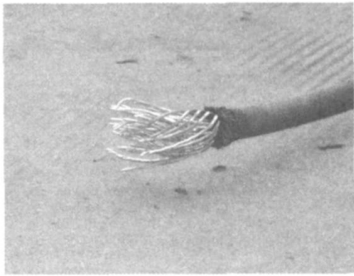


图 3 线路断裂后悬空

故障点之外电力系统其他地方的参数仍然是三相对称的,根据断线处可以作出正序、负序和零序的网络(见图 5)。

从图 5 的序网图中可列出故障点的电压平衡方程为

$$\left. \begin{aligned} U_{qk|0} - U_1 &= Z_1 I \\ 0 - U_2 &= Z_2 I \\ 0 - U_0 &= Z_0 I \end{aligned} \right\}$$

$U_{qk|0}$ 为 qk 间断开时电源作用下 qk 两点间电压;
 Z_1, Z_2, Z_0 分别为正序、负序、零序网络从断口 qk 看进去的等值阻抗(正序电压源)

本案例现场为 A 相断线,在图 4(a)中,由图可得知故障处的边界条件为

$$I_a = 0, U_b = U_c = 0$$

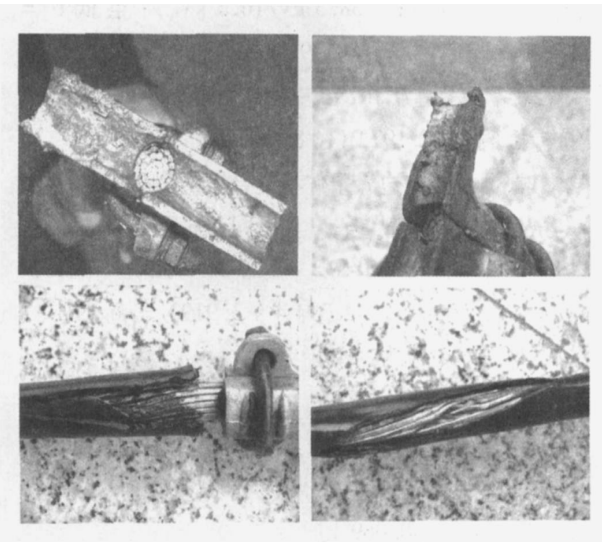


图 2 线路 T接点断裂后残骸

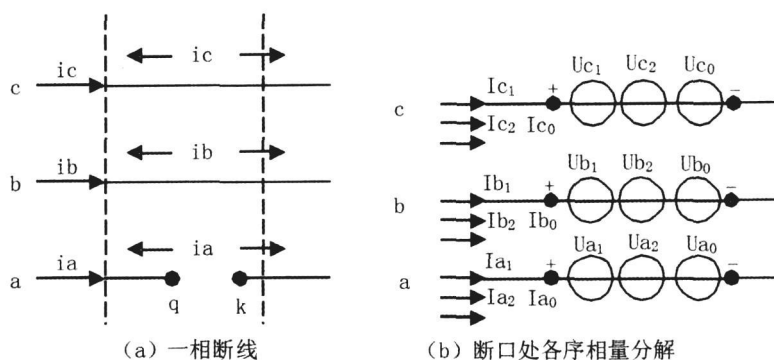


图 4 非全相运行示意图

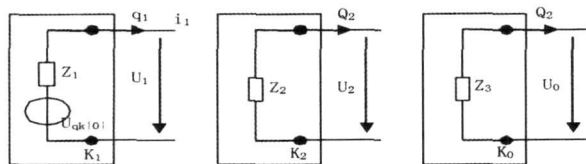


图 5 非全相运行的各序网络示意图

相应的各序分量的边界条件为

$$I_1 + I_2 + I_0 = 0, U_1 = U_2 = U_0$$

故障处电流是流过断线线路上的电流,故障处的电压是断口间的电压,即复合序网为断口间的并联。其各序电流分量为

$$I_1 = \frac{U_{qk|0|}}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}}, I_2 = -I_1 \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0}, I_0 = -I_1 \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0}$$

按叠加原理,可把断线处看作是突然叠加一个负电流源,将断线故障分解为正常运行方式和只在故障点有一个不对称电流源的故障网络,则故障分量的计算分析就简单化了,如图 6。

由图 6 可见,故障分量的边界条件为

$$\Delta I_1 = -I_{k|0|}, U_b = U_c = 0$$

转换为各序分量为

$$\Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_0 = -I_{k|0|}, U_1 = U_2 = U_0$$

按此边界条件作出复合序网如图 7,求得各序故障分量的电流为

$$\Delta I_1 = -I_{k|0|} \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0}} \times \frac{1}{Z_1}$$

$$I_1 = \frac{1.1}{j(5.6165 + 5.6165 \times 6.7127 / 5.6165 + 6.7127)} = -j0.127$$

$$I_2 = -\frac{6.7127}{6.7127 + 5.6165} \times (-j0.127) = j0.0691$$

$$I_0 = -\frac{5.6165}{6.7127 + 5.6165} \times (-j0.127) = j0.0579$$

$$\Delta I_1 = -I_{k|0|} \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0}} \times \frac{1}{Z_2}$$

$$\Delta I_0 = -I_{k|0|} \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0}} \times \frac{1}{Z_0}$$

如果在正序分量中加入正常运行分量后,线路上的电流的各序分量就为

$$I_1 = \Delta I_1 + I_{k|0|}, I_2 = \Delta I_2, I_0 = \Delta I_0$$

而断口各序电压分量为

$$U_1 = U_2 = U_0 = I_{k|0|} \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0}}$$

2006 年,该局调度中心下达对系统归算至 110 kV XX 变电站 10 kV 母线线路阻抗标么值最大运行方式为 $X_{*am} = 0.4003$;最小运行方式为 $X_{*amin} = 0.7907$;

110 kV XX 站主变压器容量为 31 500 kVA,额定电压为 110 kV/38.5 kV/10.5 kV,高至低 $U_k = 18.00\%$ 、高至中 $U_k = 9.99\%$ 、中至低 $U_k = 6.45\%$, 10 kV 线路导线型号 JKLYJ-240,长度 3.3 km,线路阻抗标么值 $X = 1.1972$ (图 8)。

根据断线的边界条件和复合序网图 9 所示,断口电压为 $U_{qk|0|} = E'' = 1.1$ 。序网各序阻抗为

$$Z_1 = Z_2 = j(0.1 + 0.4003 + 1.1972 + 3.919) = j5.6165$$

$$Z_0 = j(0.4003 + 2.3944 + 3.919) = j6.7127$$

故障处各序电流为

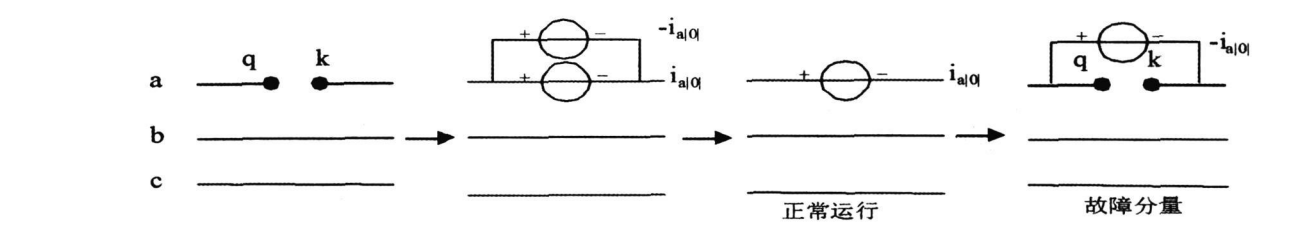


图 6 一相断线运行分析的叠加原理图

线路 b、c 相电流为

$$I_b = a^2(-j0.127) + a(j0.0691) + j0.0579 = (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})(-j0.127) + (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})(j0.0691) + j0.0579 = -0.169822 + j0.08685 = 0.19\angle -27^\circ$$

$$I_c = a(-j0.127) + a^2(j0.0691) + j0.0579 = (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})(-j0.127) + (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})(j0.0691) + j0.0579 = -0.050142 + j0.15595 = 0.16\angle -72^\circ$$

断口三序电压为

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{U}_3 = -j0.0691 \times j5.6165 = 0.3881$$

a 相断口电压为

$$\dot{U}_1 = 3\dot{U}_1 = 3 \times 0.3881 = 1.16$$

从此次断线事故,没有造成人身伤害和设备损坏,但在人口骤密的十字路口之交通要道,教训却值得深思。

3 防范措施

(1)电网安全关系到社会稳定和千家万户,必须杜绝由于人员责任原因、设备问题和外部因素造成的人身、电网、设备事故,确保不发生重特大人身死亡事故、重特大电网事故和设备事故,确保不发生对社会严重影响的停电事故和人身伤亡事故,保证电网安全稳定运行,保证电力有序供应;

(2)电网坚强是电力安全的基础,必须加强电力设施的设计管理和规范工作,严格设计程序和设计资质的审查,设计不合理、有安全隐患的图纸不与审批和施工。电网薄弱,设备老化,负载过重等对电力安全造成极大的安全隐患;

(3)工程验收必须严格执行相关电压等级的线路或电气设备的验收规范,对有隐患的线路和设备及时发出整改通知限期整改,不符合验收规范者不得验收投运;

(4)健全电网应急处理机制和应急措施且必须有针对性;电网必须坚持统一规划、统一调度和统一管理,坚持电网、电源、用电负荷协调发展。

针对夏季高温和重负荷等特点,对重要设备、长期重载设备以及老旧设备,应制定过载、过温运行的相关技术规定,确保输变电设备在出现过载、过温运行情况下的安全。同时,加强对输变电设备在恶劣气候和重要保电时期的特巡工作,切实做好防雷、防雨、防火、防污闪等工作。有针对性开展重载、大档距、交叉跨越线路导线弧垂和交叉跨越距离的检测和线路走廊的清理。

当前特别要加强对事故率较高的线路及线路连接点和绝缘子等设备的监督、检查,对重要线路的设计、施工和验收必须严格执行规程规范。同时,对线路的安装施工除严格施工工艺外,还应定期开展红外线测温,在年检预试时,对线路连接部分的夹具、螺栓等应进行紧固检查。

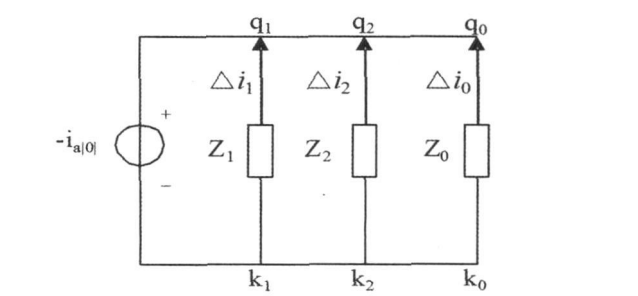


图 7 一相断线故障分量的复合序网

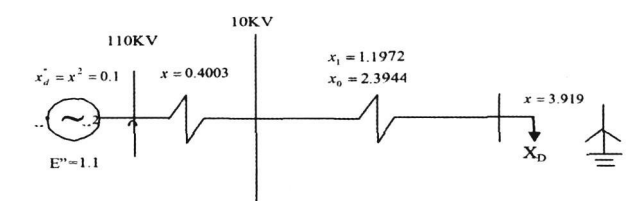


图 8 系统阻抗图

(下转第 66 页)

控制吸收塔 pH 值高于 5,在喷淋量的保证下,保证脱硫效率。

4 脱硫系统特殊运行方式效果检查

采取以上措施后,于 2008 年 6 月 28 日实现了首台机组正式恢复发电。进入烟囱的净烟气温度被控制在 50℃以下,净烟气烟道凝结水量增加,烟囱下凝结水量较小,凝结水 pH 值大于 2。环境保护指标满足要求。具体指标如表 2。

表 2 脱硫系统特殊运行方式下的实际参数		
序号	参数名称	实际参数
1	原烟气含尘量 /mg/m ³	≤ 200
2	浆液 pH 值	5.1~5.6
3	浆液密度 /kg/L	1.10~1.20
4	吸收塔浆液高度 /m	14.5~16.5
5	原烟气温度 /℃	130~150
6	烟气换热器出口温度 /℃	48~51
7	烟囱入口烟气温度 /℃	46~49
8	烟气凝结水 pH 值	2.2~2.8
9	净烟气 SO ₂ 浓度 /mg/m ³	≤ 1000
10	脱硫效率 /%	≥ 95
11	净烟气颗粒物浓度 /mg/m ³	≤ 50

2008 年 10 月 8 日完成了 FGD 通过 4×50 MW 机组烟囱排放,满足了冬季机组发电的需要,同时为 330 MW 机组烟囱的修复创造了条件。在脱硫系统采用特殊运行方式三个月后,对受损烟囱内部进行腐蚀等检查,未见特别的异常现象。

2009 年 5 月,受损烟囱修复,脱硫系统恢复正常运行方式,至此,机组彻底恢复。

5 结 论

巴蜀江油发电厂 240 m 烟囱地震受损后,经过计算和调研论证,根据湿法脱硫工艺原理,采取脱硫特殊运行方式成功解决了通过受损烟囱的临时排烟问题。受损烟囱未见明显腐蚀和新增裂纹。在不影响机组发电的情况下,为受损烟囱修复创造了条件。在整个过程中,烟气中 SO₂ 排放量达到国家环保相关要求。为巴蜀江油发电厂及全川灾后恢复生产重建家园作出了应有的贡献。

(收稿日期: 2009—08—12)

(上接第 19 页)

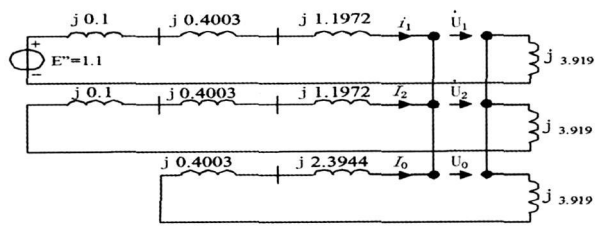


图 9 复合序网

4 总 结

近几年来,随着城市的发展及沿海企业和高耗能企业在内地的投入加大,使电力负荷几创新高,而气温突变,高温高热又将导致电力负荷继续攀高。电力线路及电力设施在严重过载情况下,将造成导线发热

和机械强度的降低,导线的连接处在过热情况下接触面产生膨胀引起金具螺栓松动,严重时就会造成断线、倒杆甚至人身伤亡事故,该 10 kV XX II 回 31 号杆断线事故就是一个典型案例。因此,电力线路在设计时应考虑城市的发展和电力负荷的增长裕度及线路的过载能力。同时,线路设计时尽可能避免空中 T 接,避免检修不便留下死角而埋下事故隐患。在调度运行方面应该根据实际情况,结合系统的运行方式,分别采取措施合理分配负荷,以达到预期的目的。

参考资料

[1] 张伟. 电力系统分析 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

(收稿日期: 2009—10—15)

关于输电线路耐雷水平的综合研究分析

曾 奕

(四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:雷击是危及输电线路安全可靠运行的主要因素,深入研究输电线路的耐雷水平对保证电力系统的安全可靠运行具有重要的工程意义。介绍了输电线路的雷击类型,分别分析了杆塔接地电阻、线路档距、杆塔高度、导线电压、杆塔波阻抗对输电线路耐雷水平的影响,阐述了输电线路常用的防雷措施:架设避雷线、降低杆塔接地电阻、增设耦合地线、提高绝缘等级,为输电线路耐雷水平的深入研究打下基础。

关键词:输电线路;耐雷水平;接地电阻;避雷线

Abstract: Lightning stroke is the main factor that endangers the safe and reliable operation of transmission line. Therefore the deep research on lightning withstand level of transmission line has the engineering significance on guaranteeing the safe and reliable operation of power system. The lightning strike types of transmission line are introduced and the influences of grounding resistance of tower, line span, tower height, wire voltage and tower wave impedance on lightning withstand level of transmission line are analyzed respectively. The common protection measures against lightning are described including setting up overhead ground wire, decreasing the grounding resistance of tower, increasing coupling ground wire and improving insulation level, which lays a foundation for the deeper research on lightning withstand level of transmission line.

Key words: transmission line; lightning withstand level; grounding resistance; overhead ground wire

中图分类号: TM712.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0020-04

1 引 言

目前雷击仍是危及输电线路安全可靠运行的主要因素,国家电网 2003 年生产运行情况统计分析表明^[1],全国 500 kV 输电线路中雷击跳闸占线路跳闸的 46%, 330 kV 输电线路中雷击跳闸占线路跳闸的 29%, 220 kV 输电线路中雷击跳闸占线路跳闸的 33.4%, 110 kV 输电线路中雷击闪络占线路跳闸的 35.3%。国际大电网会议 (CIGRE) 公布的美国、前苏联等 12 个国家连续 3 年的运行资料表明,总长度 3.27×10^4 km 的 275~500 kV 输电线路的雷害事故占总事故的 60%;对各国数十年的统计资料分析后得知^[2~6],输电线路高杆塔、大保护角时的绕击占雷击的主要地位;当杆塔高度低、绝缘水平低、冲击接地电阻高时会发生反击闪络事故。因此深入研究输电线路的耐雷水平对保证电力系统的安全可靠运行具有重要的工程意义。

2 输电线路的雷击类型

根据雷电过电压形成的物理机理,雷电过电压可

以分为两种:①直击雷过电压,即雷电直接击中杆塔、避雷线或者导线所引起的线路过电压;②感应雷过电压,即雷电击中线路附近的大地,由于电磁感应在导线上产生的过电压。实际运行经验表明,直击雷过电压对电力系统危害最大,感应雷过电压只对 35 kV 及以下线路产生威胁。

按照雷击线路的部位不同,直击雷过电压又可分为两种情况:①雷击线路杆塔或避雷线时,雷电流通过雷击点阻抗使得该点对地电位大大升高,当雷击点与导线之间的电位差超过线路绝缘的冲击放电电压时,会对导线发生闪络,使导线出现过电压,由于杆塔或避雷线的电位(绝对值)高于导线,因此称之为反击;②雷电直接击中导线(无避雷线)或绕过避雷线(屏蔽失效)击中导线,直接在导线上引起过电压,这种形式的雷击通常称为绕击。反击、绕击示意图如图 1 所示。

在工程实际中,输电线路防雷性能的优劣主要用耐雷水平和雷击跳闸率这两个指标来衡量。耐雷水平是指线路遭受雷击时所能耐受的不致引起绝缘闪络的最大雷电流幅值(kA),耐雷水平越高,线路防雷

性能越好。雷击跳闸率是指折算至年平均雷电日数为 40 d 的标准条件下,每 100 km 线路每年因雷击引起的线路跳闸次数,其计算单位是 $1/100\text{ km}\cdot\text{a}$ 。雷击跳闸率是衡量线路防雷性能的综合性指标。

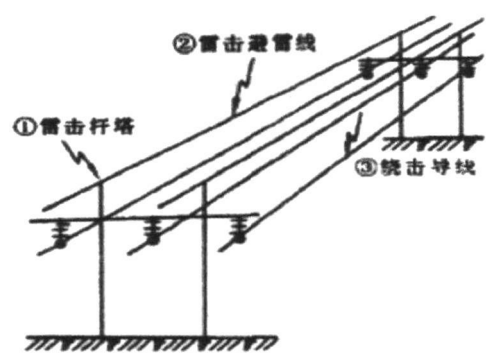


图 1 线路反击、绕击示意图

3 耐雷水平的影响因素

3.1 杆塔接地电阻对耐雷水平的影响

当雷击杆塔时,由于杆塔的冲击接地电阻远小于避雷线及输电导线的波阻抗,因而大部分雷电流由杆塔入地,剩余部分则沿避雷线流向邻近杆塔。与传统杆塔集中电感模型相比较,采用多波阻抗模型进行仿真,杆塔接地电阻对耐雷水平的影响在减弱(见图 2),这与实际相符。因此,多波阻抗模型同集中电感模型相比,将会提高输电线路防雷计算的准确性。

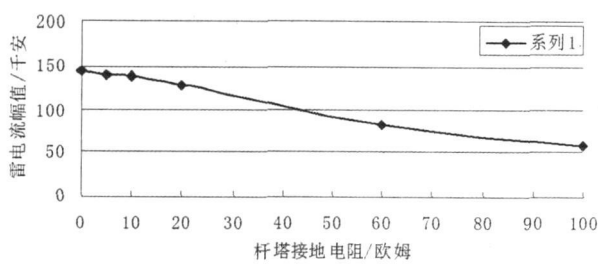


图 2 耐雷水平随接地电阻的变化

3.2 线路档距对耐雷水平的影响

雷击杆塔后,雷电波沿线路传播,传到下基杆塔需要一定的时间,因此当线路档距发生变化时,线路耐雷水平也不同。在接地电阻取值等都不变的情况下,只考虑档距的变化,逐步增大线路的档距,可得到线路档距对耐雷水平的影响,如图 3 所示。

3.3 杆塔高度对耐雷水平的影响

杆塔越高,线路截获的雷电越多。一方面,杆塔高度越高,引雷面积增大,着雷次数增加;另一方面,雷击塔顶后沿塔传播至接地装置时引起负反射波返

回到塔顶或横担所需时间增长,致使塔顶或横担电位增高,容易造成反击,导致线路耐雷水平降低,跳闸增大。因此在条件允许的情况下,尽量降低杆塔高度以降低反击跳闸率。耐雷水平随杆塔高度的变化情况如图 4 所示。

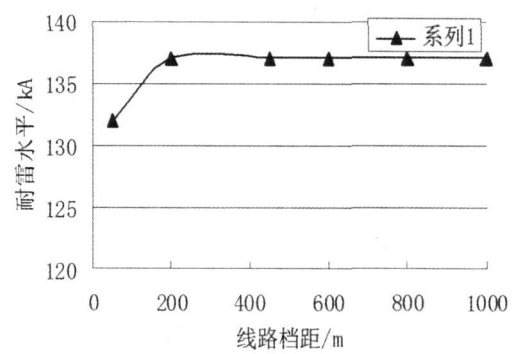


图 3 线路档距对耐雷水平的影响

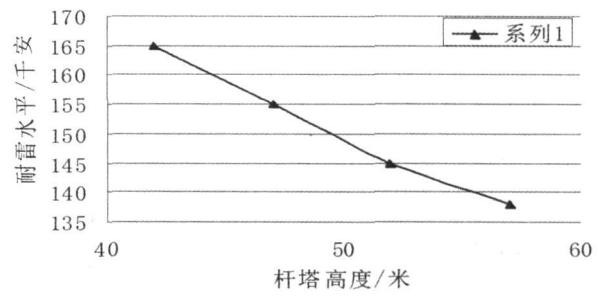


图 4 耐雷水平随杆塔高度的变化情况

3.4 导线电压对耐雷水平的影响

由于 500 kV 线路工作电压较高,反击时,它在绝缘子两端电压已占有相当大的比率。在耐雷水平计算中忽略工频电压的影响将造成较大的误差,因此必须考虑此时导线上的工作电压,而导线上的交流周期电压具有很大的随机性,如图 5 所示,不同相位角下雷击塔顶时的耐雷水平是有差别的。

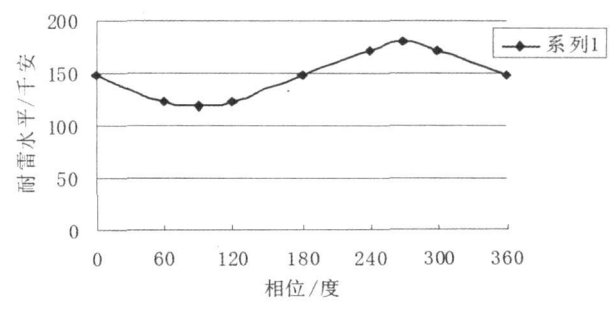


图 5 耐雷水平随运行电压相位的变化

3.5 杆塔波阻抗对耐雷水平的影响

杆塔波阻抗是高塔及特高塔防雷设计中的一个重要参数,波阻抗对反击耐雷水平的影响如图 6 所

示。从图 6 可以看出,对于 500 kV 输电线路,杆塔的波阻抗独立地变化 10%,输电线路的反击耐雷水平相应地变化约 10%。

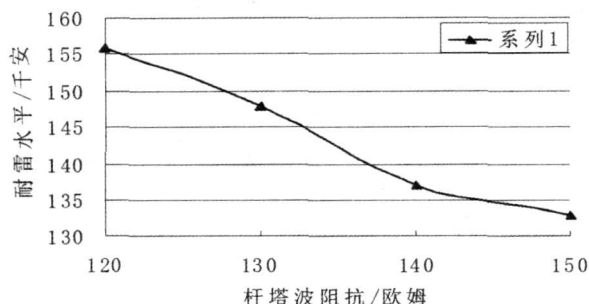


图 6 耐雷水平随杆塔波阻抗的变化

4 输电线路常用的防雷措施

4.1 架设避雷线

架设避雷线是输电线路防雷保护最基本和最有效的措施。避雷线的主要作用是防止雷直击导线,同时还具有以下作用。

- 1)分流作用,以减小流经杆塔的雷电流,从而降低塔顶电位;
- 2)通过对导线的耦合作用减小线路绝缘子上承受的电压;
- 3)由于对导线的屏蔽作用,能够降低导线上的感应过电压。

通常来说,线路电压越高,采用架设避雷线的方法效果越好,而且避雷线在线路造价中所占的比重也越低(一般不超过线路总造价的 10%)。因此规程规定,220 kV 及以上电压等级的输电线路应全线架设避雷线,110 kV 线路一般也应全线架设避雷线。同时,为了提高避雷线对导线的屏蔽效果,避免雷电绕过避雷线而直接击中导线,即减小绕击率,避雷线对边导线的保护角一般采用 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$; 220 kV 及 330 kV 双避雷线线路应做到 20° 左右; 500 kV 及以上的超高压、特高压线路都架设双避雷线,保护角在 15° 及以下;山区宜采用更小的保护角。但是随着避雷线保护角的减小,避雷线与导线的耦合也会随之增加,耦合损失也会不断增加,因此,对避雷线保护角的确定应当权衡绕击率与耦合损耗二者,采用最经济的保护角。另外,杆塔上两根地线间的距离,不应超过导线与地线间垂直距离的 5 倍。

4.2 降低杆塔接地电阻

避雷线与塔脚电阻相配合,在雷击时能够起到大幅度的降压作用,故而对 110 kV 及以上的混凝土杆塔或铁塔线路,是一种最有效的防护措施,尤其在电阻率 $\rho \leq 300 \Omega \cdot \text{m}$ 的土壤中,降低接地电阻较易,经济投资小。计算表明:杆塔接地电阻每增加 10~20 Ω ,雷击跳闸率将会增加 50%~100%。

目前降低杆塔接地电阻的方法主要有以下几种。

4.2.1 利用接地电阻降阻剂

在接地极周围敷设了降阻剂后,可以起到增大接地极外形尺寸,降低与周围大地介质之间的接触电阻的作用,从而能在一定程度上降低接地极的接地电阻。降阻剂用于小面积的集中接地、小型接地网时,其降阻效果较为显著。降阻剂是由几种化学物质配制而成的混合物,是具有良好的导电性能的强电解质和水分。这些强电解质和水分被网状胶体所包围,网状胶体的空格又被部分水解的胶体所填充,使它不至于随地下水和雨水而流失,因而能长期保持良好的导电作用。

4.2.2 采用爆破接地技术

通过爆破制裂,再用压力机将低电阻率材料压入爆破裂隙中,从而能够起到改善很大范围内土壤导电性能的目的,相当于大范围的土壤改性。

4.2.3 扩大接地网面积

接地网的接地电阻与接地网面积的平方根近似成反比,地网面积越大,其接地电阻值越低。增大地网面积无疑是一种降低接地电阻的好方法。但是这种方法所消耗的金属材料多,将导致经济性能的下降。

4.2.4 外引接地

将主接地网与主接地网区域外某一低土壤电阻率区域敷设的辅助接地装置相连,以达到降低整个接地系统接地电阻的目的。其缺点同样是增加了经济投资。如果接地装置附近有导电良好及不冻的河流湖泊,可采用此法。但是在设计安装时,考虑到连接接地极干线自身电阻所带来的影响,外引式接地极长度不宜超过 100 m。

除了以上 4 种较常用的降低接地电阻的方法外,增加地网的埋深、采用自然接地体、深井接地、局部换土等方法也可以有效降低接地网的接地电阻。在确定降低接地电阻的具体措施时,应根据当地原有运行经验、气候状况、地形地貌的特点和土壤电阻率的高低等条件进行全面、综合分析,因地制宜地选择合理

的方法。这样既可保障线路、设备的正常运行,又可避免接地装置工程投资过高情况的发生。

4.3 增设耦合地线

在降低杆塔接地电阻有困难时,可采用架设耦合地线的措施,即在导线下方再架设一条地线。它的作用主要有以下两个方面。

1)加强避雷线与导线间的耦合,从而减小绝缘子串两端电压的反击电压和感应电压的分量;

2)增加了雷击塔顶时向相邻杆塔分流的雷电流。

运行经验表明,耦合地线对减小雷击跳闸率的效果是显著的,尤其在山区的输电线路其效果更明显。中国曾对 110 kV 和 220 kV 有避雷线线路采用过加装耦合地线的做法。

3)装设线路避雷器。即使全线架设避雷线,也不能完全排除在导线上出现雷击过电压的可能性,将带有间隙的复合外套氧化锌避雷器安装在雷电活动强烈、土壤电阻率高、降低杆塔接地电阻有困难的线路段,可以使由于雷击所产生的过电压超过一定的幅值时动作,给雷电流提供一个低阻抗的通路,使其泄放到大地,从而限制了电压的升高,当三相绝缘子串旁都配置线路避雷器时,可大大减少输电线路的雷击跳闸率,提高耐雷水平,保障线路、设备的安全运行。

然而,线路避雷器的防雷效果只对安装点起保护作用,完全达到防雷效果需全线安装线路避雷器,投资巨大,在线路的部分杆塔上安装线路避雷器,如果选点不合适就达不到应有的保护效果,通常都是在遭受雷击严重的部分杆塔点处装设线路避雷器。因此,为避免在使用线路避雷器时的盲目性,必须掌握线路的运行现状及重要性,有针对性地选用线路避雷器。

4.4 提高绝缘等级

在所有防雷措施中,采用不平衡绝缘和加强绝缘是最经济、也是最容易实现的。增大绝缘时的效果,一是提高了绝缘水平,从而提高了反击和绕击的耐雷水平;二是降低了建弧率;三是减少了保护角。由于大跨越、高杆塔线路雷击过电压高于一般线路段,为降低其跳闸率,可加大大跨越档距导线与避雷线之间的间距,或者增加线路绝缘子串的片数,以加强绝缘。

对于同杆架设的双回路线路,其绝缘子串的片数应有所差别,其目的是:在雷击时绝缘子串片数少的回路先发生闪络,闪络后的导线相当于地线,增加了对另一回路的耦合作用,可降低其绝缘子串上的过电

压,保证可以继续供电,一般认为两回路的绝缘水平相差相电压峰值为宜。

5 结束语

分析了耐雷水平的影响因素,发现与传统杆塔集中电感模型相比较,采用多波阻抗模型进行仿真,杆塔接地电阻对耐雷水平的影响在减弱,这与实际情况相符;在接地电阻取值等都不变的情况下,只考虑档距的变化,逐步增大线路的档距,发现初期可以提高耐雷水平,后期几乎无影响;杆塔越高,线路截获的雷电越多,因此在条件允许的情况下,尽量降低杆塔高度以降低反击跳闸率;在耐雷水平计算中忽略工频电压的影响将造成较大的误差,因此必须考虑此时导线上的工作电压;杆塔波阻抗是高塔及特高塔防雷设计中的一个重要参数,随着波阻抗的增大,耐雷水平逐渐降低。

此外,还阐述了输电线路常用的防雷措施,架设避雷线是输电线路防雷保护最基本和最有效的措施;避雷线与塔脚电阻相配合,在雷击时能够起到大幅度的降压作用,故而对 110 kV 及以上的混凝土杆塔或铁塔线路,是一种最有效的防护措施;在降低杆塔接地电阻有困难时,可采用架设耦合地线的措施,即在导线下方再架设一条地线;在所有防雷措施中,采用不平衡绝缘和加强绝缘是最经济、也是最容易实现的。

参考文献

- [1] 国家电网公司生产运营部. 国家电网公司 2003 年生产运行情况 [R]. 北京: 国家电网公司生产运营部, 2004.
- [2] 李培国. 国外对特高压输电线路雷击跳闸原因的一个新观点 [J]. 电网技术, 2000, 24(7): 63—65.
- [3] 马宏达. 各种避雷针的结构及其防雷性能 [J]. 电网技术, 2000, 24(12): 53—57.
- [4] 维列复金, 吴维韩. 俄罗斯超高压和特高压输电线路防雷运行经验分析 [J]. 高电压技术, 1998, 24(2): 76—79.
- [5] 易辉, 崔江流. 我国输电线路运行现状及防雷保护 [J]. 高电压技术, 2001, 27(6): 44—45.
- [6] 钱冠军. 500 kV 线路直击雷典型事故调查研究 [J]. 高电压技术, 1997, 23(2): 73—75.

(收稿日期: 2009—10—10)

变电站直流系统接地告警方式设计

李俊儒¹, 刘 玲¹, 赖民昊²

(1. 德阳电业局, 四川 德阳 618000; 2. 成都电业局, 四川 成都 610021)

摘 要:通过对变电站直流系统故障接地情况的分析,提出了分布式微机绝缘监测装置及其支路直流传感器在 RS485 通信网络中的系统构成以及直流系统多级供电方式下的接地故障告警方式,使微机绝缘监测装置能正确直观地反映出直流系统发生故障接地时的准确地点及性质,从而提高故障排查、切除速度。

关键词:直流系统;微机绝缘监测;接地告警

Abstract: Through the analysis of the situation of ground fault in substation DC system, the system composition with distributed computer-based insulation monitoring device and its branch direct-current sensor in RS485 communication network is proposed as well as the way of grounding alarm under the multi-level power supply of DC system, which makes the computer-based insulation monitoring device reflect the exact location and the nature correctly and intuitively when the ground fault occurred in DC system, thus it can enhance the speed of investigating and clearing the fault.

Key words: DC system; computer-based insulation monitoring; grounding alarm

中图分类号: TM645 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0024-02

变电站直流系统作为主要电气设备的操作及控制电源,其可靠性直接影响到电力系统运行的安全可靠。由于直流系统是一个庞大多分支的供电网络,接地故障经常发生。一般情况下,一点接地并不影响直流系统的运行,但如果接地故障点查找不够迅速,不能及时切除,若再发生另一点或多点接地,就可能造成信号回路、控制回路、继电保护装置等的误动作。

目前,变电站直流系统多采用分布式微机绝缘监测装置,其特点如下:①利用直流传感器检测支路漏电流,无需在直流系统中注入任何信号,不受对地大电容的影响,并能准确测量出故障支路;②采用不平衡电桥原理检测母线对地绝缘,当正、负母线绝缘同时降低时,能正确检出接地电阻值。文中以其硬件为支撑,提出了能正确快速反映变电站直流接地故障的告警方式。

1 接地情况分析

现在,变电站多采用分布式结构,各继电器室按所属电压等级分布于场地之中。以一座含 500 kV、220 kV 及 35 kV 3 个电压等级的变电站为例,由于站用电系统电源由 35 kV 系统提供,则变电站的直流系统多安装于临近站用电室的 35 kV 继电器室,直流支

路通过直流总母线再引致其他继电器室。

直流系统一般由两段直流母线供电,Ⅰ、Ⅱ段母线互为备用,每段母线由一组蓄电池和一台充电机进行供电,并设充电机 3 作为充电机 1、2 故障时的备用充电机。两段母线正常时独立供电,当一段母线上的充电机或蓄电池组发生故障时,可通过切换把手将该段母线切至有完好蓄电池组或充电机的母线段,从而确保直流母线供电的可靠性。当直流系统Ⅰ段母线

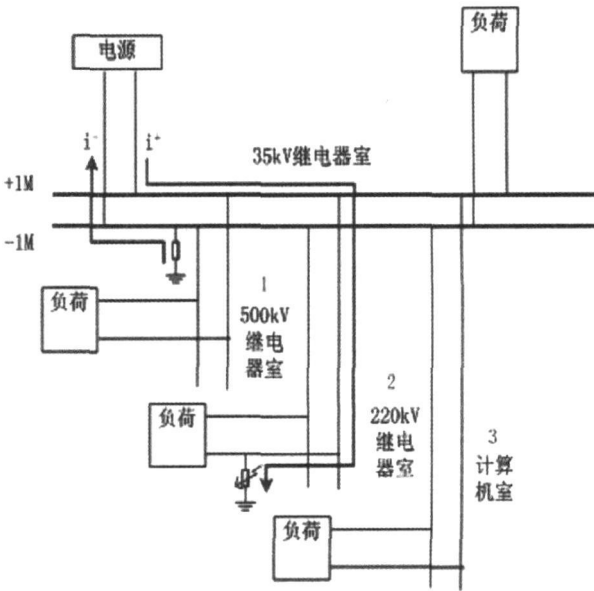


图 1 直流系统支路接地故障图

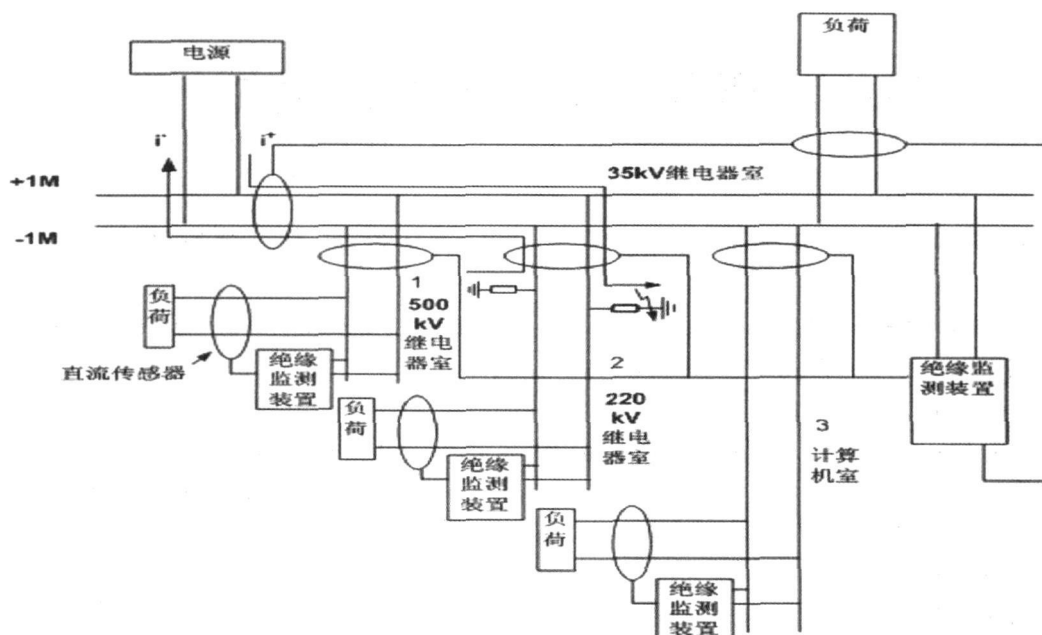


图 2 直流系统绝缘监测系统接线图

的 220 kV 继电器室支路负荷发生正极接地时,其接地情况如图 1 所示。

从图 1 可以看出,直流系统安装时,直流总母线是属于一级供电母线,连接至其他继电器室的直流母线仅相当于二级馈线与总母线所在继电器室的支路馈线属同级,而其他继电器室的负荷支路则相当于三级馈线,因此绝缘监测装置在反映接地故障时,应能准确地判断出究竟在哪一级的哪一支路发生何种接地故障。

2 传统分布式绝缘监测系统的构成及不足

每个继电器室分别安装两个直流分屏供直流 I、II 段负荷,每个屏安装一台分布式微机绝缘监测装置,其下端接馈线支路绝缘采集单元,上端通过 RS485 网络接入微机自控高频开关电源直流系统再传输至监控系统。

一般来说,大部分直流传感器仅安装于馈线之上,当馈线发生接地故障时可根据流过电流的不平衡而测得接地支路,并且接地支路信号只在装置上反映而并不上传至监控机。加上母线接地信号仅由安装于直流总母线的直流传感器反映,所以不能得到确切的接地地点信息,只能由变电站值班员分批去各个继电器室检查排除故障,因此大大减缓了故障处理速度。并且雷雨天气时,由于雨水侵袭,直流系统发生故障的概率大大增加,给故障排查人员的安全带来了

更大的危险性。由此可以看出明确故障地点是很必要的。

3 接地告警方式设计

从前面的分析可以得出,反映接地故障的直流传感器除直流总母线需要安装以外,还应在接至各继电器室的二级直流母线上安装,其装设方式如图 2 所示。

从图 2 可以看出,当 2 号馈线发生直流正接地时,2 号母线馈线由于加装了直流传感器,则可以测得不平衡电流,可在装置上反映出究竟是不是 220 kV 继电器室发生了直流接地,但是直流总母线仍会测得不平衡电流,所以接地告警逻辑应定义如下。

首先将直流总母线定义为第一级,将直流分母线定义为第二级,将直流负荷支路定义为第三级;

当第三级负荷支路发生接地时,仅发支路接地信息,支路接地信息定义为:XX 继电器室 X 号绝缘监测装置 XX 号支路正(负)接地。

当第二级母线发生接地时,发母线接地信号,信号定义为:XX 继电器室 I (II) 母正(负)接地。二级母线接地判断方式为:三级支路均无不平衡电流但二级母线传感器有不平衡电流;

当第一级母线发生接地时,发母线接地信号,信号定义为:35 kV 继电器室 I (II) 母正(负)接地。

(下转第 41 页)

4 结 论

针对传统相模变换矩阵的不足,提出了一种采用新的相模变换矩阵,并结合提升小波的故障测距改进算法。通过分析仿真得出以下结论:所提出的算法,不仅能反映所有类型的故障,减小计算的工作量,而且相较于普通小波测距,多数情况下测距结果精度较高。

参考文献

[1] 陈平,葛耀中,索南加乐,等. 基于故障开断暂态行波信息的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 56—59, 64.

[2] 覃剑,陈祥训,郑健超,等. 利用小波变换的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 6—10.

[3] 李友军,王俊生,郑玉平,等. 几种行波测距算法的比较[J]. 电力系统自动化, 2001, (14): 36—39.

[4] 蒋涛,陆于平. 不受波速影响的输电线路单端行波故障测距研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 24(12): 29—32.

[5] 李泽文,曾翔君,徐小箐,等. 输电线路双端行波故障定位新算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 40—43.

[6] 董杏丽,葛耀中,董新洲,等. 基于小波变换的行波测距距离保护原理的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(7): 9—13.

[7] 熊小伏,林金洪. 基于小波重构的电力电缆故障测距方法[J]. 电网技术, 2003, 27(6): 36—38.

[8] 范春菊,张兆宁,郁惟镛. 小波方法在超高压输电线路故障测距中的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 50—53.

[9] 黄雄,王志华,尹项根等. 高压输电线路行波测距的行波波速确定方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 34—37.

[10] 覃剑,葛维春,邱金辉,等. 影响输电线路行波故障测距精度的主要因素分析[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 28—35.

[11] 徐丙垠. 利用暂态行波的输电线路故障测距技术[D]. 西安:西安交通大学, 1991.

[12] 王安定,葛耀中. 模量变换技术在反应故障分量的微机保护中的应用研究[J]. 电力系统自动化, 1988, 12(3): 17—27.

[13] 宋国兵,李森,康小宁,等. 一种新相模变换矩阵[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 57—60.

[14] 葛哲学,沙威. 小波分析理论与 MATLAB⁷实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2005. 3.

[15] Mognago F H, Abur A. Fault location using wavelets[J]. IEEE Trans On PWRD, 1998, 13(4): 1475—1480.

作者简介:

郭 亮 (1982—),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护研究。

吕飞鹏 (1968—),男,博士,教授,从事电力系统继电保护和故障信息处理智能系统研究。

罗长亮 (1983—),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护研究。

蒋 科 (1983—),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护研究。

李鹏飞 (1981—),男,硕士,从事电力系统继电保护研究。

(收稿日期: 2009—09—01)

(上接第 25 页)

一级母线接地判断方式为:二级支路均无不平衡电流但一级母线传感器有不平衡电流;

由于母线和负荷支路同时接地的情况非常少,所以可以只定义为上述方式,并且多个继电器室发生多负荷支路接地时,绝缘监测装置仍可上传信号。

4 结束语

通过对变电站直流系统接地告警方式的设计,可以使运行人员直观地监视到直流系统故障状况,锁定故障点,及时排除故障,当然由于直流馈线并未最终

的负荷端,运行人员可以绘制更为详细的二级接线图,以方便下级支路的查找。

参考文献

[1] 贾秀芳. 直流系统绝缘监测综合判据[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(16): 47—49.

作者简介:

李俊儒 (1982—),女,助理工程师,德阳电业局。

刘 玲 (1982—),女,助理工程师,德阳电业局。

赖民昊 (1981—),男,助理工程师,成都电业局。

(收稿日期: 2009—07—08)

高压隔离开关触指压力的测试

蒋 平¹, 李 晶²

(1. 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:通过高压隔离开关触指压力仪器的开发,使触指压力的现场测试得以实施,减少了由于触指压力不符合要求引发的高压隔离开关过热故障缺陷,完善了高压隔离开关的测试项目。

关键词:隔离开关;触指压力;现场测试

Abstract: Based on the development of the contact pressure testing equipment for high voltage disconnector the field test of contact pressure can be carried out This testing can reduce over-heat failure of disconnector caused by the contact pressure and complete the testing project of high voltage disconnector

Key words: disconnector; contact pressure; field test

中图分类号: TM835 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)06—0026—03

高压隔离开关被广泛地用于电力系统,是电网运行设备中数量最多、最易失修的一次高压输变电设备,同时也是故障最多的一类输变电设备。其中由于触指压力不符合要求引发的高压隔离开关过热故障缺陷,更比比皆是。这是因为,隔离开关触指压力降低(触指压簧弹性减弱),主回路接触电阻就会增大,引起触头发热,触头发热后接触面氧化造成接触电阻进一步增大,触头发热更厉害,形成恶性循环,严重时发生熔焊产生拉弧,引发事故。为此,国家电网生[2006]57号《交流高压隔离开关和接地开关评价标准》4(4)条将高压隔离开关触指压力测试列为了预防性试验项目;国家电网公司在《十八项电网重大反事故措施》11.12.2条、华中电网有限公司《预防高压开关设备事故措施》12.2条和《四川省电力公司反事故措施实施细则》6.12.2条中,均要求新安装或检修后的高压隔离开关开展触指压力测试。但由于没有专用测量工具和有效的测试方法,全国各地在高压隔离开关实际安装、检修及预试工作中,并没能开展起来,文件精神和要求也没有得到落实。

1 现场用测试仪的开发

1.1 测试对象的选择

由于 GW4、GW5和 GW7是装运数量最多的隔离开关,其中 GW4型高压隔离开关又是电力系统中用量最大的型号,根据四川省 2007年隔离开关统计,在

110 kV 和 220 kV 电压等级中仅 GW4型及其改进型就占四川系统全部隔离开关数量的 73.2%。根据电力生产检修和安装单位的急迫要求,经反复论证和对国外先进元器件的查询、确认,由于 GW4、GW5、GW7及相应改进型号的系列高压隔离开关其带触指的触头结构是相同的,区别仅在于对应触指开口的宽度不同。为此根据这一特点,研制开发了 GW、GW5和 GW7型高压隔离开关触指压力测试仪。

1.2 测试仪的构成与测试方法

高压隔离开关触指压力测试仪由柔性薄膜式压力传感器、动触头模拟调节器和测量显示器等组成。动触头模拟调节器由手柄托、柄杆、插入位置指示滑标、动触头宽度调节、压力传动滑块、滑块滑槽、滑块限位挡板组装而成。宽度调节根据游标卡尺测量结果,旋转模拟动触头的铜螺栓改变插入滑块深度,使



图 1 高压隔离开关触指压力测试仪的构成

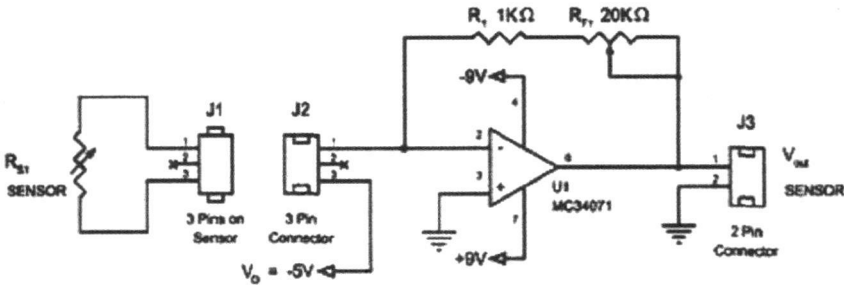


图 2 柔性薄膜式压力传感器的应用电路

其达到动触头宽度完成调节。将调节好的模拟动触头插入隔离开关动、静触头实际合闸位置(事先由柄杆上的动触头插入位置指示滑标确定),隔离开关任一对触指压力通过压力传动滑块传递到柔性薄膜式压力传感器上,由数字测量显示器直接读取压力数值。

1.3 应用电路原理

柔性薄膜式压力传感器应用电路原理如图 2 所示。在无负载情况下,输出为 0 V;在负载 445N 时,输出是 4.2 V,输出电压与负载具有高度线性关系。输出电压—负载关系如图 3 所示。

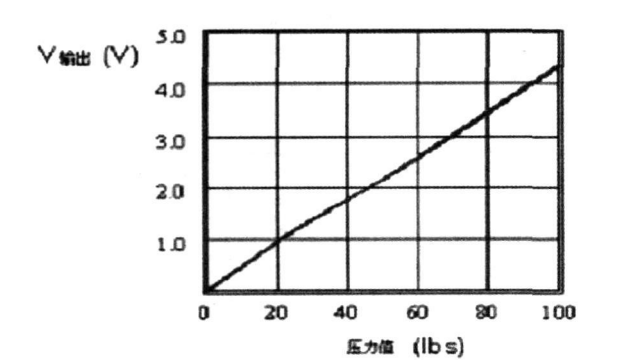


图 3 输出电压—负载关系

高压隔离开关触指压力测试仪原理图如图 4 所示,选用的 CPU 为 TI 公司 16 位单片机 MSP430F2013。

1.4 测量与校准

由高压隔离开关触指压力测试仪原理图 4 得到

$$R_x = V_{IN2} \times R_{13} / (V_{CC} - V_{IN2}) \quad (1)$$

$$V_{CC} = V_{IN1} \times (R_{14} + R_{20}) / R_{20} \quad (2)$$

$$P = a/RX + b = a \times (V_{CC} - V_{IN2} / (V_{IN2} \times R_{13}) + b \quad (3)$$

由式 (3) 得知,测量的压力值 P,必须要得到 V_{IN1} 、 V_{IN2} 测量值。测量 V_{IN1} 、 V_{IN2} 使用 MSP430F2013 内部 16 位 A/D, A/D 的采样频率 4 096 k。准确度:1LSB 内部可编程放大器 PGA,有 1~32 倍的程控增益,保证了 0~50 kg 范围内测量准确性。

为了保证测量的稳定性,测量电路中的分压电阻

及测量电阻采用的均是准确度为 0.1%,温度系数为 $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 的器件。

高压隔离开关触指压力测试仪的校准,即公式 (3) 中的系数 a、b 确定,是由在标准砝码产生的标准压力下,将标准砝码重量代入以下公式计算得到。

$$P_1 = a/RX1 + b \quad (4)$$

$$P_2 = a/RX2 + b \quad (5)$$

式中, P_1 、 P_2 为标准砝码压力; $RX1$ 、 $RX2$ 为压力传感器的测量值。

1.5 技术特点

1.5.1 采用柔性薄膜式压力传感器

柔性薄膜式压力传感器属于压阻效应型压力传感器,具有以下优点:①压力与电阻变化具有高度线性关系;②传感器本体非常薄 (0.127 mm) 且具有可挠性,属于薄片式感测元件。柔性薄膜式压力传感器外观如图 6 所示,主要感测区位于前端大小为直径 9.53 mm 的圆形区域。

1.5.2 触头模拟调节装置

高压隔离开关由于动、静触头接触面小,加之 GW4、GW5、GW7 等系列插入式的触指为多对组成,如同时进行全部触指的测量,同样会掩盖个别压力偏小的触指,所以动触头模拟装置可单独进行任一对触指压力的测量。

1.5.3 避免压力传递的误差

隔离开关处于合闸位置时,静触指与动触头接触处为正向压力,若经过拐臂或其他非沿接触面(接近线的一个面)法线方向进行测量,必将引入非线性误差。另外如压力传递因材质或结构原因,在不同压力下产生不同的形变,其误差的修正也是非常困难的。采用的柔性薄膜式压力传感器仅 0.127 mm 厚(超薄),压力传递采用刚性材料滑块,使各元件间为紧密结合,压力为正向传递且传递过程各器件均无变形和预压间隙,解决了其他方式触指压力测量中结构器

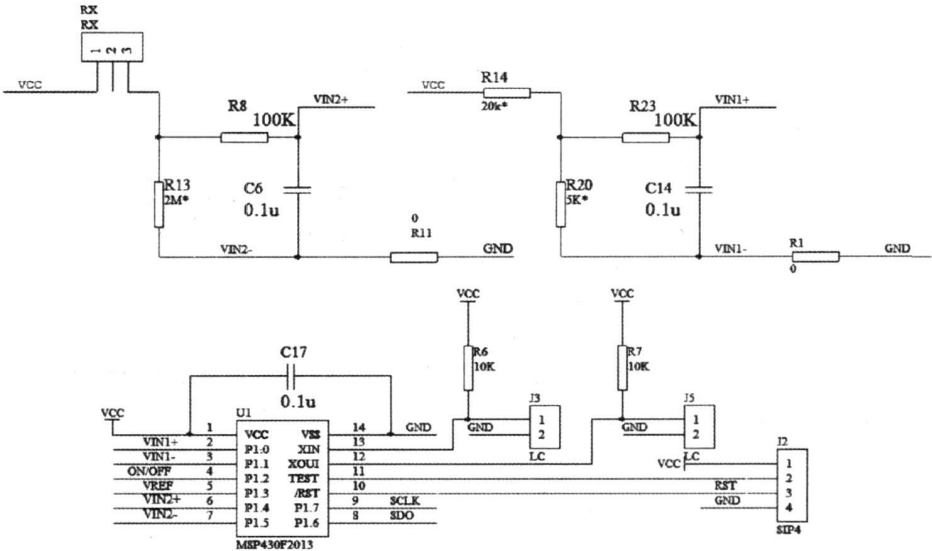


图 4 触指压力测试仪原理图

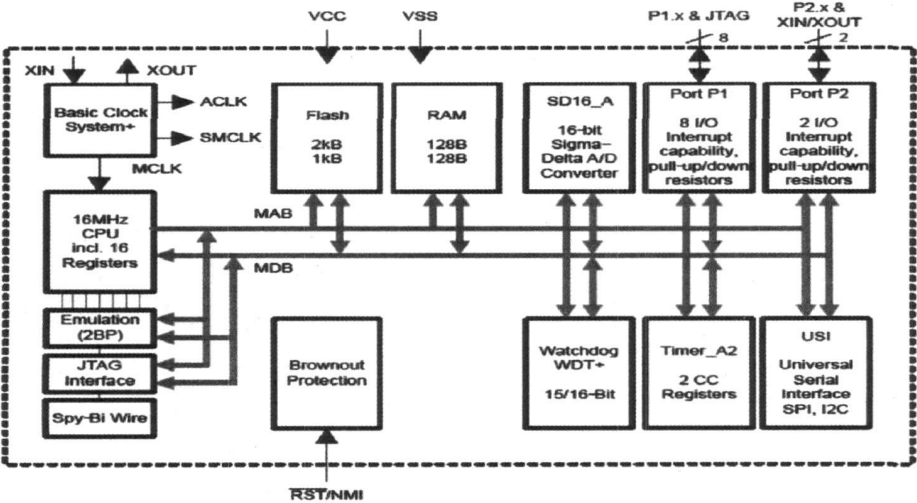


图 5 MSP430F2013 的内部结构图



图 6 传感器外观图

件发生变形引起的测量误差。

1.5.4 低功耗和微型化

由于该传感器的低功耗和低电压驱动,内置 7 号电池不需外接电源,彻底抛弃了其他传感器所需的高功率电源和庞大的外围辅助电路,使整体得以实现轻型化和微型化。触头模拟调节器装置长度 22 cm,重量 0.5 kg 单手柄操作,即使处在检修架上等高空,一人也可轻松完成测试,是测量户外 GW4、GW5、GW7 及相应系列相同触指结构的高压隔离开关触指压力专用测试仪器。

2 结束语

通过所述测试仪器及方法的实施,使国家电网公司在电网重大反事故措施中,关于开展高压隔离开关触头接触压力测试的要求,在实际安装检修工作中可以得到落实,为完善高压隔离开关测试项目创造了条件,对保证高压隔离开关设备正常和保障电网安全运行具有重要意义。随着对贯彻执行国家电网生[2006]57号《交流高压隔离开关和接地开关评价标准》、《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》和《四川省电力公司反事故措施实施细则》力度的加大和深入,安装调试单位和各运行维护单位将逐步开展高压隔离开关触指压力的测试。

(收稿日期: 2009—07—24)

配电网谐波潮流计算

钟 茜

(四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘 要:中低压配电网谐波潮流计算问题,适宜采用三相分析方法。系统分析了国标 GB/T 14549—93、GB/Z 17625.4—2000 对谐波限值以及谐波叠加方法的规定。对中低压配电网中的电气元件如变压器、传输线、负荷等构建了三相谐波模型,并提出了配网谐波潮流计算的步骤和方法。

关键词:配电网;谐波;潮流

Abstract: Three phase analysis method is recommended to the harmonic power flow calculation for distribution network with middle and low voltage level. The harmonic emission limit and the harmonic superposition method in GB/T 14549—93 and GB/Z 17625.4—2000 are analyzed. The three phase harmonic models of transformer, transmission line and load are established. The process of power flow calculation of distribution network is presented.

Key words: distribution network; harmonic; power flow

中图分类号: TM861 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2009)06—0029—04

谐波是电环境的污染物。像很多其他形式的污染一样,谐波的发生要影响整个电环境,而且可能波及离谐波源很远的地方。谐波会对电力系统和用户造成一系列危害,比如引起系统局部谐振,增加附加发热和损耗,造成设备故障;导致电力设备不正常工作,加速电力设备老化等。因此,对配电网进行谐波潮流计算,估算配电网电能质量情况,具有重要的现实意义。

中国中低压配电网的三相参数是不对称的,而且由于低压侧单相负荷的存在,使得正常运行时,三相负荷通常不对称。对配电网谐波潮流分析宜采用三相模型分析法。如图 1 所示系统,假设有若干组谐波源注入到配电网。如果配电网系统为线性无源系统,则可应用叠加原理分别计算各次谐波。通过直接求解式(1),即可求得系统各母线公共连接点的谐波电压 $[V_h]$ 。



图 1 不平衡电流注入配网系统

$$[I_h] = [Y_h][V_h] \tag{1}$$

式中, $[I_h]$ 、 $[Y_h]$ 、 $[V_h]$ 中每一个元素都是由自导纳和互导纳组成的 3×3 阶矩阵。

1 谐波发射限值^[1,2]

中国对谐波问题的研究始于 20 世纪 80 年代。1991 年谐波国家标准起草小组提交了 GB/T 14549—93《电能质量 公用电网谐波》初稿。1993 年国家技术监督局正式颁发了国家标准。GB/T 14549—93 的性质为推荐性国家标准。该标准的正式颁发标志着中国谐波综合治理工作走上了标准化道路。2000 年国家技术监督局将 IEC 61000—3—6 等同采用为国家指导性技术文件 GB/Z 17625.4—2000《中、高压电力系统中畸变负荷发射限值的评估》。

GB/T 14549—93 给出了各个等级电力系统电压畸变限值和谐波电流限值。GB/Z 17625.4—2000 中只给出了中、高压电力系统的电压畸变限值,而没有给出电流畸变限值,因此 GB/Z 17625.4—2000 评估用户谐波水平仅使用电压畸变限值。

2 谐波叠加方法

中低压配电系统是一多谐波源共同作用的系统,在谐波估算的过程中,若已知各谐波源相位,则可直接

接采用谐波潮流的计算方法,进行谐波潮流计算;但有时往往不能实时监测谐波源,只能给出各谐波源的有效值幅值以及电网结构的基本参数。在谐波计算过程中,不可避免将遇到多谐波源共同作用于系统时(谐波源相位未知情况下)谐波电压、电流在系统监测点处(PCC)如何叠加的问题。

GB/T 14549-93规定,两个谐波源的同次谐波电流在一条线路的同一相上叠加,当相位角已知时按照式(2)计算。

$$I_h = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h2}^2 + 2 I_{h1} I_{h2} \cos \theta_h}$$

(2)

式中, I_{h1} ——谐波源 1 的第 h 次谐波电流, A;
 I_{h2} ——谐波源 2 的第 h 次谐波电流, A;
 θ_h ——谐波源 1 和谐波源 2 的第 h 次谐波电流之间的相位角。

当相位角不确定时,可按照式(3)进行计算。

$$I_h = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h2}^2 + K_h I_{h1} I_{h2}}$$

(3)

式中, K_h 系数按照表 1 选取。

表 1 系数 K_h 的值

h	3	5	7	11	13	9 >13	偶次
K_h	1.62	1.28	0.72	0.18	0.08		0

两个以上同次谐波电流叠加时,首先将两个谐波电流叠加,然后再与第三个谐波电流叠加,依此类推。两个及以上谐波源在同一节点同一相上引起的同次谐波电压叠加的计算与式(2)、式(3)同。

GB/Z 17625.4-2000^[2]中的谐波叠加原则即 IEC 叠加原则,IEC 有两种叠加法则。下面就第二种叠加法则进行阐述。第 h 次合成谐波电压的叠加法则是:

$$U_h = \sqrt{\sum_i U_{hi}^2}$$

(4)

式中, U_h ——对所考虑的一组谐波源(概率统计值)计算出的(第 h 次)合成谐波电压值;

U_{hi} ——要进行合成的各单个谐波电压(第 h 次)的值;

α ——一个指数,主要取决于两个因素:①对不超过计算值的实际值所选择的概率值;②各次谐波电压的幅值和相位随机变化的程度。

IEC 叠加原则中对 α 的取值进行了如表 2 的说明。

表 2 叠加指数 α

谐波次数	α
$h \leq 5$	1
$5 \leq h \leq 10$	1.4
$h > 10$	2

3 电气元件谐波计算模型

3.1 变压器三相谐波模型

许多三相变压器都绕在公用铁心上。因此,所有绕组都与其他绕组有耦合关系。任何双绕组三相变压器都可以用两个耦合的复合线圈代表,如图 2 所示^[3,4]。

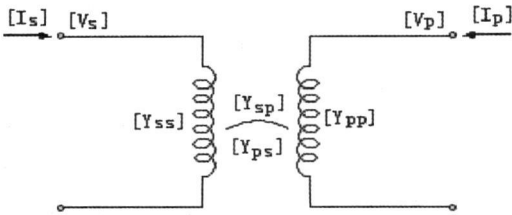


图 2 将双绕组三相变压器看成两个藕合的复合线圈

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix}$$

(5)

式(15)中,

$$I_p = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}, I_s = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}, V_p = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, V_s = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Y_{pp} 与 Y_{ss} 为自导纳矩阵, Y_{ps} 与 Y_{sp} 为互导纳矩阵,当两个复合线圈为双向耦合时有 $Y_{ps} = Y_{sp}^T$ 。 Y_{pp} 、 Y_{ss} 、 Y_{ps} 、 Y_{sp} 均为 3×3 阶矩阵。

通常认为变压器的所有三相参数都是对称的。在这种情况下,双绕组变压器的三相接线方式可以由 3 个三阶基本子矩阵构成。在标准变比 $k=1$ 的情况下,它们的形式是:

$$Y_1 = \begin{bmatrix} y_t & 0 & 0 \\ 0 & y_t & 0 \\ 0 & 0 & y_t \end{bmatrix}$$

$$Y_2 = \begin{bmatrix} 2y_t & -y_t & -y_t \\ -y_t & 2y_t & -y_t \\ -y_t & -y_t & 2y_t \end{bmatrix}$$

其中, $y_t = \frac{1}{z}$, z 为变压器基波下低压侧的短路阻抗。

在一般的变压器连接方式中,这些子矩阵与 Y_{pp} 、 Y_{ss} 、 Y_{ps} 、 Y_{sp} 的关系列于表 3 中。

高压电力变压器的内部谐振频率远高于谐波渗透研究的频率范围。因此变压器的匝间电容和对地

电容,对研究结果的精确度影响很小,可以忽略。对于由集肤效应造成的变压器铁心损耗增加,可以在电阻与频率的关系中考虑,如式(6)所示。

表 3 双绕组变压器节点导纳矩阵的子矩阵

绕组接线方式		自导纳子矩阵		互导纳子矩阵
P	S	Y_{pp}	Y_{ss}	$Y_{ps}=Y_{sp}^T$
YN	Y_n	Y_1	Y_1	$-Y_1$
YN	Y	$Y_2/3$	$Y_2/3$	$-Y_2/3$
YN	$\Delta-11$	Y_1	Y_2	$-Y_3$
Y	Y	$Y_2/3$	$Y_2/3$	$-Y_2/3$
Y	$\Delta-11$	$Y_2/3$	Y_2	$-Y_3$
Δ	Δ	Y_2	Y_2	$-Y_2$

$$Z_{Tn} = \sqrt{h}R_{T1} + jhX_{T1} \tag{6}$$

式中, R_{T1} 是变压器基波电阻; X_{T1} 为变压器基波电抗。

3.2 输电线模型

通常可用一Π型等值电路表示三相输电线路,如图 3 所示。

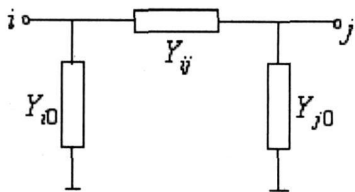


图 3 三相输电线Π型等值电路

如果输电线路是对称排列或是经完全换相的,即是三相对称的。

$$Z_{ij}^{abc} = \begin{bmatrix} Z_s & jx_m & jx_m \\ jx_m & Z_s & jx_m \\ jx_m & jx_m & Z_s \end{bmatrix}$$
$$Y_{ij}^{abc} = \begin{bmatrix} Y_s & Y_m & Y_m \\ Y_m & Y_s & Y_m \\ Y_m & Y_m & Y_s \end{bmatrix}$$
$$Y_{ij}^{abc} = Y_p^{abc} = j\frac{1}{2} \begin{bmatrix} b_0 + 2b_m & -b_m & -b_m \\ -b_m & b_0 + 2b_m & -b_m \\ -b_m & -b_m & b_0 + 2b_m \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中, Z_s ——各相线路计及大地影响的自阻抗;
 x_m ——各相线路相互间的互感抗;
 b_0 ——为各相线路对地的电(容)纳;
 b_m ——为各相线路相互间的互电(容)纳。

3.3 综合负荷模型

负荷遍及各行各业,各类负荷所占比重随时间也有很大变化,特别是普遍存在的为改善功率因数而装设的静电电容器容量也常有变化,这些使得要准确

定负荷的等值阻抗变得很困难。一般来说,可将它分为电动机类负荷与其他类负荷,按其组成的比例分别计算等值阻抗并予以并联组成综合等值阻抗。其他类负荷近似以电阻性负荷对待,电动机类负荷近似以等值电动机对待。

实际情况下只知道接于系统母线处的综合负荷的基波有功功率和无功功率,应当注意,接于系统母线的并联补偿装置和滤波装置不应该包含在综合负荷中,它们的模型按并联元件进行建模。一般认为,综合负荷对正序电流和负序电流呈相同的阻抗,而对零序电流则呈现很大的阻抗。计算中采用如下导纳矩阵模型。

$$Y = T \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & y & 0 \\ 0 & 0 & \downarrow \end{bmatrix} T^{-1} \tag{8}$$

式中, y 为综合负荷在基波下的负序导纳。

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}, \text{其中 } \alpha = 1 \angle 120^\circ。$$

4 谐波潮流计算方法

谐波潮流计算步骤如下。

- (1)设定谐波计算次数 h ;
- (2)根据谐波次数与电网结构、元件模型,构建 h 次谐波下的导纳矩阵 Y_h ;
- (3)如果已知各谐波源相位,则按照式解算电网本次谐波潮流,进入步骤(5),否则进入未知谐波源相角的计算方式,进入步骤(4);
- (4)每个谐波源单独作用时,解算电网谐波潮流,得到 PCC 点处注入谐波电流以及谐波电压;按照谐波叠加原则,在 PCC 点处将各谐波源单独作用时的结果进行叠加,作为该点该次谐波潮流计算结果。
- (5)重新设置需要计算的谐波次数 h 进入步骤(1);直到各次谐波下的电网潮流计算均完成,则进入步骤(6);
- (6)在 PCC 点处计算谐波总畸变率。

5 结 论

配电网的三相参数是不对称的,须采用三相谐波潮流模型进行计算。建立的配电网各元件的三相谐

波模型,并系统分析了 GB/T 14549—93、GB/Z 17625.4—2000 对谐波限值以及谐波叠加方法的规定,以此为依据提出了在已知谐波源相位和未知谐波源相位两种情况下的配电网谐波潮流计算步骤。该方法可广泛应用于配电网系统谐波估算中。

参考文献

[1] GB/T 14549—1993,电能质量 公用电网谐波[S].
[2] GB/Z 17625—2000,中、高压电力系统中畸变负荷发射限值的评估[S].
[3] J Arrillaga D. A. Bradley P. S. Bodger 电力系统谐波[M].北京:中国矿业大学出版社,1991.
[4] 王猛.电牵引负荷谐波在三相电力系统中的分布与计算[D].成都:西南交通大学,2003.

[5] George J Walkileh 电力系统谐波——基本原理、分析方法和滤波器设计[M].北京:机械工业出版社,2003.
[6] Task Force on Harmonic Modeling and Simulation “Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonic in Electric Power networks”. IEEE Trans[J]. 1996, 11(1): 452—465.
[7] Vinay Shama R. J Fleming Leo Niekamp “An Iterative Approach for Analysis of Harmonic Penetration in the Power Transmission Networks”. IEEE Trans[J]. 1991, 6(4): 1698—1706.
[8] 张学松,柳焯,于尔铿,等.配电网潮流算法比较研究[J].电网技术,1998,22(4): 45—49.

(收稿日期:2009—07—07)

(上接第 15 页)
分段试投,避开负荷低谷时段。
4)分析控制软件是否存在缺陷,适当进行修改,避免类似情况发生。

6 结 语

目前天广直流运行在定无功功率控制功能方式和自动无功功率控制模式,当要将某小组交流滤波器进行手动操作时,应将该小组交流滤波器操作到非选择状态,然后才能对其进行操作。无功功率控制主要通过投退交流滤波器实现,直流系统将会根据负荷对无功的要求和对谐波的要求而确定正常运行时的滤波器小组数。在闭锁状态,直流站控检测交流滤波器小组的可用数目,如果可用的交流滤波器满足最小配置,直流站控将送一个确认的信号到极控,允许极解锁。在极解锁时,为了过滤交流谐波,将投入一个 A 型和一个 B 型小组滤波器。在无功控制自动模式下解锁时,极控将送一个整流器“解锁”状态信号到直流站控。直流站控将投入下一个 A 型和一个 B 型小组滤波器。如果即将投入的小组滤波器出现故障,则自动投入下一个可用的小组滤波器。在换流器解锁后大约 500 ms 滤波器最小数目配置完成。在解锁状态,如果由于滤波器小组不可用,不能满足正常运行负荷所需求的无功和谐波,将会发出“电流控制”的告警信号,此信号在一定延时之后会将降低电流的信号送到极控,极控收到信号后将会执行降低单极或

双极传输功率命令。因此,要求运行人员密切监视无功功率控制是否在自动模式,各个小组交流滤波器的状态以及交流滤波器投退情况能否满足直流系统的需求,尽量避免由于无功功率控制出问题而引起直流系统降负荷运行和强迫停运情形的发生。同时,特别注意小组交流滤波器检修后的试运行阶段应尽量安排在直流负荷稳定的时段,在试运行期间运行人员要密切其他小组滤波器的自动投退预选情况和自动投退情况是否正常。

参考文献

[1] 赵畹君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004.
[2] 曹继丰.高压直流输电现场实用技术问答[M].北京:中国电力出版社,2007.
[3] 2008 浙大直流组.直流输电[M].北京:电力工业出版社,1982.
[4] Siemens DC station control system information manual (Tianshengqiao Station). Germany Siemens 1999.
[5] Siemens AC filter and DC filter study report performance and rating (Tianshengqiao Station). Germany Siemens 1999.

作者简介:

刘 洋(1983—),男,吉林人,工学、理学双学士,助理工程师,主要从事高压直流输电的运行和维护工作。
黎张文(1979—),男,广西人,工学学士,助理工程师,主要从事高压直流输电的运行和维护工作。

(收稿日期:2009—08—05)

采用串联谐振原理优化设计 110 kV 变压器和 GIS 耐压装置

黄建康

(成都电业局, 四川 成都 610041)

摘 要:通过采用大功率电力变压器试验装置和串联谐振耐压试验装置的比较, 串联谐振试验装置具有操作简单、损耗低、重量轻、维护简单、对电源需求低、保护完善等优点。考虑到变压器耐压主要是容性负载, 核算出串联谐振装置电抗器的配置, 提出了采用 6 节 38 kV /140 H /1 A 电抗器的设计方式, 可以灵活地通过变频和电抗器的调感, 实现电压和电感的不同组合, 满足 110 kV 变压器和 110 kV GIS 耐压试验的电压和频率需要。该套装置在 110 kV 龙华变电站、110 kV 西郊变电站等多个工程中取得了良好的试验效果, 证明了该套试验配置方案的可行性和优越性, 并可在工程中大量采用。

关键词:串联谐振; 变压器; GIS 耐压试验

Abstract: Through comparing high-power transformer with series resonant dielectric strength test device, the series resonant test device is simple in operation and easy to maintain, and it has other advantages such as low loss, lightweight, low demand for power supply and a perfect protection. Taking it into account that the transformer dielectric strength test is mainly capacitive load, the reactor configuration of series resonant device is calculated, and then the design of using six 38 kV /140H /1A reactors is proposed, which can flexibly regulate the inductance through the reactor and frequency conversion and realize the different combinations of voltage and inductance to meet the need of voltage and frequency for 110 kV transformer and 110 kV GIS dielectric strength test. The kit installed in 110 kV Longhua substation and 110 kV Xijiao substation have achieved good test results, and it proves the feasibility and superiority of the test configuration, which can be widely used in the project.

Key words: series resonance; transformer; GIS dielectric strength test

中图分类号: TM835 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0033-05

长期以来, 110 kV 变压器和 110 kV GIS 耐压试验都是通过大功率变压器和调压器组合来完成的, 由于大功率变压器和调压器存在设备重、容易漏油、试验电源容量大、运输困难、保护不完善等缺点, 而串联谐振耐压设备可以很好地解决这些问题。110 kV 变压器和 110 kV GIS 耐压试验主要是容性负载, 从技术经济两个方面考虑, 通过变频和积木式调感电抗器的合理组合, 采用串联谐振试验方案实现 110 kV 变压器和 110 kV GIS 耐压试验。

1 采用大功率工频耐压设备和串联谐振耐压装置优缺点比较

1.1 所需电源容量比较

工频耐压试验采用高压变压器输出电压直接加在被试变压器上 (如图 1)。由于被试变压器的电容大, 由此试验变压器需要输出的试验电流^[1]。

$$I = \frac{U_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} \approx \frac{U_c}{X_c} \tag{1}$$

R 为回路等效电阻; X_c 为试品容抗; U_c 为电容端电压。

电源需要提供的功率为

$$S = \frac{U_c^2}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} \approx \frac{U_c^2}{X_c} \tag{2}$$

而在串联谐振耐压试验中, 由于回路全谐振, 对于整个回路来讲, 试品容抗 X_c 等于试品感抗 X_L , 由此需要输出的试验电流^[2]为

$$I = \frac{U}{R} \tag{3}$$

R 为回路等效电阻;

U 为励磁变压磁输出电压。

$$U_c = U_L = I X_c = Q U_c$$

U_c 、 U_L 分别为电容和电感端电压;

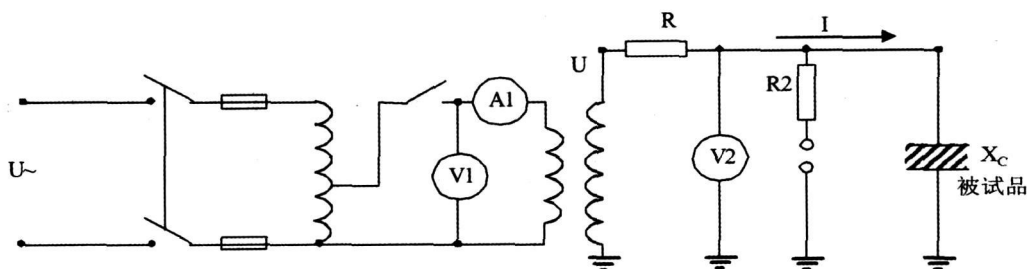


图 1 交流耐压试验接线图

X_c 为试品容抗；

I_c 为流过试品电容电流。

其中, $Q = \frac{X_c}{R}$

Q 为电抗器品质因数。

电源需要提供的功率为

$$S = \frac{1}{Q} \cdot \frac{U_c^2}{X_c} \quad (4)$$

一般电抗器品质因数 Q 为 30~60。

因此采用串联谐振所需电源容量和电压仅为变压器耐压的 $1/Q$, 这就解决了部分试验现场试验电源容量不足的问题。

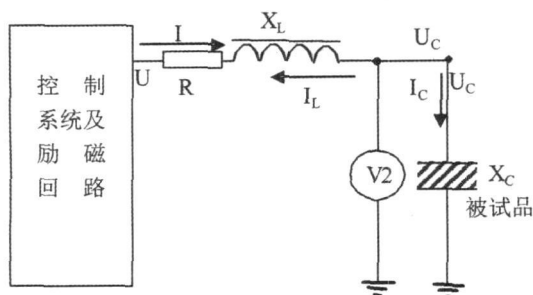


图 2 串联谐振耐压试验接线简图

1.2 现场试验设备运输等比较

工频耐压试验采用大容量高压变压器、调压器来实现, 变压器和调压器一般都采用油浸式, 110 kV 变压器试验所需要的试验变压器和调压器加起来 2 t 左右, 现场试验需要使用 1 台大货车和 1 台吊车, 特别对于远距离施工, 这个费用是非常高且不能接受的。

如果采用了串联谐振设备, 可以大大节约施工成本。首先由于所需要的容量小了很多, 电抗器采用积木式结构, 重量大大减轻。整套设备的每一台部件 2 人就能搬动, 整套设备只需要 1 台 0.5 吨皮卡车就能装完, 大大节约了车辆运输相关费用。

1.3 设备运行维护比较

工频耐压试验所采用高压变压器和调压器一般都是采用油浸式结构, 长期运行容易出现漏油问题,

需进行油的处理和更换等工作。而串联谐振设备所需要的励磁变压器和电抗器一般都采用干式结构, 基本不需要维护保养, 大大节约了维护相关费用。

2 110 kV 串联谐振耐压设备方案设计

2.1 110 kV 串联谐振耐压设备配置设计

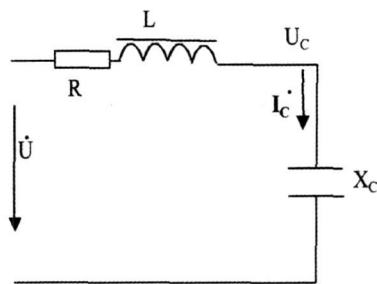


图 3 串联谐振耐压试验接线简图

根据 LC 串联谐振电路回路 (图 3), 当回路发生谐振时^[2]

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad (5)$$

故回路的谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (6)$$

电感电流为

$$I_L = I_C = U_c \omega C \quad (7)$$

根据最新规程《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》^[3]对于变压器外施交流耐压的规定, 对频率的要求是 45~65 Hz 对耐压值要求为出厂试验耐压值的 80%。对于经常遇到的 110 kV 电压等级变压器, 110 kV 侧耐压 112 kV, 35 kV 侧耐压 68 kV, 10 kV 侧耐压 28 kV^[4]。

对于 GIS 交流耐压^[5]频率要求 30~300 Hz, 110 kV GIS 耐压值为 184 kV。

根据以上要求, 故设计采用 6 台 38 kV / 140 H / 1 A 电抗器, 10 kVA 电源容量, 经计算得表 1。

由表 1 和式 (7) 可知, 对于 110 kV 变压器, 综合

表 1 主变压器负载电容量计算表

电抗器组合	电抗值 (H)	负载电容量 (pF)	频率 (Hz)	电压 (kV)	计算公式
6 台电抗器串联	840	7 200~14 000	45~65	0~228	$f_b = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$
5 台电抗器串联	700	8 500~17 000	45~65	0~190	
4 台电抗器串联	560	11 000~21 000	45~65	0~152	
3 台电抗器串联	420	14 000~28 000	45~65	0~114	
2 台电抗器串联	280	21 000~43 000	45~65	0~73	
1 台电抗器	140	42 000~88 000	45~65	0~38	

表 2 GIS 负载容量计算表

电抗器组合	电抗值 (H)	负载电容量 (pF)	频率 (Hz)	电压 (kV)	计算公式
6 台电抗器串联	840	350~23 000	30~300	0~228	$f_b = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$
5 台电抗器串联	700	400~19 000	30~300	0~190	

表 3 变压器基本参数

型 式	SFSZ9—40000 /110	出厂编号	079
出厂日期	2006. 12	试验日期 温度 湿度	2007. 3. 5 /12℃ /78%
额定容量	40000 /40000 /40000kVA	联结组别	YNynod11
绝缘水平	高压线路端子	SI/LI/AC	530 /480 /200 kV
	高压中性点端子	LI/AC	325 /140 kV
	中压线路端子	SI/LI/AC	220 /200 /85 kV
	低压线路端子	SI/LI/AC	85 /75 /35 kV
电压组合	110±8×1. 25 % /38. 5±2×2. 5% /10. 5 kV		

考虑电抗器额定电流为 1 A 的情况下:

110 kV 侧耐压 112 kV 时,可承受负载电容量为 7 200~28 000 pF,一般变压器 110 kV 侧的电容量为 8 000~14 000 pF;

35 kV 侧耐压 68 kV 时,可承受负载电容量为 7 200~43 000 pF,一般变压器 35 kV 侧的电容量为 10 000~24 000 pF;

10 kV 侧耐压 28 kV 可承受负载电容量为 7 200~88 000 pF,一般变压器 10 kV 侧的电容量为 12 000~28 000 pF。

因此采用该配置是完全能够满足 110 kV 变压器交流耐压试验需要。

对于 110 kV GIS 耐压试验^[6],综合考虑电抗器额定电流为 1 A 的情况得表 2。

由表 2 可知,对于 110 kV GIS 耐压 184 kV, 30~300 Hz 可承受负载电容量 300~23 000 pF。按照 GIS 每个间隔 1 000~3 500 pF 计算,至少可以进行 6 个间隔试验。

通过以上分析,采用该配置方案可以进行 110 kV 电力变压器的交流耐压试验,并且可以进行 6 个间隔的 GIS 耐压试验 (如果间隔多于 6 个可以分段进行试验)。

2.2.4 断电保护

试品回路跳闸后,电抗器尾部会产生过电压,保护

2.2 110 kV 串联谐振耐压设备保护功能

对于 110 kV 串联谐振耐压设备,需要配备完善的安全保护功能。

2.2.1 过电压保护

电压保护是为了防止在试验过程中由于人为或者其他原因造成过电压的时候,设备能够自动进行保护。过电压保护可以进行人工设定,利用分压器的模拟信号进行硬件保护,保护可在 1 μs 内迅速动作。过电压保护精度为 2%。

2.2.2 过电流过热保护

过流保护是双重的,一方面每只 I PM 模块自身带有过电流过热保护功能,另一方面采用霍尔元件对直流进行采样,根据容量—时间曲线进行硬件保护,保护时间是 1 μs。

2.2.3 放电保护

试品放电后,试验在 1 μs 内自动跳闸。放电后由于回路的参数发生突变,而电抗器为感性元件,这是可能会在电抗器尾端产生过电压而打坏励磁变压器及变频电源,为此必需在励磁变压器高压侧加装避雷器,在变频电源的出口加装滤波器。由于容性试品放电后会产生脉冲电流和反击。为此在电源侧加装了进线保护,防止反击电压打坏变频器。

方式与放电保护相同。

2.2.5 从零启动

电压调节分辨率高,可从零启动。如不从零合闸,变频器不启动。

3 110 kV 串联谐振耐压现场试验

2007 年 8 月,利用该串联谐振设备对 110 kV 西郊变电站 1 号变压器进行了耐压试验。

表 4 现场测试变压器对地电容

电容 CX (pF)	高对中低及地	中对高低及地	低对高中及地
	13 292.8	20 500.2	19 570.2

因在试验中采用了电容式分压器进行高压电压监视,其电容为 2 000 pF。

首先对高压侧进行耐压试验 112 kV,高压侧对中低及地的电容为 13 292.8 pF,加上分压器电容 2 000 pF,负载电容 C=15 292.8 pF,初设频率 f=50 Hz

利用公式 $f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ 可得:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 C f^2} = 10\,142\,400 / 15\,292.8 \approx 663.2\text{ H}$$

因每节电抗器电感为 140 H,故电抗器节数 $n = \frac{663.2}{140} = 4.7 \approx 5$

取 n=5 节,则电抗器电压能经受 $5 \times 38\text{ kV} = 190\text{ kV} > 112\text{ kV}$,满足试验需求。

按 $L=5 \times 140 = 700\text{ H}$, $C=15\,292.8\text{ pF}$ 由 $f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = 48.7\text{ Hz}$ 满足 45~65 Hz 的要求。

现场按照 5 节电抗器串联的方式进行耐压,调谐频率为 48.5 Hz 与计算频率 48.7 Hz 存在 0.2 Hz 的误差。经过分析,该误差是由试验设备和高压试验线之间的杂散电容引起的,利用公式 $f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ 反算得,杂散电容约 300 pF。

采用同样的计算方法,对变压器中压侧、低压侧进行了耐压,如表 5。

在整个试验过程中对各方面保护功能进行了测试,保护安全完善,符合现场试验需要。在随后的多个变电站耐压试验中得到了很好的应用,能满足各个容量的变压器试验需要,在 GIS 耐压试验中,因频率范围为 30~300 Hz 更容易满足现场需要。

4 耐压试验中的注意事项

在使用串联谐振耐压设备进行变压器或 GIS 耐压试验时,为了确保人身安全和设备的正常运行要做好试验前的准备工作。耐压前必须认真分析该工作中容易出现的问题和不安全因素,制定控制措施,做到心中有数,防患于未然。耐压试验必须有严密的组织,必须设置试验安全监护人,各项操作要有专人负责。每次试验前都应做好充分准备,了解被试设备运行状况,熟悉串联谐振耐压设备原理和试验方法。通知无关人员离开被试设备,经试验负责人许可方可加压。加压过程中试验人员必须严肃、认真、精力集中,操作者的手不要离开跳闸按钮,注意监视仪表及现场,不得擅自职守。在进行几项重要操作时,操作者分别呼叫“高压合闸”、“放电”、“去掉接地杆”等口令,当监护人同意并重复上述口令后,方能进行具体操作。试验结束后必须用接地杆放在高压端,对被试设备进行充分放电。当试品试验过程中出现放电、击穿或出现异常现象,应立即跳闸,切忌麻痹大意,未降压就闯入高压区。确保试验安全有效进行。

5 结束语

在现场使用该 110 kV 串联谐振耐压设备对 110 kV

表 5 主变压器耐压频率计算表

试验位置	电容	电抗器	计算频率	实际频率	耐受电压	高压电流
高对中低及地	13 292.8	$5 \times 140 = 700\text{ H}$	48.7 Hz	48.5 Hz	112 kV	0.5 A
		$5 \times 38\text{ kV} = 190\text{ kV}$				
中对高低及地	20 500.2	$3 \times 140 = 420\text{ H}$	51.8 Hz	51.6 Hz	68 kV	0.5 A
		$3 \times 38\text{ kV} = 108\text{ kV}$				
低对高中及地	19 570.2	$3 \times 140 = 420\text{ H}$	52.9 Hz	52.7 Hz	28 kV	0.2 A
		$3 \times 38\text{ kV} = 108\text{ kV}$				

说明: 1. 频率均满足要求 45~65 Hz 电压均满足要求;
2. 试验中杂散电容约为 200~400 pF 之间不等;
3. 高压电流 $I = U_e \omega C_e$ 。

龙华变电站、110 kV 西郊变电站等进行试验后,各方面保护功能完善,试验过程安全,各项试验操作都满足试验需求,只需要不到 10 kVA 的电源容量,与采用大功率试验变压器相比,还大大减少了试验运输等费用,试验效率也得到了极大的提高。

随着串联谐振耐压试验技术的不断发展,充分利用串联谐振试验装置具有的操作简单、损耗低、重量轻、维护简单、对电源需求低、保护完善等优点,逐步开展大容量设备的耐压试验势在必行。串联谐振耐压试验技术已经非常的成熟,对于容性试品的耐压试验,原有笨重的大功率变压器耐压试验设备必将被轻型的串联谐振耐压试验设备所替代,可在工程中大量采用。

参考文献

[1] 张豫仁. 高电压实验技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1982.

[2] 孙力勇, 张焰, 蒋传文. 求解机组组合问题的嵌入贪婪搜索机制的粒子群优化算法 [J]. 电网技术, 2006, 30 (13): 44—48.

[3] 刘涌, 侯志俭, 蒋传文. 求解机组组合问题的改进离散粒子群算法 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (4): 35—39.

[4] 韩恺, 赵均, 钱积新. 电力系统机组组合问题的闭环粒子群算法 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (1): 36—40.

[5] V. S Pappal I Erlich A New Approach for Solving the Unit Commitment Problem by Adaptive Particle Swarm Optimization [J]. Power and Energy Society General Meeting — Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE 20—24 July 2008: 1—6.

[6] Ting T. O, Rao M. V. C, Loo C. K A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle swarm optimization [J]. IEEE Trans on PWRs 2006, 21 (1): 411—418.

[7] Lingfeng Wang Chanan Singh Unit commitment considering generator outages through a mixed — integer particle swarm optimization algorithm [J]. Applied Soft Computing 2009, 9: 947—953.

[8] Tsung —Ying Lee Chun —Lung Chen Unit commitment

1982.

[2] GB/T 16927. 1 — 1997, 高电压试验技术第一部分: 一般试验要求 [S].

[3] 国家技术监督局. 电气装置安装工程电气设备交接试验标准 [M]. 中国计划出版社, 2006.

[4] DL/T 474. 4—2006, 现场绝缘试验实施导则 交流耐压试验 [S].

[5] 西南电业管理局试验研究所. 高电压设备试验方法 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1993.

[6] DL/T 555 — 1994, 气体绝缘金属封闭电器现场耐压试验导则 [S].

[7] 中华人民共和国能源部. 电业安全工作规程 [S]. 北京: 中国电力出版社, 1991.

作者简介:

黄建康 (1976—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统自动化及高压试验。

(收稿日期: 2009—10—14)

(上接第 3 页)

with probabilistic reserve: An IPSO approach [J]. Energy conversion and management 2007, 48: 486—493.

[13] Xiaohui Yuan Hao Nie Anjun Su Liang Wang Yanbin Yuan An improved binary particle swarm optimization for unit commitment problem [J]. Expert System with Applications 2009, (36): 8049—8055.

[14] 陈焯, 赵国波, 刘俊勇等. 用于机组组合优化的蚁群粒子群混合算法 [J]. 电网技术, 2008, 32 (6): 52—56.

[15] 蒋秀洁, 吴永华, 杨敏. 基于 PSO—GA 算法的电力系统机组组合研究 [J]. 继电器, 2006, 34 (5): 34—38.

[16] 娄素华, 余欣梅, 熊信良, 等. 电力系统机组启停优化问题的改进 DPSO 算法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (8): 30—35.

[17] P. Sriyanyong Y. H. Song Unit Commitment Using Particle Swarm Optimization Combined with Lagrange Relaxation [J]. Brunel Inst of Power Syst, Brunel Univ, Uxbridge UK; Power Engineering Society General Meeting 2005. IEEE 12—16 June 2005, 3: 2752—2759.

作者简介:

赵幸欣 (1985—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行。

(收稿日期: 2009—09—18)

一种基于新的相模变换矩阵的输电 线路故障测距改进算法

郭 亮¹, 吕飞鹏¹, 罗长亮¹, 蒋 科¹, 李鹏飞²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 山东电力工程咨询院, 山东 济南 250013)

摘 要: 针对已有电力系统行波故障测距算法中采用的相模变换、小波变换存在的不足, 提出了一种结合新的相模变换矩阵和提升小波的行波故障测距改进算法, 实现了单一模量反映所有故障类型, 简化了高频小波系数的计算, 提高了计算速度。通过 Matlab 仿真实验, 验证了与普通小波测距相比, 算法具有较高的测距精度。

关键词: 相模变换; 提升小波; 故障测距; 输电线路; 暂态行波

Abstract: Considering the deficiencies of the used phase-mode transformation and wavelet transform in the available transmission line fault location algorithms, an improved algorithm for the fault location based on a new phase-mode transformation matrix and lifting wavelet is proposed. All types of fault can be reflected by a single modulus, the calculation for the wavelet coefficients with high frequency is simplified, and the calculation speed is enhanced. Matlab simulation shows that the algorithm has a higher accuracy compared with the traditional wavelet location methods.

Key words: phase-mode transformation; lifting wavelet; fault location; transmission line; transient traveling wave

中图分类号: TM755 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0038-04

0 引 言

故障测距是电力系统查找输电线路故障点的重要依据。在输电线路故障后及时、准确地找到故障点, 对修复线路, 保证可靠供电以及电力系统的安全稳定、经济运行具有非常重要的作用。行波故障测距法因其原理简单, 近年来受到了国内外学者的关注, 得到了广泛的研究^[1~11]。现有的行波故障测距法多采用相模变换与小波变换相结合对暂态行波信号进行分析。目前常用的 Clark、Karrenbauer、Wedpohl 等变换矩阵在分析时域问题时应用最多, 但其在继电保护应用中的最大缺陷是单模量不能适用于所有类型故障。若要使模量能反映所有类型故障, 必须使用双模量或选相配合, 从而使计算量大大增加^[12]。传统的基于卷积的离散小波变换计算量大, 计算复杂度, 对存储空间的要求高, 不利于硬件实现^[14]。

针对已有行波故障测距算法存在的不足, 提出了一种结合新的相模变换矩阵和提升小波的行波故障测距法。该算法通过对电流行波进行相模变换, 再利用提升小波分析线路两端电流行波线模量来实现高精度故障测距。与已有的行波测距法相比, 该方法不

仅解决了单一模量不能反映所有故障类型的问题, 还具备运算所需存储空间小, 计算量小和计算效率高优点。最后将其仿真结果与普通小波测距结果进行了对比。

1 新的相模变换矩阵的分析

相模变换的数学本质就是将参数矩阵化为对角阵。对于三相均匀换位线路, 根据其相模变换矩阵的构造原则, 即第一列各元素相等, 第二、三列元素之和均为零, 文献 [13] 构造出一种新的相模变换矩阵, 其原始阵为

$$S = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ 5 & -1 & -4 \\ 5 & -4 & -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & -3 \\ 1 & -3 & 2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

对故障暂态相电流进行相模变换, 可以提取线模分量, 即 1 模量和 2 模量。表 1 给出了各种类型故障下使用该相模变换矩阵所得到的 1 模量和 2 模量的值。通过表 1 可知, 运用该相模变换矩阵得到的模量

表 1 各种故障类型下的电流量模值

故障类型	边界条件	1 模量	2 模量
BG	$i_b = i_c = 0$	i_a	i_a
BG	$i_a = i_c = 0$	$2 i_b$	$-3 i_b$
CG	$i_a = i_b = 0$	$-3 i_c$	$2 i_c$
AB	$i_c = 0, i_b = -i_a$	i_b	$-4 i_b$
BC	$i_a = 0, i_b = -i_c$	$5 i_b$	$-5 i_b$
CA	$i_b = 0, i_a = -i_c$	$4 i_a$	$-i_a$
ABG	$i_c = 0$	$i_a + 2 i_b$	$i_a - 3 i_b$
BCG	$i_a = 0$	$2 i_b - 3 i_c$	$2 i_c - 3 i_b$
CAG	$i_b = 0$	$i_a - 3 i_c$	$i_a + 2 i_c$
ABC	$i_a + i_b + i_c = 0$	$i_a + 2 i_b - 3 i_c$	$i_a - 3 i_b + 2 i_c$

值在所有类型故障下均为非零值,即 1 模量和 2 模量均能单独反映所有类型故障^[13],因此可以任意选取其中之一作为仿真分析对象。

2 提升小波变换

提升小波于 1996 年由 Sweldens 提出,其算法的基本思想是,将现有的小波滤波器分解成基本的构造模块,分步骤完成小波变换^[14]。传统的小波都可以找到等效的提升方案。如图 1,由提升算法构成的小波变换过程可以分为以下 3 个阶段。

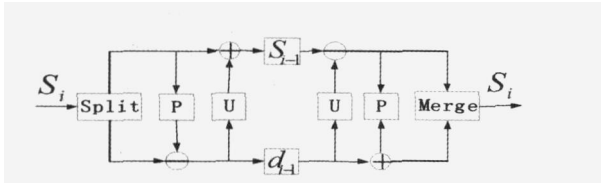


图 1 提升算法的分解和重构

- (1)分解。将输入信号 S_i 分为两个子集 S_{i-1} 和 d_{i-1} ,最简单的方法是按奇偶性分,分解过程 $F(S_i) = (S_{i-1}, d_{i-1})$;
 - (2)预测。在基于原始数据相关性的基础上,用偶数序列 S_{i-1} 的预测值去预测奇数序列 d_{i-1} ,即将滤波器 P 对偶数信号作用后作为奇数信号的预测值,奇数信号的实际值与预测值相减得到残差信号,重复分解和预测过程,经 n 步后原信号集可用 $\{S_n, d_n, \dots, S_1, d_1\}$ 来表示;
 - (3)更新。更新的基本思想是找出一个更好的子数据集 S_{i-1} ,使之保持原始数据集的一些特性。构造一个更新算子 $U, S_{i-1} = S_{i-1} + U(d_i - 1)$ 。
- 综上所述,提升算法可以实现原位运算,在每个

点都可以用新的数据流替换旧的数据流。当重复使用原位提升滤波器组时,即可得交织的小波变换系数。

电力暂态信号分析处理中的小波基的选择目前主要倾向于经验性选择。因为对故障暂态信号进行研究需要提取的是非平稳信号的瞬时、突变成分,即提取有限频带上的信息,所以在小波基的选取上,需要考虑其在时、频两域的紧支撑性和带通滤波性能,又为了能准确检测出信号中的奇异点,该小波函数必须具有正则性^[7, 15]。综合考虑,这里选择 db4 小波作为提升小波的小波基

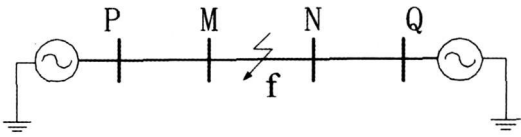


图 2 仿真模型

3 算例仿真

为了验证所提出的算法,用 Matlab/Simulink 建立一个 500 kV 双电源系统模型,如图 2。设定仿真时间为 0.05 s 采样频率为 1 MHz 分布参数线路 PM、MN、NQ 的长度皆为 300 km,故障起始时间为 0.025 s 接地电阻为 10 Ω ,线路参数为

$R_1 = 0.01273 \Omega / \text{km}$
 $R_0 = 0.3864 \Omega / \text{km}$
 $L_4 = 0.9337 \times 10^{-3} \text{ H} / \text{km}$
 $L_0 = 4.1264 \times 10^{-3} \text{ H} / \text{km}$
 $C_1 = 12.74 \times 10^{-3} \mu\text{H} / \text{km}$
 $C_0 = 7.751 \times 10^{-3} \mu\text{H} / \text{km}$

以线路 MN 为研究对象,其区内故障点为 f 先以 A 相单相接地故障为例,设定故障点 f 距母线 M 端 45 km,运行仿真可得 M 端和 N 端的 1 模量暂态电流波形及其高频小波系数如图 3 所示。

再以 CA 两相相间短路为例,设定故障点 f 距母线 M 端 135 km,运行仿真可得 M 端和 N 端的 1 模量暂态电流波形及其高频小波系数如图 4 所示。

测距算法采用不受波速影响的双端行波测距^[5]。故障距离采用以下公式进行计算。

$$X = \frac{(t - t_1) \times l}{2(t - 2t_1 + t_2)}$$

(3)

其中 l 为线路全长, t_1 为故障初始行波从故障点

到达测量端母线的时刻， t_1 为故障点反射波到达测量端母线的时刻， t_2 为故障初始行波从故障点到达对端母线的时刻。

分别对 M、N 两端的提升小波系数进行测量得到 3 个波头的时间，再代入式 (3) 计算可得测距结果。以上两个例子的仿真结果如表 2 所示，可见该算法能够比较准确地确定故障地点。

为了进一步验证该算法，表 3 给出了各种类型故障下分别采用提升小波和普通小波所得的部分测距结果。通过比较可以看出，采用提升算法后大多数故障测距结果精度比普通小波测距高，能够满足精确故障定位的要求。

表 2 算例的仿真结果

故障	t_1 /ms	t_2 /ms	t_3 /ms	X /km	ϵ /km
AG 45 km	25.157	25.467	25.883	44.884	0.116
CA 135 km	25.469	26.399	25.571	135.174	0.174

注： ϵ 为绝对误差，其他符号意义同式 (3)。

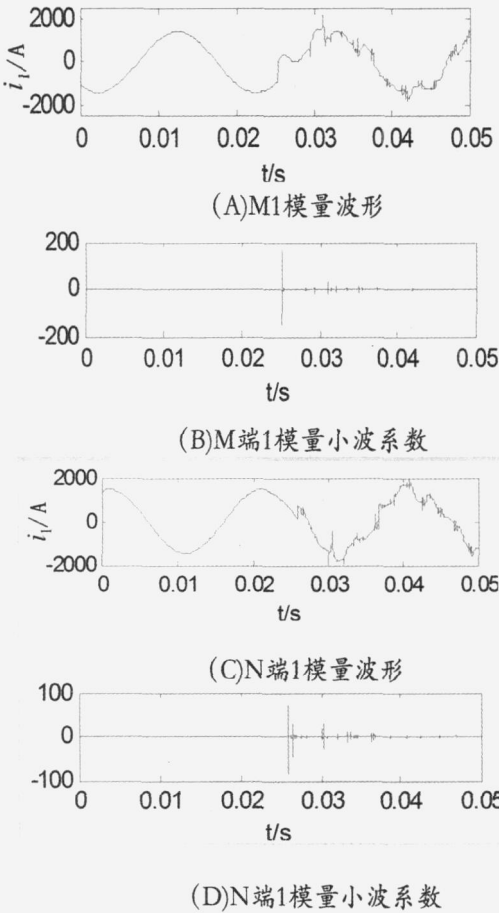


图 3 1 模量波形及其提升小波变换 (45 km, A 相)

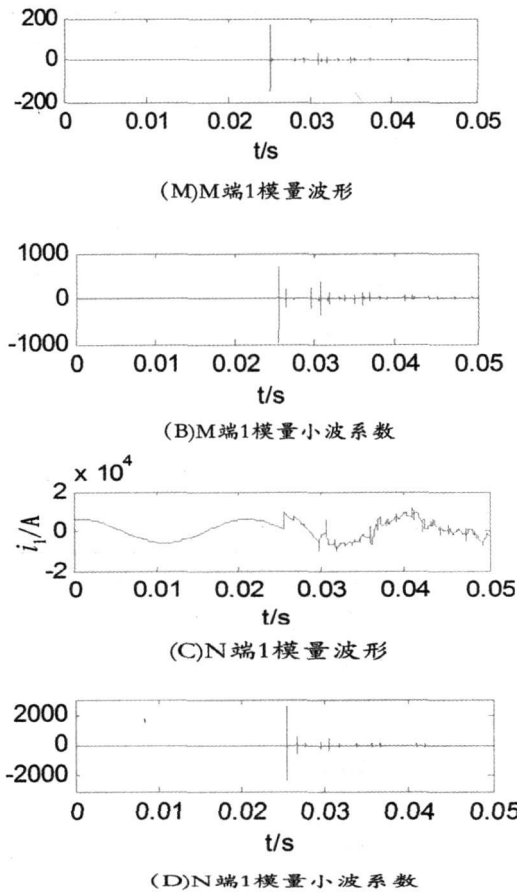


图 4 1 模量波形及其提升小波变换 (135 km, CA 相间)

表 3 各种故障类型下的仿真

故障类型	故障仿真距离 /km	提升小波测距 /km	绝对误差 /m	普通小波测距 /km	绝对误差 /m
单相接地短路	40	40.068	68	39.999	1
	90	90.058	58	90.231	231
	180	180.000	0	179.971	29
	220	220.000	0	219.932	68
两相相间短路	280	280.271	271	280.271	271
	40	40.068	68	39.999	1
	90	90.058	58	90.231	231
	180	180.000	0	179.971	29
两相接地短路	220	220.000	0	219.932	68
	280	280.271	271	280.271	271
	40	40.068	68	39.999	1
	90	90.058	58	90.231	231
三相接地短路	180	180.000	0	179.971	29
	220	220.000	0	219.932	68
	280	280.271	271	280.271	271
	40	40.068	68	39.999	1

4 结 论

针对传统相模变换矩阵的不足,提出了一种采用新的相模变换矩阵,并结合提升小波的故障测距改进算法。通过分析仿真得出以下结论:所提出的算法,不仅能反映所有类型的故障,减小计算的工作量,而且相较于普通小波测距,多数情况下测距结果精度较高。

参考文献

[1] 陈平,葛耀中,索南加乐,等. 基于故障开断暂态行波信息的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 56—59, 64.

[2] 覃剑,陈祥训,郑健超,等. 利用小波变换的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 6—10.

[3] 李友军,王俊生,郑玉平,等. 几种行波测距算法的比较[J]. 电力系统自动化, 2001, (14): 36—39.

[4] 蒋涛,陆于平. 不受波速影响的输电线路单端行波故障测距研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 24(12): 29—32.

[5] 李泽文,曾翔君,徐小箐,等. 输电线路双端行波故障定位新算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 40—43.

[6] 董杏丽,葛耀中,董新洲,等. 基于小波变换的行波测距距离保护原理的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(7): 9—13.

[7] 熊小伏,林金洪. 基于小波重构的电力电缆故障测距方法[J]. 电网技术, 2003, 27(6): 36—38.

[8] 范春菊,张兆宁,郁惟镛. 小波方法在超高压输电线路故障测距中的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 50—53.

[9] 黄雄,王志华,尹项根等. 高压输电线路行波测距的行波波速确定方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 34—37.

[10] 覃剑,葛维春,邱金辉,等. 影响输电线路行波故障测距精度的主要因素分析[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 28—35.

[11] 徐丙垠. 利用暂态行波的输电线路故障测距技术[D]. 西安:西安交通大学, 1991.

[12] 王安定,葛耀中. 模量变换技术在反应故障分量的微机保护中的应用研究[J]. 电力系统自动化, 1988, 12(3): 17—27.

[13] 宋国兵,李森,康小宁,等. 一种新相模变换矩阵[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 57—60.

[14] 葛哲学,沙威. 小波分析理论与 MATLAB⁷实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2005. 3.

[15] Mognago F H, Abur A. Fault location using wavelets[J]. IEEE Trans On PWRD, 1998, 13(4): 1475—1480.

作者简介:

郭 亮 (1982—),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护研究。

吕飞鹏 (1968—),男,博士,教授,从事电力系统继电保护和故障信息处理智能系统研究。

罗长亮 (1983—),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护研究。

蒋 科 (1983—),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护研究。

李鹏飞 (1981—),男,硕士,从事电力系统继电保护研究。

(收稿日期: 2009—09—01)

(上接第 25 页)

一级母线接地判断方式为:二级支路均无不平衡电流但一级母线传感器有不平衡电流;

由于母线和负荷支路同时接地的情况非常少,所以可以只定义为上述方式,并且多个继电器室发生多负荷支路接地时,绝缘监测装置仍可上传信号。

4 结束语

通过对变电站直流系统接地告警方式的设计,可以使运行人员直观地监视到直流系统故障状况,锁定故障点,及时排除故障,当然由于直流馈线并未最终

的负荷端,运行人员可以绘制更为详细的二级接线图,以方便下级支路的查找。

参考文献

[1] 贾秀芳. 直流系统绝缘监测综合判据[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(16): 47—49.

作者简介:

李俊儒 (1982—),女,助理工程师,德阳电业局。

刘 玲 (1982—),女,助理工程师,德阳电业局。

赖民昊 (1981—),男,助理工程师,成都电业局。

(收稿日期: 2009—07—08)

架空线—电力电缆混合线路特性及保护配置探讨

江少成¹, 岳亚丽², 潘震宇¹, 黄万骏¹, 陈雷¹

(1. 温州电力局, 浙江 温州 325000; 2. 湛江供电局, 广东 湛江 524005)

摘 要:从电力电缆的正序、负序、零序阻抗特性及零序阻抗与零序电流的关系, 分析了电力电缆同架空线的不同之处。在传统保护的基础上提出了自适应接地距离保护和零序电流保护方案。该方案能适应电网各种运行方式, 在各种接地故障时均能更可靠起到保护作用。

关键词: 电缆; 零序阻抗; 自适应; 接地距离保护; 零序电流保护

Abstract: Firstly, by introducing the characteristics of positive sequence impedance, negative sequence impedance, zero sequence impedance and the relationship between zero sequence impedance and zero sequence current, the differences between power cable and transmission line are analyzed. Then, the schemes of adaptive algorithm of ground distance relaying and zero sequence current protection are proposed based on the traditional current protection method. The scheme can be adapted for all operation modes of power grid. And it could provide a well protection to the power grid when all kinds of earth fault take place.

Key words: cable; zero sequence impedance; adaptive algorithm; ground distance protection; zero sequence current protection

中图分类号: TM773 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2009)06—0042—03

现阶段所使用的高压输电网络设备主要有两种: 架空线和电力电缆。架空线作为一种传统的输电线路, 其各种电气参数都比较稳定, 各种保护方案都有了比较完善的理论体系。但是由于它占地面积大, 电磁干扰强烈, 影响了城市的景观和环境, 逐渐淡出城市输电网络。

随着中国大中型城市建设的飞速发展和城市规划的要求, 电力电缆以其占地少、对人身安全、供电可靠、维护工作量小等优点得到了广泛的应用。城区 220 kV 和 110 kV 线路大量采用电力电缆, 特别是架空—电缆混联线路得到广泛使用。

但是电力电缆的电气参数不像架空线那样稳定, 尤其是它的零序参数, 均会随着所流经的零序电流的变化而发生改变, 正由于此, 传统的继电保护方案并非完全满足电力电缆的保护需要。在高压架空线路保护的基础之上, 针对电缆电气参数的特点, 探讨一种电缆—架空线混合线路的保护方案, 并进行理论、仿真分析甚至有条件进行试运行具有较好的意义和价值。

1 电力电缆的电气特性

目前使用的电力电缆有橡皮绝缘电力电缆、聚氯

乙烯绝缘电力电缆、油浸纸绝缘电力电缆、交联聚乙烯电力电缆 (XLPE)、高压充油电力电缆、SF₆ 气体绝缘电力电缆、超导电缆等。其中以 XLPE 应用最为广泛, 是城市电网改造的首选。

电缆由于制作工艺的不同, 使得它的电容和电感比较起普通架空线有很大的不同。架空线路的相间距远大于电缆线路相间距, 因此电缆的单位长度电感小的多, 由此导致一般电力电缆的阻抗角都明显小于架空线路的阻抗角。电缆的小电感特性带来了一系列诸如负载分配和短路电流水平等问题, 同时也影响继电保护的配置方案。

电力电缆无论是缆心之间, 还是缆心与护套之间的间距都要小得多, 再加上绝缘材料的高介电常数, 造成电缆的单位长度的电容要远大于架空线路单位长度的电容, 较同电压等级架空线路单位长度电容基本上高一个数量级, 较大数量级的分布电容必将在线路中产生较大的容性电流。对于较长电缆线路显然不能忽略分布电容所产生的容性电流对于保护配置的影响。

1.1 电缆的正负序阻抗

电缆线路序阻抗除了需要考虑电缆的型号、结构、护套接地方式以及布置 (例如是否布置于磁化通

道中)等因素之外,还必须计及集肤效应以及邻近电缆效应的影响。一般来讲,由于电缆缆心间距较小,正序(负序)阻抗比架空线要小。

1)单心电缆线路的金属护套只有一点互联接地;或各相电缆和金属护套均换位,且三个换位小段长度相等;或金属护套连续换位得很好时,电缆的正序(负序)阻抗为

$$Z_1 = Z_2 = R_c + j \frac{2}{3} \omega \times 10^{-4} \ln \frac{S \times nS \times mS}{GMR_A \times GMR_B \times GMR_C} \quad (1)$$

式(1)中, Z_1 、 Z_2 为单位正、负序阻抗; ω 为角频率; R_c 为三相线心的平均交流电阻, Ω/km ; S 、 mS 、 nS 为电缆各相相间距离; GMR_A 、 GMR_B 、 GMR_C 为自几何均距。

2)电缆的金属护套两端直接互联(接地)时,护套内电流与心线电流方向相反,并产生护套损耗,导致电缆正序(负序)电阻减小,正序(负序)电抗增加,计算公式如下。

$$Z_1 = Z_2 = R_c + j \frac{2}{3} \omega \times 10^{-4} \ln \frac{S \times nS \times mS}{GMR_c} + \frac{X_m^2 R_s}{X_m^2 + R_s^2} - j \frac{X_m^3}{X_m^2 + R_s^2} \quad (2)$$

式(2)中, X_m 为金属护套与线心间的单位互感; R_s 为金属护套的直流电阻, Ω/km ; GMR_c 为线心的几何半径。

1.2 电缆的零序阻抗

1)短路电流一大地位回路:电缆线路的金属护套只在一端互联接地,而邻近无其他平行的接地导线,则在电网发生单相接地故障时,短路电流以大地作回路。单回路的零序单位阻抗为

$$Z_0 = 3(R_c + R_g + j \frac{2}{3} \omega \times 10^{-4} \ln \frac{D_e}{[GMR^3 (S \times nS \times mS)^2]^{1/9}}) \quad (3)$$

式(3)中, Z_0 为单位零序阻抗, Ω/km ; GMR 为线心的几何半径, D_e 为故障电流以大地作回路的等值回路深度; R_g 为大地漏电阻。

2)短路电流以金属护套作回路:电缆线路的金属护套在两端直接互联或交叉互联接地时,短路电流通过大地部分可忽略不计,可认为短路电流全部以金属护套作回路,回路电阻为金属护套的并联电阻,则单回路的零序单位阻抗为

$$Z_0 = R_c + R_s + j \frac{2}{3} \omega \times 10^{-4} \ln \left(\frac{GMR_s}{GMR_c} \right) \quad (4)$$

式(4)中, GMR 为金属护套的几何半径。

电缆金属护套仅在一端互联接地时,其零序单位阻抗值约为正、负序单位阻抗值的 7~10 倍。护套在两端互联接地时,电缆零序单位阻抗仅略大于正、负序单位阻抗值,而架空线路的 X_0 约为 X_1 的 3.6~4.5 倍。

对于 XLPE 套管型电缆,其零序阻抗的大小取决于所处铁磁场的导磁率,零序电流增大,磁感应强度增大,相对导磁率会增大。但是磁感应强度过大又会导致磁饱和,这就造成了处于铁磁场中的高压地下电缆的零序阻抗随零序电流的大小而改变。文献[1]给出了某电缆的零序阻抗与零序电流的关系曲线,如图 1。

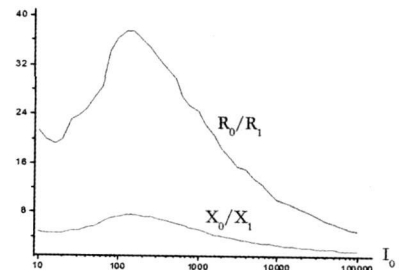


图 1 电缆零序电阻、电抗比与零序电流之间关系曲线

2 自适应接地距离保护方案

传统架空线接地距离保护,在理论和运行上已经相对完善,对于架空线路的保护可以说是尽善尽美,并且长期的使用中,也积累了相当的经验。而当运用在电力电缆中,却不相同, Z_0 会随着零序电流的不同而变化。因此,将传统接地距离保护的整定计算方法运用到电力电缆时,就会出现较大误差,甚至会带来运行上的错误。

电力电缆的零序阻抗和零序电流成非线性的函数关系,可以采用已有的零序电抗和零序电流的函数关系曲线(根据电缆出厂数据或投运前试验数据)。同时选用以零序电流为极化量的接地方向阻抗继电器和多边形阻抗继电器,以减小保护区受过度电阻的影响,使得保护区更加稳定;并且采用极化量后,受电力电缆的特殊电气特性影响较小,利于保护的可靠性和选择性。

以正序电压为极化量的接地方向阻抗继电器动作方程可以转化为

90° ≤

$$U_{\Phi} = \left[I_0 + \frac{R_1 \left(\frac{R_0}{R_1} - 1 \right) \times 3I_0 + jX_1 \left(\frac{X_0}{X_1} - 1 \right) \times 3I_0}{3Z_1} \right] \times Z_{set}$$

$$\leq 270^\circ \quad (5)$$

式 (5) 中, U_{Φ} 为继电器所测得的电压; I_0 为继电器所测得的电流; $U_{\Phi 1} e^{j\theta}$ 为正序电压极化量; Z_{set} 整定阻抗。

记录所要保护电力电缆的电气参数, 包括电力电缆的长度、单位零序阻抗、单位正序阻抗, 电压等级等, 零序阻抗的初值一般采用电力电缆出厂设置。将整条线路分成很多小段, 对于单相接地短路和两相接地短路故障时, 对各个小段进行迭代逐次逼近计算, 得到不同短路点时的零序短路电流和 $\left(\frac{X_0}{X_1} - 1 \right) 3I_0$ 、

$\left(\frac{R_0}{R_1} - 1 \right) 3I_0$ 的函数关系, 并拟合成该线路的故障曲线。当发生接地短路时, 采集零序电流, 判断接地短路故障的类型是单相接地还是两相接地短路。将所采集的数据, 根据故障类型, 带入到计算机中对应的拟合曲线, 根据函数关系获得 $\left(\frac{X_0}{X_1} - 1 \right) 3I_0$ 和 $\left(\frac{R_0}{R_1} - 1 \right) 3I_0$, 根据式 (5) 来判断, 阻抗继电器是否动作。

3 自适应零序电流保护方案

对于电缆—架空混合线路, 电缆的零序阻抗是会随着零序电流的变化而变化的, 而架空线路的零序阻抗基本上趋于稳定, 不会随着运行状况的变化而发生变化。所以, 混合线路的零序参数是零序电流的非线性函数。文献 [2] 提供了两种零序阻抗的求取方法: 一种方法是查阅制造厂家提供的阻抗电流曲线, 但是, 人工查阅阻抗曲线的方法, 精确度较低而且费时、费力, 可行性很低; 另一种方法是基于迭代算法采用计算机编程实现对阻抗值的求取。

自适应零序电流保护方案的关键点在于设法确定给定线路在发生接地短路时零序电流与短路位置间的关系, 做出相应的关系曲线。其主要步骤如下。

(1) 确定该线路所处系统的经常运行方式、最大运行方式和最小运行方式。

(2) 收集被保护混合线路的基本参数, 包括架空线路的单位零序阻抗值, 电缆线路的参考零序阻抗初

值, 电缆的长度以及架空线路的长度等。

(3) 将整条混合线路合理分为诸多小段, 所分的小段数目越多则最终程序的计算精度就越高。

(4) 将系统最大运行方式至最小运行方式大区间合理划分为若干运行小区间, 然后逐一计算各运行方式下, 逐点发生接地短路故障时所流经的零序电流的大小。

(5) 将步骤 (4) 产生的数据采用最小二乘法对阻抗电流曲线进行拟合, 生成整条混合线路零序电流与短路位置间的关系曲线。每一种运行方式就对应着一条关系曲线。

(6) 当接地短路发生后, 采集零序电流值, 并判断短路的类型。计算短路前后短时间内的电压、电流突变量, 确定此时系统的运行方式, 并根据步骤 (5) 得到的关系曲线确定短路位置。

(7) 零序电流保护逻辑系统根据故障位置或故障零序电流值, 决定是否动作。

具体计算流程图如图 2 所示。

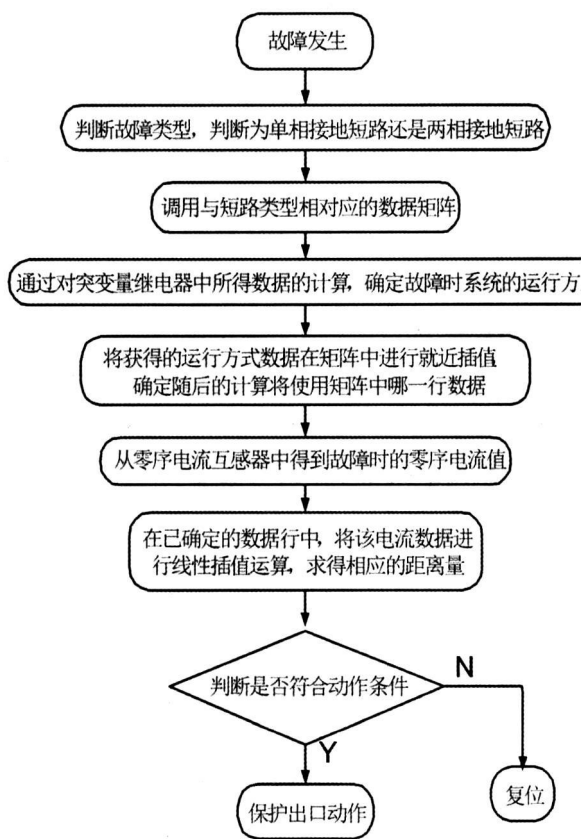


图 2 保护算法流程

该保护方案采用分布参数电路模型, 并充分考虑到电缆各部分的阻抗值会随短路点的变化而变化的

(下转第 54 页)

定,管道膨胀均匀,无振动,参数调整符合新老机组使用要求,实现了温度、压力的智能化自动调节,随时满足新老机组用汽要求,达到了预期目标,因此,可在需要不同品质、大流量蒸汽参数的企业中推广使用。

参考文献

[1] 李青,张兴营,徐光照.火力发电厂生产指标管理手册

[M].北京:中国电力出版社,2007.

[2] DL/T 5054—1996,火力发电厂汽管道设计技术规定[S].

[3] 张燕侠.热力发电厂[M].北京:中国电力出版社,2006.

(收稿日期:2009—02—23)

(上接第 44 页)

特性,将短路点的位置量作为继电器动作判据,较符合实际电缆运行状况。

4 仿真计算实例

对于某 110 kV 中长电缆线路,系统简化图如图 3 所示(MN 为电缆线路),系统参数如下。

$$Z_{1S} = (1.063 + j10.6)\Omega$$

$$Z_S = (1.216 + j11.4)\Omega$$

电缆线路采用 YJLW03 110/1×400 型 XLPE 长度为 20 km;电缆电气参数为 $R_1 = 0.0543 \Omega/\text{km}$, $X_1 = 0.211 \Omega/\text{km}$, $C_1 = 0.159 \mu\text{F}/\text{km}$;零序阻抗待定。相邻导线为架空线,选用型号为 LGJ—120 导线,线路电气参数为 $R_1 = 0.27 \Omega/\text{km}$, $X_1 = 0.412 \Omega/\text{km}$, $C_1 = 0.0088 \mu\text{F}/\text{km}$ 。变压器为 SF—20 000/110 型, $P_k = 163 \text{ kW}$, $U_k\% = 10.5$, $P_0 = 60 \text{ kW}$, $I_0\% = 3\%$ 。

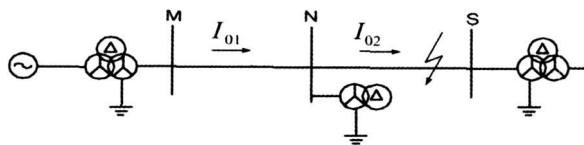


图 3 某 110 kV 系统网络接线图

零序 I 段按照上面提供的自适应计算步骤先离线确定电缆线路零序阻抗,在线路发生接地短路的情况下,根据短路类型在线、动态地确定零序 I 段的动作电流。在上述参数下,一般经过 5、6 次迭代运算,运算精度满足要求;计算经过表明单相接地故障时本方案零序 II 段灵敏度系数为 3.11,较传统方法提高 25%;两相接地短路时零序 II 段灵敏度系数 2.34,较传统方法提高 26%。

5 总结

综上所述,电力电缆零序阻抗具有非线性,随着

电缆线路所处系统的运行方式的改变、故障类型的改变,零序阻抗也会改变。

所提出的基于迭代算法的电缆线路的零序电流保护,充分考虑了电缆零序阻抗的特性,采用拟合曲线确定零序电流与短路点的关系。其整定值可以适应系统运行方式的改变;当系统运行方式改变时,保护针对该方式的仿真模型,进行迭代计算,从而可以精确确定该方式下的电缆零序阻抗及其整定值;虽然电缆线路零序阻抗不是常数,随着所处系统零序电流的大小而改变,因采用自适应插值的整定方法,保护的 范围一直是最大的。本保护方案存在的问题是没有考虑过渡电阻对于保护的影响,当短路点存在过渡电阻时,一旦确定系统当前的运行方式,保护的 保护范围会受到一定的影响,此时,零序电流会变小, I 段保护范围将会缩小,零序 II 段的灵敏度将有所下降。

参考文献

[1] 丁蕾,范春菊.高压地下电缆自适应继电保护方案的研究[J].继电器,2004,32(22):43—47.

[2] ZIPP J CONROY M. Protective relaying Considerations for Transmission Lines with High Voltage AC Cables IEEE Trans on Power Deliver, 1997, 12 (1): 83—96.

作者简介:

江少成(1979—),男,浙江龙游人,工程师,从事电力系统调度工作。

岳亚丽(1980—),女,河南人,助理工程师,从事电力系统继电保护工作。

潘震宇(1972—),男,浙江温州人,助理工程师,从事电力系统运行工作。

黄万骏(1972—),男,浙江温州人,助理工程师,从事电力系统调度工作。

陈雷(1982—),男,浙江温州人,助理工程师,从事电力系统调度工作。

(收稿日期:2009—09—17)

电力变压器铁心剩磁检测方法研究

陈文臣, 雷晓燕, 王 磊

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要:分析了电力变压器铁心产生剩磁的原因及其危害。通过对变压器有剩磁和无剩磁两种情况下的对比分析, 指出励磁电流的偶次谐波是剩磁存在的标志, 并提出通过对励磁电流偶次谐波的测量来判断变压器有无剩磁的检测方法, 现场试验和 EMTP 软件仿真验证了检测方法的可行性。

关键词:电力变压器; 剩磁; 励磁电流; 偶次谐波

Abstract: The reasons of the residual magnetism generated by transformer core are analyzed as well as its hazards. Through the comparative analysis of two situations with and without the residual magnetism, it is found that the even harmonic of excitation current is a sign of the residual magnetism existing. The detection method is put forward which determines the residual magnetism in the transformer by measuring the even harmonic of excitation current. The feasibility of the detection method is proved by the field experiment and EMTP software simulation.

Key words: power transformer; residual magnetism; excitation current; even harmonic

中图分类号: TM936 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0045-04

电力变压器是电网的重要组成元件之一, 在电网的安全稳定运行中具有极其重要的作用。在对电力变压器进行电压比、直流电阻测量和空载实验等操作后会在铁心中残留剩磁。由于剩磁的存在, 当变压器投入运行时铁心剩磁使变压器铁心半周饱和, 在励磁电流中产生大量谐波, 这不仅增加了变压器的无功消耗, 而且可能引起继电保护器误动作, 造成一定的经济损失。与此同时, 铁心的高度饱和使漏磁增加, 引起金属结构件和油箱过热。局部过热将使绝缘纸老化并使变压器油分解, 影响变压器的寿命。因而变压器铁心剩磁的大小不仅直接影响到绕组的运行安全, 而且影响到电力系统的稳定、安全运行^[1,2]。

基于上述原因, 在变压器运行时或投入运行前对剩磁量进行检测并采取有效措施消除或减小铁心剩磁量十分必要, 这对保护变压器正常运行、维护电力系统的稳定与安全十分重要。

1 变压器铁心剩磁产生原因及特点

剩磁产生的原因是由于铁磁材料固有的磁滞现象。

电力变压器绕组直流电阻测试后, 会在铁心中残留剩磁。一般说来, 直流磁化的安匝数愈大, 剩磁愈

严重。具有剩磁的变压器, 施加 50 Hz 交流电压, 当变压器空载投入和外部故障切除后电压恢复时, 因铁心饱和及存在剩磁会出现很大的励磁电流即励磁涌流, 其特点是含有很大成分的非周期分量、含有大量的高次谐波分量且以二次谐波为主、波形之间有间断, 其大小和衰减时间与外加电压、铁心剩磁大小与方向、回路阻抗、变压器容量和铁心性质有关。交流磁势的某半波方向与剩磁方向一致时, 铁心急剧饱和, 出现偶次谐波。如图 1 所示, 一台 500 kV 单相变压器具有剩磁, 在施加 50% 和 100% 50 Hz 额定电压时, 均出现较明显的偶次谐波励磁电流, 励磁电流的偶次谐波是存在剩磁的标志^[5,6]。

2 变压器剩磁检测原理方法

剩磁检测目前在国内外还没明确、成熟的方法, 因此研究出一种方便有效的变压器铁心剩磁检测方法具有重要意义。

当变压器没有剩磁时, 也可使变压器产生励磁涌流, 此时的涌流中的谐波主要是以三次谐波为主的奇次谐波, 另外还有其他高次谐波。当变压器中存在剩磁时可使其产生更大数值的励磁涌流, 而此时的励磁电流与无剩磁时的励磁电流的最大区别在于励磁电

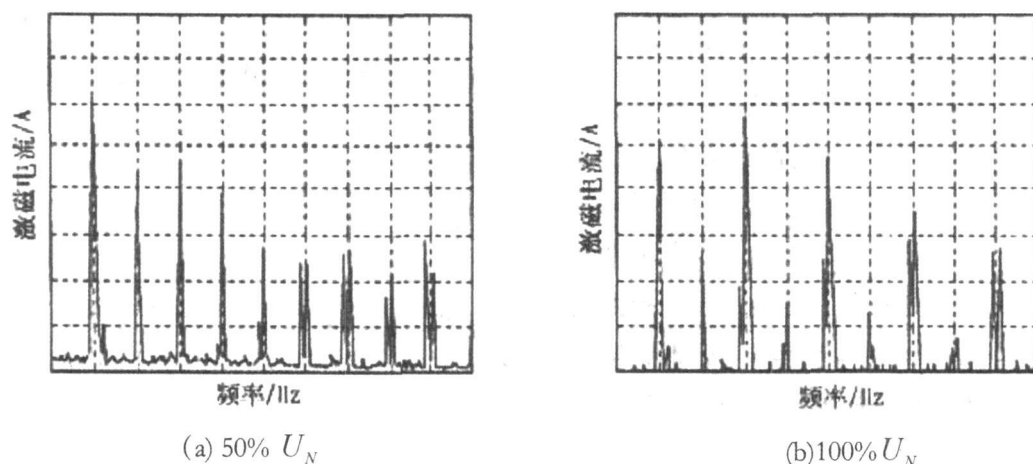


图 1 具有偶次谐波的励磁电流波形

流中存在较明显的偶次谐波励磁电流,励磁电流的偶次谐波是存在剩磁的标志。因此可通过对励磁电流的偶次谐波的测量来判断是否有剩余磁通的存在。偶次谐波包含 2、4、6、8……等次谐波,而其中又以二次谐波含量最为明显。因此下面主要采取了以测量二次谐波为主的谐波测量方法来判断有无剩余磁通的存在^[5]。

3 剩磁检测试验及结果分析

励磁电流的偶次谐波是存在剩磁的标志。在第 2 节中提出了利用检测励磁电流的偶次谐波来判断有无剩磁检测试验方法。对于单相变压器其空载电流就是铁心的励磁电流,并具有与励磁电流完全相同的特点。

本试验选取了一台单相变压器,对其先加直流电流进行一段时间的充磁,然后对其做空载试验。用具有 FFT 分解功能的示波器对其空载电流进行傅立叶分解和波形记录,得出包含偶次谐波在内的各次谐波含量的分布图,从而判断是否有剩磁的存在。同时本实验还使用了 TH-S 型螺线管磁场测试组合仪来测量磁感应强度 B 的大小,磁感应强度 B 的大小可反映剩磁量的大小,从中可判断剩磁量的大小对偶次谐波含量是否有影响。

3.1 试验电路图

如图 2 所示当开关 K 接通 K^2 时,直流电流源就对单相变压器进行充磁。待充磁完成后,可通过磁场测试组合仪测试单相变压器的磁场大小。然后将开关打到 K^1 处,就接通了自耦变压器,试验变压器被

通以交流电,此时将示波器调整到触发方式下,这样就可记录在合闸初始时刻的电流波形或者其 FFT 分解图。试验变压器采用了长科院试验工厂生产的变压器,电压等级 220 V/10 V/5 V,变压器容量 500 VA。

3.2 试验结果及分析

3.2.1 25% 时试验结果及分析

将自耦变压器的输出电压调整到 55 V,即 25% U_N ,并使示波器工作在触发方式下,得到的合闸初始时刻的励磁电流波形的 FFT 分解图如图 3 所示。

由图 3 可看出,当变压器中存在剩磁时,即使剩磁很小,其励磁电流中也含有大量的谐波。除包含奇次谐波外,还含有大量的偶次谐波,且偶次谐波中以二次谐波的含量最为明显。偶次谐波的含量还与合闸初相角有关系,不同的合闸初相角对偶次谐波的含量有很大影响。

待交流电试验完成后,将电源断开,用磁场测试仪的探头测量变压器的磁感应强度,此时霍尔电压几乎为 0,说明此时已基本没有剩磁的存在。再将变压器通以 25% U_N 测得此时励磁电流初时刻波形 FFT 分解图如图 4 所示。

由图 4 可知当没有剩磁存在时励磁电流的 FFT 分解中已基本没有偶次谐波的存在,此时主要含有以三次谐波为主的奇次谐波。

3.2.2 50% U_N 、额定电压时试验结果及分析

将自耦变压器的输出电压分别调整到 110 V 和 220 V,即 50% U_N 和 U_N ,并使示波器工作在触发方式下,得到的合闸初时刻励磁电流波形的 FFT 分解图如图 5。

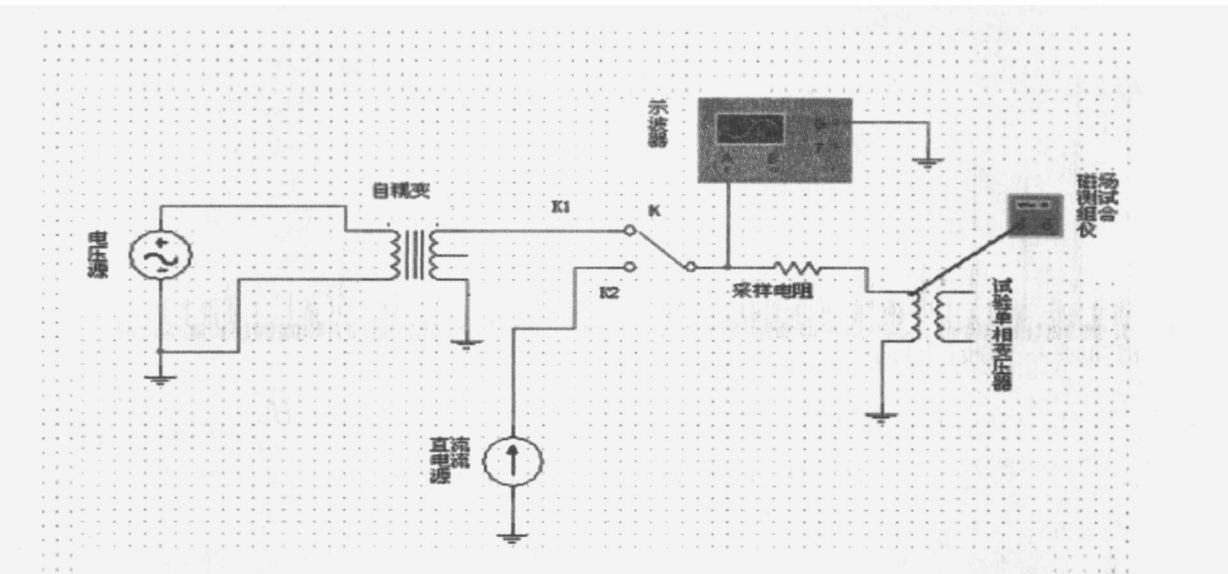


图 2 剩磁检测试验电路图

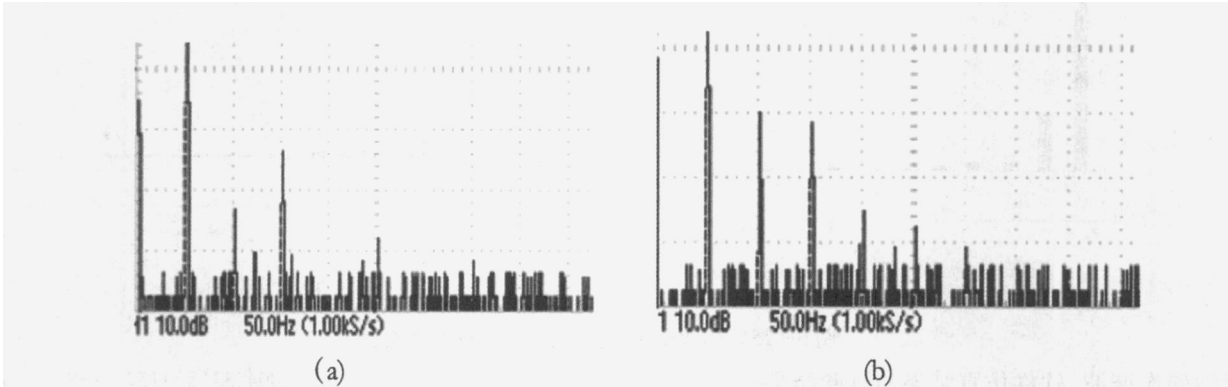


图 3 25% U_N 时不同合闸初相角情况下励磁电流初时刻波形 FFT 分解

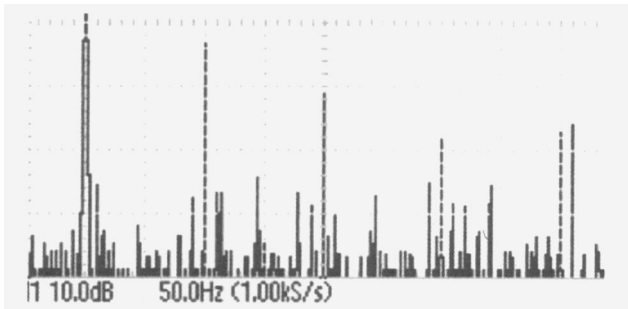


图 4 25% U_N 时励磁电流初时刻波形 FFT 分解 (无剩磁时)

3.2.3 小 结

由试验结果可知当变压器中存在剩磁时,即使剩磁很小,其励磁电流中也含有大量的谐波。除包含奇次谐波外,还含有大量的偶次谐波。且偶次谐波中以二次谐波的含量最为明显。偶次谐波的含量还与合闸初相角 α 有关系,不同的合闸初相角对偶次谐波的含量有很大影响。

不同的合闸初相角 α 不仅对二次谐波含量有显著影响,而且对励磁电流幅值、间断角也有很大影响。

经理论分析表明: $\alpha=0^\circ$ 时合闸单相变压器的正向励磁涌流最大;当 $\alpha=180^\circ$ 时合闸,其反向励磁涌流最大;当 $\alpha=90^\circ$ 时合闸,其励磁电流为周期性对称电流,直接进入稳态^[6]。

当没有剩磁存在时励磁电流的 FFT 分解中已基本没有偶次谐波的存在,此时主要含有以三次谐波为主的奇次谐波。

4 EMTTP 仿真

在 EMTTP 软件中建立适当的单相变压器模型^[7],设置合闸初相角为 0° ,测得无剩磁和有剩磁两种情况下不同电压等级下的励磁电流初时刻波形 FFT 分解图。剩磁大小设定为 0.7 倍饱和磁通。现将几张典型仿真图列举如图 6。

由图 6(a)、(b)可看出当有剩磁时,励磁电流中无偶次谐波存在,有剩磁时励磁电流中出现了较明

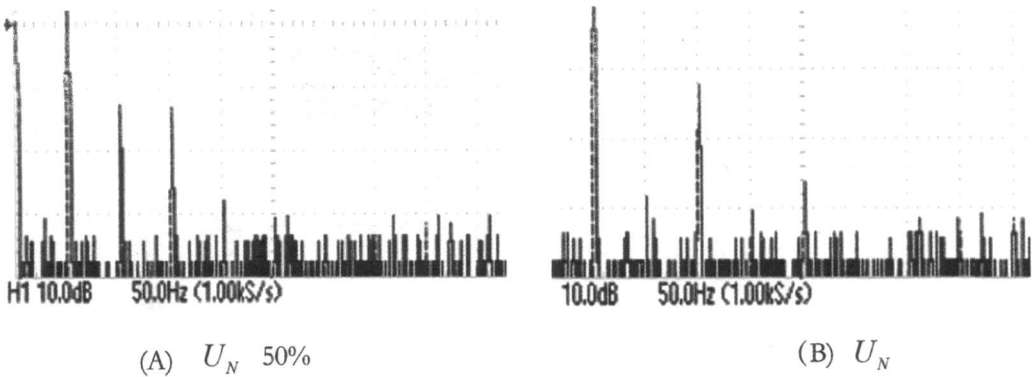


图 5 50% U_N 时励磁电流初时刻波形 FFT 分解

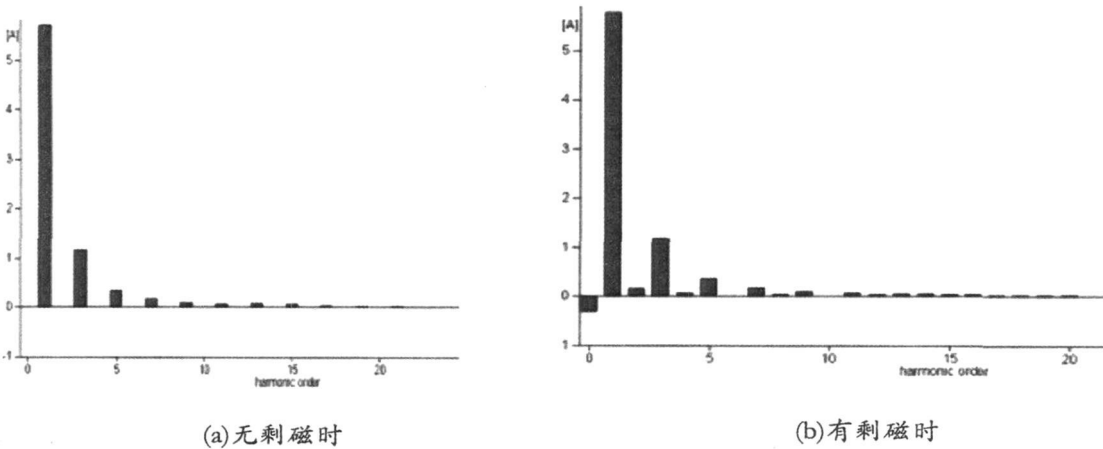


图 6 25% U_N 时励磁电流初时刻波形 FFT 分解

显的偶次谐波,软件仿真结果与试验结果一致。

5 结 语

通过分析研究提出了通过检测变压器励磁电流中有无偶次谐波的剩磁检测方法。从 EMTP 软件仿真和现场试验都验证了该方法的可行性。在试验时,即使变压器剩磁很小,其励磁电流中也含有大量的谐波,这时奇次谐波偶次谐波同时存在,偶次谐波中以二次谐波的含量最为明显。试验时还发现偶次谐波的含量还与合闸初相角 α 有关系,不同的合闸初相角对偶次谐波的含量有很大影响。合闸初相角 α 不仅对二次谐波含量有显著影响,而且对励磁电流幅值、间断角也有很大影响。

参考文献

[1] 李丹青,李汉青.浅析变压器谐波的产生、危害及抑制

[J]. 机电工程技术, 2004, 33(8): 157—158
[2] 梁仕斌,文华,曹敏等.铁心剩磁对电流互感器性能的影响[J].继电器, 2007, 35(22): 27—32.
[3] 辜承林,陈乔夫,熊永前.电机学[M].武汉:华中科技大学出版社, 2005.
[4] 李明武,梁冠安.变压器有载合闸过程中故障分闸后铁心剩磁分析[J].高压电器, 2003, 39(5): 26—28
[5] 万达. 500 kV 变压器的剩磁和局部放电试验[J].江苏电力技术. 2000, 33(1): 14—17.
[6] 符杨,蓝之达,陈珩.计及铁心动态磁化特性的三相变压器励磁涌流的仿真研究[J].变压器, 1997, 34(9): 6—11.
[7] 万凯,刘会金.计及剩磁效应的变压器模型[J].变压器, 2002, 39(5): 10—13

作者简介:

陈文臣 (1986—),男,四川德阳人,武汉大学电气工程学院 2008 级硕士研究生,主要研究方向为高电压与绝缘技术。

(收稿日期: 2009—10—10)

B25 MW 汽轮机振动处理

张亚平

(四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610072)

摘 要: 机组在整套启动时, 首次启动发现汽轮机汽轮机轴振较大, 5 500 r/min 时, 2 号轴承大轴振动 2Y 约 140~150 μm , 然后, 进行振动分析和处理, 机组轴系振动全部达到优良标准。

关键词: B25 MW 汽轮机; 轴系振动; 分析; 处理

Abstract: During the commissioning of the whole unit when it firstly rises up to 5 500 r/min the max shaft vibration takes place that is No 2 bearing vibrates 140~150 μm in y direction. And then the shaft vibration of the unit meets the requirements of the criterion by analyzing and disposing the vibration.

Key words: B25MW steam turbine; shaft vibration; analysis; treatment

中图分类号: TK263.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0049-01

某电厂一期工程, 主机为某汽轮机有限公司生产的 B25-8.83/1.27 型高压、高温、高速、单缸、冲动式背压汽轮机和四川东风电机厂有限公司生产的 QFB₂W-25-2 型空冷发电机。

机组在整套启动时, 首次启动发现汽轮机轴振较大, 5 500 r/min 时, 2 号轴承大轴振动 2Y 约 140~150 μm 。然后先后进行过多次启动, 汽轮机大轴振动仍然较大, 影响机组的运行。

1 机组振动原因查找和分析

为了查找机组振动原因, 在 2 号轴承外侧 Y 方向加装了大轴振动探头, 在 2 号轴承上方加装了轴承标高测量表, 在汽轮机 2 号轴承左右加装了膨胀指示, 在汽轮机 1 号轴承左右和端部加装了膨胀指示。

2006 年 12 月 31 日 9:50 进行机组启动。机组振动情况见表 1。

2 号轴承标高测开机前 110 μm , 5 500 r/min 时

180 μm , 增加 70 μm , 2 号轴承左右膨胀各 30 μm , 1 号轴承左右膨胀各 20 μm , 端部膨胀 74 μm 。可见汽机膨胀均匀。

对 2 号轴承大轴振动 2Y 进行频谱分析, 发现振动信号主要是工频成份, 振动幅值 180 μm , 其他频率振动幅值均在 5 μm 一下。

对升速过程振动分析, 发现 1Y 和 2Y 振动随转速增加而增加, 特别是 5 000~5 500 r/min 更加明显。

由此可见, 引起汽轮机大轴振动的主要原因是转子质量不平衡。

2 振动处理

在分析出引起汽轮机大轴振动的主要原因后, 于 2006 年 12 月 31 日, 对汽轮机进行了高速动平衡, 第一次在汽轮机前后分别加入 60.13 g 和 60.26 g 试加重进行启动, 振动数据见表 2。

表 1 机组各轴承振动记录表

时间	转速	1号上	12号上	3号上	4号上	1号 X	1号 Y	2号 X	2号 Y	2Y 加
10:00	400	0	0	0	0		4		14	32
10:25	2000	1	0.5	6.1	5.6		26		22	20
10:40	3000	1.5	0.9	7	5		32		35	78
11:15	4000	1.2	1.1	8.1	3.0		21		47	63
12:35	5000	3.3	4.1	17	7	18	35	51	79	143
13:08	5500	8	7	55	28	33	77	98	108	200
13:13	5500	12	9	65	34	43	104	122	135	290

(下转第 58 页)

集中控制室的照明采用格栅照明或点光源,即集中控制室主环采用阻燃栅格的光带照明或点光源,控制室灯光采用分级控制方式,以满足 CRT 及大屏幕监视器照度要求。电子设备间及继电器室采用由带栅格的荧光灯组成的发光带。荧光灯配以长寿命、高效率的电子镇流器。

集控室的主环部分照明采用间接照明灯具,建筑的吊顶上留有灯槽,将这种灯安装在灯槽里,灯槽采用铝合金专用型材,反射器采用薄钢板加工,表面喷涂白色高级烤漆或静电喷塑,其灯光经多次反射后再射至工作面,无直射和反射眩光,光线柔和舒适,亮度均匀。该灯具采用荧光灯光源,可采用电子镇流器,同时采用调光控制(由于电子镇流器的寿命相对较

短,因此也可考虑采用节能型电感镇流器)。

2 结 论

自从 1996 年中国启动“中国绿色照明工程”以来,其他行业已率先在各自的项目中进行实施,电力行业也相继在一些项目中开始实施,并得到了各方面的重视。通过以上分析可以说明,绿色照明在火力发电厂中的应用在技术上是可行的,在经济上是有利的,从环保的角度讲更是必要的,他将随着绿色照明电器新工艺、新技术的不断发展,在工程实际中得到更广泛的应用,从而达到高效、节能、环保的目的。

(收稿日期: 2009—07—10)

(上接第 49 页)

表 2 2006 年 12 月 31 日第一次加重后各轴承的振动情况 μm

时间(时:分)	转速	1号上	2号上	1号 Y	2号 Y	2Y 外加探头
19:03	5000	2.0	2.1	48	53	142
19:08	5500	11	4.1	108	72	260

表 3 2007 年 1 月 1 日联轴器上加重后各轴承的振动情况 μm

时间(时:分)	转速	1号上	2号上	3号上	4号上	1号 Y	2号 Y	2Y 加
9:45	400	0	0			5	14	29
9:54	2000	1	0.3			23	24	19
9:56	3000	1	0.4			27	10	62
10:02	4000	0.6	0.4			23	17	53
10:13	5000	0.7	0.3			13	12	50
10:18	5500	2	1	2	1	14	6	44

经过计算发现,试加重量对振动影响很小,于是在将汽轮机前后加重全部取下,在联轴器 129 度位置上加重 21.3 g 加重后,2007 年 1 月 1 日再次启动,振动数据见表 3。

10:45 提高背压,向热网供汽,振动基本没有变化。

由机组振动和计算可知,转子上的不平衡重量已很少,约 2.7 g 故振动处理和高速动平衡到此结束。

3 结 论

1)引起汽轮机振动的原因是联轴器质量不平衡。

2)联轴器质量不平衡通过现场平衡,不平衡重

量已很少。

3)机组轴系振动达到优良水平。

4)由于联轴器对于汽轮机来说是悬臂外伸端,在处理类似结构的振动问题时,在外伸端加重的效果很好,往往起到四两拨千斤的作用。

参考文献

[1] 张游祖,施维新. 汽轮发电机组的振动及转子找平衡[M]. 北京:水利电力出版社,1986.

作者简介:

张亚平(1963—),男,高级工程师,从事汽轮机的技术监督、服务和调试等方面的研究工作。

(收稿日期: 2009—09—10)

攀煤 135 MW 机组余汽技术改造

王金柱, 陈立伟, 彭久兵, 刘彦昭, 黄胜富

(攀枝花攀能化股份有限公司研石发电厂, 四川 攀枝花 617065)

摘 要:攀煤公司 $2 \times 12 \text{ MW} + 1 \times 6 \text{ MW}$ 小型发电机组面临关停, 根据当地电网实际全面分析攀煤矿井安全, 积极争取政策关停锅炉, 利用新建 135 MW 机组富余蒸汽经减温减压后供小机组发电, 首创并成功运用流量大且调节蒸汽参数范围宽的减温减压装置, 有推广应用价值, 确保矿井安全, 社会效益和经济效益显著。

关键词:余汽发电; 技改; 煤矿; 用电安全

Abstract: The small generating units ($2 \times 12 \text{ MW} + 1 \times 6 \text{ MW}$) of Panzhihua Coal Company are faced with shutting down so according to the actual situation of the local power grid the company is positively striving for shutting down the boiler with policies. The mine safety of the company is comprehensively analyzed meanwhile the surplus steam of newly-built 135 MW units is used by reducing the temperature and pressure for small units to generate the electrical energy. The first and successful application of desuperheating and decompression device with large flow and wide range of adjustable steam parameters is worthy of popularization which can ensure the security of mine and bring significant social and economic benefits.

Key words: power generation with surplus steam; technical transformation; coal mine; safety of electrical energy utilization

中图分类号: TM616 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0050-05

1 背 景

1.1 机组概况

攀煤研石发电厂隶属于川煤集团攀煤公司, 辖有发电总装机 300 MW。其中 30 MW ($2 \times 12 \text{ MW} + 1 \times 6 \text{ MW}$) 机组 1992 年投产, 属攀煤公司自备电厂, 以 35 kV 电压直供攀煤矿井; 新建 $2 \times 135 \text{ MW}$ 循环流化床机组相继于 2006 年 7 月和 2007 年 1 月投产, 纳入四川省统调统分, 以 220 kV 电压等级接入攀枝花东部的钒钛工业园区, 燃烧煤研石、劣质煤, 认定为资源综合利用机组。

30 MW 机组配套的锅炉为四川锅炉厂 20 世纪 80 年代生产的 35 t/h 双汽包自然循环鼓泡床, 为当时燃烧低热值煤种的代表炉型, 并在各煤矿坑口自备电厂得到广泛推广。因其汽轮发电机组容量小、启动调节灵活等优点, 1992 年来一直为攀煤矿井安全和攀枝花西部电网稳定承担着重要任务。随着技术进步和新型锅炉的出现, 经国家第三批“双高一优”项目批准建设 $2 \times 135 \text{ MW}$ 循环流化床机组, 配套 440 t/h CFB(循环流化床锅炉) 炉型, 替代热耗高、效率低的鼓泡床锅炉。建成后纳入四川省统调统分, 两年来受四川电网水电装机容量大的影响, 丰水期单机运

行, 上网负荷常在 80 MW 左右, 甚至机组全停; 枯水期双机运行, 上网负荷在 160~240 MW, 负荷率低, 满负荷运行时间极少, 富余蒸汽空间较大。

1.2 电力市场状况

2008 年 1—10 月, 全国发电设备累计平均利用小时为 3 981 h, 比去年同期降低 200 h。其中, 水电设备平均利用小时为 3 110 h, 比去年同期增长 22 h; 火电设备平均利用小时为 4 171 h, 比去年同期降低 225 h。四川火电设备平均利用小时低于全国平均水平。从各区域的用电量增长情况来看, 四川的用电量同比增长也未超过全国平均水平。

四川电网统调电厂 186 个, 装机容量为 27 450.7 MW, 其中: 水电厂 143 个, 装机容量为 16 104.1 MW, 占 59%; 火电厂 43 个, 装机容量为 11 316.7 MW, 占 41%; 水电最大单机容量为 550 MW, 火电最大单机容量为 600 MW。按照国家节能发电调度办法(试行)的通知, 发电排序是风能—水能—核能—能耗低的 300~1 000 MW 机组—利用研石发电的综合利用电厂—其他燃煤锅炉。尤其是攀枝花地区, 水力资源丰富, 除在建的观音岩水电站装机达 3 000 MW, 银江等大型梯级水电站有序进行外。现有火电装机容量为 1 000 MW 左右, 大型水电装机为二滩电站 3 300 MW, 小水电 300 多台, 总容量超过 100 MW。而本地

区最高用电负荷在 1 100 MW 左右,平均负荷在 800 MW 左右,从二滩下网最高 600 MW 作为本地区使用。所以攀煤厂长期处于单机或双机半负荷运行状态,但 135 MW CFB 锅炉的燃烧特性决定了在低负荷下运行无经济性可言,煤矸石利用率低,同时还使利用价值非常大的灰渣因含碳量高而无法使用,严重制约灰渣综合利用。

1.3 小机组关停威胁攀煤矿井安全

1.3.1 电力工业结构调整关停小火电机组

为实现“十一五”规划纲要提出的单位国内生产总值能源消耗降低和主要污染物排放总量减少目标,推进电力工业结构调整,根据《国务院批转发展改革委、能源办关于加快关停小火电机组若干意见的通知》(国发〔2007〕2号),加快关停小火电机组,攀煤 2×12 MW+1×6 MW 机组面临关停。

1.3.2 攀枝花西部电网状况

攀枝花电网现有统调机组总装机为 925 MW (不含二滩 3 300 MW),由统调机组及地方小水、火电共同承担供电,地方小水、火电总装机容量很小,且小水电均为径流式电站,枯期基本没有发电能力。

攀枝花是一个沿江而建的狭长山城,几个主网火电厂(河门口电厂 2×135 MW,攀煤电厂 2×135 MW,攀钢电厂 3×100 MW+1×55 MW)均在攀枝花电网的西部,而主要用户集中在电网的中部和东部,大量负荷均以 110 kV 和 220 kV 从西部向东部输送,攀枝花 50% 以上的电力需要依靠两回 500 kV 联络线送入东部,而西部只有 110 kV 格里坪和河石坝变电站向攀煤、西区工业园区和城网等企业供电,变电容量共为 4×40 MVA,到 2008 年底,格里坪变电站负荷将达到 62.5 MW,不能满足 N-1 原则,在主变压器检修期间,格里坪片区需要控制 22.5 MW 以上负荷,河石坝变电站不具备扩建 35 kV 间隔的能力。同时根据攀枝花市的产业布局,将利用西区的土地优势,开发工业园区发展循环经济,而该地区电网供电能力较弱,无法为经济规模增长提供强大的电力支撑。

1.3.3 攀煤矿区电网改造难度极大

攀煤公司现有 35 kV 变电站 6 座,主变压器 12 台,总变电容量为 72.9 MV·A。主要由攀枝花西部 4 条 35 kV 线路与矿井联系,导线型号 LGJ-120,主要线路在矿区穿越,采空区多,新建线路通道选择困难,投资大,改造周期长。

1.4 争取政策保障攀煤矿井安全势在必行

攀煤公司认真全面分析矿井安全威胁因素,结合 135 MW 机组的负荷率及富余蒸汽空间,为确保矿井安全,积极争取政策。最终以川经电力〔2007〕406 号通知关停 5 台锅炉,30 MW 发电机组作矿区保安电源;以攀经电〔2008〕264 号文同意 30 MW 机组经蒸汽管道改造后,利用 2×135 机组富余蒸汽发电,继续作为攀煤公司保安电源发电运行。

2 可行性设计选型

2.1 设计总思路

将新建 2×135 MW 机组 535℃,13.24 MPa 的超高压富余新蒸汽,经过两台减温减压装置(减温水来自新机组高压给水),变为 435℃,3.5 MPa 的中温中压参数约 160 t/h 的蒸汽,沿厂区管架接至老机组主蒸汽母管,供给 3 台汽轮机组发电,作功后的乏汽经凝汽器凝结成水后,再从老机组凝结水系统沿管架返回至两台新机组的凝汽器。仅保留 3 台老厂汽轮机本体系统和必要的辅助系统(原有锅炉、除氧器、给水泵、加热器均不投运)。对汽源的监控接入新机组 DCS 控制。

2.2 设计标准及工艺要求

技改依据与引用标准:DLGJ 9《火力发电厂初步设计文件内容深度规定》、DL 5000《火力发电厂设计技术规程》、DL/T 5054《火力发电厂汽水管道设计技术规程》、DL/T 5072《火力发电厂保温油漆设计规程》等。

工艺要求:管道的设计选型合理,布置满足运行中的膨胀要求,出口参数满足老机组的使用要求,回水不得影响新机组的正常运行。

2.3 减温减压装置的选用

考虑到老机组老化程度,并参考目前实际运行参数,老机组主蒸汽系统容量富余系数暂按 20% 考虑,因此新增减温减压器设计总容量暂定为 $100 \times 2 = 200$ t/h。每台减温减压装置选型主要参数:

进汽压力 $P_1 = 13.7$ MPa 进汽温度 $t_1 = 540$ ℃,进汽流量 $Q_1 = 95.6$ t/h

出口压力 $P_2 = 3.9$ MPa 出口温度 $t_2 = 450$ ℃,出口流量 $Q_2 = 100$ t/h

减温水(从高压给水来)压力 = 17.88 MPa(a),温度 = 160℃,流量 = 4.4 t/h

压力调节门和温度调节门的电动装置为实现智

能化选用 SIPOS 系列的产品,为后一步的人工智能调节创造有利条件。

2.4 厂区管架及疏水系统设计

2.4.1 厂区管架路线选择

135 MW 机组与 30 MW 机组厂房直线距离约 270 m,分别位于海拔 1 079 平台和 1 105 平台,厂区蒸汽管道和凝结水回水管道采用管架布置,有以下两种方案供选择。

方案一:利用厂区内现有的老机组至新机组的启动蒸汽管道管架。

拟用现有管架,调整布置新增蒸汽管道 ($\Phi 325 \times 13$) 和凝结水回水管 ($\Phi 159 \times 4.5$),经核算其荷载对原有管架承载力,不能满足新增管道的受力要求。

方案二:直线布置管架。

优点:管架路线短捷,管道内蒸汽流动更加顺畅,流动阻力损失减少,并且管道总长减少约 100 m。投资节省,建设施工受原有设施影响小。

综合上述两种方案,优先选取方案二设计管架实施。

2.4.2 厂区疏水系统设置

为了满足本技改管道使用过程中的需要,在新厂房内设有疏水点五处,分别位于两台减温减压装置前后和联络管上。厂区管道设有疏水点三处,均位于管道布置的低点。

2.5 管道选择

2.5.1 蒸汽管道选择

单台 135 MW 机组引出 80~100 t/h 蒸汽,根据其选取流速 60~90 m/s 蒸汽比容 0.025 610 888 m^3/kg 管道内径计算公式 $d_n = 18.81 \times (Q/w)^{1/2}$ (式中 Q 为管道的容积流量, m^3/h ; W 为管道内蒸汽流速, m/s)。计算得出新蒸汽的引出管道选取 $\text{D}133 \times 14$ mm 的 12Cr1MoV 管道,分别经过减温减压装置后由于参数发生了变化,即蒸汽比容、流量、压力等发生了变化尤其是蒸汽比容明显增大,根据上述公式求得其选用管道为 $\text{D}273 \times 11$ mm 的 20 G 管道。两台 2×135 MW 机组的蒸汽经合并之后流量增大,经计算选用 $\text{D}325 \times 13$ mm 的 20 G 管道。

2.5.2 减温水、凝结水管道选择

减温水采用锅炉给水,参数为 17.88 MPa(a),温度 160℃。要将进汽压力 $P_1 = 13.7$ MPa 进汽温度 $t = 540^\circ\text{C}$ 的 95.6 t/h 蒸汽减为出口压力 $P_2 = 3.9$ MPa 出口温度 $t = 450^\circ\text{C}$ 的蒸汽,根据热平衡计算需要减温水量 4.4 t/h 参照锅炉给水的选取流速计算,

减温水管道选用 $\text{D}32 \times 4$ mm 的 20 G 管道。同理凝结水管道选用 $\text{D}159 \times 4.5$ mm 的 20 无缝钢管道。

2.6 保温材料的选择

为了避免减温减压后的蒸汽经远距离输送后压力、温度下降过多,经使用温度、导热系数等计算,并根据《火力发电厂保温油漆设计规程》要求,新蒸汽管道采用硅酸铝制品,凝结水管道采用普通棉沾制品,为防止露天雨水影响,另加 0.7 mm 铝合金保护层。

3 综合评价

3.1 能耗及热效率经济性分析

3.1.1 余汽发电与技改前老机组运行比较

按照南京汽轮机厂提供热平衡数据,12 MW 汽轮发电机机组设计热耗为 13 077 kJ/kW·h 运行 15 年后为 17 142 kJ/kW·h 相应热效率 η_e 为 $= 3\,600 / 17\,142 \times 100\% = 21\%$,老锅炉效率 η_b 、管道效率 η_p 分别取 72%、97%,得出老机组发电标煤耗 $q = 0.123 / (\eta_e \eta_b \eta_p) = 838$ g/kW·h

按照老机组所耗 160 t/h 中压蒸汽,新机组发电标煤耗以 400 g/kW·h 计算,每小时节约标煤 $(838 - 400) \text{g/kW} \cdot \text{h} \times 30 \times 103 \text{kW} \cdot \text{h} \times 10^{-6} = 13.14$ t 如果按照老机组年运行 5 000 h 标煤 380 元/t 计算,每年可节约 2 496.6 万元。

3.1.2 余汽发电的能耗损失计算

由新机组供汽发电,因存在减温减压损失、管道沿程阻力损失等,同样的 160 t/h 蒸汽,在新机组可以发电 48 MW/h 而老机组仅发电 30 MW/h 造成 18 MW/h 的发电损失。由此而损失标煤约 7.2 t/h 按 380 元/t 的标煤及年运行 5 000 h 计算每年损失 1 368 万元。

3.1.3 减温减压器损失引起的电耗损失

发电负荷每小时损失 18 MW,由此计算新机组锅炉产生对应的蒸汽量需要增加的厂用电耗和 30 MW 机组发电的厂用电耗。根据新机组锅炉的运行分析和 30 MW 机组厂用设备,计算厂用电量约增加 1 800 kW/h 按 5 000 h 计算年增耗电量 9 GW·h 按估算成本电价 0.28 元/kW·h 计算年损失约 252 万元。

3.2 环保效益分析

老锅炉关停,据热经济计算每小时节约了 13.14 t 标煤。暂按照 135 MW 机组的排放量计算,每吨原煤每小时 SO_2 和粉尘的排放量分别为 5.017 kg 和

0.648 kg 所以每年可以至少减排 SO_2 共 141.5 t 粉尘共 18.27 t 环保效益也是明显的。

3.3 人员划转充斥外聘人员带来的效益

技改后老机组锅炉关停、燃运设备停运、制水设备等停运,将减少员工 60 人,划转到其他岗位或充斥到外聘人员的岗位上,每年节约支出外聘人员工资和加班费约 120 万元。

3.4 电量电费分析

30 MW 机组在攀枝花西部电网承担着攀煤矿井安全和电网稳定性的重要任务,每年按运行 5 000 h 计算发电 150 $\text{GW}\cdot\text{h}$ 如果从电网购电的平均电价按 0.73 元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ 计算,存本电价按 0.33 元计算(考虑老机组维修及其他费用),攀煤公司每年将节约电费 6 000 万元。

3.5 结 论

3.5.1 社会效益和经济效益显著

在目前攀枝花西部电网供电能力不足,且攀煤内部电网改造难度大的背景下,关闭老机组锅炉,充分利用新机组富余蒸汽供老机组发电,不仅可以继续保证攀煤矿井安全和攀枝花西部电网的稳定,也符合国家节能减排政策,同时提高了新机组设备效率和利用率,加大了煤矸石的利用量,解决了 45 名职工的就业问题等,具有良好的社会效益。在经济性方面每年可实现 6 996.6 万元的利润,经济效益明显。

3.5.2 存在的问题

由于 30 MW 机组是利用 135 MW 机组余汽发电,若 30 MW 机组满发,将使两台 135 MW 机组上网负荷由 240 MW 降为 192 MW,单台 135 MW 机组上网负荷由 120 MW 降为 72 MW。若 135 MW 机组满发,30 MW 机组被迫停机,保安电源中断,威胁攀煤矿井安全。因此,在 5 台发电机组运行方式和负荷分配上,需要电力调度支持,密切配合共同维护电网稳定。

4 同类先进技术概况及技术创新点

4.1 主要技术点

(1)主蒸汽参数跨越 2 个压力等级,从高温高压直接到中温中压,减温减压装置的运行可靠性必须保证;(2)送汽管道超长(约 300 m),热膨胀、压力损失等计算复杂;(3)主蒸汽参数稳定性(尤其变负荷情况下)控制难度大;(4)老机组回水对 135 MW 机组的真空及负荷的影响难以测算,为最大限度的消除其

影响,专门为其设计与选用了东方汽轮机厂专利产品——凝结水消能装置;(5)管道敷设,经过方案优化,厂区管架投资少,并利用了 $2\times 135\text{ MW}$ 现有的启动蒸汽管道作为回水管道;(6)将新机组的余汽经减温减压后代替老锅炉提供蒸汽,真正实现清洁、环保发电,同时保证了攀煤矿井安全和攀枝花西部电网的稳定。

4.2 主要技术创新内容

(1)将 535°C , 13.24 MPa 的超高压蒸汽经过减温减压装置后成为满足老机组要求品质的中温中压蒸汽。

(2)本类型减温减压装置为国内为数不多的将超高压参数蒸汽经压力调节门和温度调节门后成为老机组使用的合格品质蒸汽的典型范例。特别是经过两级减温减压达到要求品质和参数的蒸汽更是史无前例。

(3)本技改仅保留 3 台老机组汽机本体系统和必要的辅助系统(凝结水系统和循环冷却系统),利用新机组 $2\times 135\text{ MW}$ CFB 锅炉的富余新蒸汽经减温减压后引至老机组发电,凝结水再返回新机组凝汽器回收。原有锅炉、电除尘、除氧器、给水泵、加热器均不投运。

(4)因新机组使用的是除盐水,而老机组使用的软化水,机组老化,运行真空低、凝结水温度高、含氧量高等,为实现有效回收凝结水,避免影响新机组真空及凝结水质,经反复论证决定在系统内各增加一台东方汽轮机厂生产的专利产品——消能装置,一是对老机组凝结水进行有效消能、缓解对新机组凝汽器的冲击,二是对其充分雾化后,防止影响新机组凝汽器运行参数;三是对其进行真空除氧,避免新机组设备产生氧腐蚀。

(5)蒸汽管道和凝结水管道均根据新老机组参数进行详细计算后合理选用。

4.3 同类技术全面综合对比情况

(1)本技改实现了老机组锅炉的逐台关停而保证了新老机组的运行稳定。(2)在(集团)公司内外均为首次尝试并取得了一次性成功,在同类技术、设计、设备选型等全面综合对比情况处于国内领先水平。(3)经过本系统的全面投用,打破了普遍认为的高能级蒸汽不能直接在低能级设备使用的常规。

5 应用和推广

本技改在攀煤厂投入使用后,整个系统运行稳

定,管道膨胀均匀,无振动,参数调整符合新老机组使用要求,实现了温度、压力的智能化自动调节,随时满足新老机组用汽要求,达到了预期目标,因此,可在需要不同品质、大流量蒸汽参数的企业中推广使用。

参考文献

[1] 李青,张兴营,徐光照.火力发电厂生产指标管理手册

[M].北京:中国电力出版社,2007.

[2] DL/T 5054—1996,火力发电厂汽管道设计技术规定 [S].

[3] 张燕侠.热力发电厂 [M].北京:中国电力出版社,2006.
(收稿日期:2009—02—23)

(上接第 44 页)

特性,将短路点的位置量作为继电器动作判据,较符合实际电缆运行状况。

4 仿真计算实例

对于某 110 kV 中长电缆线路,系统简化图如图 3 所示(MN 为电缆线路),系统参数如下。

$$Z_{1S} = (1.063 + j10.6) \Omega$$

$$Z_S = (1.216 + j11.4) \Omega$$

电缆线路采用 YJLW03 110/1×400 型 XLPE 长度为 20 km;电缆电气参数为 $R_1 = 0.0543 \Omega/\text{km}$, $X_1 = 0.211 \Omega/\text{km}$, $C_1 = 0.159 \mu\text{F}/\text{km}$;零序阻抗待定。相邻导线为架空线,选用型号为 LGJ—120 导线,线路电气参数为 $R_1 = 0.27 \Omega/\text{km}$, $X_1 = 0.412 \Omega/\text{km}$, $C_1 = 0.0088 \mu\text{F}/\text{km}$ 。变压器为 SF—20 000/110 型, $P_k = 163 \text{ kW}$, $U_k\% = 10.5$, $P_0 = 60 \text{ kW}$, $I_0\% = 3\%$ 。

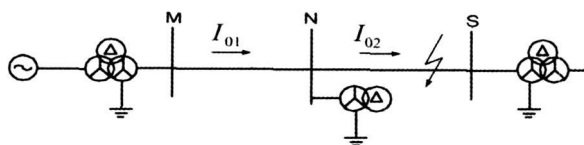


图 3 某 110 kV 系统网络接线图

零序 I 段按照上面提供的自适应计算步骤先离线确定电缆线路零序阻抗,在线路发生接地短路的情况下,根据短路类型在线、动态地确定零序 I 段的动作电流。在上述参数下,一般经过 5、6 次迭代运算,运算精度满足要求;计算经过表明单相接地故障时本方案零序 II 段灵敏度系数为 3.11,较传统方法提高 25%;两相接地短路时零序 II 段灵敏度系数 2.34,较传统方法提高 26%。

5 总结

综上所述,电力电缆零序阻抗具有非线性,随着

电缆线路所处系统的运行方式的改变、故障类型的改变,零序阻抗也会改变。

所提出的基于迭代算法的电缆线路的零序电流保护,充分考虑了电缆零序阻抗的特性,采用拟合曲线确定零序电流与短路点的关系。其整定值可以适应系统运行方式的改变;当系统运行方式改变时,保护针对该方式的仿真模型,进行迭代计算,从而可以精确确定该方式下的电缆零序阻抗及其整定值;虽然电缆线路零序阻抗不是常数,随着所处系统零序电流的大小而改变,因采用自适应插值的整定方法,保护的 范围一直是最大的。本保护方案存在的问题是没有考虑过渡电阻对于保护的影响,当短路点存在过渡电阻时,一旦确定系统当前的运行方式,保护的 保护范围会受到一定的影响,此时,零序电流会变小, I 段保护范围将会缩小,零序 II 段的灵敏度将有所下降。

参考文献

[1] 丁蕾,范春菊.高压地下电缆自适应继电保护方案的研究 [J].继电器,2004,32(22):43—47.

[2] ZIPP J CONROY M. Protective relaying Considerations for Transmission Lines with High Voltage AC Cables IEEE Trans on Power Deliver, 1997, 12 (1): 83—96.

作者简介:

江少成 (1979—),男,浙江龙游人,工程师,从事电力系统调度工作。

岳亚丽 (1980—),女,河南人,助理工程师,从事电力系统继电保护工作。

潘震宇 (1972—),男,浙江温州人,助理工程师,从事电力系统运行工作。

黄万骏 (1972—),男,浙江温州人,助理工程师,从事电力系统调度工作。

陈 雷 (1982—),男,浙江温州人,助理工程师,从事电力系统调度工作。

(收稿日期:2009—09—17)

浅析绿色照明在发电厂中的应用

胡 蓉

(四川电力设计咨询有限公司, 四川 成都 610016)

摘 要:随着科学技术的发展,人类物质文明和精神文明得到不断提高,推行 "绿色照明工程"可节约大量电能,减少能源消耗,保护地球生态环境、提高照明质量、提高舒适性和健康性。根据发电厂的运行特点,从节能、提高照明质量等方面进行优化设计,在发电厂实施 "绿色照明工程"。

关键词:绿色照明; 高效; 节能; 环保

Abstract: With the development of science and technology, human material and mental civilization are progressing continuously. The promotion of green lighting engineering can save a large amount of electric energy, reduce energy consumption, protect ecological environment and improve lighting quality as well as the comfort and health. Based on the operation characteristics of power plant in terms of saving energy and improving lighting quality etc., the design has been optimized so that the green lighting engineering can be carried out in power plant.

Key words: green lighting; high effect; energy saving; environmental protection

中图分类号: TM923 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)06—0055—04

"绿色照明"是 20 世纪 90 年代初国际上对采用节约电能、保护环境照明系统的形象性说法。美国、英国、法国、日本等主要发达国家和部分发展中国家先后制订了"绿色照明工程"计划,取得了明显效果。照明的质量和水平已成为衡量社会现代化程度的一个重要标志,成为人类社会可持续发展的一项重要措施,受到联合国等国际组织机构的关注。

绿色照明是指通过科学的照明设计,采用效率高、寿命长、安全和性能稳定的照明电器产品(包括电光源、灯用电器附件、灯具、配线器材,以及调光控制器和控光器件),改善提高人们工作、学习、生活的条件和质量,从而创造一个高效、舒适、安全、经济、有益的环境并充分体现现代文明的照明。

目前在火力发电厂照明设计中,依然沿用着一般工矿照明的设计思路,只是考虑满足基本的照明功能需要,距绿色照明的要求还有一段距离。绿色照明不仅仅是节能灯具简单的代换,而是一门集产品制造、系统设计、安装工艺的系统工程,合理的设计为日后的运行打下坚实的基础。如果在发电厂工程设计中能够大量采用绿色照明和照明节能技术,对于提高生产人员的工作效率,改善工作环境,同时降低厂用电率,提高经济效益都有巨大的意义。

1 绿色照明在电厂设计中的具体应用

根据绿色照明的定义,在发电厂工程照明设计中应重点考虑以下几个方面:节能、提高照明质量及照明方案优化。

1.1 节能措施在电厂照明设计中的体现

1.1.1 采用高效率的照明灯具

绿色照明要求在满足眩光限制和配光要求的条件下,应选用高效优质照明灯具,并应符合表 1、表 2 规定。

表 1 荧光灯灯具的效率

灯具光 输出口形式	敞开放式	带保护罩(玻璃或塑料)		
		透明或带齿型	磨砂、棱镜	格栅
灯具效率	75%	65%	55%	60%

表 2 高强度气体放电灯灯具的效率

灯具光输出口形式	敞开放式	带格栅或透光罩
灯具效率	75%	55%

对于没有防护要求的较清洁的场所,应首先选用开启型灯具;对于有防护要求的场所应尽量采用透光性能好的透光材料和反射率高的反射材料,以保证有较高的效率。同时,还应使所选灯具的配光曲线与被照环境相适应,使被照面的照度均匀,避免照度过于集中或分散。为了使光通量的利用率高,在厂房和车

间应首先选用直接型和半直接型灯具。

工程中灯具选择方案如下。

在汽机房零米层推荐选用块板型高效率灯,配金属卤化物灯光源,该灯具反射器采用双块板结构,灯具效率达 70%~90%左右,且光源还有光通量大,寿命长(可达 10 000~20 000 h),显色指数为 60~65,对颜色的还原性较好,人体感觉舒适度强等特点。该灯具吸壁安装在柱上或管吊在楼板下。

在汽机房运转层选择推荐选用混光灯,配金属卤化物灯和高压钠灯,该灯具反射器为铝合金光滑面结构,灯具效率达 70%~80%左右,混光效果好。该灯具吸顶安装在汽机房屋架上。

在锅炉房、输煤系统、煤仓层、灰库等要求防水、防尘、防腐等有防护要求的场所,采用三防灯。该灯散光罩采用聚碳酸脂材料制成,具有强度高、抗冲击的特点,罩体纵向有可防直射眩光的棱镜条,采用对称的双曲面反射器,灯具效率达 70%左右、配光合理,防护等级为 IP65,配用光源为紧凑型 3U 荧光灯。该灯具可吸顶、可管吊、可吸壁、可立管安装。

辅助车间的照明灯具选择块板灯。

生产办公和生活类的辅助建筑的照明灯具选择,在有吊顶的地方采用镜面铝高效节能灯具,反射器采用抛物状进口镜面铝反射器,格栅为进口防眩铝格栅,该灯具效率达 70%左右,格栅保护角按 30°设计,该灯具可嵌入安装,也可吸顶安装。无吊顶的地方采用银灰色铝合金型材灯具。采用细管径直管荧光灯,比传统荧光灯提高光效 20%,提高寿命 30%,寿命可达 6 年以上。

控制室采用可调节间接照明灯具,避免盘柜表面反光,减少眩光,以减轻操作人员的视觉疲劳,既提高了照明质量,又体现了以人为本的人性化要求。

辅助建筑物采用嵌入荧光灯或筒灯代替以往工程中采用的漫反射的吸顶灯,光源用荧光灯或紧凑型荧光灯代替白炽灯。

道路及户外大面积照明,灯具采用铝压铸壳体,配置光曲线较好的道路灯具和投光灯具,使用寿命长,降低维护费用。光源采用高压钠灯,寿命可达

20 000 多小时,光通量大,节能效果显著,光穿透力强,就是在雨天、雾天时照明效果远好于其它光源,是目前室外照明最理想的光源,再配以光控时控一体化的照明箱,更可节约大量电能。

1.1.2 采用高效率、长寿命的电光源

照明电器的电光源应采用高效率、长寿命的光源,如细管径直管型荧光灯、紧凑型荧光灯和金属卤化物灯、高压钠灯。如在室外、主厂房、高大厂房中采用光效高、寿命长的高压钠灯、金属卤化物灯;在高度较低控制室、办公室、会议室、走廊、楼梯间等场所,细管径直管型荧光灯因光效高、寿命长、显色性好而代替粗管径直管型荧光灯,紧凑型荧光灯和小功率金属卤化物灯因其光效高、寿命长而取代白炽灯。

1.1.3 采用节能的灯用电器附件

为了保证不同类型电光源在电网电压下正常可靠工作而配置的电器件统称为灯用电器附件。常用的灯用电器附件有:镇流器、启辉器、触发器及电容器。

镇流器的能耗一般占到整个灯具能耗的 20%~30%,因此着重考虑镇流器的选用。常用的镇流器一般分为电感式镇流器和电子镇流器两大类,电感式镇流器又分为传统型和节能型两类。

传统电感镇流器尽管有结构简单、安全系数高、坚固耐用、价格低廉、寿命长(10 年以上)的优点,但因其体积大、重量重、噪音大、频闪高、功率损耗高(40 W 用于灯管的自身损耗为 9 W)和功率因数低等致命缺点。

节能型的电感镇流器是一种新型产品,采用新型节能型的电感镇流器代替传统电感镇流器,其节能效果已接近电子电感镇流器的水平(比传统电感镇流器节能约为 40%以上),相对电子感镇流器来讲,这种镇流器具有售价低、谐波含量低、可靠性高的优势。电子镇流器具有自身功耗低、无需功率补偿、启动可靠、可实现调光、体积小、无频闪、噪声低、重量轻、抗高频电磁辐射、抗电网干扰等优点,但其成本相对较高、使用的元器件较多,稳定性、一致性相对较差,寿命相对较短(2~4 年)。

通过比较,设计中推荐采用节能型的电感镇流器

表 3 镇流器主要参数对比

型号品种	自身功耗 /W	重量比	光效比	开机浪涌电流比	电磁干扰 EMI	连续使用寿命 /a
36W /40W 普通电感镇流器	9	1	0.95~0.98	1.5	无	10
36W /40W 节能电感镇流器	4~5	1.5	1.02~1.05	1.5	无	10~20
36W /40W 电子镇流器	≤3.5	0.3~0.4	1.10	10~15	在允许范围内	2~4

和电子电感镇流器代替传统电感镇流器。

1.1.4 合理的配线、减少配电线路的损耗

根据《火力发电厂和变电所照明设计技术规定》第 12.0.5 条“气体放电灯应装设补偿电容器,补偿电容器因数不应低于 0.9”的规定,工程中电子镇流器应配补偿电容器,使线损减少。在配线时应根据计算合理的选择导线截面。

优化配电方式,把单相改为两相三线或三相四线供电,线损可以比原来下降 75%~80%。对于较长的照明线路采用三相四线。对于道路照明将以往的集中供电改为分区供电,合理的选择及布置照明配电箱,以节省照明布线。

1.1.5 采用各种照明节能的控制设备和器材

采用合理的照明控制方式是实现节能的重要手段。主要考虑以下几点。

(1)采用照明开关集中控制与就地控制相结合的方式,室内相对多地设置照明开关,以方便开关,从而达到节能的目的。应根据房间出口情况的不同相应设置不同的开关。在电厂的配电室和其它不经常有人的场所,将设置单独开关分散控制,没人工作时就立即将所有灯关闭。

(2)户外照明的控制采用光控式自动控制方式。

(3)在走廊和楼梯间有采用声控、光控或复合型控制的做法。

(4)不同照明开关控制的灯具宜根据被照明场所使用功能的不同分区间隔布置,可根据外界光线的情况或使用要求决定灯具开启的数量。

(5)在集控室中将设置调光开关,通过控制荧光灯光输出量来达到调节照度的目的。

1.2 电厂照明设计中如何提高照明质量

1.2.1 照度水平的确定

照度水平主要包括照度标准、照度均匀度和空间照度等内容。在确定工程照度标准时应综合考虑视觉功效、舒适的视觉环境、技术经济和节能等因数。

工程中主要场所的推荐照度如下。

汽机房除运转层外各层	100 lx
汽机房运转层	200 lx
锅炉房及本体各层	50 lx
集中控制室及继电器室	300 lx
配电室	200 lx
生产办公楼	300 lx
厂区道路照明	5 lx

在满足照度标准的同时,还应注意房间照度的合理分布,合理的照度分布有利于视觉工作。

1.2.2 限制眩光,提高照明舒适度

眩光是指在视野内由于亮度分布或亮度范围的不适宜,或存在着极端的亮度对比,以致引起不舒适感觉或降低观察细部或目标能力的视觉现象。眩光可分为:直接眩光、不舒适眩光、反射眩光、光幕反射。

在厂房照明设计中重点要解决的是直接眩光。解决直接眩光的办法是限制灯具的最低悬挂高度,最低悬挂高度与采用的光源和灯具有关系,一般厂房内采用的是有反射罩、不带格栅、光源为金属卤化物灯或高显色高压钠灯的块板灯,根据照明规程要求,该灯具功率为 150~250 W,遮光角为 24°,悬挂高度定为 5.5~6 m 时,即能满足限制直接眩光的要求。

在控制室的照明设计中重点要解决的是反射眩光和光幕反射。反射眩光是由视野中的反射引起的眩光,特别是靠近视线方向看见反射像所产生的眩光。光幕反射是视觉对象的镜面反射,它使视觉对象的对比降低,以至部分或全部地难以看清细部。反射眩光和光幕反射更接近视线,因此比直接眩光更不利。一般解决的措施如下。

(1)采用低亮度光源或在灯具上采取遮光方法,使反射影像的亮度处于容许的范围以内。

(2)如光源或灯具亮度不可降低到理想程度,可对布灯位置或物件本身位置进行调整,使反射影像处于视线之外。

(3)可提高照度,以增加光源数量,减少反射眩光和光幕反射的影响。

(4)采用低光泽度的表面装饰材料,以减弱镜面反射的能力。控制室的照明设计将着重在采用低亮度光源或在灯具上采取遮光方法和合理布置灯具位置上考虑。一种方法是采用间接照明的方法,另一种方法是采用新型点光源。

1.3 集控室的照明方案

作为电厂照明设计的重要部分,集控室照明从来都是人们关注的重点。从最早的发光带,到后来的发光天棚,再到最近的发光块,一直致力于寻找更好的照明方式。随着集控室内控制设备的变化,相应的照明的一些思路也应改变。

结合绿色照明概念,集控室照明设计既要满足建筑方面的要求,同时要能达到舒适、节能、实用的功能要求。这就需要着重在灯具和光源的选型上多加考虑。

集中控制室的照明采用格栅照明或点光源,即集中控制室主环采用阻燃栅格的光带照明或点光源,控制室灯光采用分级控制方式,以满足 CRT 及大屏幕监视器照度要求。电子设备间及继电器室采用由带栅格的荧光灯组成的发光带。荧光灯配以长寿命、高效率的电子镇流器。

集控室的主环部分照明采用间接照明灯具,建筑的吊顶上留有灯槽,将这种灯安装在灯槽里,灯槽采用铝合金专用型材,反射器采用薄钢板加工,表面喷涂白色高级烤漆或静电喷塑,其灯光经多次反射后再射至工作面,无直射和反射眩光,光线柔和舒适,亮度均匀。该灯具采用荧光灯光源,可采用电子镇流器,同时采用调光控制(由于电子镇流器的寿命相对较

短,因此也可考虑采用节能型电感镇流器)。

2 结 论

自从 1996 年中国启动“中国绿色照明工程”以来,其他行业已率先在各自的项目中进行实施,电力行业也相继在一些项目中开始实施,并得到了各方面的重视。通过以上分析可以说明,绿色照明在火力发电厂中的应用在技术上是可行的,在经济上是有利的,从环保的角度讲更是必要的,他将随着绿色照明电器新工艺、新技术的不断发展,在工程实际中得到更广泛的应用,从而达到高效、节能、环保的目的。

(收稿日期: 2009—07—10)

(上接第 49 页)

表 2 2006 年 12 月 31 日第一次加重后各轴承的振动情况 μm

时间(时:分)	转速	1号上	2号上	1号 Y	2号 Y	2Y 外加探头
19:03	5000	2.0	2.1	48	53	142
19:08	5500	11	4.1	108	72	260

表 3 2007 年 1 月 1 日联轴器上加重后各轴承的振动情况 μm

时间(时:分)	转速	1号上	2号上	3号上	4号上	1号 Y	2号 Y	2Y 加
9:45	400	0	0			5	14	29
9:54	2000	1	0.3			23	24	19
9:56	3000	1	0.4			27	10	62
10:02	4000	0.6	0.4			23	17	53
10:13	5000	0.7	0.3			13	12	50
10:18	5500	2	1	2	1	14	6	44

经过计算发现,试加重量对振动影响很小,于是在将汽轮机前后加重全部取下,在联轴器 129 度位置上加重 21.3 g 加重后,2007 年 1 月 1 日再次启动,振动数据见表 3。

10:45 提高背压,向热网供汽,振动基本没有变化。

由机组振动和计算可知,转子上的不平衡重量已很少,约 2.7 g 故振动处理和高速动平衡到此结束。

3 结 论

1)引起汽轮机振动的原因是联轴器质量不平衡。

2)联轴器质量不平衡通过现场平衡,不平衡重

量已很少。

3)机组轴系振动达到优良水平。

4)由于联轴器对于汽轮机来说是悬臂外伸端,在处理类似结构的振动问题时,在外伸端加重的效果很好,往往起到四两拨千斤的作用。

参考文献

[1] 张游祖,施维新. 汽轮发电机组的振动及转子找平衡[M]. 北京:水利电力出版社,1986.

作者简介:

张亚平(1963—),男,高级工程师,从事汽轮机的技术监督、服务和调试等方面的研究工作。

(收稿日期: 2009—09—10)

300 MW CFB 机组低负荷运行研究

唐俊,魏志全

(四川白马循环流化床示范电站,四川 内江 641005)

摘 要: 300 MW CFB 锅炉有大范围的调峰能力,在四川电网丰水期显示了普通燃煤机组不可比拟的优越。针对机组在长期低负荷下出现的故障做出了简要分析,提出了技术措施。

关键词: CFB; 翻床; 二次风管烧坏; 锅炉 MFT; 振动; 汽动给水泵; 技术措施

Abstract 300 MW CFB unit has a regulating ability with a large area and it has shown the advantages beyond comparison with the ordinary coal-fired unit in high flow period in Sichuan power grid. A brief analysis is carried out about the failure occurred in the part-load operation for a long time and the technical measures are proposed.

Key words CFB; bed flop; the destroy of secondary air pipes; boiler MFT; vibration; turbine-driven feedwater pump; technical measure

中图分类号: TK221 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2008)06-0059-03

四川白马 300 MW CFB 锅炉为 ALSTOM 公司精心设计和开发的双支腿单炉膛、一次中间再热、平衡通风、露天岛式布置、全钢架悬吊结构、亚临界自然循环汽包炉。锅炉岛由法国 ALSTOM 公司设计制造,配套汽轮机为东方汽轮机厂生产的 N300-16.7/537/537-8 型汽轮机,配套发电机为东方电机厂生产的 QFSN-300-2-20 型发电机。

锅炉设计上采用四川宜宾高硫无烟煤作燃料,脱硫采用炉内加钙方式进行。

四川白马 300 MW CFB 循环流化床锅炉的主要性能参数如表 1。

表 1 白马 300 MW CFB 锅炉主要性能参数

序号	参 数	BMCR	BECR
1	蒸发量 (t/h)	1025	977
2	过热蒸汽压力 (MPa)	17.4	17.4
3	过热蒸汽蒸汽温度 (℃)	540	540
4	再热蒸汽流量 (t/h)	844	807
5	再热蒸汽进、出口压力 (MPa)	3.9/3.7	3.716/3.536
6	再热蒸汽进、出口温度 (℃)	330/540	325.6/540
7	给水温度 (℃)	280	278
8	锅炉效率 (%)	≥91.79	
9	脱硫效率 (%)	>90	
10	锅炉最低不投油稳燃负荷 (%)	35% BMCR	
11	SO ₂ 排放值 (O ₂ =6% 的干烟气) (mg/Nm ³)	≤600	≤600
12	NO _x 排放值 (O ₂ =6% 的干烟气) (mg/Nm ³)	≤250	≤250
13	Ca/S 摩尔比		1.8

汽轮机的设计规范及技术特征

型号: N300-16.7/537/537-8 型

型式: 亚临界, 中间再热, 两缸两排汽, 凝汽式汽轮机 设计参数:

额定功率: 300 MW; 最大功率: 330 MW;

主蒸汽压力: 16.7 MPa; 主蒸汽温度: 537℃;

再热蒸汽压力: 3.18 MPa; 再热蒸汽温度: 537℃;

额定转速: 3 000 r/min; 冷却水温: 20℃;

背压: 6.4 kPa; 给水温度: 281℃;

额定蒸汽流量: 904 t/h; 低压末级叶片高度: 851 mm。

四川电网水电比例大, 达到 61%。在丰水期, 水电负荷高、峰谷差大, 电网调峰压力较大, 火电厂调峰为电网的安全提供了有力保障。四川白马 300 MW CFB 锅炉具有大范围的变负荷能力, 最低负荷可以长期维持在 11.5 MW 左右 (无燃油支持), 在四川电网特殊的电力机构下, 会面临长期带低负荷的特殊工况, 为保证机组在低负荷机组的安全, 生产技术及运行部门针对低负荷做了有力的探索, 以保证机组长期稳定运行。结合机组的运行特点, 机组长期低负荷的主要危险点控制体现为: 防止低负荷翻床; 防止二次风管烧坏; 防止锅炉 MFT 保护动作; 防止 6 号低压加热器疏水管振动; 汽动给水泵的安全问题。下面将主要针对以上问题做出阐述, 疏漏之处, 望同行做出批评指正。

1 防止低负荷翻床

四川白马 300 MW CFB 锅炉的双支腿单炉膛, 在

锅炉给煤不均匀以及风量的突然波动的情况下,会引起两侧运行床压的差异,这种情况在运行中定义为翻床。翻床可能带来的可能后果是:锅炉正常的物料循环被终止;锅炉两侧床温偏差大,可能引起锅炉床温局部超温而结焦;一次风机失压、过流;锅炉蒸汽汽温、汽压异常变化,给汽轮机运行调整带来困难,甚至影响到安全运行。

1.1 低负荷翻床的原因

- (1) 长时间低负荷运行,炉膛内积累了大量细床料;
- (2) 入炉煤粒度太细及石灰石加入量较大;
- (3) 下二次风流量波动大;
- (4) 一、二次风挡板在低负荷调节性能变差;
- (5) 锅炉外置床和回料器回料不均匀引起扰动;
- (6) 低负荷吹灰负压波动,引起一次风量和引风流量变化过大。

1.2 防止长期带低负荷翻床的措施

- (1) 控制好锅炉上部差压,发现上部压差偏高时,应及时从 201、301 外置床放细灰,控制好上部压差正常(一般在 180 MW 以下时,上部压差维持在 0.6 kPa 以下);
- (2) 严格控制锅炉总床压在 36~38 kPa 之间,防止锅炉翻床后一次风机电流越限引起一次风机跳闸;
- (3) 合理控制一次风机出口风压和一次风流量设定值,保证热一次风门工作在 30%~60% 稳定区域;
- (4) 合理调整二次风机出口风压,控制二次风压不低于 10 kPa 风门开度大于 20%,保证二次风流量、流速稳定,防止风量不足造成床料翻入风管,使风管过热和剧烈振动,损坏设备,并加强现场二次风管的检查,发现问题及时处理;
- (5) 严格按照锅炉设计控制入炉煤粒度,控制煤粒度分布,当煤粒度中大于 8 mm 的份额达到 10%,小于 0.2 mm 的粒度大于 40% 时,及时通知燃化部调整破碎机间隙;
- (6) 定期作好一、二次风量测点的吹扫工作,保证测量的准确性,防止变工况堵塞风量测点,影响风量调节;
- (7) 严格控制石灰石加入量,保证平稳连续加入,严禁瞬时大量加入石灰石;
- (8) 低负荷吹灰时适当提高负压,防止吹灰过程中锅炉上部产生正压,造成一次风量变动过大引起锅炉翻床;
- (9) 当锅炉发生翻床后应立即将一次风门切手

动进行调节,稳定一侧一次风量,用最快的时间消除翻床,以保证一次风机不超电流和锅炉的稳定。

2 防止二次风管烧坏

四川白马 300 MW CFB 锅炉风量主要是由两台一次风机和两台二次风机供给。一次风主要用于流化床料,并为燃料提供初始燃烧空气。二次风机主要是为分级燃烧、控制炉温、抑制 NO_x 的产生提供空气。二次风在锅炉燃烧室内共有上下两层共 12 个风口,称为上下二次风。

2.1 低负荷二次风管烧坏的原因

- (1) 二次风流量过低;
- (2) 锅炉出现翻床,造成二次风管进床料;
- (3) 下二次风调门开度过小;
- (4) 二次风压设定不合理。

2.2 防止低负荷二次风管烧坏的措施

- (1) 保证二次流量正常稳定,在流量波动时将下二次风调门至手动,并保证风门挡板开度在 20% 左右,且保证空预器后二次风压大于 10 kPa;
- (2) 控制锅炉总床压在 36 kPa 左右;
- (3) 定期对二次风管温度进行测量,发现温度超过空预器出口温度时,及时增大二次风流量降低风管温度;
- (4) 注意监视二次风晃动规律,发现晃动增大时及时进行调整;
- (5) 锅炉出现翻床时,增加二次风管的监控次数。

3 防止锅炉 MFT 保护动作

3.1 锅炉 MFT 保护动作的原因

- (1) 煤量过小,煤质变差,不着火;
- (2) 与对应负荷的风量相比,风量过大引起床温过低;
- (3) 锅炉细灰过多,引起锅炉换热加剧导致床温下降;
- (4) 锅炉 MFT 逻辑保护动作:同侧给煤线跳闸;一次风机跳闸;流化风机跳闸而备用风机未联动;旋风分离器下部立管压差高(达 10 kPa)延时 10 s。

3.2 防止锅炉 MFT 保护动作的措施

- (1) 加强运行一二次风量的调整,在保证锅炉风管

和流化安全的前提下尽量维持一二次风量低限运行;

(2) 尽量降低锅炉上部差压, 以保证锅炉床温在安全范围;

(3) 当发生锅炉煤质明显变差、床温急剧下降时应及时增加煤量, 确保锅炉的安全稳定运行;

(4) 作好锅炉跳闸的事故预想, 防止锅炉 MFT 保护动作造成机组解列;

(5) 保证锅炉床枪、风道燃烧器可靠备用, 当发生锅炉燃烧恶化时及时投助燃;

(6) 保证事故给水泵、电动给水泵、柴油发电机可靠备用;

(7) 发生锅炉 MFT 保护动作时, 应充分认识 CFB 锅炉热容量大的特点, 有步骤的恢复锅炉运行, 注意汽温控制、水位控制、投煤、投外置床等关键事宜; 防止扩大故障影响。

(8) 修改旋风分离器下部立管压差高 (达 10 kPa) 延时 10 s 的逻辑, 改为旋风分离器下部立管压差高 (达 20 kPa) 延时 10 s。

4 防止 6 号低压加热器疏水管振动

四川白马 300 MW CFB 锅炉底冷器用于冷却底灰的冷却水由凝结水提供, 由轴封加热器后引出, 冷却底灰后回水至 6 号低压加热器的入口。

4.1 6 号低压加热器疏水管振动的原因

(1) 低灰冷却器回水温度低;

(2) 6 号低压加热器疏水不畅。

4.2 防止 6 号低压加热器疏水管振动的措施

(1) 低负荷运行期间, 加强对 6 号低压加热器疏水管道的检查;

(2) 控制底冷器冷却水回水温度在 65~80℃。如果水压过低应适当关小冷却水回水电动总门, 如果遇到煤质好床压低时, 应停运部分底冷器运行, 并关小停运底冷器的冷却水门;

(3) 当出现 6 号低压加热器疏水管路振动时, 可开启 6 号低压加热器事故疏水及时消除管路振动;

(4) 振动严重, 短时不能消除时, 可采用解列 6 号低压加热器汽侧的方法消除振动。

5 汽动给水泵的给水保证

四川白马 300 MW CFB 机组的给水由一台电泵

和两台汽动给水泵保证, 电动给水泵主要由于机组启动初期, 正常运行时为两台汽动给水泵, 汽动给水泵的驱动汽源有主蒸汽、汽轮机四段抽汽、辅助蒸汽三种, 而辅助蒸汽由汽轮机再热冷段保持压力恒定, 给水泵再循环开启的流量设定为小于 225 t/h。

机组低负荷时, 两台汽动给水泵的运行出力都非常小, 可能会小于 220 t/h 从而汽动给水泵的再循环将打开, 这将引起给水压力、压差和流量的波动, 从而引起汽动给水泵的转速波动, 汽动给水泵在正常运行时的状态为锅炉自动方式, 如果压力和压差偏差过大, 将会使汽动给水泵的运行方式切换为转速自动, 如果给水流量小于 190 t/h 而再循环没开启, 汽动给水泵将跳闸, 这将给锅炉给水保证带来困难。

机组低负荷时, 汽动给水泵的驱动汽源将从汽轮机四段抽汽切换为辅助蒸汽 (通过设定辅助蒸汽压力实现汽源切换), 切换过程中, 操作不当, 可能引起小机供汽带水。

锅炉主蒸汽的调节除锅炉燃烧调整外主要靠三级减温水调节, 减温水取至汽机 1 号高压加热器出口, 减温水流量的变化在低负荷时容易引起给启动给水泵压力和压差的变化, 从而导致汽动给水泵转速的变化。

汽动给水泵给水保证的技术措施如下。

(1) 机组长期低负荷, 应保证辅助蒸汽联箱的疏水畅通, 防止辅助蒸汽联箱中积水;

(2) 负荷变化时, 应加强对汽动给水泵流量变化的运行监视, 保证汽动给水泵再循环的正常开关;

(3) 在低负荷切换小机用汽时应充分疏水, 并缓慢操作, 防止小机供汽带水;

(4) 低负荷时尽力维持机组负荷、主蒸汽温度、主蒸汽压力的稳定, 减少汽温波动给汽动给水泵调整带来的干扰。

6 其他注意事项

(1) 长时间低负荷运行时, 由于抽汽压力降低可能造成高低压加热器疏水水位波动, 应注意对高低压加热器疏水水位进行调整, 防止水位过高或疏水带汽及疏水不畅;

(2) 长期低负荷运行时, 汽轮机 4 号高压调门长期处于关闭状态, 应定期对汽轮机 4 号高压调门定期

(下转第 63 页)

工程决定取消热水收集罐和热水泵,而对甲醇车间除氧器回收系统仍采用热水收集罐。总的工艺流程简略方块图如图 1。

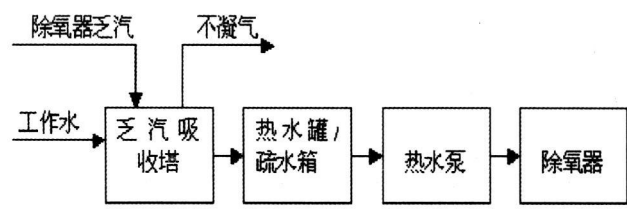


图 1 除氧器排汽乏汽回收系统工艺流程简图

一定压力的常温除盐水在通过乏汽回收装置 JF—CV 吸收塔负压室内的多个引射器时,产生的卷吸作用使负压室产生负压,从除氧器排汽管排出的乏汽直接进入负压室,进入回收罐体负压室内的乏汽有一部分被引射器内的除盐水吸收,吸收乏汽的除盐水在引射器内混合加压后,降落到回收罐体底部的自封式热水收集室,从而形成双程喷射降淋。

没有被引射器吸收的另一部分乏汽从负压室下部向下,经过双程降淋时被进一步完全吸收。

吸收乏汽之后的除盐水进入气水分离室,氧气等不可凝气体从水中分离出来从排气孔排出,高温水靠重力进入位于地面的热水收集罐或疏水箱,经过水泵将热水直接送入除氧器内回收利用。

2.3 运行效果

川维厂锅炉车间高压除氧器和甲醇车间除氧器乏汽回收装置自 2007 年 6 月先后正式投入运行后,两套装置运行正常、稳定,无需专人值班,能适应乏汽压力的波动,汽氧分离效果较好,不影响除氧效果,除氧指标氧合格率达到 100%,乏汽基本完全回收,节能减排效益明显。

3 经济效益分析

(1)乏汽回收节省标煤计算:由于乏汽压力的不同,回收装置所回收的乏汽量不好准确计算,但可以

根据两套乏汽回收装置实际运行参数来准确计算所回收的热量。锅炉车间高压除氧器和甲醇车间除氧器乏汽回收装置的工作水量分别为 9 t/h、12 t/h 进水温度为常温 20℃,出水温度分别为 84℃、83℃,这样就可计算出装置所回收的实际热量(见表 1)。

由此表可看出两套乏汽回收装置可节约标煤 0.19034 t/h 按厂年运行 8 000 h 计,每年可节约标煤 1 522.72 t 当前地区燃煤均价 470 元/t 入厂煤热值年均 21 935 kJ/kg 则每年可以节约购煤成本 95.60 万元。

(2)装置回收冷凝水节约成本:2.4 t/h×8 000 h×3 元/t=5.76 万元。

(3)装置运行耗电量:按泵铭牌功率 2×15 kW 计算。

(4)装置年运行 8 000 h 合计节约成本计算如下:乏汽回收节省标煤折算节约成本:95.60 万元;回收冷凝水节约成本:5.76 万元;耗电费:2×15×0.517 3×8 000=12.42 万元;维护费:0.5 万元;年节省:95.60+5.76-12.42-0.5=88.44 万元。

表 1 除氧器乏汽回收装置回收热量计算表

名称	进水流量 /t/h	进水温度 /℃	出水温度 /℃	回收热量 /kJ/h	折标煤 /t/h
锅炉车间	9.0	20	84	2 411 596.8	0.08 231
甲醇车间	12	20	83	3 165 220.8	0.10 803
合计	24			5 576 817.6	0.190 34

4 结 论

JF—CV 除氧器乏汽回收装置结构简单,运行可靠,贴近实际生产需要,不影响除氧效果,易于操作,经济效益明显,年效益 88.44 万元,是一种值得广泛推广的节能减排新技术。

参考文献

[1] 曾丹苓.工程热力学[M].北京:高教出版社,1992.
[2] 郑体宽.热力发电厂[M].北京:水利电力出版社,1991.
(收稿日期:2009—10—20)

(上接第 61 页)
充分疏水,防止 4 号高压调门开启时带水,引起汽机大轴振动。

参考文献

[1] 300 MW 机组全能运行规程(修改版)[M].四川白马

循环流化床示范电站有限责任公司.2008.
[2] 吴季兰.汽轮机设备及系统[M].北京:中国电力出版社,2001.
[3] 刘德昌、阎维平.流化床燃烧技术[M].北京:中国电力出版社,1995.
[4] 范从振.锅炉原理[M].北京:水利电力出版社,1995.
(收稿日期:2009—09—04)

除氧器乏汽回收技术在节能减排中的应用

刘明宝

(中石化四川维尼纶厂, 重庆 长寿 401254)

摘 要:介绍了除氧器乏汽回收技术在中石化四川维尼纶厂成功应用的实例。

关键词:除氧器; 乏汽回收; 节能减排

Abstract The successful application of waste steam recovery technique of deaerator to SinoPec Sichuan WeNylon Factory is introduced

Key words deaerator; waste steam recovery; energy saving and emission reduction

中图分类号: TK219 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0062-02

在现有工业和电站锅炉给水除氧方式上, 通常是采用蒸汽加热汽提的方式进行热力除氧, 除氧后的富氧余汽从除氧器顶部排空。这种除氧方式具有简单、可靠和除氧效果好的优点, 但也造成相当多的蒸汽随着废气排出, 导致能源的浪费和环境的污染。中石化四川维尼纶厂(下简称川维厂)在运除氧器共有 8 台, 具体为锅炉车间 4 台, 发电车间 3 台, 甲醇车间 1 台, 现场估计各台排汽在 1.0~1.8 t/h 之间不等, 其中锅炉车间高压除氧器和甲醇车间除氧器乏汽量较大。川维厂作为国家发改委确定的千家重点节能企业之一, 抓好节能减排工作既是应尽的义务和责任, 也是落实科学发展观、实现又好又快发展的客观要求。为此, 川维厂于 2007 年 6 月与北京君发节能环保有限公司合作, 采用其专利技术 JF-CV 除氧器乏汽回收装置, 成功地将锅炉车间高压除氧器和甲醇车间除氧器排出的乏汽全部进行了回收利用。

1 JF-CV 除氧器乏汽回收技术简介

1.1 JF-CV 除氧器乏汽回收装置系统组成及原理

JF-CV 除氧器乏汽回收装置包括 JF-CV 吸收塔、热水收集罐、输送水泵和控制系统等。

常温工作水在通过 JF-CV 吸收塔负压室内的多个引射器时, 产生的卷吸作用使负压室产生负压, 除氧器乏汽一部分被工作水吸收, 另一部分乏汽从负压室下部向下经过双程降淋时被吸热, 最后极少量蒸汽和氧气等不凝气从排放口排放。吸热后的工作水进入位于地面的热水收集罐, 经过输送水泵将热水直

接送入除氧器内回收。

控制系统包括温度控制回路、压力控制回路和两个液位控制回路。通过乏汽吸收塔上的温度和压力信号来控制除盐水量, 使吸收乏汽后的热水温度和塔内压力保持稳定在设定值; 乏汽吸收塔的下部是自封式热水收集室, 和热水收集罐一样, 通过磁翻版液位传感器输出的液位信号来调节出水量, 使液位稳定在设定值。

1.2 JF-CV 除氧器乏汽回收装置具有的功能

(1) 特制的负压抽吸功能、智能化的自动控制, 保障了除氧器的乏汽排放背压的稳定; (2) 内置高精度的脱气膜管, 把大部分氧气等不凝气体分离排出, 回收的冷凝水不影响除氧器的进水品质, 保证了除氧器除氧效果; (3) 双程喷射降淋技术提高了除盐水对乏汽的吸收能力, 吸收率可达 99.8%; (4) 乏汽吸收塔与热水收集罐上下分体安装, 增大了高温水的气蚀余量, 配合热水收集罐内置的防气蚀装置, 保障水泵长年连续运行不会发生气蚀。

2 在川维厂的工程应用

2.1 工程范围

川维厂共有 8 台在运除氧器, 其中锅炉车间高压除氧器和甲醇车间除氧器乏汽量较大, 现场估计排汽在 1.5~1.8 t/h 之间。川维厂与北京君发公司进行了认真细致的协商, 决定先在排汽量大的锅炉车间高压除氧器和甲醇车间除氧器实施乏汽回收。

2.2 工艺流程

考虑到锅炉车间有疏水箱和疏水泵可以利旧, 本

工程决定取消热水收集罐和热水泵,而对甲醇车间除氧器回收系统仍采用热水收集罐。总的工艺流程简略方块图如图 1。

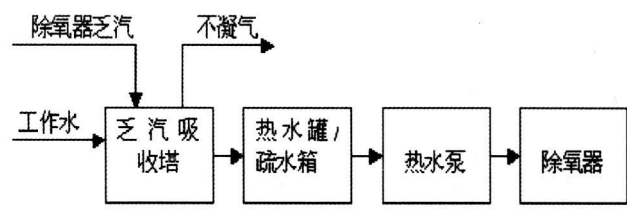


图 1 除氧器排汽乏汽回收系统工艺流程简图

一定压力的常温除盐水在通过乏汽回收装置 JF—CV 吸收塔负压室内的多个引射器时,产生的卷吸作用使负压室产生负压,从除氧器排汽管排出的乏汽直接进入负压室,进入回收罐体负压室内的乏汽有一部分被引射器内的除盐水吸收,吸收乏汽的除盐水在引射器内混合加压后,降落到回收罐体底部的自封式热水收集室,从而形成双程喷射降淋。

没有被引射器吸收的另一部分乏汽从负压室下部向下,经过双程降淋时被进一步完全吸收。

吸收乏汽之后的除盐水进入气水分离室,氧气等不可凝气体从水中分离出来从排气孔排出,高温水靠重力进入位于地面的热水收集罐或疏水箱,经过水泵将热水直接送入除氧器内回收利用。

2.3 运行效果

川维厂锅炉车间高压除氧器和甲醇车间除氧器乏汽回收装置自 2007 年 6 月先后正式投入运行后,两套装置运行正常、稳定,无需专人值班,能适应乏汽压力的波动,汽氧分离效果较好,不影响除氧效果,除氧指标氧合格率达到 100%,乏汽基本完全回收,节能减排效益明显。

3 经济效益分析

(1)乏汽回收节省标煤计算:由于乏汽压力的不同,回收装置所回收的乏汽量不好准确计算,但可以

根据两套乏汽回收装置实际运行参数来准确计算所回收的热量。锅炉车间高压除氧器和甲醇车间除氧器乏汽回收装置的工作水量分别为 9 t/h、12 t/h 进水温度为常温 20℃,出水温度分别为 84℃、83℃,这样就可计算出装置所回收的实际热量(见表 1)。

由此表可看出两套乏汽回收装置可节约标煤 0.19034 t/h 按厂年运行 8 000 h 计,每年可节约标煤 1 522.72 t 当前地区燃煤均价 470 元/t 入厂煤热值年均 21 935 kJ/kg 则每年可以节约购煤成本 95.60 万元。

(2)装置回收冷凝水节约成本:2.4 t/h×8 000 h×3 元/t=5.76 万元。

(3)装置运行耗电量:按泵铭牌功率 2×15 kW 计算。

(4)装置年运行 8 000 h 合计节约成本计算如下:乏汽回收节省标煤折算节约成本:95.60 万元;回收冷凝水节约成本:5.76 万元;耗电费:2×15×0.517 3×8 000=12.42 万元;维护费:0.5 万元;年节省:95.60+5.76-12.42-0.5=88.44 万元。

表 1 除氧器乏汽回收装置回收热量计算表

名称	进水流量 /t/h	进水温度 /℃	出水温度 /℃	回收热量 /kJ/h	折标煤 /t/h
锅炉车间	9.0	20	84	2 411 596.8	0.08 231
甲醇车间	12	20	83	3 165 220.8	0.10 803
合计	24			5 576 817.6	0.190 34

4 结 论

JF—CV 除氧器乏汽回收装置结构简单,运行可靠,贴近实际生产需要,不影响除氧效果,易于操作,经济效益明显,年效益 88.44 万元,是一种值得广泛推广的节能减排新技术。

参考文献

[1] 曾丹苓.工程热力学[M].北京:高教出版社,1992.
[2] 郑体宽.热力发电厂[M].北京:水利电力出版社,1991.
(收稿日期:2009—10—20)

(上接第 61 页)
充分疏水,防止 4 号高压调门开启时带水,引起汽机大轴振动。

参考文献

[1] 300 MW 机组全能运行规程(修改版)[M].四川白马

循环流化床示范电站有限责任公司.2008.
[2] 吴季兰.汽轮机设备及系统[M].北京:中国电力出版社,2001.
[3] 刘德昌、阎维平.流化床燃烧技术[M].北京:中国电力出版社,1995.
[4] 范从振.锅炉原理[M].北京:水利电力出版社,1995.
(收稿日期:2009—09—04)

湿法烟气脱硫系统特殊运行方式

何绍洪, 何 强

(巴蜀江油发电厂, 四川 江油 621709)

摘 要: 2008 年“5. 12”特大地震, 四川巴蜀江油发电厂 2×330 MW 机组烟囱受损, 使灾后恢复生产困难巨大。面对全省灾后用电的需求, 既确保机组正常发电又不影响受损烟囱修复, 是急需解决的突出问题。通过计算和调研论证, 利用脱硫系统的特殊运行方式与搭建临时烟道相结合的方案, 较好地解决了这一问题, 使巴蜀江油发电厂灾后顺利恢复发电。

关键词: 大地震; 火电厂; 烟囱; 湿法烟气脱硫; 特殊运行方式; 恢复生产

Abstract: The stack of the two 330MW generation units in Sichuan Bashu Jiangyou Thermal Power Plant was broken due to the powerful earthquake on 12th of May 2008, so it was a great difficulty to recovery the generation. Facing the electricity demands for the reconstruction in Sichuan Province, the outstanding urgent problem was to generate surely and to repair the stack at the same time. Based on the calculation and the experiences of other plants, the technical scheme was defined. In accordance with the technical scheme, the equipment for wet flue gas desulfurization (WFGD) was running in a particular form and the temporary flueway was being constructed. In this way, the problem had been solved felicitously, and therefore the power plant has been put into operation again successfully.

Key words: earthquakes; thermal power plant; stack; wet flue gas desulfurization (WFGD); particular operating mode; recovery

中图分类号: TM628 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)06—0064—03

巴蜀巴蜀江油发电厂 2×330 MW 机组从法国阿尔斯通公司全套进口, 于 1990 年投产。2006 年采用两炉一塔建设方式加装一套石灰石—石膏湿法烟气脱硫系统, 于 2007 年 2 月正式投运。

原烟气进入回转式烟气换热器 (GGH), 烟气温度从 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至约 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进入吸收塔。吸收塔出口 $45\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的净烟气进入 GGH 加热到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 经烟囱排放。整个脱硫系统中, 吸收塔系统是核心, SO_2 的脱除, 中间产物的氧化, 以及石膏结晶全部在吸收塔中完成。

地震前, 整个机组运行正常。大地震导致机组停

运, 对设备造成不同程度损害。经综合检查, 烟囱损坏是机组恢复生产的最大障碍。

1 烟囱受损前脱硫系统运行概况

1.1 脱硫工艺系统

巴蜀巴蜀江油发电厂湿法脱硫工艺系统包括: 烟气系统、 SO_2 吸收氧化系统 (吸收塔系统)、吸收剂制备及供给系统、石膏抛弃系统、废水处理系统。各系统关系框图见图 1。

1.2 脱硫系统的控制参数和指标

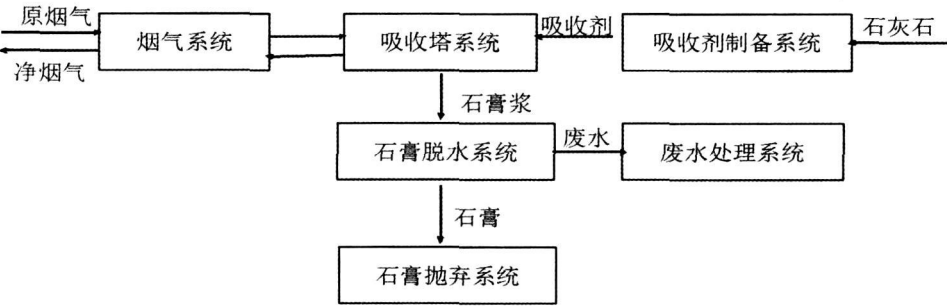


图 1 湿法脱硫工艺系统框图

运行中脱硫系统的控制参数和指标如表 1。

表 1 脱硫系统的参数和控制指标

序号	控制项目	控制标准
1	原烟气含尘量 /mg/L	≤ 200
2	浆液 PH 值	4.5~5.5
3	浆液密度 /kg/L	1.10~1.20
4	吸收塔浆液高度 /m	14.5~16.5
5	烟气换热器出口温度 /℃	≥ 80
6	净烟气 SO ₂ 浓度 mg/m ³	≤ 1000
7	烟气脱硫效率 /%	≥ 95

脱硫系统在实际运行中,浆液循环泵的运行台数根据原烟气中 SO₂ 浓度和出口净烟气 SO₂ 浓度的大小来确定。通过严格控制石灰石—石膏浆液的密度 pH,实现净烟气 SO₂ 达标排放。

1.3 烟囱防腐

烟囱外筒为砼结构,高 240 m;内筒高度 90 m,75 m 以下为砼结构,75~90 m 为陶土砖结构。增建 FGD 前,烟囱内筒的防腐内衬采用抗硫酸盐水泥砂浆砌筑陶土砖,用水玻璃型耐酸胶泥填充陶土砖砌缝,可防止烟气对烟囱的腐蚀。因为设置有 GGH,未对烟囱进行防腐改造。陶土砖和砼外筒间用膨胀珍珠岩隔热。

2 受损烟囱临时处理措施的可行性

2008 年 5 月 12 日四川汶川发生 8.0 级特大地震,造成巴蜀江油发电厂 330 MW 机组烟囱内筒 75~90 m 耐酸陶土砖全部垮塌,隔热层脱落,烟囱筒体局部裂纹。

2.1 烟囱受损后对耐温的影响

烟囱设计方明确表示:烟囱在无内衬保护的情况下,砼外筒不能承受大于 30℃ 的温差,否则会导致砼横向钢筋断裂和砼裂纹,在余震不断的情况下,甚至导致烟囱折断垮塌。因此,高温烟气不能进入未修复的烟囱,给巴蜀江油发电厂灾后恢复生产造成巨大困难。

2.2 受损烟囱及烟道防腐耐酸分析

若通过脱硫系统采用特殊方式运行,低温烟气将在烟道及烟囱内产生大量亚硫酸和硫酸浓度较高的凝结水。如果湿烟气直接接触砼,对砼产生酸腐蚀和硫酸盐腐蚀,导致砼膨胀、破裂,使钢筋处于酸腐蚀环

境,导致酸腐蚀和电化学腐蚀,严重威胁烟囱安全。因此降低烟气温度,对烟道及烟囱的防腐提出了更高的要求。

2.3 降低烟气温度的迫切性和可能性

巴蜀江油发电厂所在地域,四季分明,夏季环境温度 20~35℃,冬季环境温度 0~15℃。要满足烟囱内筒烟温与烟环境温度相差不大于 30℃ 条件,在夏季,进入烟囱的烟气温度不能超过 50℃,而在冬季则无法实现。脱硫设备是降低烟气温度的现成设施,降低烟气温度成为可能。因此,重点在于使烟气温度低于 50℃,并将腐蚀控制在有限程度,尽快恢复生产。在受损烟囱未完全恢复健康的情况下,夏季通过脱硫系统特殊的运行方式实现生产,为采取更加可靠的烟气临时排放措施和烟囱的修复赢得时间。恢复运行后,可修建临时烟道连接已经退役的原 4×50 MW 机组 120 m 烟囱,完善烟气临时排放措施。

3 脱硫系统特殊运行方式

3.1 烟气换热器 (GGH) 特殊运行工况确立

根据原烟气参数和脱硫塔喷淋条件,经过严格计算,脱硫塔出口烟气温度低于 50℃。在原烟气其它参数不变情况下,吸收塔入口烟温对出口烟温影响甚小。因此,GGH 不换热,则可保证进入烟囱的净烟气温度低于 50℃。

采取 GGH 极低速度转动,既可使 GGH 几乎丧失换热功能,又可起到盘车防止中轴和托架变形的作用,这是一种方式。此方式需要改变 GGH 驱动装置。

实际实施中,采取移出 GGH 储热原件的方式。即使 GGH 按原速转动,换热能力也大大降低。为尽可能保持净烟气低温,用空气作 GGH 低泄漏密封风。

3.2 受损烟囱防腐处理措施选择

综合在净烟气腐蚀环境中受损砼烟囱防腐要求、防腐施工工期、施工难度和防腐成本,决定采用耐酸油漆进行临时防腐。通过筛选,某品牌环氧防腐耐酸油漆处理烟囱内壁,在凝结水 pH 低于 1.5 时,可有效防止低温烟气对烟囱砼的腐蚀。

3.3 运行条件保证

保证脱硫塔浆液喷淋量,不但是净烟气温度的保证,也是提高脱硫效率,降低凝结水酸度的前提。

为减少净烟气带水,适当增加除雾器冲洗次数,保证除雾器工作状态良好。

控制吸收塔 pH 值高于 5,在喷淋量的保证下,保证脱硫效率。

4 脱硫系统特殊运行方式效果检查

采取以上措施后,于 2008 年 6 月 28 日实现了首台机组正式恢复发电。进入烟囱的净烟气温度被控制在 50℃以下,净烟气烟道凝结水量增加,烟囱下凝结水量较小,凝结水 pH 值大于 2。环境保护指标满足要求。具体指标如表 2。

表 2 脱硫系统特殊运行方式下的实际参数		
序号	参数名称	实际参数
1	原烟气含尘量 /mg/m ³	≤ 200
2	浆液 pH 值	5.1~5.6
3	浆液密度 /kg/L	1.10~1.20
4	吸收塔浆液高度 /m	14.5~16.5
5	原烟气温度 /℃	130~150
6	烟气换热器出口温度 /℃	48~51
7	烟囱入口烟气温度 /℃	46~49
8	烟气凝结水 pH 值	2.2~2.8
9	净烟气 SO ₂ 浓度 /mg/m ³	≤ 1000
10	脱硫效率 /%	≥ 95
11	净烟气颗粒物浓度 /mg/m ³	≤ 50

2008 年 10 月 8 日完成了 FGD 通过 4×50 MW 机组烟囱排放,满足了冬季机组发电的需要,同时为 330 MW 机组烟囱的修复创造了条件。在脱硫系统采用特殊运行方式三个月后,对受损烟囱内部进行腐蚀等检查,未见特别的异常现象。

2009 年 5 月,受损烟囱修复,脱硫系统恢复正常运行方式,至此,机组彻底恢复。

5 结 论

巴蜀江油发电厂 240 m 烟囱地震受损后,经过计算和调研论证,根据湿法脱硫工艺原理,采取脱硫特殊运行方式成功解决了通过受损烟囱的临时排烟问题。受损烟囱未见明显腐蚀和新增裂纹。在不影响机组发电的情况下,为受损烟囱修复创造了条件。在整个过程中,烟气中 SO₂ 排放量达到国家环保相关要求。为巴蜀江油发电厂及全川灾后恢复生产重建家园作出了应有的贡献。

(收稿日期: 2009—08—12)

(上接第 19 页)

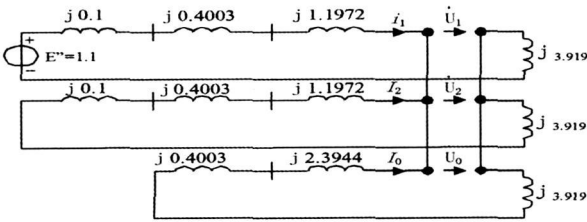


图 9 复合序网

4 总 结

近几年来,随着城市的发展及沿海企业和高耗能企业在内地的投入加大,使电力负荷几创新高,而气温突变,高温高热又将导致电力负荷继续攀高。电力线路及电力设施在严重过载情况下,将造成导线发热

和机械强度的降低,导线的连接处在过热情况下接触面产生膨胀引起金具螺栓松动,严重时就会造成断线、倒杆甚至人身伤亡事故,该 10 kV XX II 回 31 号杆断线事故就是一个典型案例。因此,电力线路在设计时应考虑城市的发展和电力负荷的增长裕度及线路的过载能力。同时,线路设计时尽可能避免空中 T 接,避免检修不便留下死角而埋下事故隐患。在调度运行方面应该根据实际情况,结合系统的运行方式,分别采取措施合理分配负荷,以达到预期的目的。

参考资料

[1] 张伟. 电力系统分析 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

(收稿日期: 2009—10—15)

强磁弱电系统中一起保护误动作分析

杨先义, 王 华, 陈 漫
(成都电业局, 四川 成都 610021)

摘 要: 分析了强磁弱电系统下的一起纵联零序保护误动作行为, 并提出了防止误动作的改进措施。

关键词: 强磁弱电系统; 纵联零序方向; 误动作; 改进措施; 负序功率方向

Abstract: The pilot zero sequence protection misoperation under a magnetically strong and electrically weak system is analyzed and an improvement action for preventing misoperation is proposed.

Key words: strong magnetism and weak electricity system; pilot zero sequence direction; misoperation; improvement action; negative sequence power direction

中图分类号: TM773 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0075-04

1 事故简述

2009 年 3 月某日, 110 kV 面海线发生 C 相永久性接地故障, 大面站 110 kV 面海线 147 开关零序电流 II 段保护动作, 重合后加速。与此同时, 与 110 kV 面海线同廊架设 (共走廊距离约 17 km) 的 220 kV 大石南线两侧的 RCS902A—SC 纵联零序方向保护动作, 单跳 C 相, 经重合闸延时后重合, 重合成功后线路两侧 RCS902A—SC 纵联零序保护再次动作, 三跳。事故后巡线, 在 110 kV 面海线上找到故障点, 而在 220 kV 大石南线上未发现有故障。220 kV 大石南线保护配置: 一号保护为光纤纵差 PSR703, 未动作; 二号保护为纵联距离零序 RCS902A, 纵联零序方向保护动作, 测距 34 km。所有故障录波启动, 所有 220 kV 线路收发信机启动, 现场一次设备检查正常。故障发生前, 系统运行方式如图 1。

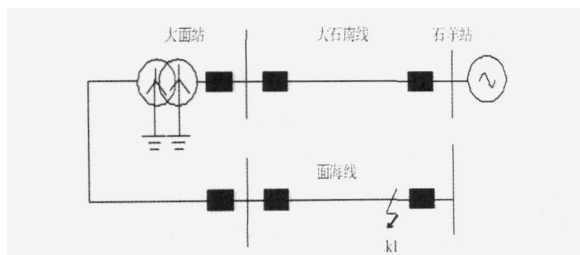


图 1 故障前系统接线方式

2 保护动作行为分析

2.1 RCS902A—SC 动作原因分析

取大面变电站和石羊变电站的 RCS902A—SC 录波数据计算零序电流幅值、零序电压幅值、零序电压电流相位及零序功率如图 2。石羊变电站侧零序故障分量波形见图 2。图 2(a)为 $3I_0$ 的幅值, 图 2(b)为 $3U_0$ 的幅值, 图 2(c)为 $3U_0$ 超前 $3I_0$ 的角度, 图 2(d)为零序功率。从图上可以看到, 故障后, $3U_0$ 超前 $3I_0$ 约 250° , 零序功率为 -5 VA 。 $3U_0$ 和 $3I_0$ 的相位关系和零序功率表明石羊变电站侧零序功率方向判为正方向。石羊变电站零序电流 $3I_0$ 达到约 2.3 A, 超过整定为 1.3 A 的“零序方向过流定值”。大面变电站侧零序故障分量波形见图 3。图 3(a)为 $3I_0$ 的幅值, 图 3(b)为 $3U_0$ 的幅值, 图 3(c)为 $3U_0$ 超前 $3I_0$ 的角度, 图 3(d)为零序功率。从图上可以看到, 故障后, $3U_0$ 超前 $3I_0$ 约 220° , 零序功率为 -1.7 VA 。 $3U_0$ 和 $3I_0$ 的相位关系和零序功率表明大面变电站侧零序功率方向判为正方向。大面变电站零序电流 $3I_0$ 达到约 1.8 A, 超过整定为 1 A 的“零序方向过流定值”。

分析结论图 4, 线路两侧的零序功率方向均为正方向。对纵联零序保护而言, 线路两侧的零序功率方向均判为正方向, 且零序电流超过了“零序方向过流定值”, 故而纵联零序方向保护动作。

2.2 区外故障纵联零序方向动作的原因

根据系统等效接线图 (图 5、6), 考虑线路互感的影响, 忽略电阻, 根据每回线路的零序电压降和基尔霍夫方程, 可列出以下方程组。

$$I_0 = I_1 + I_2$$

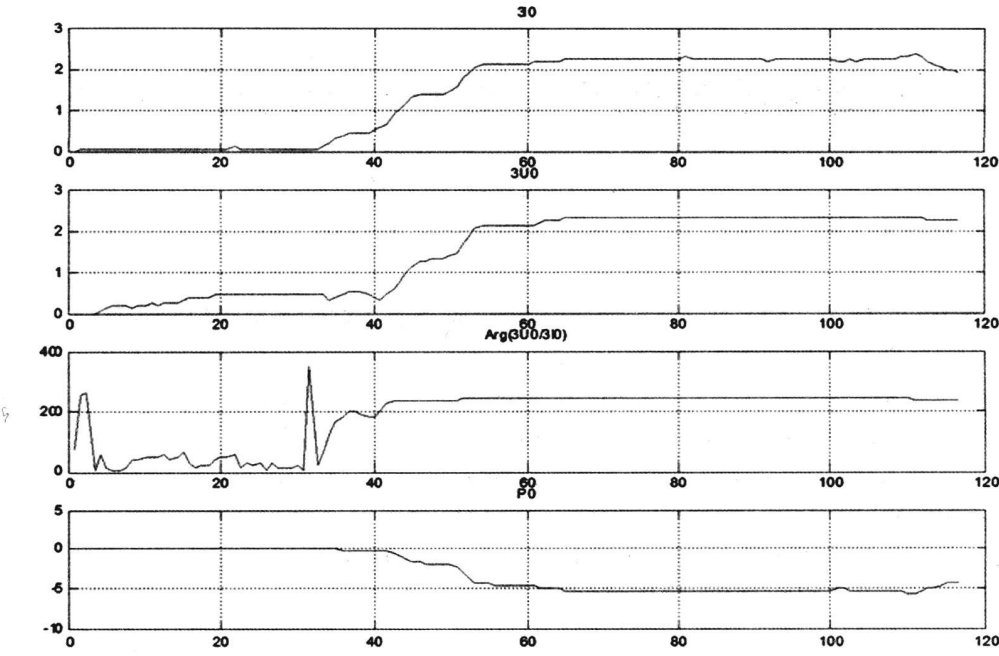


图 2 石羊变电站侧零序故障分量波形分析

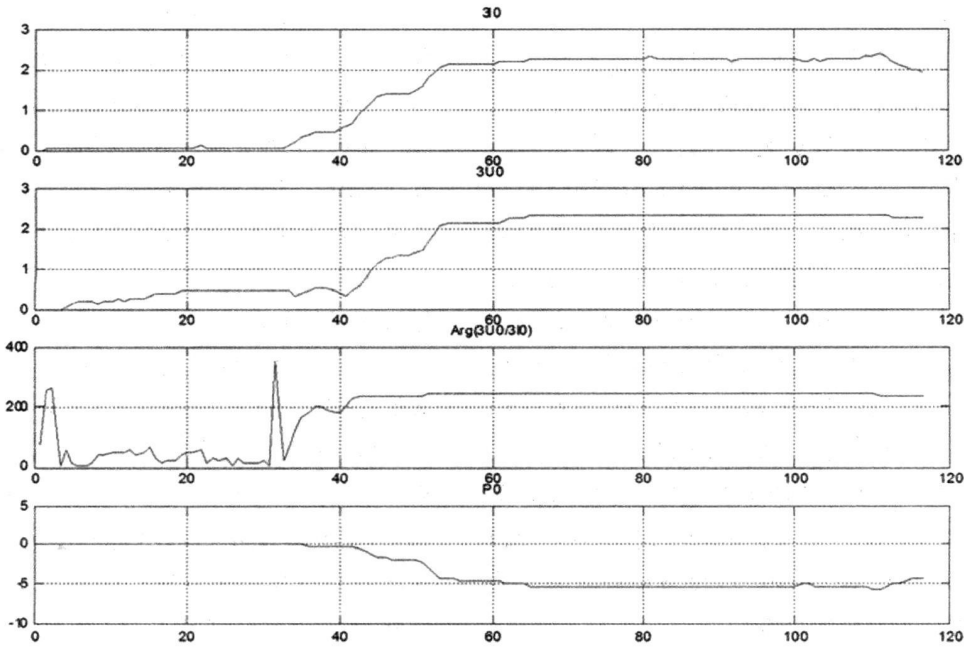


图 3 大面变电站侧零序故障分量波形分析

$$\begin{aligned} U_0 &= (Z_{1L0} + Z_{1f0}) I_1 + Z_{sn0} I_k + Z_{0m} I_1 - U_{m0} \\ &= I_k (Z_{120} + Z_{sn0}) + Z_{0m} I_k \end{aligned} \quad \begin{aligned} U_{m0} &= Z_{sn0} I_k \\ U_{n0} &= Z_{sn0} I_k \end{aligned}$$

对方程组进行求解,可求得:

$$\begin{aligned} U_{m0} &= \frac{U_0 [Z_{sn0} (Z_{2L0} + Z_{sn0}) - Z_{0m} (Z_{sn0} + Z_{1f0})]}{(Z_{2L0} + Z_{1f0} + Z_{sn0} - Z_{0m}) (Z_{1L0} + Z_{sn0}) (Z_{1L0} + Z_{sn0}) + (Z_{sn0} + Z_{0m}) (Z_{1L0} - Z_{0m})} \\ U_{n0} &= \frac{U_0 (Z_{sn0} + Z_{0m}) Z_{sn0}}{(Z_{2L0} + Z_{1f0} + Z_{sn0} - Z_{0m}) (Z_{1L0} + Z_{sn0}) + (Z_{sn0} + Z_{0m}) (Z_{1L0} - Z_{0m})} \end{aligned}$$

由于上式分母大于零,因此,当 $[Z_{sn0} (Z_{2L0} + Z_{sn0}) < Z_{0m} (Z_{sn0} + Z_{1f0})]$ 时, $U_{m0} < 0$, 即线路两侧零序电压出现反相。且 $Z_{sn0} + Z_{1f0}$ 越大,或 $Z_{2L0} + Z_{sn0}$ 越小,或 Z_{0m} 越大,越容易出现零序电压反相。以上比较式中,

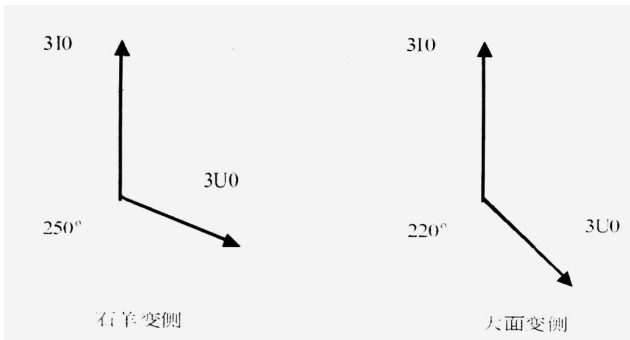


图 4 线路两侧零序方向分析

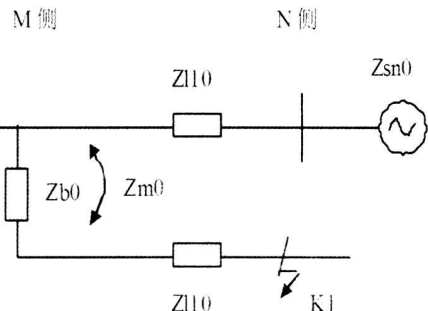


图 5 系统等效接线图

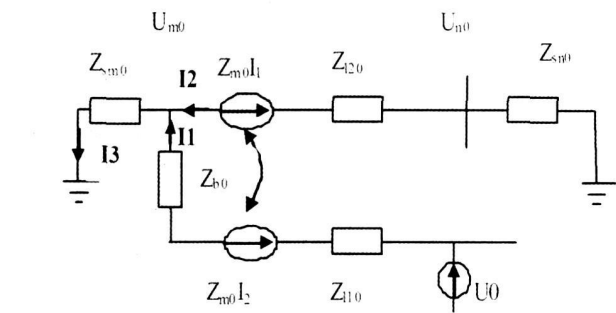


图 6 零序回路示意图

$Z_{sn0} (Z_{l10} + Z_{sn0})$ 可理解为系统中电的联系程度, $Z_{sm} (Z_{sn0} + Z_{l10})$ 可理解为系统中磁的联系程度, 如果磁的联系大于了电的联系, 应会出现线路两侧零序电压反相的结果, 造成纵联零序保护误动。

本案例中发生区外故障时因为相邻线路零序互感 Z_{0m} 的原因, 使大石南线线路上的零序电压和零序电流发生变化, 导致大石南线的零序功率方向发生误判。220 kV 大石南线与 110 kV 面海线之间存在较弱的电气联系和较强的电磁联系, 定量计算显示其电磁联系强于电气联系, 因此当 110 kV 面海线上发生单相接地故障时, 大面变电站侧零序电压出现反相, 与零序电流方向出现“负负得正”的效果, 从而使得线路双方零序方向均判为正方向, 保护误动。

就零序方向继电器来看, 互感引起的效果与线路发生接地故障的效果是一致的, 所不同之处在于: 互感引起的零序变化可以视为零序电压源串接于线路, 是一个纵向故障源, 故障引起的零序变化可以视为零序电流源并接于故障点, 是一个横向故障源; 互感引起的零序电流是穿越性的, 故障导致的零序电流两侧是负的, 均由线路流向母线; 互感引起的零序电压两侧相差 180° , 故障导致的零序电压两侧均为正^[1]。

2.3 负序功率方向分析

在强磁弱电系统下发生单相接地故障时, 负序功率方向能否正确反映出故障点位置呢? 以下根据本案提取的相同故障录波数据进行误动线路两侧的负

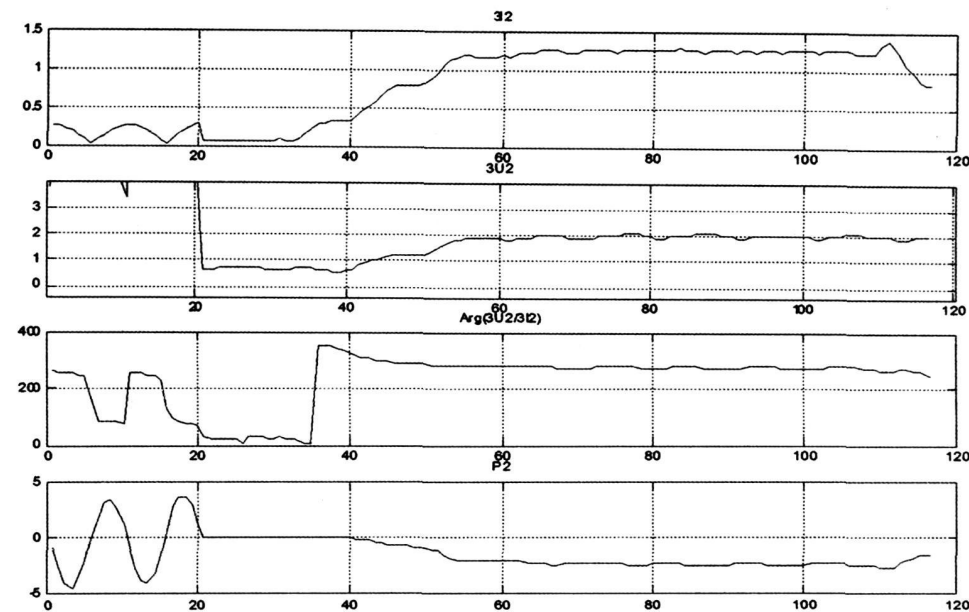


图 7 石羊变电站侧负序故障分量波形分析

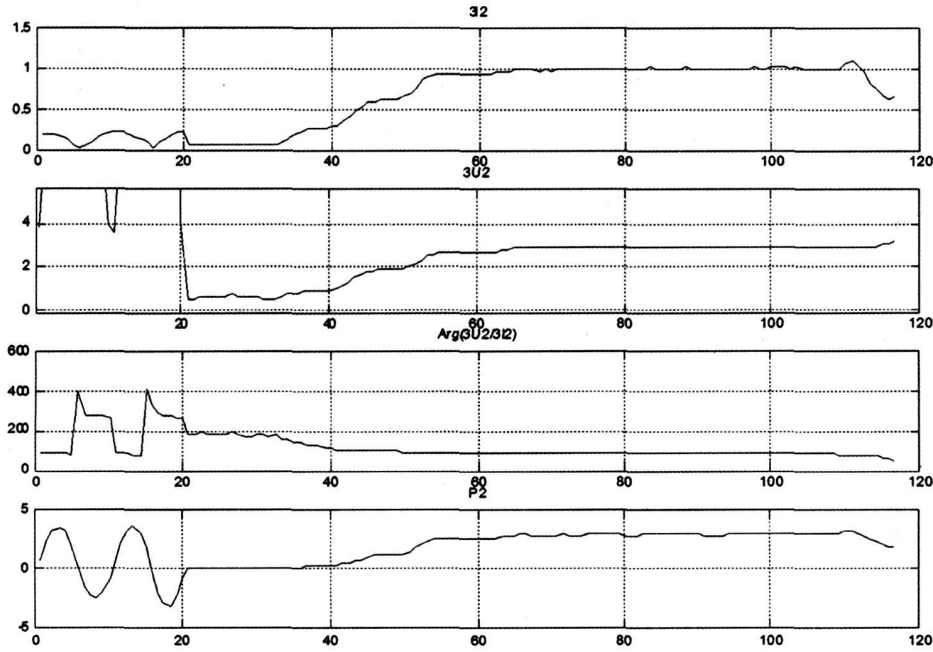


图 8 大面变电站侧负序故障分量波形分析

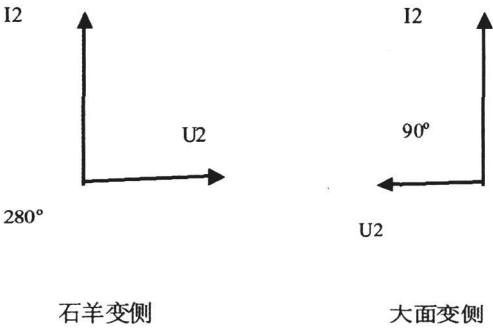


图 9 线路两侧负序方向分析

序故障分量分析。石羊变电站负序电压、负序电流、负序电压电流相位和负序功率如图 7。 $3U_2$ 超前 $3I_2$ 的相位约在 280° 左右, 负序功率 P_2 约为 -2.8 VA 。从 $3U_2$ 超前 $3I_2$ 的相位和负序功率可以看到, 石羊变电站侧负序功率方向判为正方向。大面变电站负序电压、负序电流、负序电压电流相位和负序功率如图 8。 $3U_2$ 超前 $3I_2$ 的相位约在 90° 左右, 负序功率 P_2 。

分析结论: 石羊变电站负序功率方向判别为正方向故障, 大面变电站负序功率方向判别为反方向故障, 上述方向判别表明是发生了区外故障。

3 改进措施

(1) 采用光纤差动保护。由于光纤差动保护是基于基尔霍夫定律原理, 它不再依赖零序功率方向继电器来判别故障方向, 因而可以从根本上避免零序方

向的误判问题。从本案中也可看出, 误动作线路配置的光纤差动保护并未动作。而且, 同纵联距离零序保护相比, 光纤差动保护具有天然判相功能, 对于同杆线路的跨线故障, 有很强的识别功能, 因此采用光纤差动保护是最有效和最完善的措施。但目前典型设计要求超高压线路的两套主保护需要采用不同原理的保护, 能否同时采用双光差保护, 值得进一步研究。

(2) 增加纵联零序保护的负序闭锁条件, 采用零序和负序电气量的综合判别。由于负序功率方向在强磁弱电条件下发生单相故障时依然能够保持方向判别的正确性, 通过在纵联零序方向保护中采用零序和负序电气量的复合判据, 可以提高纵联零序方向保护动作的可靠性, 确保故障时不会发生方向误判。

参考文献

[1] 薛峰. 同杆线路纵联零序保护误动分析及措施研究 [M]. 国网公司继电保护培训教材.
[2] 薛峰. 一起零序互感引起的平行双回线跳闸事故分析 [M]. 国网公司继电保护培训教材.

作者简介:

杨先义 (1973—), 男, 工程硕士研究生, 长期从事继电保护维护工作, 成都电业局生技部。

王 华 (1976—), 男, 大学本科, 成都电业局生技部, 长期从事电力系统管理工作。

陈 漫 (1975—), 女, 大学专科, 成都电业局变电运行管理所, 长期从事变电运行管理工作。

(收稿日期: 2009—06—12)

架空输电导线覆冰及舞动在线监测技术综述

宁 妍^{1,2}, 黄 琦^{1,2}, 张昌华^{1,2}, 曹永兴^{1,3}

(1 电力系统与广域测量与控制四川省重点实验室, 四川 成都 610054;
2 电子科技大学电力自动化工程学院, 四川 成都 610054; 3 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:近年来, 架空输电线路的覆冰和舞动在线监测技术取得了长足的发展。介绍导线覆冰舞动造成的危害、覆冰舞动的产生机理和监测方式以及导线覆冰舞动在线监测技术国内外的应用现状和发展趋势; 重点介绍了光纤传感器在输电导线覆冰舞动监测技术应用中的优越性。

关键词:覆冰; 舞动; 输电导线; 在线监测; 光纤传感器

Abstract In recent years the monitoring techniques on icing and galloping for overhead transmission lines have been progressed actively. The mechanisms of icing and galloping and their possible harms to the real transmission lines are described. The applications status and the development trend of various online monitoring techniques for icing and galloping in transmission lines are also briefly summarized. The superior application prospects of fiber optical sensors are particularly presented.

Key words icing; galloping; transmission line; online monitoring; fiber optical sensor

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2009)06—0067—04

0 前 言

架空输电导线覆冰是指冷的雨滴或降雪落到低于冰点 (0°C) 导线上凝结成覆冰的现象。导线覆冰做为特殊的气象条件, 给架空线路的安全运行造成严重影响。由于覆冰荷载过重, 造成冰闪跳闸、导线舞动和倒塔断线等事故频繁, 直接影响电网的正常运行。架空输电导线舞动是一种低频 ($0.1\sim3\text{ Hz}$)、大振幅 ($>10\text{ m}$) 的振动现象, 且舞动波为驻波, 舞动时全档架空线做大幅度的波浪式的震荡, 并兼有摆动。导线舞动也是威胁电网安全运行的重要因素。导线舞动会发生诸如: 导线电弧烧伤、金具损坏、导线断股、断线、倒塔等事故。2008 年初, 全国电力系统因雪灾造成的直接经济损失为 400 亿元, 占全国雪灾造成损失的 22.3%。其中, 由于覆冰舞动造成输、变电设备损害, 是这次电网受灾比较严重的重要原因之一。此次电网雪灾引起了人们对输电导线覆冰舞动在线监测技术的重视和投入。

1 输电导线覆冰在线监测技术

1.1 导线覆冰监测技术

输电导线覆冰在线监测系统是线路在线监测技术的重要组成部分之一。目前线路覆冰的发现主要是依靠人工巡检, 在高压线路分布的区域地形复杂、环境恶劣, 给巡检工作带来很大困难, 覆冰在线监测系统克服了人工巡检带来的危险及困难, 大大节省了人力、财力。它取代了造价高、维护困难的观冰站; 能准确、详实的记录现场覆冰过程的相关参数信息, 为线路设计、防冰改造提供真实的数据信息参考; 对冰害及时预警, 提高覆冰区电网运行的安全性。从覆冰监测原理及分析方法来说, 可以分为图像法^[1]、称重法^[1]、导线倾角—弧垂法^[2~3], 如表 1 所示。

从表 1 所见, 目前应用较广泛的是称重法。随着光纤传感器 (FOS fiber optical sensor) 技术的不断发展, 光纤传感器在测量导线应力方面的优势不断体现出来。光纤传感器与以电测量原理为基础的传感器有本质区别, 它是一种用光作为敏感信息载体, 用光纤作为传递敏感信息媒质的新型传感器。因此, 光纤传感器具有很好的电绝缘性、很强的抗电磁干扰能力和较高的灵敏度; 可实现不带电的全光型探头; 便于与计算机和光纤传输系统相连实现对被测信号的远距离监控。光纤传感器很适合在输电网的高压、强电磁干扰、强腐蚀等恶劣环境下工作, 且较其他方法而言更能保障测量数据的精确度及监测系统工作的稳

表 1 输电线覆冰在线监测方法分类

分类依据		简介
图像法	机理	从杆塔视频装置中采集图片,利用导线固有几何尺寸,计算出覆冰面积,再换算到等效的覆冰厚度。
	优点	该方法简单易行,能直观地观察气候环境恶劣地区的覆冰情况。
	缺点	摄像头只能观测近处覆冰状况,采集信息量有限,在积雪较厚的气候条件下,摄像头有可能被冰雪覆盖,致使整个监测系统瘫痪,并且现场视频只能固定若干点,无法自由控制。
称重法	机理	将拉力传感器替换球头挂环,测量在一个垂直档距内导线的质量,通过排除法,最终得出覆冰质量,再通过米顿换算为等值覆冰厚度。
	优点	这种方法直接、计算简便、相对较可靠;充分掌握沿线气象条件;可以全面收集和长期积累气象资料。
	缺点	国内各厂家生产的覆冰在线监测系统装置,由于没有统一的设计、制造和试验标准,导致运行的稳定性和测量精度有较大的差异。
倾角-弧垂法	机理	将采集到导线倾角、弧垂等参数,结合输电线路状态方程、线路参数和气象环境参数,计算导线的覆冰重量和覆冰平均厚度等参数。
	优点	可应用输电导线状态方程简化不规则计算。
	缺点	这种方案计算出的覆冰厚度是档内平均值,无法反应覆冰具体分布情况,并且在不均匀覆冰情况下,使用输电线路状态方程计算,误差较大。

定性。

1.2 导线覆冰在线监测应用情况

1997 年,日本科学家通过使用光纤传感器测量导线应变的方法监测导线覆冰情况。在 30 km 的输电线上安装了一套 10 个 FBG (in - fiber bragg grat - ing 光纤布拉格光栅)传感器的复用 FBG 系统,通过附着在线上金属盘的应变来体现负载变化,从而测得导线覆冰重量^[4]。2005 年底,乌克兰国家电力公司安装了 8 套覆冰在线监控系统,通过监测导线重量变化反应导线覆冰情况。在中国,山西、湖南、湖北、广东等地区已部分建成了输电线路覆冰在线监测系统。2006 年 2 月,在山西省忻州重覆冰区,安装了覆冰在线监控系统,该系统通过测量导线荷载变化监测覆冰情况,截至 2007 年 3 月,该系统成功监测了 3 次导线覆冰。湖南省电网公司在 14 个地区安装了 68 个覆冰监测点,初步构建了湖南电网输电线路覆冰在线监测网络。该系统通过安装于杆塔上的传感器采集数据,监测冰情;湖北省电网公司采用高性能摄像机拍摄覆冰现场图像监测导线覆冰情况。在 2008 年冰害的预警、监测中导线覆冰在线监测系统发挥了重要作用。2009 年初,广东电网公司,应用称重法原理结合摄像机图像采集技术,在韶关坪石和清远连州地区建立了导线覆冰在线监测系统网。南方电网公司分别在贵阳局、柳州局和梧州局所辖的易覆冰区域线路上安装了 5 套监测终端,构成了导线覆冰在线监测系统网。完善的输电线路覆冰在线监测系统,是降低覆冰灾害损失的有效手段之一。

2 输电导线舞动在线监测技术

输电导线舞动是一个包含众多因素的复杂现象,它的研究涉及到空气动力学、耦合振动学、气象学、力学等多学科。输电导线舞动监测系统应用实时监护原理,监测输电导线舞动时的气候条件、获取舞动信息,实时地远程监测输电导线的舞动情况。随着国内外科学家、学者对导线舞动现象的研究,导线舞动在线监测技术取得了很大成就。

2.1 国内外研究导线舞动产生机理

自 20 世纪 30 年代起,国外学者开始对导线舞动进行了大量的实验和理论研究,提出了 Den Hartog 的空气动力理论^[5]、O. Nigol 扭转舞动理论^[6, 7, 8]和惯性耦合机理^[9],其他的舞动理论都是在这些理论的基础上发展起来的,例如日本的扭转反馈机理等。在此基础上,中国学者提出的低阻尼系统共振机理^[10]以及动力学稳定性机理^[11]。这些机理从不同角度阐述了舞动发生的机理,如表 2 所示。

针对不同的输电导线舞动机理,人们建立了不同的输电导线舞动的数学模型。其中,根据 Den Hartog 垂直舞动理论,建立了单自由度垂直振动模型;根据 O. Nigol 扭转舞动理论,将垂直振动和扭矩相结合提出了两自由度模型,由于两自由度模型不能很好的反应舞动特性,继而人们提出了三自由度模型,其中考虑水平、垂直和扭转的三自由度模型是目前考虑较全面的舞动模型^[9, 12, 13, 24]。不同的数学模型对应着不同的求解算法,这对导线舞动在线监测技术产生了一

表 2 国内外关于导线舞动产生机理的解释

舞动产生机理		简 介
Den Hartog 垂直舞动理论	产生机理	当风吹向覆冰所致非圆截面时会产生升、阻力,只有当升力曲线斜率的负值大于阻力时,导线截面动力不稳定舞动才能产生,从而诱发导线舞动。
	优、缺点	该理论仅考虑了偏心覆冰导线在风激励下的空气动力特性,忽略了导线扭转的影响。试验表明,导线舞动也会发生在升力曲线正、负斜率区域 ^[17] ,这种现象不能用该理论解释。
O. Nigol 扭转舞动理论	产生机理	当覆冰导线的空气动力扭转阻尼为负且大于导线的固有扭转阻尼时,扭转运动成为自激振动,当扭转振动频率接近垂直或水平振动频率时,横向运动受耦合力的激励产生一交变力,在此力作用下导线发生大幅度的舞动。
	优、缺点	该理论考虑了偏心覆冰导线在风激励下的空气动力特性及导线扭转的影响;但该理论不能解决薄、无覆冰舞动等现象。
惯性耦合机理	产生机理	该理论认为,横向运动和扭转运动可能都是稳定的,只是由于偏心惯性作用引起攻角变化,从而使相应的升力对横向振动形成正反馈,加剧了横向振动,并逐渐积累能量,最后形成大幅度舞动。
	优、缺点	这种类型的舞动只会发生在偏心质量位于背风面的场合,具有一定的局限性。
低阻尼系统共振机理	产生机理	该机理认为,在风的作用下,整个架空输电线路各组成单元都会产生不同程度的振动;在特殊气象条件下,导线气动阻尼、结构阻尼降低,其振动会加剧,并激发线路产生系统共振,即形成舞动。
	优、缺点	该理论能解释传统舞动原理不能解释的许多舞动现象,如薄、无覆冰舞动等,但该理论缺乏试验研究,有待实践验证。
动力学稳定机理	产生机理	只有不稳定振动才能产生象舞动这样大的振幅。因此,可将舞动看作是一种动力不稳定现象。
	优、缺点	稳定性机理考虑了垂直、水平、扭转三个分量,并考虑了三者的互相耦合,从而可以模拟各种类型的舞动。原则上,稳定性舞动机理可以包括现有的各种舞动机理,换言之,现有的各种舞动机理可以看作稳定性舞动机理的某种特例。

定的影响。

监控中心计算机担任着数据保存、数据处理、结果显示等任务。根据输电导线舞动的不同数学模型,对测量得到的传感器数据,现在提出了 6 种处理方法。文献 [14]从输电线垂直、扭转舞动机理出发,建立了输电线路双向稳定的两自由度模型,应用动力学和控制论稳定判据,对输电导线舞动方式进行分析;文献 [15]建立了导线舞动的水平、垂直、扭转三自由度模型,通过摄动法判断稳定性;对同一数学模型文献 [16]应用 Taylor 变换对其进行分析;文献 [17]介绍了通过风能与导线系统损耗之间的能量守恒关系,估算舞动最大振幅的方法;文献 [18]利用梁单元模

拟输电导线,通过坐标迭代和 Newmark 法进行静力、动力响应分析,应用有限元的思想进行舞动过程分析;在文献 [19]中,介绍了神经网络算法在处理输电线舞动数据中的应用,该方法基于 B—P 算法的反传式神经网络结构,通过实现从输入到输出的非线性变换,解决导线舞动的识别问题。

2.2 导线舞动在线监测技术

目前,导线舞动监测技术主要采用两种方式:一种是通过视频采集技术来实现对舞动监测;另一种是通过传感器采集输电导线舞动参数,然后通过计算机建模处理,分析计算线路舞动情况。两种监测方式原理对比如表 3 所示。

表 3 输电线舞动在线监测方法分类

监测方法		简 介
视频监控法	视频监控 ^[20]	原理 根据生产输电线坐标系和安装摄像头以后的新坐标系之间的坐标平移参数和零度图像拟合参数及相关算法推导出舞动旋转角度。 涉及技术 数字视频压缩技术、无线通信数据传输技术、新能源及低功耗应用技术。
	加速传感器 ^[21]	原理 根据加速度和位移的关系计算出导线舞动的振幅数据,将此数据与监控机上数据库的数据比较判断是否应该发出预警。 技术方案 加速度传感器将舞动信号转化成电信号,并由单片机内部集成的 AD 转换器进行数字化采集,再进行简单的信号处理,然后将测量数据通过 GSM 模块将测量数据无线传输到监控机上进行综合评判。
传感器参数采集法	光纤传感器 ^[22]	原理 将多个光纤传感器均布在输电导线上,构成准分布式光纤传感器网络,荷载变化经金属板传入光纤光栅,将采集的应力、温度信息传输回计算机控制中心。 涉及技术 用波分复用技术对光栅反射信号进行解调,同时采用时分复用技术将采集数据通过无线网络设备传输到计算机监控中心。

从表 3 可见,和输电导线覆冰在线监测技术一样,由于光纤传感器的突出优点,它在输电导线舞动监测中得到应用。较视频法而言,光纤传感器法采用时分复用技术克服了数据传输量小缺点,且分布式光纤传感器系统可以采集更为全面的舞动信息,更易控制;较加速度传感器法而言,光纤传感器,可以同时采集应力和温度信息,且不受电磁干扰,保证了信号的精确度和传输速率。

2.3 导线舞动在线监测现状

在挪威,研究人员在 3 股长为 160m 的平行输电导线上,分别安装 3 个光纤传感器,分别测量了无覆冰情况下,微风振动和大风振动时,输电导线舞动的温度和应力数据,观测导线舞动波形^[22]。在国内,导线舞动在线监测技术应用较少,现有的大都处于实验室研发状态,有待实际输电线路的考验。

3 架空输电导线在线监测系统中其他关键技术

对导线舞动在线监测技术的研究主要受 2 个技术因素制约,一是线路上监测装置的电源问题;二是监测数据的传输通信问题^[23]。

3.1 电源

对于传感器而言,在信息接受/发送终端都是需要电源的。现在设计的输电线舞动监测终端多采用太阳能蓄电池或自充电蓄电池系统为系统的电源。一种方案是自取电蓄电池系统,即利用市电供电或者直接把输电线的高压电变成所需电源对电池进行充放电;另一种是太阳能电池板充放电电源系统,该电源系统是一个独立的自给自足电源系统,不受市电或输电线路电源影响,但是太阳能蓄电池的转化效率较低,供电时间短,受天气影响较严重。在信号传输过程中,以电为基础的传感器采集到的数据传输需要电源供电的,由于传输通路存在一定阻抗,信号会有一定的衰减,影响了测量的精度;而以光为媒质的光纤传输信号不需要电源,且由于光的传播速度快,不受电磁干扰,保证了远距离测量数据的精度。

3.2 数据传输方式

现有监控数据传输方式有视频基带传输、宽频共缆传输、网络传输、微波传输、双绞线平衡传输、光纤传输六种传输方式。视频基带传输是指通过同轴电缆直接传输模拟信号;宽频共缆传输是指采用调幅调制、伴音调频搭载、FSK 数据信号调制等先进技术,可

将四十路监控图像、伴音、控制及报警信号集成到“一根”同轴电缆中双向传输;网络传输是指将音视频及其它信号数据压缩通过 GSM (Global System for Mobile Communications 全球移动通讯系统)无线数据传输;微波传输是指采用调频调制或调幅调制的办法,将信号搭载到高频载波上,转换为高频电磁波在空中传输;双绞线传输(平衡传输)是指将监控信号处理通过平衡对称方式传输;光纤传输是指通过把信号转换为光信号在光纤中传输。其中网络传输是近几年的新兴产业,以起无线传输、数据压缩技术及基于强大的网络构架,使监控数据传输变更加方便,迅速。

4 结 论

经过多年的研究和实践,架空输电导线覆冰舞动在线监测技术的研究及开发非常迅速。随着光纤传感器技术的发展及分布式光纤传感器网络的兴起,使输电导线覆冰舞动在线监测系统有了新的发展,分布式光纤传感器网络可同时获得被测量的空间分布状态和随时间变化的信息,可在整个光纤上对环境参数进行连续测量。且由于光纤传感器能与光纤遥测技术的内在相容性等优点,使架空导线覆冰舞动监测系统具有更好的实时性、在线性、可靠性。随着光纤传感器的成本下降,必将在架空输电导线覆冰舞动监测系统中得到更为广泛的应用。

参考文献

- [1] 张予. 架空输电线路导线覆冰在线监测系统 [J]. 高压技术, 2008, 34(9): 1992—1995.
- [2] 刘和云, 周迪, 付俊萍, 等. 导线雨淞覆冰预测简单模型的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 44—47.
- [3] 王阳光, 尹项根, 游大海, 等. 基于无线传感器网络的电力设施冰灾实时监测与预警系统 [J]. 电网技术, 2009, 33(7): 14—19.
- [4] Ogawa Y, et al. A multiplexing loaded monitoring system of power transmission lines using fibre Bragg grating [A]. Proc. of the Optical Fibre Sensors Conf. (OFS 212) [C]. Williamsburg, USA, 1997, 468—471.
- [5] Den Hartog. Transmission line vibration due to sleet [J]. AIEE Transactions, 1932, 1074—1086.
- [6] O. Nigol. Conductor galloping Part I—Den Hartog mechanism. IEEE Trans PAS, 1981, 100(2): 708—719.

(下转第 94 页)

电力系统运行状态分析和识别方法研究	程向辉 刘俊勇 杨嘉湜 等 (20)
考虑分布式电源的智能电网备用市场交易模型	张国芳 吕 林 刘俊勇 (24)
超导储能技术对智能电网电压稳定的影响	徐 建 邱晓燕 汪兴旺 (29)
超导储能技术在电力系统中的应用与展望	李 勇 刘俊勇 胡 灿 (33)
传统变电站检修向数字化变电站状态检修转变	刘 阳 刘俊勇 张建明 (38)
基于 Google Earth 的电网信息可视化研究及实现	黄 媛 刘俊勇 何 迈 等 (43)
巡线机器人的研究综述及面向智能电网技术的一些探讨	佃松宜 翁 桃 廖云杰 等 (47)
数字化变电站网络选型设计	罗小东 郑 旭 舒 勤 (52)
四川省电力公司应急通信建设管理概况及思考	邓 创 肖行谏 (55)
光伏发电的政策与技术浅析	杜新伟 (61)
提高初期特高压互联电网稳定性措施初探	丁理杰 刘 洋 杜新伟 等 (64)
对智能电网概念的理解与四川发展智能电网的思考	杜新伟 (68)
典型接线方式下智能配电网自愈功能实施的探讨	都健刚 (71)
供电企业建设坚强智能电网新技术应用策略的探讨	郑 毅 (73)
智能电网初探	赖民昊 刘 芸 (77)

(上接第 70 页)

[7] O. Nigol Conductor galloping Part II—Torsional mechanism. IEEE Trans PAS 1981, 100(2): 699—707.

[8] O. Nigol G. J. Clarke Conductor galloping and control based on torsional mechanism [J]. IEEE Paper 1974, 16 (2): 31—41.

[9] 郭应龙, 李国兴, 尤传永. 输电线路舞动 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

[10] 蔡廷湘. 输电线路舞动新机理研究 [J]. 中国电力, 1998, 31(10): 62—66.

[11] 尤传永. 导线舞动稳定性机理及其在输电线路上的应用 [J]. 电力设备, 2004, 5(6): 13—17.

[12] 陈晓明, 邓洪洲, 等. 大跨越输电线路舞动稳定性研究 [J]. 工程力学, 2004, 2, 21(1), 56—60.

[13] Y. M. Desai P. Yu N. Popplewelland · H. Shah Computer & Structures 1995, 57, 3): 407—420.

[14] 童国力, 韩富春. 输电导线防舞动的双向稳定性分析 [J]. 太原理工大学学报, 2007, 38(6).

[15] Desai Y M. Shah Y A H. Popplewill N. Perturbation—Baxed Finite Element Analyses of Transmission Line Galloping Journal of Sound and Vibration 1996, 191(4): 469—489.

[16] 梁绍宏. 高压架空输电线路舞动建模及计算机仿真 [D]. 华北电力大学, 2003.

[17] 卢明泉, 尤传永. 架空输电线路分裂导线舞动的非线性分析.

[18] 王丽新, 杨文兵, 杨新华, 等. 输电线路舞动的有限元分

析 [J]. 华中科技大学学报, 2004, 21(1)

[19] 巫世晶, 向农. 神经网络在输电线导线舞动监测诊断系统中的应用 [D]. 武汉水利电力大学, 1998.

[20] 毛玉星, 张占龙, 邓军, 等. 架空输电线横向舞动角度仿真计算 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(23).

[21] 张帆, 熊兰, 刘钰. 基于加速传感器的输电线舞动检测系统 [J]. 电测与仪表, 2009, 46(517).

[22] L. Bjerkar Application of Fiber—Optic Bragg Grating Sensors in Monitoring Environmental Loads of Overhead Power Transmission Lines APPLIED OPTICS Vol 39, No 4, 2000.

[23] 黄新波, 孙钦东, 张冠军, 等. 在线监测和 GIS 用输电线路管理系统 [J]. 电网技术, 2007, 33(6): 118—122.

[24] R. D. Blevins W. D. Wan The Galloping Response of a two—Degree—of—Freedom System. Journal of Applied Mechanics vol 41. No 4. 1974.

作者简介:

宁 妍 (1984—), 女, 硕士研究生, 研究方向电力系统自动化。

黄 琦 (1976—), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为电力系统控制、大规模电力系统分布式并行计算和电力系统传感器网络等。

张昌华 (1975—), 男, 博士, 副教授, 目前研究反向为电力系统优化及控制、智能算法。

曹永兴 (1963—), 男, 高级工程师, 研究方向高压输电导线架设及监测技术。

(收稿日期: 2009—09—02)

电力系统电压稳定性分析综述

赵周芳, 李华强, 张希猛

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:电力系统电压稳定性是电力工程界的研究热点之一。首先介绍了分岔理论在电压稳定性分析中的应用。其次,给出了电压稳定分析中常用的静态指标,阐述了各指标的特点。最后,介绍动态电压分析方法,并对电压稳定性分析进行展望。

关键词:电压稳定性;分岔理论;静态电压稳定性指标;动态电压稳定性

Abstract: The voltage stability of power system is a major focus of research in power engineering. Firstly, the application of bifurcation theory to the analysis of voltage stability is introduced. Secondly, the used steady-state voltage stability indices are presented and their characteristics are described in detail. Finally, the dynamic voltage analysis methods are introduced and an outlook for the voltage stability analysis is given.

Key words: voltage stability; bifurcation theory; steady-state voltage stability index; dynamic voltage stability

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0071-04

0 引 言

19 世纪 70、80 年代法国、瑞典、日本等国家相继发生电压崩溃性事故,这些以电压崩溃特征的电网瓦解事故每次均带来巨大的经济损失,同时也引起了社会的极大混乱。电压稳定问题已经成为国际工学界关注的焦点。

电力系统电压稳定性问题经过几十年的发展已经有很大进步,早期人们简单地将电力系统电压失稳问题看作系统过载引起,从而将其视为静态问题或者认为系统动态对电压稳定的影响很慢。但是,电力系统本质上是一个非线性动力学系统,电压失稳究其本质是系统的动态行为,涉及到了各种元件的动态特性。因此,电压稳定问题可分为静态电压稳定性与动态电压稳定性,两者研究的角度和目的不同。

理论和实践已证明分岔理论是分析研究非线性动态系统结构稳定性的有效工具。电压稳定的改变实质是一种从稳态走向分岔的过程,其外在表现为电压幅值的振荡失稳或瞬间大幅度跌落。

目前,对于静态电压稳定性,学者们提出了各种指标及其方法来评估系统的静态电压稳定性。但是对于动态电压稳定性问题,由于各种元件动态模型的建立和其相互影响的复杂性及其所导致的求解过程中的“维数灾”问题,动态电压稳定性还有待进行进

一步的研究。

下面首先阐述了电力系统电压稳定性与分岔理论。其次,论述了静态电压稳定及相应的指标和计算方法。其后,对动态电压稳定性的研究方法及研究现状进行了概括。最后,结论部分给出电压稳定研究目前存在的一些问题,并对以后的工作做出展望。

1 电压稳定性与分岔理论

Kwatny 和 Pasrija 等人首次将分岔理论引入电压稳定性分析中,在文献 [1] 中他们应用分岔理论研究了电力系统微分一代数模型下的多平衡点稳定性问题,为之后分岔理论在电压稳定性问题中的应用奠定了基础。

1.1 电力系统的静态分岔

在电压稳定的静态分岔分析中,一般不考虑元件和控制的动态特性,此时的平衡点方程就是潮流方程。

1.1.1 鞍结分岔

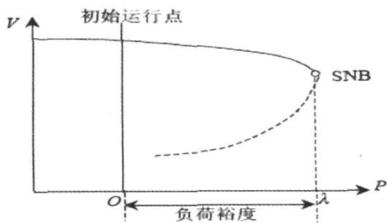


图 1 鞍结分岔

图 1 为鞍结分岔 (Saddle Node Bifurcation, SNB), 随着负荷水平的增加, 系统电压水平开始降低, 系统在 SNB 处发生电压崩溃, 点 SNB 即为鞍结分岔点。曲线的上半部分为稳定区, 下半部分为不稳定区。

1.1.2 极限诱导分岔

1992 年 Ian Dobson 在文献 [2] 提到了另一种分岔现象——极限诱导分岔 (Limit Induced Bifurcation, LIB)。如图 2 所示, 点 O 为初始运行点, 随着负荷的增加, 系统的电压水平逐渐降低, 发电机会随之逐渐增加无功出力, 当系统中某台发电机到达无功极限时, 系统会突然发生电压崩溃, 这是因为系统的运行点位于该发电机 PV 曲线下半部的不稳定区而引起了系统的突然电压崩溃。

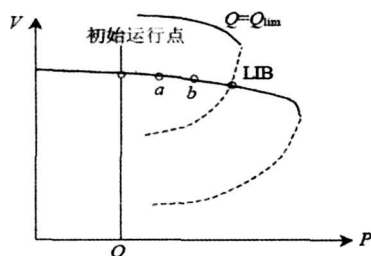


图 2 极限诱导分岔

1.2 电力系统的动态分岔

动态分岔研究系统的动态行为, 需要考虑元件及控制的动态属性对电压稳定的影响, 在各种动态分岔中 Hopf 分岔是最基本的、最具代表性的分岔形式, 1983 年瑞典电网发生的电压崩溃事件就与 Hopf 分岔有关 [3]。目前动态分岔的研究范围已拓展到倍周期分岔 [4]、环面分岔 [5]、同宿及异宿分岔现象。

分岔理论在电压稳定性问题的研究中已得到越来越广泛的应用, 其地位日显重要性 [6]。相对而言, 目前的很多研究都是针对静态分岔, 对动态分岔的研究相对较少。

2 静态电压稳定性指标

静态电压稳定只与代数方程式有关, 故它比动态研究更有效率。静态电压稳定性指标应能回答如下问题: 当前运行点到崩溃点的接近程度, 即当前运行点到崩溃点还有多大裕度, 哪些支路为关键支路? 哪些发电机是关键发电机? 哪些节点对功率注入最敏感? 发生静态电压失稳时其机理是什么? 发生电压失稳问题时要采用何种措施? 采用哪种措施更有效?

通过静态分析指标运行人员可以得到当前运行点到崩溃点的距离。这里是对静态电压稳定性指标进行总结概括。

2.1 负荷裕度指标

负荷裕度指标直观易与理解, 线性度好, 可以较方便的计及过渡过程中各种因素, 因此受到广泛的重视。负荷裕度指标是一个精确指标, 它不依赖于特别的系统模型, 仅需要一个静态模型, 尽管它可以用于动态模型, 却并不依赖动态细节。一旦通过计算求得负荷裕度后, 就可以容易的计算负荷裕度对任何系统参数和控制参数的灵敏度。

2.2 灵敏度指标

灵敏度指标以潮流方程为基础, 利用系统中某些量的变化情况来研究系统的电压稳定性, 灵敏度指标物理概念明确, 在潮流计算的基础上只要少量的额外计算便可以得到, 因此在静态电压稳定中得到了广泛的应用。但是, 大部分灵敏度指标并未计及负荷动态的影响, 不能计及系统的非线性以及物理约束的影响, 不能反映当前运行点与临界点的距离 [7]。

2.3 最小奇异值 特征值指标

当系统运行到达鞍结分岔负荷极限时, 潮流雅可比矩阵奇异, 且有一个零奇异值和一个零特征值。因此潮流雅可比矩阵的奇异度可以作为电压稳定性指标, 即用潮流雅可比矩阵的最小奇异值 特征值来作为电压稳定性指标, 其缺陷在于对崩溃点的预测度较差。

2.4 电压不稳定接近指标 VPI

电压不稳定接近指标 VPI (Voltage Instability Proximity Index) 是在潮流多解 [8] 的基础上提出来的, 通过一对相关邻近潮流解之间的距离来判断电压稳定性。

2.5 二阶性能指标

电压崩溃是强非线性现象, 当发电机或传输设备达到极限时, 大部分已提出的指标值将发生快速突变, 不能给出当前运行点与崩溃点的接近程度, 文献 [9, 10] 在保留非线性潮流的基础上提出了二阶指标, 克服一阶指标非线性的缺陷。二阶指标为准线性指标, 主要内容是如何寻找一种具有“二次型”特性的指标函数。

2.6 无功裕度指标

在系统发生鞍结分岔的情况下, 通过计算求得最大无功负荷与基态负荷的差得到最大无功裕度。文

献 [11] 通过优化的方法得到最大无功裕度对系统鲁棒性进行全局度量并计及了发电机的无功极限。

2.7 U/U_0 指标

U 为潮流或状态估计得到的节点电压, U_0 是对同一个系统状态所有负荷为 0 解潮流方程得到的节点电压。每个节点的 U/U_0 提供系统电压稳定性指示, 并判断弱节点和预防地点, 但该指标对系统参数呈现高度非线性特性, 不能准确预报电压崩溃的接近程度。

2.8 局部指标

局部负荷指标假定在其他节点负荷维持不变的情况下, 某节点以一定的功率因素增加负荷, 从起始点到 PV 曲线鼻端的相对距离; 负荷节点电压稳定性就地安全指标利用简化系统的潮流方程解的条件判断电压安全性。由于安全控制采用的是就地量, 因此需要利用最新的快速的数据采集和处理技术才能实现, 如文献 [12], 基于支路等值电路推导得到的静态电压稳定指标, 并利用 GPS (Global Position System) 的向量测量单元测得当地数据, 判断节点的稳定性, 用于大型输电网的静态电压在线检测。

有关电压稳定性的指标有很多, 每个指标都有其各自的特点及应用范围, 很难明确地说哪一种指标好。需要针对各个实际的系统找出一种合适的电压稳定指标^[13]。上述提出的各种指标均适用于鞍结分岔, 针对极限诱导分岔的指标相对较少, 仅有负荷裕度指标, 其计算方法也仅有连续潮流法^[14~17]以及优化方法^[18]。

3 动态电压稳定性分析

动态电压稳定性分析根据系统的 DDAE (Difference-Differential-Algebraic Equation) 方程, 计及了元件的动态特性, 如时域仿真法, 在考虑系统的非线性元件动态特性的前提下, 采用数值积分的方法得到电压及其他量随时间变化的曲线。

3.1 暂态电压稳定性分析

电力系统暂态稳定研究的主要解决问题是: 快速准确地判断系统在受到大扰动以后能否保持暂态电压稳定。时域仿真是分析电力系统暂态电压稳定性和校验其它分析方法正确性的关键手段, 但是其计算量巨大。文献 [19~21] 以简单系统为例, 讨论了电力系统暂态电压稳定性的基本概念仿真, 研究了电压

崩溃发生时的基本特征, 并研究了快速判断电力系统暂态电压稳定性的方法。文献 [22] 基于等面积定则, 提出暂态电压稳定裕度指标, 在该指标的基础上求解故障临界切除时间以及给定故障切除时间相应的极限动态负荷。文献 [23] 在电压稳定域二阶逼近理论的基础上提出了暂态电压稳定判据, 通过简单系统仿真实例证明该失稳判据所具有的速度快、准确度高、易于计算机实现以及工程实用性高的特点, 但该判据仅给出定性分析, 不能给出电压稳定裕度。针对这一问题, 文献 [24] 运用电压稳定域二阶逼近理论提出暂态电压稳定域度指标, 但该方法仅适用于简单系统, 至于大规模系统的需要进一步加以研究。在实际的电力系统中暂态电压失稳将伴随着暂态功角失稳, 如何将两者纳入统一时间框架进行分析还需更深入的研究。采用基于动态元件建模的方式^[21, 22, 25], 通过仿真模拟电压崩溃发生以及发展过程, 计算量较大, 机时耗费较高, 距离实时在线评估还有很大一步距离。随着中国“西电东送, 区域联网”能源发展战略的实施, 采用交直流输电已成为必然趋势, 文献 [26、27] 对暂态电压稳定的影响因素、分析方法、稳定判据等进行了介绍, 研究了实际系统暂态电压稳定的一些现象以及采取何种措施更有利于保持交直流混联系统暂态电压稳定性。

3.2 中长期电压稳定性分析

中长期电压稳定研究的理论依据为准稳态分析以及多时标仿真, 目前对中长期电压稳定的研究主要集中在计算效率和准确度等方面。文献 [28] 提出 EXSTAB 程序 (Extended Time-Scale Stability Analysis Program) 模拟中长期扰动, 文献 [29] 中 Van Cutsem 提出用准稳态平衡方程代替暂态过程, 即准稳态近似。文献 [30] 结合二分搜索技术和准稳态模拟分析求取稳定运行极限, 可以满足实时应用的要求。文献 [31] 对准稳态仿真基本原理的基础上提出了适用于不同系统的 QSS (Quasi-steady simulation) 仿真方法, 指出该仿真方法在在线和离线应用方面均有很好的应用前景。文献 [31、33、34] 均是基于准稳态分析方法的对中长期电压稳定动态元件的建模以及快速仿真算法所进行的研究, 文献 [35] 对中长期电压崩溃过程的事故特征以及崩溃机理进行了分析, 文献 [34] 提出以有载调压变压器变比为参数的连续潮流法, 并对连续潮流法的步长控制加以改进, 以得到更快的运算速度。

中长期电压稳定以及暂态电压稳定研究已有较大进步,但是针对暂态电压稳定以及中长期电压稳定的建模还存在着很多问题,在电压失稳事故过程的仿真研究中,很难将暂态电压失稳过程和中长期电压失稳过程在事故特征和时间框架上割裂开来。因此研究电压失稳过程,需要对故障扰动的全过程进行仿真,而不是仅采用暂态过程仿真,否则可能使结果偏于乐观^[31]。此外,如何建立适用于电压稳定分析的动态负荷模型^[35]有大量的工作要做。

4 结论及展望

电压稳定性研究已取得一些进步,但是还有一些问题有待解决。

第一,电压稳定性问题的实时安全监视和电压崩溃的在线预防措施,通过预想故障对故障后运行状态的稳定性进行判别,以供运行人员采取必要的预防控制措施,快速而且准确度高的解析方法有待进一步加以研究。

第二,目前对动态分岔理论的研究尚不深入,有待进一步的研究。

第三,电压崩溃与电力系统的模型有很大关系,对电力系统非线性元件进行动态建模需要进一步的研究。

参考文献

- [1] Harry G. Kwak, Ann K. Pasirja, Leon Y. Bahar. Static Bifurcations in Electric Power Network: Loss of Steady-state Stability and Voltage Collapse[J]. IEEE Trans On Circuits and Systems, 1986, 10(33): 981—991.
- [2] Ian Dobson, Liming Liu. Voltage Collapse Precipitated by the Immediate Change in Stability When Generator Reactive Power Limits Are Encountered[J]. IEEE Trans on Circuit and System, 1992, 39(9): 762—766.
- [3] E. H. Abed, C. Alexander, H. Wang, A. M. A. Hamdan, H. C. Lee. Dynamic Bifurcations in a Power System Model Exhibiting Voltage Collapse[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 1993, 3(5): 1169—1176.
- [4] 张强,王宝华,杨成梧. 电力系统的倍周期分岔[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(11): 6—9.
- [5] 贾宏杰,余贻鑫,李鹏. 电力系统环面分岔与混沌现象[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 6—10.
- [6] 郭志炜,胡国根,韩祯祥. 基于分叉理论的电力系统电压稳定性分析[M]. 北京:中国电力出版社, 2005.
- [7] 袁骏,段献忠,何仰赞,石东源. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述[J]. 电网技术, 1997, 21(9): 7—10.
- [8] Yasuo Tanura, Koji Sakamoto, Yukihiko Tayama. Voltage Instability Proximity Index (VPI) Based On Multiple Load Flow Solutions in Ill-conditioned Power Systems[J]. Proceedings of the 27th Conference on Decision and Control, 1988, 2114—2119.
- [9] A. Berizzi, P. Finazzi, D. Dosi, P. Marannino, S. Corsi. First and Second order methods for voltage collapse assessment and security enhancement[J]. IEEE Trans On Power System, 1998, 13(2): 543—551.
- [10] Alberto Berizzi, Yong-Gang Zeng, Paolo Marannino, Alessandro Vaccarini, Pierangelo Scapellini. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 81—87.
- [11] T. Van Cutsem. A Method to Compute Reactive Margins with Respect to Voltage Collapse[J]. IEEE Power Engineering Review, 1991, 51.
- [12] C. Liu, K. T. Vu. Analysis of tap-changer dynamics and construction of voltage stability regions[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems[J]. 1989, 36(4): 575—590.
- [13] 周双喜,姜勇,朱凌志. 电力系统电压稳定性指标述评[J]. 电网技术, 2000, 25(1): 1—7.
- [14] Naoto Yorino, Hua-Qiang Li, Hiroshi Sasaki. A Predictor/Corrector Scheme for Obtaining Q-Limit Points for Power Flow Studies[J]. IEEE Trans on Power System, 2005, 20(1): 130—137.
- [15] 马冠雄,刘明波,王奇. 一种识别静态电压稳定分岔点的混合方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 17—20.
- [16] 王奇,刘明波. 一种识别极限诱导分岔点的改进连续潮流算法[J]. 华南理工大学学报, 2008, 36(2): 133—138.
- [17] 赵晋泉,江晓东,张伯明. 一种静态电压稳定临界点的识别和计算方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 28—32.
- [18] 李华强,刘亚梅, N. Yorino. 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 56—60.
- [19] 段献忠,何仰赞,陈德树. 电力系统暂态电压稳定的基本概念和仿真分析[J]. 华中理工大学学报, 1995, 23(4): 21—24.
- [20] 段献忠,何仰赞,陈德树. 电力系统暂态电压稳定性的快速判断[J]. 华中理工大学学报, 1996, 24卷增刊(II): 46—49.

(下转第 85 页)

全运行指标可视化显示方法,如配网可靠性评估可视化等,从数理统计与数据挖掘等角度为调度员提供更多决策支持。③加入配网的经济性分析模块,对泸州电网运行效益进行可视化展示,同时生动展示网损、检修等信息。

5 结束语

泸州电网实时可视化分析与预警系统极大地提升了泸州电网调度监视控制的装备水平。不仅有利于电网安全生产运行,同时也作为泸州电业局的一面窗口,使不同层次人员能够很快对泸州电网整体情况有相当清晰的感性认识。更重要的是,系统在很大程度上减轻了调度员的劳动强度,提高了调度效率与准确性。将调度员从枯燥、海量数据和日益繁重的监视任务中解脱出来,使其专注思考电网运行的深层次问题,大大加强了对泸州电网的调度运行控制能力。

参考文献

[1] 陈玮,罗毅,涂光瑜,等.动态监视下电力系统状态的可视化[J].电力系统自动化,2004,28(8):68—71.
[2] OVERBYE T J WEBER J D. Visualization of power sys-

tem data[C]. Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences Hawaii USA: IEEE, 2000: 1228—1234.

[3] 刘俊勇,陈金海,沈晓东,等.电网在线可视化预警调度系统[J].电力自动化设备,2008,28(1):1—5.
[4] 陈佳,孙宏斌,汤磊,等.电力系统控制中心三维可视化技术及其实时应用[J].电力系统自动化,2008,32(6):20—24.
[5] 胡之武,邱家驹,王康元.电力系统节点运行数据等高线可视化实现方法[J].电力系统自动化,2005,29(8):55—59.
[6] 袁泉,王康元,张洁,等.基于 SVG 的公共信息交互平台[J].继电器,2005,33(12):66—68.
[7] 张慎明,刘国定. IEC61970 标准系列简介[J].电力系统自动化,2002,26(14):1—6.
[8] 吴政球,潘立强,陈辉华,等.基于灵敏度分析的机组电价决策及其算法[J].中国电机工程学报,2004,24(1):60—64.

作者简介:

高 剑 (1975—),男,1998年毕业于重庆大学,工程师,从事技术管理工作;
余兴祥 (1980—),男,硕士研究生,从事调度运行工作;
刘友波 (1982—),男,四川大学在读博士研究生。

(收稿日期:2009—08—18)

(上接第 74 页)

[21] 段献忠,何仰赞,陈德树.仿真计算中暂态电压稳定性的判断[J].华中理工大学学报,1995,23(4):25—28.
[22] 徐泰山,薛禹胜,韩祯祥.感应电动机暂态电压失稳的定量分析[J].电力系统自动化,1996,20(6):21—24.
[23] 叶俭,梅生伟,薛安成.基于稳定域边界二阶逼近的暂态电压稳定分析[J].现代电力,2005,22(4):1—5.
[24] Yihong Wang, Chen Shen, Shengwei Mei, Ancheng Xue. Analysis of Transient Voltage Stability via Quadratic Approximation Method [R]. International Conference on Power System Technology, 2006, 1—6.
[25] 徐泰山,薛禹胜,韩祯祥.暂态电压稳定的模型要求和快速判断[J].电力系统自动化,1995,19(12):11—15.
[26] 汪娟娟,张尧,夏成军,等.交直流电力系统暂态电压稳定性综述[J].电网技术,2008,32(12):30—34.
[27] 莫琦,张尧,武志刚,等.交直流互联系统暂态电压稳定问题仿真分析[J].电力系统自动化学报,2006,18(6):87—90.
[28] A. Kurita, H. Okubo, D. B. Klapper. Multiple time-scale Power System Dynamic Simulation. IEEE Trans on Power System, 1993, 8(1): 216—223.

[29] Van Cutsem, T. Vourmas, C. D. Voltage Stability Analysis in Transient and Mid-term Time Scales. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 10: 146—154.
[30] Van Cutsem, C. Moisse. Determination of Secure Operating Limits with Respect to Voltage Collapse. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 325—327.
[31] 马世英,印永华,汤涌,等.短期和中长期电压稳定仿真及评价[J].电网技术,2006,30(19):14—20.
[32] 安 宁,周双喜,朱凌志.中长期电压稳定准稳态时域轨迹追踪方法[J].电网技术,2006,30(20):40—45.
[33] 顾群,徐泰山,陈怡,等.中期电压稳定的建模和快速仿真[J].电力系统自动化,1993,23(21):52—55.
[34] 徐泰山,鲍颜红,薛禹胜,等.中期电压稳定的快速仿真算法研究[J].电力系统自动化,2000,24(3):9—11.
[35] 段献忠,包黎昕.电力系统电压稳定分析和动态负荷建模[J].电力系统自动化,1999,23(19):25—28.

作者简介:

赵周芳 (1983—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统电压稳定。
李华强 (1965—),男,博士,教授,从事电压稳定及优化问题研究。

(收稿日期:2009—06—23)

非电量在线检测技术在状态检修中的应用

徐克华

(广安电业局, 四川 广安 638000)

摘 要: 由于非电量在线检测技术在生产实际中具有不停电、不取样、直观、准确、快速及安全等特点, 通过对状态检修相关文件的分析, 在设备状态检测过程中开展了红外/紫外检测技术、SF₆ 气体激光检漏技术、局部放电超声检测技术等非电量在线检测技术的研究与应用, 为输变电设备的状态检测提供了一种灵活的检测手段。

关键词: 状态检修; 非电量检测; 红外; 紫外; 激光; 超声波

Abstract: Online detection of non-electrical quantities for electrical apparatus is a kind of detecting method without power cut-off and sampling and possesses the advantages of accuracy, rapidity and safety during the site application. Based on the relevant files of condition-based maintenance (CBM), the research and application of non-electrical quantities technique are summarized such as infrared/ultraviolet detection technique, SF₆ gas leakage hunting technique using laser and ultrasonic detecting technique for partial discharge, which undoubtedly will be a contribution to the flexible detection for CBM of transmission and distribution equipment.

Key words: condition-based maintenance; non-electrical quantity detection; infrared; ultraviolet; laser; ultrasonic wave

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0079-03

随着电网的快速发展, 以及用户对供电可靠性要求的逐步提高, 传统的基于周期的设备检修模式已经不能适应电网发展的要求, 迫切需要在充分考虑电网安全、环境、效益等多方面因素情况下, 研究、探索提高设备运行可靠性和检修针对性的新的检修管理方式。近年来, 国家电网公司积极开展了状态检修相关工作的研究和探索。作为解决当前检修工作面临问题的重要手段, 状态检修对提高设备健康水平, 保证电网安全、可靠运行具有重要意义^[1, 2]。

根据国家电网公司状态检修相关规定的要求, 四川电网积极开展了红外/紫外检测技术、SF₆ 气体激光检漏技术以及局部放电超声波检测技术等非电量检测技术的研究, 通过这些状态检测新技术与新方法的应用和推广, 对设备状态进行了严密监测和全过程控制, 有力推动了四川状态检修工作的规范开展。

1 状态检修对非电量在线检测技术的需求

状态检修的目标是通过加强对设备状态的检测和监视, 提高设备的运行可靠性, 从而提升电网安全运行水平。国家电网公司在编制《输变电设备状态检修试验规程》时, 已采纳了适当放宽停电的例行试验, 加强在线检测的技术思路。因此, 在开展状态检

修的过程中, 就需要通过对各种新技术、新方法的应用, 进一步促进状态检测技术的发展^[3]。与预防性试验规程不同的是, 目前红外检测技术已经作为例行试验项目用于检测设备是否存在异常温度变化的情况。而且通过对状态检修相关文件的分析, 可以发现今后对在线检测技术的需求会随着电网规模的迅猛增长越来越多。

同时在国家电网公司设备状态检修管理规定中, 也明确要求: “各区域电网有限公司、省(自治区、直辖市)电力公司负责贯彻国家电网公司设备状态检修相关管理规定和技术标准, 并制定本单位实施细则”^[2]。因此在参考四川省输变电设备的运行维护经验基础上, 制定了四川省相关文件的实施细则, 其中明显地体现出了希望在今后的状态检修工作中加强在线检测技术的研究、应用和推广的工作思路。并且在四川省的状态检修体系建设中, 充分肯定了在线检测技术生产实际中的应用成效。目前四川省在状态检修工作中开展较多的在线检测技术主要有红外/紫外检测技术、SF₆ 气体激光检漏技术以及局部放电超声波检测技术等, 更多的是侧重于非电量在线检测技术的应用与推广, 其中主要原因是非电量检测技术受现场复杂的电磁场环境影响较小, 而且近年来随着传感器技术的发展, 使得非电量检测技术的灵敏度大

大提高,非常有利于现场开展设备的状态检测工作。随着非电量在线检测技术的不断发展和成熟,今后会在状态检修工作中显得越来越重要。

2 非电量在线检测技术在状态检修中的应用

根据四川省在线检测技术研究水平,目前状态检修工作主要应用的非电量检测技术有:红外/紫外检测技术、紫外检测技术、SF₆ 气体激光检漏技术以及局部放电超声波检测技术等,在生产实际中具有不停电、不取样、直观、准确、快速及安全等特点^[4,5]。通过在现场的应用与推广,发现了大量的设备缺陷或故障,为电网运行及时采取应对措施提供了科学依据。

2.1 红外检测技术

电气设备过热故障发生后,会造成导体发热、烧断、设备损坏以至于被迫停运,因此对设备过热的超前控制,减少设备过热缺陷就具有重要意义。一旦被测设备存在缺陷,相应部位的温度场会发生变化,红外检测技术能够准确地检测出电气设备的温度分布信息,将不可见的设备表面温度分布转换为可见光图像,从而揭示缺陷设备的异常状态,为设备故障判断提供准确的数据。目前红外检测技术已经在四川省广泛使用。目前红外检测技术已经非常成熟,在状态检修工作也作为例行试验项目,对及时发现、预防、处理重大事故的发生起到了关键作用^[4]。

红外检测技术是利用红外探测器和光学成像物镜接受被测设备辐射的红外线,然后成像在红外探测器的光敏元件上,从而获得红外热像图,这种热像图与物体表面的热分布场相对应。即将物体发出的不可见红外线能量转变为可见的热图像。热图像中的不同颜色代表被测物体的不同温度。

2.2 紫外检测技术

对于在大气条件下工作的高压电气设备,往往不可能完全排除电晕和表面局部放电的产生。由于设备表面粗糙存在毛刺、结构缺陷以及污秽等原因,会造成运行中电场集中、电荷密度过大而发生电晕等放电现象^[5,6]。如果电气设备出现较为强烈的电晕或电弧放电现象,再加上恶劣的外部环境影响,极有可能发生闪络引起绝缘事故^[7]。利用空气中电晕放电会产生紫外线的特点,四川省已经开展了电晕放电紫外检测技术的研究与应用。目前国内外主要有两种类型的紫外检测设备,分为日盲型紫外检测设备与夜

视型紫外检测设备(非日盲型紫外设备)。日盲型紫外检测设备工作在紫外波长在 240~280 nm 之间,由于包围地球的臭氧层吸收了这一部分紫外线,所以在地面的太阳光谱中缺失了紫外线波段范围小于 300 nm 的这一部分,使得日盲型紫外观测设备能够在白天阳光下使用^[8]。而夜视型紫外检测设备不能避开太阳中紫外光的影响,所以应在日落后或夜间使用。

一般情况下,紫外检测技术可以检测到所有电气设备的电晕放电现象^[6]。比如金属导电体表面粗糙、存在锐角或尖端、均压措施不当,以及绝缘体表面破损或裂纹、存在污秽等电晕放电^[8]。绝缘体的电晕放电相对于导电体的电晕放电来说,对电力安全运行的危害更加严重。通过紫外仪可以清晰地发现,四川省某 500 kV 变电站母线接地开关均压环端部由于锈蚀、电镀层剥离等引起表面粗糙,形成局部电场畸变,导致异常电晕放电。

2.3 SF₆ 气体激光检漏技术

在电力系统中,当以 SF₆ 气体作为绝缘和灭弧介质的断路器在使用过程中发生泄漏时,绝缘介质的减少及水分的进入会导致设备绝缘强度降低。而且在电弧及局部放电、高温等因素影响下,SF₆ 气体会进行分解,分解产物遇到水分后会产生一些剧毒物质,这些剧毒物即便是微量也能致人非命。并且泄漏出来的 SF₆ 气体及其分解物会往室内低层空间积聚,且不易散发,对进入室内的检修及巡视人员的安全构成严重威胁。此外,SF₆ 气体还是一种温室效应气体,因此其安全性已受到人们的广泛关注。

SF₆ 气体激光检漏技术是运用 SF₆ 气体对长波红外线有很强吸收能力的特性,采用后向散光成像技术对气体进行成像。当检测区域存在 SF₆ 气体泄漏时,由于 SF₆ 气体对红外光线具有强烈吸收作用,所以此时反射到检测设备的红外能量会急剧地减弱,SF₆ 气体在显示设备上显示为黑色烟,并且随着气体浓度变化,黑度也不同。在这种方式下,SF₆ 气体泄漏源就可以快速、准确确定^[9]。原理图如图 1 所示。

2.4 局部放电超声检测技术

SF₆ 气体绝缘组合电器设备(GIS)因具有故障低、免维护等特点而在电力系统中被广泛使用。但是 GIS 的特殊性,使得除微水检测等少数试验项目外,现行高压试验的大多数项目无法用于 GIS 长期以来几乎处于无维护状态。一旦 GIS 设备内部出现缺陷,一般不容易进行排查。

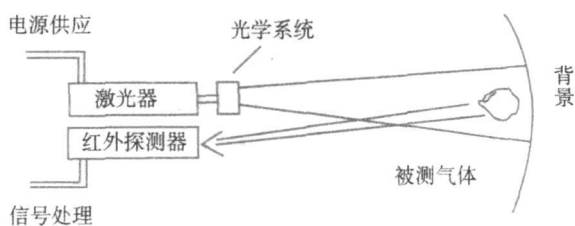


图 1 SF₆ 气体激光检漏原理图

GIS 局部放电超声波检测技术是基于声发射原理的检测方法。当 GIS 设备发生局部放电、电晕等缺陷时，会伴随有电、声、光信号的产生。GIS 局部放电产生的能量使周围 SF₆ 气体的温度骤然升高，从而形成局部过热，所产生的扰动以压力波的形式传播，类型包括纵波、横波和表面波。GIS 中沿 SF₆ 气体传播的只有纵波，这种超声纵波以某种速度以球面波的形式向四周传播^[10, 11]。由于超声波的波长较短，因此它的方向性较强，能量较为集中。当这种波到达 SF₆ 与金属外壳的交界面时，一部分透过金属外壳继续传播。把超声传感器紧贴在 GIS 金属壳体的外部，就可接收到局放产生的超声波信号。再根据实际运行经验加以分析，可以对 GIS 的运行状况进行评估与判断。检测原理图如图 2 所示。

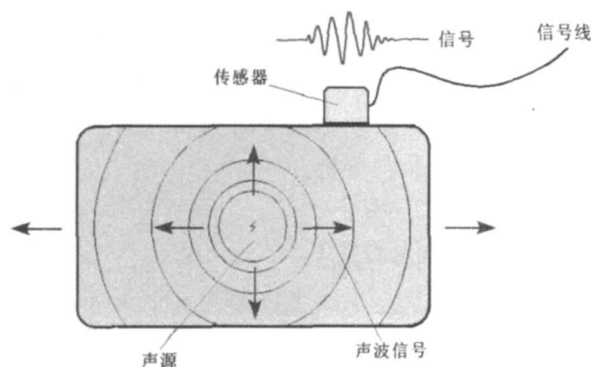


图 2 局部放电超声波检测原理图

2008 年“5·12”汶川大地震后，四川省在抗震救灾、隐患排查过程中，应用超声波检测技术开展了 GIS 局部放电检测，发现靠近地震震中位置的某水电站 GIS 出线筒的水平段有较明显的放电信号，分析该部位可能受地震影响产生缺陷。检测结果如图 3 所示。

3 结 论

在开展状态检修工作中应用了红外、紫外检测技术、SF₆ 气体激光检漏技术、局部放电超声检测技术

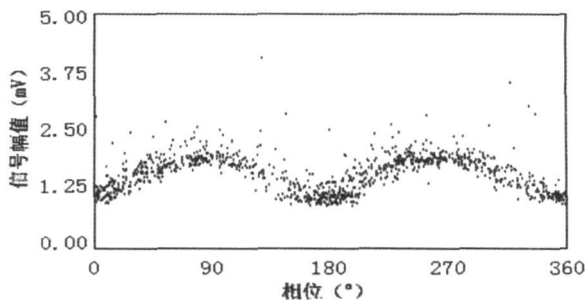


图 3 GIS 局部放电超声波检测结果

等非电量带点检测技术对输变电设备状态进行了检测与诊断，检测结果显示非电量带点检测技术能够准确、快速、直观地反映出设备的状态信息，能够作为一种灵活的检测手段应用于状态检修工作中。并且在今后的状态检修工作中，非电量在线检测技术的应用会越来越广泛。

参考文献

- [1] 国家电网公司. 国家电网公司关于规范开展状态检修工作意见 [Z]. 2008.
- [2] 国家电网公司. 国家电网公司设备状态检修管理规定 (试行) [Z]. 2008.
- [3] 国家电网公司. Q/GDW 168—2008《输变电设备状态检修试验规程》及编制说明 [Z]. 2008.
- [4] 胡红光, 电力红外诊断技术作业与管理 [M], 中国电力出版社, 2006, 10—14.
- [5] 迟殿林, 曾庆立. 用紫外成像检测电气设备外绝缘状况 [J]. 东北电力技术, 2005, (1): 22—23.
- [6] 寇晓适, 卢明, 夏中原, 刘博, 高新志. 紫外放电检测在电力系统设备状态检修的应用 [J]. 河南电力, 2008, (1): 1—5.
- [7] 刘振亚. 特高压电网 [M]. 中国经济出版社, 2005, 255—256.
- [8] 戴利波. 紫外成像技术在高压设备带电检测中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 97—98.
- [9] 北京华光天星国际科技发展有限公司. GD—100 型 SF₆ 气体激光可视检漏仪使用指南 [Z]. 中国, 2008, 2—5.
- [10] 陆瑾, 袁聪波, 孙骏, 等. 变压器局部放电的电—声联合检测技术应用 [J]. 华东电力, 2006, 34(9): 78—80.
- [11] 罗勇芬, 李彦明, 刘丽春. 变压器局部放电的超声波和射频联合检测技术的现状和发展 [J]. 变压器, 2003, 40(12): 28—30.

作者简介:

徐克华 (1970—), 男, 工程师, 技术管理。

(收稿日期: 2009—08—20)

泸州电网实时可视化分析与预警系统

高 剑¹, 余兴祥¹, 刘友波²

(1 泸州电业局, 四川 泸州 646000; 2 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:随着地区配电网规模日渐扩大, 庞大的电网运行数据容易导致调度人员对潜在重要信息的遗漏, 电网可视化分析与预警已成为解决这一问题的重要手段。为提高调度员工作效率与调度准确性, 泸州电业局与四川大学电气信息学院共同开发了泸州电网实时可视化分析与预警系统。详细介绍了该配网可视化系统的软、硬件配置、系统构架与特点、功能模块及系统使用情况, 并针对系统使用中遇到的相关问题提出了进一步研究思路。

关键词:泸州电网; 电网实时可视化分析; 预警; 系统开发

Abstract With the rapid expansion of local distribution network enormous operation data makes it easy for the dispatchers to omit the important potential information of power grid. Power grid visualization analysis and early warning have become one of the most significant technological means to solve this problem. To improve the work efficiency and accuracy of dispatchers Luzhou Electric Power Bureau and School of Electrical Engineering and Information of SCU have researched and developed the real-time visualization analysis and early warning system for Luzhou power grid. The software and hardware configuration, the system architecture and the characteristics and the function module are introduced. And the further research idea is proposed.

Key words Luzhou power grid; power grid real-time visualization analysis; early warning; system development

中图分类号: TM769 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0082-04

0 引 言

现代电力系统的安全高效运行是各层面关心的首要问题。为提高系统运行质量, 能量管理系统 (SCADA/EMS) 正朝着数据采集周期更短的方向发展, 数据量日益增大, 对人机交互界面与辅助系统功能及时效性提出了新要求^[1,2]。电网实时可视化辅助分析技术的发展为实现这一要求提供了可能^[3,5]。文献 [3] 基于 IEC 61970 标准提出了在线可视化调度和预警系统的设计方案, 并介绍了开发流程中的关键技术, 构建了电网可视化分析的体系结构。文献 [4] 针对电力系统控制中心的节点型和线路型数据设计了基于电网接线图背景的可视化表达方式。文献 [5] 对节点运行数据等高线可视化实现机理进行了介绍。总之, 电网可视化技术是调度自动化与电网运行控制技术紧密结合的前沿研究课题, 是未来智能调度的关键技术之一。

为提高调度效率与准确性, 挖掘泸州电网运行信息, 特别是紧急情况下关键信息发现与预警, 准确预测和分析电网存在缺陷, 泸州电业局与四川大学电气信息学院于 2007 年共同研发了泸州电网实时可视化

分析与预警系统。目前系统运行稳定, 功能价值日益显现, 决策支撑能力逐步体现, 对提升调度运行人员技术水平和科学决策能力, 保证泸州电网安全经济运行具有重要意义。将从系统构架与配置、主体功能特点等角度出发对泸州电网实时可视化分析与预警系统进行详细介绍与分析。

1 系统整体构架

1.1 系统硬件配置

泸州电网实时可视化分析与预警系统采用独立组网结构, 不占用 EMS 网络流量, 其基本硬件配置由 1 台 HP DL380 G4P 服务器、3 台 HP Compaq 商用在线工作站等 4 台高性能 PC 机构成, 整体支持外部交换数据。完整硬件配置图如图 1 所示。

从系统工作站用途与服务器应用功能角度出发对实时可视化分析与预警系统进行划分^[3], 其硬件结构如图 2 所示。

1.2 系统体系结构

作为一种图形标准, SVG^[6]通过电网图形描述格式, 可将图形对象与 CM^[7]数据模型关联拼接起来, 实现图模一体的数据模型。泸州电网实时可视化分

析与预警系统基于标准 EMS/API 结构,以 CM 作为数据模型,体系结构^[3]如图 3 所示。

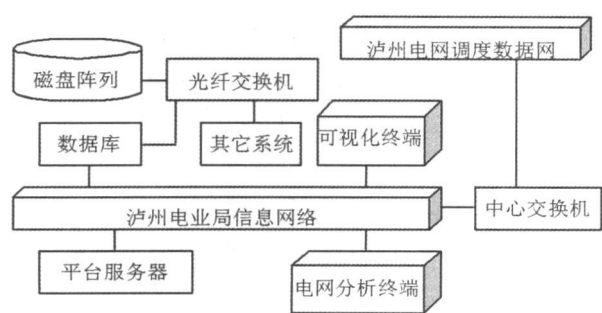


图 1 可视化分析与预警系统硬件配置示意图

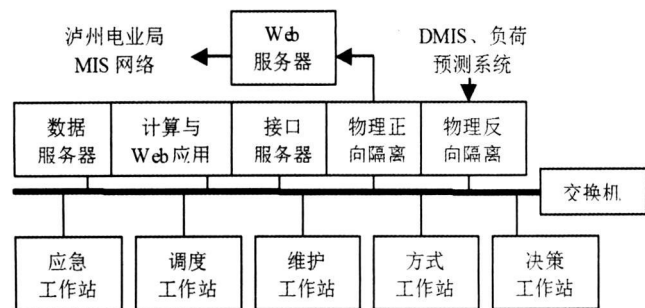


图 2 工作站与服务器硬件功能结构

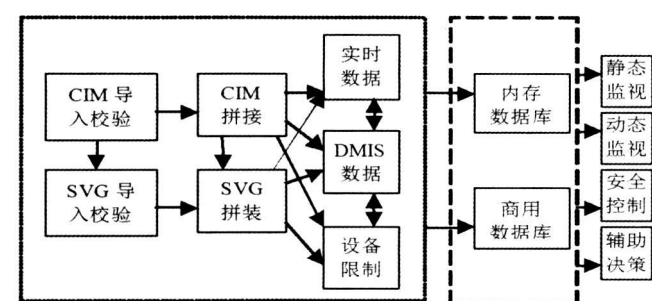


图 3 系统体系结构示意图

2 系统性能指标

2.1 图形显示指标

强大的电网运行图形功能可辅助调度员快速甄别电网运行中仅通过单纯数据表格或简单趋势描述不易发现的异常情况。泸州电网实时可视化分析与预警系统满足的图形显示指标如表 1 所列:

2.2 系统运行可靠性指标

根据泸州电网 5 年、10 年发展规划,本系统设计寿命在 10 年以上,运行可靠性指标如下。①系统平均无故障时间:20 000 h;②系统年可用率(不含 SCADA 数据中断):大于 99.5%;③电网各类参数变化

从进入实时库平台到显示时间:小于 5 s④电网正常(事故)情况下,在任意 10 s 内,服务器 CPU 平均负荷率不超过 5%(15%);在任意 10 s 内,可视化工作站 CPU 平均负荷率不超过 10%(15%);在任意 10 s 内,主站局域网平均负荷率不超过 15%(25%)。

表 1 泸州电网实时可视化分析与预警系统图形显示指标

指标项	效果	指标项	效果
画面调出/切换	<500 ms	实时刷新周期	3—5 s
30 节点等高线	<1 s	线路负载等高	<1 s
计算平均时间	<1 s	线计算时间	<1 s
画面放缩	无级放大	放缩响应	<300 ms
旋转最小角度	1℃	2D 到 3D 切换	<300 ms
2D 和 3D 旋转	>18 帧/s	潮流箭头平滑	1 像素
潮流箭头动态	10 帧/s	移动最小距离	无锯齿
GIF 动画推出	20 帧/s	30 节点算例图形	<1%
		动态全显 CPU 负载	

3 可视化分析与预警功能模块开发

3.1 软件结构与总体功能

电网可视化与预警是一套基于大量信息、对实时性要求很高的数据与图形处理高级分析系统。系统的实施过程中有多个关键技术需要解决,如动态数据库刷新和存储技术、多规约设备实时发送技术等。泸州电网实时可视化分析与预警系统遵循 CM/SVG/CIS 的模型—图形—接口规范及静态监视—动态监视—安全控制分析—辅助决策的功能体系,由实时可视化监视、可视化电网分析、预警与辅助决策可视化等 3 个主要功能平台组成。软件总体功能平台结构示意图如图 4 所示。

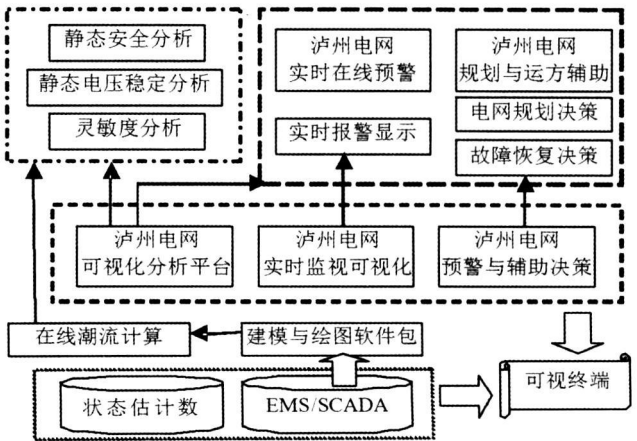


图 4 泸州电网可视化分析与预警功能模块总体结构

如图 2 与图 4 所示,系统具有开放接口,可从泸

州电网 SCADA / EMS 中获取各种数据,以等值网络为基础,进行可视化展示与分析,并作为系统报警及决策分析的可视化平台。支持数据管理、映射、维护、过滤、导入与导出。将集成系统中的数据、参数转化为系统所能识别的格式。系统实现了泸州电网实时监视,以多种可视化手段,如动态箭头、三维柱图、颜色深浅,展示泸州电网关键电气量,使调度员快速地发掘系统运行薄弱环节。在系统分析方面,引入包括潮流计算、灵敏度分析、静态安全分析等功能。系统可在线监控泸州电网运行状态,若存在越限,则可判断其已进入紧急状态及程度,对引起紧急的越限进行报警,提示调度员注意。告警等级可以通过系统配置属性自行设置。

3.2 泸州电网静态与动态可视化监视

泸州电网主要设备静态与动态监视功能主要包括:节点电压等高线、线路负载程度饼图、线路负载等高线、动态潮流(依据线路的有功、无功进行动态潮流显示,流动箭头的大小和速度随有功和无功的大小同步变化,值越大箭头越大,流动的速度越快)、无功备用、变压器温度监控、变压器备用、泸州电网接线图与设备三维旋转功能。

3.3 预警、计算与辅助决策功能

当有设备或线路出现故障、越限、或进入定义危险状态时,自动发出听觉与视觉预警信号,并进行可视化定位。依据对线路的屏幕切割操作,可计算泸州电网某个断面的有功和无功潮流,以进行局部分析。灵敏度在电网计算中有广泛应用^[8],可以借助灵敏度系数或分布因子使简化分析工作。功能包括:(1)线路灵敏度;发电机和负荷对线路的灵敏度;(2)节点电压灵敏度;发电机、电容器和变压器分接头对节点电压的灵敏度。利用 SCADA 中大量数据,如实时运行数据、设备参数,网络拓扑结构等,事故追忆可对泸州电网历史数据进行回放。相关数据是描述系统结构和运行状态,作为历史资料长期保存的数据,是电网运行重要依据。系统能对所有数据进行回放、重演,提供了事故分析与方式演算平台。

4 系统特点与运行情况

4.1 系统特点

①泸州电网运行信息实时可视化直观显示。泸州电网与设备数据显示功能模块可以二维和三维的形式

实现,在地理图上显示电网接线,用饼图、等高线等各种形式显示实时数据,可平滑移动、无级缩放,实现了节点电压、角度、线路潮流、发电出力、负荷大小、越限和裕度数据可视化显示。动态可视化显示模块可在单线图中显示动态潮流、节点电压等高线、线路负荷饼图等对象。②为调度员定制实时预警平台。当泸州电网母线电压、线路或变压器负载率以及其他运行数据不正常时提供多样预警;所采集数据超过限制时则提供告警,避免事故范围的扩大。预警平台可维护性良好,可按需自行设置,并提供多种形式告警。③使调度员能及时观测所定制的电网信息,能自动加重显示泸州电网运行变化关键点,挖掘电网潮流动态变化信息,进一步提高了泸州电网规划运行科学决策的能力。

4.2 运行示例

①泸州 110 kV 电网接线电压等高线可视化图。通过等高线显示算法将 110 kV 关键节点电压按标么值大小着色,并根据 SCADA / EMS 数据刷新频率进行动态着色显示,为调度员提供明确的视觉信号。

②泸州 110 kV 线路负载可视化图。以线路负载功率数据为依据显示线路潮流负载状态程度,并通过声光信号提示调度人员进入负载越限区域。

③泸州 110 kV 变压器负载 3 维柱图可视化展示。以生动的柱状比例显示变压器负载状态。

4.3 应用情况

该系统自 2007 年 6 月在泸州电网投入试运行以来,系统平台工作正常,同步正确,接收 SCADA 数据准确,对发电机、变压器、线路、母线、电容器的实时运行情况能正常监视,其它各项计算功能能正常运行。系统对提高电能质量、提高泸州电网与四川主网联络线潮流控制质量有重要作用,提升了电网整体安全运行水平。如 2007 年,泸州电网(责任)频率合格率保持 100%,共获得考核返还电量合计 43.35 万 kW·h,按平均购电电价 0.3 元 / kW·h 计算,获得经济效益 12 万元;2008 年冰雪灾害期间,在方式计算出控制策略前,迅速调整系统薄弱点的电压潮流水平,及时提升系统稳定水平,保证了泸州电网安全稳定运行。泸州电网实时可视化分析与预警系统整体发挥了预期作用。

4.4 进一步研究思路

①在实时可视化分析平台中,各类电力设备的静、动态模型免维护自动更新功能还需进一步完善,已适应日益升级的配电网。②引入更多的配电网安

全运行指标可视化显示方法,如配网可靠性评估可视化等,从数理统计与数据挖掘等角度为调度员提供更多决策支持。③加入配网的经济性分析模块,对泸州电网运行效益进行可视化展示,同时生动展示网损、检修等信息。

5 结束语

泸州电网实时可视化分析与预警系统极大地提升了泸州电网调度监视控制的装备水平。不仅有利于电网安全生产运行,同时也作为泸州电业局的一面窗口,使不同层次人员能够很快对泸州电网整体情况有相当清晰的感性认识。更重要的是,系统在很大程度上减轻了调度员的劳动强度,提高了调度效率与准确性。将调度员从枯燥、海量数据和日益繁重的监视任务中解脱出来,使其专注思考电网运行的深层次问题,大大加强了对泸州电网的调度运行控制能力。

参考文献

[1] 陈玮,罗毅,涂光瑜,等.动态监视下电力系统状态的可视化[J].电力系统自动化,2004,28(8):68—71.
[2] OVERBYE T J WEBER J D. Visualization of power sys-

tem data[C]. Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences Hawaii USA: IEEE, 2000: 1228—1234.
[3] 刘俊勇,陈金海,沈晓东,等.电网在线可视化预警调度系统[J].电力自动化设备,2008,28(1):1—5.
[4] 陈佳,孙宏斌,汤磊,等.电力系统控制中心三维可视化技术及其实时应用[J].电力系统自动化,2008,32(6):20—24.
[5] 胡之武,邱家驹,王康元.电力系统节点运行数据等高线可视化实现方法[J].电力系统自动化,2005,29(8):55—59.
[6] 袁泉,王康元,张洁,等.基于 SVG 的公共信息交互平台[J].继电器,2005,33(12):66—68.
[7] 张慎明,刘国定. IEC61970 标准系列简介[J].电力系统自动化,2002,26(14):1—6.
[8] 吴政球,潘立强,陈辉华,等.基于灵敏度分析的机组电价决策及其算法[J].中国电机工程学报,2004,24(1):60—64.

作者简介:

高 剑 (1975—),男,1998年毕业于重庆大学,工程师,从事技术管理工作;
余兴祥 (1980—),男,硕士研究生,从事调度运行工作;
刘友波 (1982—),男,四川大学在读博士研究生。

(收稿日期:2009—08—18)

(上接第 74 页)

[21] 段献忠,何仰赞,陈德树.仿真计算中暂态电压稳定性的判断[J].华中理工大学学报,1995,23(4):25—28.
[22] 徐泰山,薛禹胜,韩祯祥.感应电动机暂态电压失稳的定量分析[J].电力系统自动化,1996,20(6):21—24.
[23] 叶俭,梅生伟,薛安成.基于稳定域边界二阶逼近的暂态电压稳定分析[J].现代电力,2005,22(4):1—5.
[24] Yihong Wang, Chen Shen, Shengwei Mei, Ancheng Xue. Analysis of Transient Voltage Stability via Quadratic Approximation Method [R]. International Conference on Power System Technology, 2006, 1—6.
[25] 徐泰山,薛禹胜,韩祯祥.暂态电压稳定的模型要求和快速判断[J].电力系统自动化,1995,19(12):11—15.
[26] 汪娟娟,张尧,夏成军,等.交直流电力系统暂态电压稳定性综述[J].电网技术,2008,32(12):30—34.
[27] 莫琦,张尧,武志刚,等.交直流互联系统暂态电压稳定问题仿真分析[J].电力系统自动化学报,2006,18(6):87—90.
[28] A. Kurita, H. Okubo, D. B. Klapper. Multiple time-scale Power System Dynamic Simulation. IEEE Trans on Power System, 1993, 8(1): 216—223.

[29] Van Cutsem, T. Vourmas, C. D. Voltage Stability Analysis in Transient and Mid-term Time Scales. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 10: 146—154.
[30] Van Cutsem, C. Moisse. Determination of Secure Operating Limits with Respect to Voltage Collapse. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 325—327.
[31] 马世英,印永华,汤涌,等.短期和中长期电压稳定仿真及评价[J].电网技术,2006,30(19):14—20.
[32] 安 宁,周双喜,朱凌志.中长期电压稳定准稳态时域轨迹追踪方法[J].电网技术,2006,30(20):40—45.
[33] 顾群,徐泰山,陈怡,等.中期电压稳定的建模和快速仿真[J].电力系统自动化,1993,23(21):52—55.
[34] 徐泰山,鲍颜红,薛禹胜,等.中期电压稳定的快速仿真算法研究[J].电力系统自动化,2000,24(3):9—11.
[35] 段献忠,包黎昕.电力系统电压稳定分析和动态负荷建模[J].电力系统自动化,1999,23(19):25—28.

作者简介:

赵周芳 (1983—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统电压稳定。
李华强 (1965—),男,博士,教授,从事电压稳定及优化问题研究。

(收稿日期:2009—06—23)

雷电回击 DU 模型等效电路仿真

张凤鸣

(四川电力物流集团公司, 四川 成都 610021)

摘要:从雷电对系统产生影响的实际出发,研究了国际上较通用的雷电回击模型,将其归纳为两大类,指出了雷电回击模型的共性特点及建立理想雷击模型的基本要求。以 DU 模型(由 Deindorfer 和 Uman 在 1990 年提出的一种雷电回击模型)为基础,建立雷电通道的等效电路,在 PSCAD/EMTDC 上进行仿真运行,重构了雷电回击电流波形曲线,将仿真得到的对地雷电流波形与原始实测电流波形特征参数比较,证明了该等效电路用于雷电研究的有效性。

关键词:雷电;雷电回击模型;等效电路;仿真;PSCAD/EMTDC

Abstract: From the practice of lightning stroke the common lightning return-stroke models are studied and they have been classified into two types. The commonness and characteristics of the lightning return-stroke models are proposed as well as the basic demands for the development of ideal lightning stroke model. Based on DU model the equivalent circuit simulation model is presented and performed in PSCAD/EMTDC. The simulation results prove that the equivalent circuit model is with validity and applicability.

Key words: lightning; lightning return-stroke model; equivalent circuit; simulation; PSCAD/EMTDC

中图分类号: TM866 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0086-04

工程实际提出具体解决方案,具有一定的理论价值和实际工程意义。

0 引言

雷电是大自然中最宏伟壮观的气体放电现象,雷电放电会给人类的生命安全造成危害,雷电放电在电力系统中引起很高的雷电过电压(亦称大气过电压),是造成电力系统绝缘故障和停电事故的主要原因之一,雷击引起的系统故障约占总故障的 50% 以上;雷电放电所产生的巨大电流,有可能使被击物体炸毁、燃烧、使导体熔断或通过电动力引起机械损坏。随着电力系统的飞速发展,高压输电线路纵横交错,绵延万里,遭受雷击是不可避免的,由雷击引起停电事故也时有发生,给国民经济和人民生活造成了严重损失。电力系统的故障统计资料表明,雷害是造成高压输电线路停电事故的最主要原因。

在电力系统雷电防护工程计算中,雷电回击冲击电流的大幅值、大陡度等是造成电力系统大气过电压的危害严重程度的决定性因素。如何限制雷电回击电流的幅值,减小雷电流的变化率对雷电防护系统的设计安排非常重要。通常的研究忽略了雷击接地点的受雷击物体对雷击主放电流波形相关参数本身的影响,而这种影响通常是非常关键的,因此,据此为基础,研究雷击通道终端对雷电流本身的影响,并结合

1 雷电过程的描述

雷电放电是由带电荷的雷云引起的。实验表明:当大水滴分裂成水珠和细微的水沫时,会出现电荷分离现象,大水珠带正电、小水沫带负电。在特定大气和地形条件下,会出现强大而潮湿的上升热气流。造成云层中的水滴分裂起电,细微的水沫带负电,被上升气流带往高空,形成大片带负电的雷云;带正电的水珠或者凝聚成雨滴落向地面,或者悬浮在云中,形成雷云下部的局部正电荷区(图 1)。

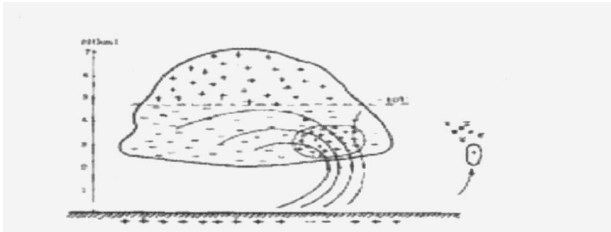


图 1 雷云中的电荷分布

大多数雷电放电发生在雷云之间(即云内放电和云间放电),对地面没有直接影响。雷云对大地的放电虽然只占少数(即地闪),却直接威胁着人类生

命财产安全和系统的安全运行。实测表明,对地放电的雷云绝大多数带负电荷。根据放电雷云电荷的极性来定义,此时雷电流的极性也为负。雷云中的负电荷逐渐积聚,同时在附近地面上感应出正电荷,当雷云与大地之间局部电场强度超过大气游离临界场强时,就开始有局部放电通道自雷云边缘向大地发展。这一放电阶段称为先导放电。先导放电通道具有导电性,因此雷云中的负电荷沿通道分布,并继续向地面延伸,地面上的感应正电荷也逐渐增多,先导通道发展临近地面时,由于局部空间电场强度的增加,常在地面突起处出现正电荷的先导放电向天空发展,称为迎面先导。当先导通迟到达地面或者与迎面先导相遇以后,就在通道端部因大气强烈游离而产生高密度的等离子区。此区域自下而上迅速传播,形成一条高导电离的等离子体通道,使先导通道以及雷云中的负电荷与大地的正电荷迅速中和,这就是主放电过程(也称回击过程, return stroke),先导放电是逐级推进发展的,每级长度约 25~50 m,各级之间有 30~90 μ s 的停歇,所以平均速度较低,约为 1.5×10^5 m/s 表现出的电流不大,约为数百安。而主放电的发展速度很高,约为 $(2 \times 10^7 - 1.5 \times 10^8)$ m/s 所以出现甚强的脉冲电流,可达几十至二三百千安。

2 雷电回击的数学模型

雷电回击模型是根据对地点雷电流波形及雷电通道附近电场和磁场数据推导得出的合乎其物理本质的简明表达形式。由于雷电的随机性和复杂性,建立一个统一的数学模型是不可能的,但一个可接受雷电数学模型至少应该描述一些与实验观测有关的数据,如通道底部电流、回击传播速度、一定距离的电磁场等。它应满足以下三个条件。

- (1)能够由测得的电磁场推断出回击电流的大小;
- (2)能预测通道近距离的电场和磁场,因为近距离测量雷电电磁场很不切实际;
- (3)能获得对雷电及有关现象的进一步更佳理解。

工程应用中大多数雷电模型是在下列条件下建立的:

- (1)大多雷电模型都是针对第一回击建立的,因为雷电第一回击是引起过电压的主要原因。

(2)雷电通道都是垂直于地面的。虽然雷电通道并不垂直于地面而总是表现出一定的曲折,但由于雷电通道的曲折具有随机性,因此在计算雷电通道周围的电磁场时由于雷电通道弯曲所带的影响并不大。

绝大多数雷电的观测都是在地面进行的,所测得的均是通道底部的电流数据,因而大多数雷电回击数学模型的都由两部分组成:一部分反映通道底部的电流波形,另一部分反映任意高度处的电流与通道底部电流的关系。本章将总结各常见模型的假设、适用条件及其局限性。

常用的雷电通道底部的电流模型有两种,即双指数函数模型和 Heidler 模型。

雷电通道底部的双指数电流模型是 Bruce 和 Golde 于 1941 年提出的,其表达式为

$$i(0, t) = I_b [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)] \quad (1)$$

式中, I_b 是通道底电流的峰值; α 、 β 是时间常数,它们决定波的上升时间、延迟时间和波的陡度。该模型能够反应出测得的通道底部电流的主要参数,且便于进行积分和微分运算。

Heidler 于 1985 年提出将通道底部的电流表示为两个函数的乘积。

$$i(0, t) = I_b \cdot x(t) \cdot y(t) \quad (2)$$

式中, $x(t)$ 为上升时间函数, $y(t)$ 为延迟时间函数。在波的上升阶段 $y(t) \approx 1$, 在波的延迟时间 $x(t) \approx$

1。取 $x(t) = \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_2)^n}$, $y(t) = \exp(-\frac{t}{\tau_2})$, 峰值

修正系数: $\eta = \exp[-(\frac{\tau_1}{\tau_2})(n\frac{\tau_2}{\tau_1})^{\frac{1}{n}}]$, 则式(2)为

$$i(0, t) = \frac{I_b}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_2)^n} \exp(-\frac{t}{\tau_2}) \quad (3)$$

式中, I_b 通道底部电流的峰值, τ_1 为前沿时间常数, τ_2 为延迟时间常数; η 为峰值修正系数, n 为指数。Heidler 模型具有优于双指数函数的特点,它在 $t=0$ 时刻对时间的导数等于 0,与观测到的第一回击电流的波形是一致的。此外,通过改变的 I_b 、 τ_1 、 τ_2 的值可方便地调节电流的幅值,最大电流变化率和传输的电荷量。

3 Deindorfer & Uman 模型 (DU 模型)

该模型将回击到通道内一定高度的电晕电流划分快、慢速延时时间常数。对应的电流分量称为“流

注 击穿”(breakdown)及“电晕”(corona)电流。每个电流分量随时间均按指数变化,而延时时间常数则随通道高度不改变。电晕电流的延时时间常数幅值则配合回击场的观察特性而作出相应调整。

基于以上假设,可得出底部电流、底部电流变化率及沿通道的电荷分布间的公式为

$$\rho_x(z) = -(\frac{1}{v} + \frac{1}{c}) [\dot{i}_x(0, t - z/v - z/c) + \tau_x \frac{d\dot{i}_x(0, t - z/v - z/c)}{dt}] \quad (4)$$

所进行的仿真研究是基于 DU 模型的。

4 仿真方法与过程

4.1 基本假设和参数

对某一特定对地点雷电流的波形假定: 1)雷电回击的通道垂直于大地, 忽略闪电分支及空中电荷, 大地视为理想导体。2)自 $t=0$ 起, 回击从地面开始。当回击波头到达每一小段时, 其中存储的电荷开始向通道放电, 放电电流以光速 c 流向通道底部。回击波头向上运动的速度 v_f 为一常量, 取为 $1.3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。3)通道长度 H 取为 5 km , 每小段的长度 l 为 50 m , 得仿真计算的支路数为 $n=h/l=100$ 。并定义每小段的时间延迟常数 $w=l(1/v_f+1/c)$, 为回击波头自某小段底端开始至放电电流回到此小段底端的总时间。4)雷电先导向下运动过程中其内存储的电荷量以指数上升。电容元件上的初始电压随着通道中的电荷的减少而下降, 其最终的回击电流也是如此。5)主要考虑首次回击过程, 仿真时间 $0 \sim T(\mu\text{s})$, $T=H(1/v_f+1/c)$ 。当 $t>T$ 时, 回击波头已达雷电通道顶端, $R-C$ 支路的所有开关闭合。等效电路如图 2 所示。

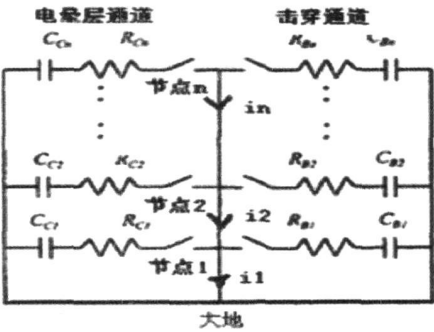


图 2 雷电回击通道的等效电路

4.2 通道电流的求取

由等效电路图 2 知, 代表每一小段通道的支路的

开关会在回击波头到达时闭合, 该段所存储的电荷即等效电路中电容元件上的电荷就会对地放电形成回击电流。接地点的回击电流由通道中所有小段的放电电流加总得到 (包括击穿电流和电晕电流), 任意高度的通道电流则由此高度以上的已经放电的各小段的放电电流求和得到。回击波头以上部分还未形成放电, 故其通道电流为零。

每小段放电电流为

$$i_h(t) = i_{hn}(t) + i_{bn}(t) = \frac{U_0}{R_{Cn}} e^{-t/R_{Cn}C_{Cn}} + \frac{U_0}{R_{Bn}} e^{-t/R_{Bn}C_{Bn}} \quad (5)$$

对所有小段的放电电流加总求和可得回击通道基电流:

$$\begin{cases} i(0, t) = \sum_{n=1}^{H/l} i_n(t - nw) v_n(t - nw), & (t \geq nw) \\ i(0, t) = 0, & (t < w) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $u(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$

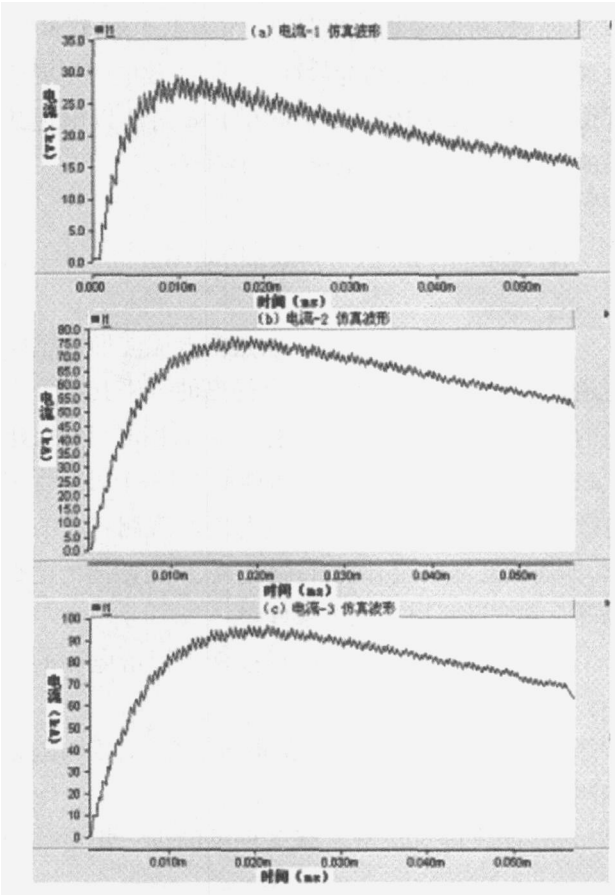


图 3 对地回击雷电流 PSCAD 仿真波形

在任意高度 z 处的回击电流可在延时 z/v_f 后由此高度以上各小段放电电流求和得到。

$$\begin{cases} i(z, t) = \sum_{n=1}^{H/\lambda} i_n(t - n\omega + z/c) \cdot v_n \\ (t - n\omega + z/c), (t \geq \omega + z/v_f) \\ i(0, t) = 0, (t < \omega + z/v_f) \end{cases} \quad (7)$$

5 仿真结果与结论

将各参数值输入 PSCAD 仿真模型后,可由输入输出通道在线实时得到节点 1 对地电流波形及幅值。3 组对地雷电流实测数据及其仿真结果如图 3。

从仿真输出的波形和数据可知,和利用电流解析表达式计算得出的电流特性值相比,用等效电路仿真得出的数据和是比较吻合的,与文献 [9] 编程求取的雷电流波形也有很好的一致性,可见,用上述方法仿真出来的对地电流波形是具有原始波形特性的,并且利用 PSCAD 进行建模仿真具有更加直观、简便的优点。

对地雷电流 $i(1, t)_{\max} = 30.26 \text{ kA}$ 在不同通道高度 z (从 50 m 到 2 000 m) 处所形成的通道回击电流对比图,如图 4。可以看出,电流幅值随着通道高度的增加而减小,电流上升时间随通道高度的增加而变大,即雷电流陡度逐渐减小。

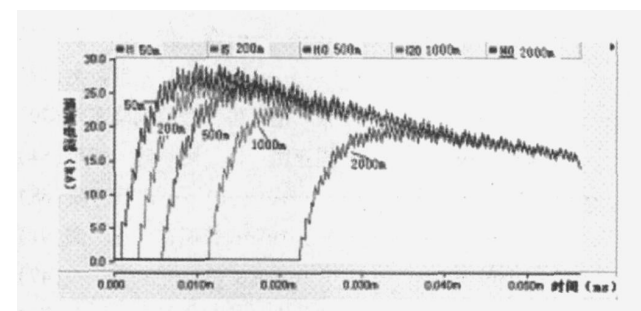


图 4 不同通道高度 z 处的雷电回击电流

参考文献

- [1] 纬钱,何金良,高玉明.过电压防护及绝缘配合[M].北京:华大学出版社,2002
- [2] 李福寿.电力系统过电压计算[M].北京:水利电力出版社,1988
- [3] 陈渭民.雷电学原理(第二版)[M].北京:气象出版社,2006
- [4] 周泽存.高电压技术[M].北京:中国电力出版社,2004
- [5] C. Gomes V. Cooray. Concepts of Lightning Return Stroke Models [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Volume 42, Issue 1, Feb. 2000 Page(s): 82 - 96.

- [6] Rakov V. A., Uman M. A. Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Volume 40, Issue 4, Part 2, Nov. 1998 Page(s): 403 - 426.
- [7] E. Pan, Ah Choy Liew. Effect of Resistance on Lightning Return Stroke Current [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15, Issue 1, Jan. 2000 Page(s): 135 - 141.
- [8] Pan E.; Ah Choy Liew. Analysis of a novel method of current sharing in a resistive lightning protection terminal [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15, Issue 3, July 2000 Page(s): 948 - 952.
- [9] 陈燕萍,张群峰,陈慈萱.雷电通道等效仿真电路[J].高电压技术,2002,28(9),3-4.
- [10] Nathan G. Parker E. Philip Krider A. Portable PC-Based System for Making Optical and Electromagnetic Measurements of Lightning [J]. Journal of applied meteorology, 2003, 42(6): 267-289.
- [11] Bruce C. E. R. Golde R. H. The lightning discharge [J]. J Inst Elec 1941, (88): 487-520.
- [12] Mirela Bejleri Vladimir A. Rakov Martin A. Uman. Triggered Lightning Testing of an Airport Runway Lighting System [J]. IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(1): 309-321.
- [13] Rakov V. A. Dulzon A. A. A modified transmission line model for lightning return stroke field calculation [C]. Proc 9th Int Symp Electromagn Compat Zurich Switzerland 1991, 44H1: 229-235.
- [14] Lin Y. T. Uman M. A. Standler R. B. Lightning return stroke models [J]. Geophys Res, 1980, (85): 1571-1583.
- [15] 陈明理,刘欣生.云地闪电的传输线模式及回击电流速度[J].高原气象,1995,14(4): 385.
- [16] C. F. W. Asgner. The relation between stroke current and the velocity of the return stroke [J]. IEEE Trans On PES, 1963, 82(10): 609-617.
- [17] R. Thottappillil D. K. McLean M. A. Uman et al. Extension of the Diendorfer-Uman lightning return stroke model to the case of a variable upward return stroke speed and a variable downward discharge current speed [J]. Geophys Res, 1991, 96: 143-150.
- [18] 梁小冰,黄方能.利用 EMTDC 进行长持续时间过程的仿真研究[J].电网技术,2002,26(9): 5557.
- [19] 林良真,叶林.电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC [J].电网技术,2000,24(1),65-66.

(收稿日期:2009-06-30)

2009 年《四川电力技术》总目录

第 1 期

云广特高压直流输电系统换相失败研究	刘 建 李兴源 艾 飞等 (1)
并联交流系统强度对换流母线电压稳定性的影响	徐梅梅 李兴源 白加林等 (5)
基于负荷时域等值模型非线性度的谐波源定位	龚华麟 肖先勇 (11)
基于电容器投切的复小波选线方法	周登登 刘志刚 (13)
考虑运行方式和时变故障率随机评估电压凹陷频次	马 超 肖先勇 (18)
推进特高压电网建设 服务四川经济发展	朱国俊 蒋 乐 (23)
基于对称分量法的变压器谐波传输特性研究	周 晋 郭 蕾 黄 军等 (28)
基于粒子群优化的电力负荷灰色预测模型	周在阳 周步祥 师玉东等 (32)
电力系统负荷预测技术	宗慧敏 滕 欢 (36)
基于 Prony 方法的电力系统低频振荡分析	白 洋 李国庆 姚天亮 (40)
基于小波变换的电力系统故障测距装置启动判据方法	刘 扬 向俊杰 付 涛 (42)
电力谐波对电能计量影响的研究	何 群 (45)
基于最大熵的多谐波源求和方法研究	陈晓静 李 楠 (50)
基于多峰谱线插值的间谐波检测新方法	黄小佳 刘亚梅 廖学静等 (54)
基于改进粒子群算法的高中压配电网实时电压无功优化	包永金 (59)
地区级电网负荷特性及其影响因素分析	尹 琦 刘青丽 (65)
影响电力负荷避峰的关联因素分析	刘凌川 段登伟 邓 华 (69)
配电系统继电保护操作电源的选用	李 俊 杨 莉 (74)
某市 2008~2012 年电力负荷预测	邹汝杰 (77)
快速多目标无功优化方法在实际系统中的应用	张 建 牛 霞 刘晓东等 (79)
两种神经网络在变压器油色谱故障诊断中的应用	周亚明 田 野 陈 斌等 (84)
变电站直流电源远程监控技术	汪守贵 (88)
广域测量系统整合方案	曾旭东 沈 澜 (91)
成都局计量中心跃升“国家实验室”	(49)
达州 500 kV 变电站投运	(76)
《四川电力技术》投稿须知	(83)

第 2 期

微电网技术研究现状	国 海 苏建徽 张国荣 (1)
基于模态法的电力系统电压稳定性研究	张少康 李兴源 徐梅梅 (7)
供电企业安全性评价自动化管理系统的设计和实现	潘守翡 雷 霞 余光亮 等 (11)
敏感负荷电压凹陷敏感度概率密度函数及应用	李 皖 陈卫东 肖先勇 (13)
一种自适应的低频减载方案的设计	巫 柯 李兴源 李青芸 (17)
计及环境约束的机组组合二层规划方案研究	蒲 实 刘俊勇 陈 烨 等 (19)
VDCOL 参数整定的改进对多馈入直流输电系统暂态稳定性的影响研究	杨大春 刘天琪 李兴源 等 (24)
复杂网络理论在电力系统中的运用与研究	肖 军 刘天琪 (28)
数字化变电站继电保护可靠性措施研究	余 锐 熊小伏 于 军 (33)
水情数据自动交换系统在水调工作中的应用	杜成锐 赵永龙 (37)

阿坝牧区电网电压偏高分析	张 应 (39)
四川电网 220 kV 及以上线路简化整定计算	杨向飞 (41)
宜宾电网 2008 年夏季运行分析	刘 勤 (44)
主副线带开关的分支箱结构优化配网结构	曾勇波 张 玻 杨 钧 (48)
110 kV 线路圆特性阻抗元件的相间距离Ⅲ段保护整定分析	陈旭锋 李旭涛 (51)
基于继电保护信息管理系统隐藏故障分析	王 伟 余 锐 能小伏等 (54)
基于复 Gaussian 小波 SVM 的短期负荷预测	郑永康 郝文斌 刘俊丽等 (58)
一种应用于配电网合环操作的计算模型与方法	陈 曦 曾勇波 叶 涛等 (62)
防止带地方电源终端变电站全站失压的保护改造方案	宋汉蓉 程 钢 尹 秦 (66)
特高压换流站直流场管形母线选择	余 波 吴怡敏 陶俊培 (69)
220 kV 母线保护改造问题	何仕卿 (73)
校核电流互感器动稳定和短时热电流的方法	李世平 蒋 平 (75)
基于 MATLAB 的跨平台电能质量分析软件研究	刘宇航 黄 军 周 晋等 (78)
YN ₀ 电压平衡变压器负序仿真分析	黄 军 魏 光 周 晋等 (81)
江油发电厂 330 MW 机组恢复发电关键技术方案研究	杨 飞 杨树林 (85)
发电厂电力拖动系统的节能研究	刘 琨 刘 念 冉 立等 (88)
循环流化床灰控阀的维护	王永龙 (92)

第 3 期

交流系统强度与所联直流输电系统换相失败关系研究	艾 飞 李兴源 王晓丽等 (1)
考虑负荷静特性的基于奇异值分解法静态电压稳定分析	吴华坚 李兴源 贺 洋等 (5)
基于 HHT 的电力系统负荷预测	白玮莉 刘志刚 王 奇等 (9)
新息图法电力系统不良数据检测与辨识	张永超 黄彦全 宋廷珍等 (14)
风电场短期风速的改进 Volterra 自适应预测法	罗海洋 刘天琪 李兴源 (16)
异步风力发电机稳态模型研究	顾 威 李兴源 魏 巍 (20)
基于 pscad 变桨距风力发电系统的建模仿真	张 尧 王维庆 李 锋等 (25)
黑启动过程中操作过电压分析	刘连志 赵 灿 韩振明 (28)
输电线路雷电干扰暂态识别的仿真研究	张丽娜 陈 皓 (31)
6~35 kV 配电网铁磁谐振对策初探	程德蓉 刘启俊 (36)
超高压输电线路绝缘子的可靠性评价	蓝健均 李大勇 (39)
一种无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测方法	周 波 (41)
线路带负荷测试标准化作业卡的编制与运用	何仕卿 (44)
变压器出口短路的危害及预防措施	徐克华 (45)
变压器绕组变形监测的研究现状综述	诸 兵 曾雪梅 黄晓艳 (48)
GIS 设备选型应注意的问题	张华强 季 枫 肖 伟 (54)
自适应遗传—禁忌搜索混合算法在 PMU 最优配置中的应用	李新振 滕 欢 (56)
电力系统微机保护技术前瞻	刘 柳 (61)
微机备自投装置应用中的一些问题分析	唐利兵 (64)
浅谈数字化变电站电气二次架构设计	汪熙珍 (68)
基于移动数据库技术的 GPS 电力线路巡视管理系统	熊 勇 余 宁 (71)
智能路由多层交换机在变电站自动化系统中的应用	冯世林 (73)
电流互感器典型故障案例分析	钟守熙 (77)
架空输电线路复合绝缘子掉串原因分析及对策	李龙江 (79)
油纸套管绝缘介质老化诊断分析	白 斌 (82)
C12—8 83 /3. 82 型汽轮机组负胀差超限原因分析及处理	任 宏 (86)
水电厂球阀前压力钢管连接明段的安全评价	张宏雁 唐 杰 周 松 (89)

600 MW 氢冷发电机漏氢处理及预防措施	袁 廷 (93)
-----------------------------	----------

第 4 期

敏感设备电压凹陷敏感度综合评估方法的研究	王华伟 李华强 (1)
一种基于重排二次型时频分布的电能质量检测新方法	王丽霞 何正友 赵 静 (5)
多馈入直流系统换流母线电压之间的相互影响	
及其同时换相失败的研究	肖 俊 李兴源 杨小兵 (11)
基于衰减电流分量的双树复小波相位选线原理	周登登 刘志刚 符伟杰 等 (16)
基于 PSCAD 的电力系统次同步谐振研究	邓 婧 李兴源 (20)
四川电网 2010 年短路电流水平分析及限制措施研究	周惟婧 杜新伟 丁理杰 (24)
基于原一对偶内点法的区域电网无功能力评估	张希猛 李华强 赵周芳 等 (28)
基于自适应粒子群算法的负荷最优分配	苏 鹏 刘天琪 黄 健 (32)
低频振荡预警及分析功能在新疆电网 WAMS 系统中的应用及改进	张彦军 张 娟 常喜强 等 (36)
电气化铁路谐波在公用电网的渗透研究	周小涵 (41)
三角波移相电流控制法及其在 STATCOM 中的应用	王心琦 张代润 杨柳柳 (44)
电弧光保护在电力系统的应用	吴志勇 (49)
基于博弈均衡购电电价的分时电价	孙 琳 刘俊勇 (52)
新疆电网风力发电运行对风电发展建设的启示	马锋福 常喜强 蔡鹏程 等 (57)
电力设备介质损耗测量方法研究	曾 伟 李建国 (62)
通过变压器电容式套管末屏获取过电压信号的方法	明志强 许 虎 (65)
浅析输电线路通过综合治理取得的防雷效果	张廷碧 彭力健 刘启俊 (69)
光电互感器在变电站数字化间隔中的应用	郭先平 李 倩 许 诺 (72)
变压器套管事故的分析及预防	欧居勇 付东丰 陈 芃 (75)
配电网中的矩阵故障定位方法	陈文业 (77)
农村电网线损管理研究	周 轩 邹 未 尚茂黎 等 (80)
自动抄表系统的现状及应用	杨 娟 (85)
计及 PSS 的电力系统时域仿真计算	焦艳杰 陈 宇 陈枳州 等 (88)
PSS/E 在四川电网的应用研究	李红军 杨 茹 王电钢 等 (92)

第 5 期

FD 法和故障树法在高压直流输电直流输电系统可靠性评估中的比较分析	谢开贵 夏 天 胡 博 等 (1)
考虑多时段 CVaR 的供电公司购电优化模型	吴 薇 刘俊勇 (5)
全桥 DC/DC(H 桥)变换电路的设计与实施	贾 周 王金梅 封俊宝 (10)
南方地区电网覆冰事故分析及应对措施研究	赵永生 王富荣 赵德奎 等 (13)
220 kV 变电站中建设融冰配电变压器的设想	邓 健 (17)
SVC 安装对四川电网的影响研究	杜新伟 丁理杰 周惟婧 (21)
特高压电流差动保护方案研究	桑丙玉 喻 奇 (24)
基于改进 PSO 算法的 PID 参数优化研究	李凌舟 陈 利 (29)
模拟五防系统设计	周慧莹 (32)
含有 SMES 电力系统次同步谐振的抑制研究	秦浩庭 刘 燕 徐根厚 等 (35)
10 kV 配电线路防雷措施研究与应用	黄兰英 吴广宁 曹晓斌 等 (39)
谐波响应特性对接地电极设计的影响研究	张凤鸣 (42)
基于 D-S 证据理论的变压器诊断系统研究	曹 海 (46)
大型电机局部放电在线监测的方法研究	崔东君 刘 念 (50)
一种新的三端电气量行波测距方案	焦征南 吕飞鹏 胡亚平等 (54)

基于改进蚁群神经网络的短期负荷预测	周 曲 邱晓燕 (58)
基于 WAMS 的互联电网联络线定功率控制系统设计	李 强 (62)
配电网合环安全性分析系统的应用及改进	冯小萍 戚红艳 樊国伟 等 (67)
区域电网低频振荡主导模式的检测方法	白 洋 邓集祥 (71)
高频通道异常情况的现场特殊处理	唐明亮 赵玉忠 (75)
接地模块接地工频电阻计算及在送电线路中的应用	徐宏宇 (78)
10 kV 系统 TV 高压保险频繁熔断事故的分析与仿真	董家读 黄 庆 何 跃 等 (83)
CAN 在 110 kV 变电站综合自动化系统的应用	刘朝毅 曾绍成 雷明亮 (86)
对 220 kV 龙丰东线线路保护更换工程的认识	罗永刚 高锦锋 (89)
Y /yn 接线变压器带单相负载的计量原理分析	张 蕾 (92)

第 6 期

粒子群算法在机组组合中的应用综述	赵辛欣 陈维荣 叶 震 (1)
基于双馈风电模型的电压稳定性研究	郭虎奎 李凤婷 (4)
V 型串在 500 kV 单回线路中的应用	王从斌 王 刚 (7)
500 kV 黄岩变电站三菱公司 HGIS 运行状况分析及处理	杨 兵 (10)
11. 29 事件引发对天广直流无功控制的深层分析	刘 洋 黎张文 (13)
10 kV 线路断线事故的分析	熊昌荣 严 峻 (16)
关于输电线路耐雷水平的综合研究分析	曾 奕 (20)
变电站直流系统接地告警方式设计	李俊儒 刘 玲 赖民昊 (24)
高压隔离开关触指压力的测试	蒋 平 李 晶 (26)
配电网谐波潮流计算	钟 茜 (29)
采用串联谐振原理优化设计 110kV 变压器和 GIS 耐压装置	黄建康 (33)
一种基于新的相模变换矩阵的输电线路故障测距改进算法	郭 亮 吕飞鹏 罗长亮 等 (38)
架空线—电力电缆混合线路特性及保护配置探讨	江少成 岳亚丽 潘震宇 等 (42)
电力变压器铁心剩磁检测方法研究	陈文臣 雷晓燕 王 磊 (45)
B25 MW 汽轮机振动处理	张亚平 (49)
攀煤 135 MW 机组余汽技术改造	王金柱 陈立伟 彭久兵 等 (50)
浅析绿色照明在发电厂中的应用	胡 蓉 (55)
300 MW CFB 机组低负荷运行研究	唐 俊 魏志全 (59)
除氧器乏汽回收技术在节能减排中的应用	刘明宝 (62)
湿法烟气脱硫系统特殊运行方式	何绍洪 何 强 (64)
架空输电导线覆冰及舞动在线监测技术综述	宁 妍 黄 琦 张昌华 等 (67)
电力系统电压稳定性分析综述	赵周芳 李华强 张希猛 (71)
强磁弱电系统中一起保护误动作分析	杨先义 王 华 陈 漫 (75)
非电量在线检测技术在状态检修中的应用	徐克华 (79)
泸州电网实时可视化分析与预警系统	高 剑 余兴祥 刘友波 (82)
雷电回击 DU 模型等效电路仿真	张凤鸣 (86)

增 刊

建设统一坚强的智能电网	张 伟 (1)
省级智能调度支持系统的设计及实现方法初探	刘俊勇 王民昆 杨嘉湜 (2)
面向智能电网的电力系统云计算	潘 睿 刘俊勇 郭晓鸣 (6)
最小二乘支持向量机短期负荷预测研究	侯贺飞 刘俊勇 (11)
基于人机互动的智能调度监控系统的设计及实现	黄 媛 刘俊勇 何 迈 等 (16)

电力系统运行状态分析和识别方法研究	程向辉 刘俊勇 杨嘉湜 等 (20)
考虑分布式电源的智能电网备用市场交易模型	张国芳 吕 林 刘俊勇 (24)
超导储能技术对智能电网电压稳定的影响	徐 建 邱晓燕 汪兴旺 (29)
超导储能技术在电力系统中的应用与展望	李 勇 刘俊勇 胡 灿 (33)
传统变电站检修向数字化变电站状态检修转变	刘 阳 刘俊勇 张建明 (38)
基于 Google Earth 的电网信息可视化研究及实现	黄 媛 刘俊勇 何 迈 等 (43)
巡线机器人的研究综述及面向智能电网技术的一些探讨	佃松宜 翁 桃 廖云杰 等 (47)
数字化变电站网络选型设计	罗小东 郑 旭 舒 勤 (52)
四川省电力公司应急通信建设管理概况及思考	邓 创 肖行谕 (55)
光伏发电的政策与技术浅析	杜新伟 (61)
提高初期特高压互联电网稳定性措施初探	丁理杰 刘 洋 杜新伟 等 (64)
对智能电网概念的理解与四川发展智能电网的思考	杜新伟 (68)
典型接线方式下智能配电网自愈功能实施的探讨	都健刚 (71)
供电企业建设坚强智能电网新技术应用策略的探讨	郑 毅 (73)
智能电网初探	赖民昊 刘 芸 (77)

(上接第 70 页)

[7] O. Nigol Conductor galloping Part II—Torsional mechanism. IEEE Trans PAS 1981, 100(2): 699—707.

[8] O. Nigol G. J. Clarke Conductor galloping and control based on torsional mechanism [J]. IEEE Paper 1974, 16(2): 31—41.

[9] 郭应龙, 李国兴, 尤传永. 输电线路舞动 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

[10] 蔡廷湘. 输电线路舞动新机理研究 [J]. 中国电力, 1998, 31(10): 62—66.

[11] 尤传永. 导线舞动稳定性机理及其在输电线路上的应用 [J]. 电力设备, 2004, 5(6): 13—17.

[12] 陈晓明, 邓洪洲, 等. 大跨越输电线路舞动稳定性研究 [J]. 工程力学, 2004, 2, 21(1), 56—60.

[13] Y. M. Desai P. Yu N. Popplewelland · H. Shah Computer & Structures 1995, 57, 3): 407—420.

[14] 童国力, 韩富春. 输电导线防舞动的双向稳定性分析 [J]. 太原理工大学学报, 2007, 38(6).

[15] Desai Y M. Shah Y A H. Popplewill N. Perturbation—Baxed Finite Element Analyses of Transmission Line Galloping Journal of Sound and Vibration 1996, 191(4): 469—489.

[16] 梁绍宏. 高压架空输电线路舞动建模及计算机仿真 [D]. 华北电力大学, 2003.

[17] 卢明泉, 尤传永. 架空输电线路分裂导线舞动的非线性分析.

[18] 王丽新, 杨文兵, 杨新华, 等. 输电线路舞动的有限元分

析 [J]. 华中科技大学学报, 2004, 21(1)

[19] 巫世晶, 向农. 神经网络在输电线导线舞动监测诊断系统中的应用 [D]. 武汉水利电力大学, 1998.

[20] 毛玉星, 张占龙, 邓军, 等. 架空输电线横向舞动角度仿真计算 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(23).

[21] 张帆, 熊兰, 刘钰. 基于加速传感器的输电线舞动检测系统 [J]. 电测与仪表, 2009, 46(517).

[22] L. Bjerkas Application of Fiber—Optic Bragg Grating Sensors in Monitoring Environmental Loads of Overhead Power Transmission Lines APPLIED OPTICS Vol 39, No 4, 2000.

[23] 黄新波, 孙钦东, 张冠军, 等. 在线监测和 GIS 用输电线路管理系统 [J]. 电网技术, 2007, 33(6): 118—122.

[24] R. D. Blevins W. D. Wan The Galloping Response of a two—Degree—of—Freedom System. Journal of Applied Mechanics vol 41. No 4. 1974.

作者简介:

宁 妍 (1984—), 女, 硕士研究生, 研究方向电力系统自动化。

黄 琦 (1976—), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为电力系统控制、大规模电力系统分布式并行计算和电力系统传感器网络等。

张昌华 (1975—), 男, 博士, 副教授, 目前研究反向为电力系统优化及控制、智能算法。

曹永兴 (1963—), 男, 高级工程师, 研究方向高压输电导线架设及监测技术。

(收稿日期: 2009—09—02)

葛洲坝集团电力有限责任公司



◆董事长兼总经理:龚春晔



◆党委书记:颜继光

葛洲坝集团电力有限责任公司是中国葛洲坝集团公司所属以从事电力工程施工总承包、水利水电工程施工总承包以及送变电工程、水利水电工程施工供电、机电设备安装工程、城市及道路照明工程、市政工程承包施工、金结加工制安于一体的国家一级电力施工企业。

公司专业力量雄厚,拥有一支施工经验丰富,知识型、专业化的经营、技术、管理和技能人才队伍。同时各类专业设备齐全,具有各类电压等级电网工程、各类水利水电工程、新能源工程、机电设备安装工程、市政工程、城市及道路照明工程以及各类金结制安等工程施工总承包能力。

多年来,公司在国家重点工程建设中,积极发挥中央企业的骨干作用,先后承担了葛洲坝、三峡、溪洛渡、向家坝、锦屏、官地等二十多个大中型水电站的施工电网建设与运行管理及电站配套输变电工程施工,同时还承建了一大批西电东送、三峡外送超高压和特高压输变电工程以及内昆铁路普洱渡铁路物资转运站、沪蓉西高速公路等机电安装工程,其中参建的三峡外送风梦500kV输变电工程、贵广一回±500kV直流输电工程、天广四回500kV输变电工程、500kV肇庆换流站工程、贵广二回±500kV直流输电工程、府谷电厂一期送出工程、罗百Ⅱ回500kV输变电工程分别荣获2005年度、2006年度、2007年度、2008年度“中国电力优质工程”称号,为国家和地方经济建设做出了积极贡献。公司目前致力于新能源市场开发,已经参建的风电项目有辽宁昌图风电场、江苏大丰风电场、黑龙江望云峰风电场、内蒙古代力吉敦日本风电场等工程。

在激烈的市场竞争中,公司始终坚持“诚信守约、追求卓越”的质量方针,取得了良好的经济效益和社会效益,连续多年荣获全国“守合同重信用企业”、“全国用户满意施工企业”、“全国优秀电力建设施工企业”、“湖北省最佳文明单位”等称号,特别是在2008年南方电网抗冰抢险和四川抗震救灾工作中,公司积极履行央企社会责任,充分发挥央企骨干作用,做出了积极贡献,被国务院国资委授予“2008年抗雨雪冰冻灾害先进集体”、“2008年抗震救灾先进集体”称号。

展望未来,公司将秉承“创世界品牌、铸世纪丰碑”的企业精神,致力于以科技为先导、顾客为中心、品质为保证,竭诚为国内外客户建造一流工程、提供一流服务。

- 1 公司承建的内蒙古代力吉敦日本风电场工程
- 2 公司承建的±800kV穗东换流站工程
- 3 公司承建的750kV兰平输电线路工程
- 4 公司承建的±800kV特高压云广直流输电线路工程
- 5 公司承建的±500kV肇庆换流站工程
- 6 公司承建的500kV锦德输电线路工程动力金放线
- 7 公司承建的江苏大丰风电场线路工程
- 8 公司承建的500kV花都变电站工程
- 9 公司承建的沪蓉西高速公路机电安装工程
- 10 公司承建的普洱渡铁路转运站工程
- 11 公司承建的辽宁昌图风电场升压站建筑与安装工程

授予 葛洲坝集团电力有限责任公司

(2008年度)
全国电力建设优秀施工企业

中国电力建设企业协会
二〇〇八年三月

授予 葛洲坝集团电力有限责任公司

2008年抗雨雪冰冻灾害
先进集体

国务院国资委
二〇〇八年三月

授予 葛洲坝集团电力有限责任公司

2008年抗震救灾
先进集体

国务院国资委
二〇〇八年三月

葛洲坝集团电力有限责任公司

守合同重信用企业

湖北省工商行政管理局
湖北省企业信用促进会
二〇〇六年六月

二〇〇七年度全省安全生产

先进单位

湖北省安全生产委员会
二〇〇八年一月

地址: 湖北宜昌市沿江大道22号 邮编: 443002

电话/传真: 0717-6712515/6735924 邮箱: zjb@gzbd.cn 网址: www.gzbd.cn

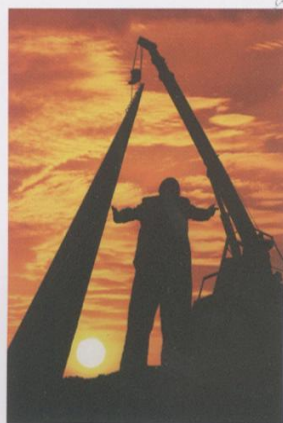
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



广元电业局

国家电网四川广元电业局位于川北要塞广元市，是国家电网四川省电力公司直属大型一类供电企业，担负着广元市四县三区70万电力客户的供电任务，截至2008年底，拥有固定资产16.84亿元，变电站38座，容量154.73万kVA，35kV及以上输电线路83条/1779km，10kV配电线路9117km。全网220kV变电站4座，在建500kV输变电项目。2008年售电量30.07亿kWh，实现电费收入13.97亿元，税费总额2.47亿元，工业增加值3.74亿元，市场占有率96.91%。2008年成功创建全国文明单位，被国务院国资委表彰为“抗震救灾先进基层党组织”，并被四川省企业联合会评为四川省优秀诚信企业。

近年来，全局干部职工紧紧围绕“一强三优”的建设目标而努力奋斗，大力弘扬安全文化，夯实安全生产基础，狠抓生产技术管理和作业现场管理，严格执行标准化作业。以电网无缺陷，系统无隐患，设备无故障，行为无违章，管理无漏洞，环境无障碍为安全生产目标。并努力打造坚强智能电网，实现物的本质安全；提升员工素质，实现人的本质安全；狠抓制度落实，实现管理本质安全；构建和谐环境，实现环境本质安全；提高设备健康水平，实现设备本质安全，从而实现广元电网全面安全。



零点行动，保证老百姓用电不受影响



抗冰保电



三峡水利枢纽梯级调度通信中心



三峡梯级调度室

三峡水利枢纽梯级调度通信中心（简称三峡梯调）是长江电力股份公司下属二级生产单位，全面负责三峡～葛洲坝水利枢纽梯级调度工作。在枢纽水库调度运行、枢纽电力生产运行调度、枢纽电力通信运行管理和维护等工作中负有重大责任。

对外业务方面，三峡梯调统一接受上级调度部门的调度指令，负责协调防洪、航运、发电、水文气象等方面工作，并根据枢纽与其实际情况，积极做好枢纽优化运行方案，在确保防洪及航运安全的同时，最大限度地发挥枢纽的综合效益，尤其是发电效益。

2009年5月31日，按照长江电力的统一部署，三峡梯调成都分中心筹建处成立，这是三峡梯调在发展道路上迈出的关键一步，标志着三峡梯调生产业务开始向金沙江流域扩展，也为进一步增强长江电力梯级电站联合调度核心能力打下坚实基础。



四川凉山水洛河电力开发有限公司



2007年9月下旬,凉山州委书记吴靖平(右一)到水洛河调研



2008年7月上旬,宁朗、水洛水电警务室成立,木里县县长宋平(左一)与阙树仁总经理揭牌



州、县移民局领导到宁朗电站检查工作



2008年9月上旬,省咨询院宁朗电站可研审查专家组到现场进行实地考察



2008年初改建公路基本完工



2008年7月21日跨水洛河1号贝雷桥通车



跨水洛河5号桥施工



(C)35kV线路铁塔组立



宁朗电站3号支洞施工



宁朗电站砂石料场设备安装



宁朗电站2号支洞洞口

四川凉山水洛河电力开发有限公司成立于二〇〇六年一月,注册资金叁亿元人民币。经营范围:水能资源的开发、投资、建设;水电厂的运营管理;电能的生产和销售;水利水电工程技术咨询、服务;水利水电物资、设备采购。经主管部门批准,公司负责四川省凉山州木里县水洛河干流的水电开发建设和运营管理。

水洛河干流开发系省重点建设项目工程之一,位于木里县境内,是金沙江中游左岸一级支流,流域面积13720km²,河口多年平均流量201m³/s,天然落差2547.9m,平均比降9.31‰,河道长179.7km,天然落差1568m,平均比降8.73‰,是四川省中型河流中径流量较大的河流之一,开发条件较为优越。2007年4月26日,省发改委批准了水洛河干流水规划报告(川发改能源〔2007〕154号),同意水洛河干流按“一库十一级”开发,自上而下依次为亚宗(93MW)、东朗(60MW)、向丁(57MW)、麦日(87MW)、钻根(183MW)、固滴(126MW)、新藏(159MW)、博瓦(135MW)、宁朗(105MW)、撒多(174MW)、捷可(114MW),总装机容量1293MW;其中东朗设不完全年调节水库,正常蓄水位以下库容1.48亿m³,调节库容1.12亿m³;共利用落差1568m,多年平均年发电量58.2/62.5亿kW.h(单独运行/联合运行),静态总投资114.03亿元。

公司自成立以来,在凉山州委、州政府和木里县委、县政府及州、县有关部门的大力支持下,本着“多快好省,联动开发,和谐水电,兴州利民”的开发理念,遵循“总体规划,全面推进,重点突破,分步实施”的工作思路,全力推进水洛河流域开发进度。截止目前,首期开发的宁朗(114MW)、钻根(201MW)、撒多(210MW)、固滴(138MW)四个电站中,宁朗电站已获四川省发改委核准,这是水洛河干流“一库十一级”中第一个获得核准的项目,是木里县境内四条河流(木里河、水洛河、鸭嘴河、东义河)上规划的共23座水电站中近两年来第一个获得核准的项目,也是“5.12”汶川大地震后凉山州获得省里核准的第一个水电项目,在全省范围内位居今年核准水电项目的前五位,该电站主体工程已于2008年底开工,2009年6月6日顺利截流,预计2010年底第一台机组投产发电;撒多电站已完成预可研报告和大部分专题报告的审批,力争在2009年获得核准,随即开工建设,2011年投产发电;钻根、固滴电站也已完成预可研报告和部分专题报告的审批,争取在2009年完成可研报告,2010年核准并开工建设,2012年投产发电。二期开发的七座电站(亚宗、东朗、向丁、麦日、新藏、博瓦、捷可)的勘测设计工作已全面启动,并已签订勘测设计合同,各设计单位已陆续进场开展外业工作,争取在2009年完成预可研报告。

遵照凉山州委、州政府和木里县委、县政府关于加快中小水电开发的指示精神,该公司将紧紧依靠地方党委、政府,充分尊重当地民风民俗,搞好民族团结,真抓实干,开拓进取,正在全面推进水洛河开发进程,力争为木里水电开发和经济发展作出更大的贡献!

四川西北联网±500kV高压直流输电技术交流会

2009年10月23日四川省电机工程学会和四川电力试验研究院在德阳电业局举办了“四川西北联网±500kV高压直流输电技术交流会”。

这次会议得到了德阳电业局热情、全力的支持。会上，四川电力试验研究院高压室参与设备调试的工程师介绍了±500kV德宝直流工程基本情况，换流站设备布置、安装及调试工作，并重点介绍了换流变压器、平波电抗器、滤波装置、直流断路器等。同时，还从设备就位，到安装过程中的检查试验、交接试验、分系统试验、站系统调试、系统调试和设备试运行全过程，详细介绍了承担的技术监督工作。

四川电力试验研究院副总工程师、系统室主任甄威介绍了德阳换流站控制保护系统的构成及主要工作方式、阀控系统情况，围绕换流站试验开展的试验技术研究工作。分别对各个部分的特点、难点及采取的针对性措施给予了详细说明。

会后，与会代表兴致勃勃地来到德阳换流站，应会议邀请，四川省电力公司直流分公司总经理白仕雄进行了详细的现场讲解，大家进行了热烈的交流。



四川西北联网±500kV高压直流输电技术交流会



四川电力试验研究院高压室副主任刘凡介绍换流站设备



与会代表参观换流站

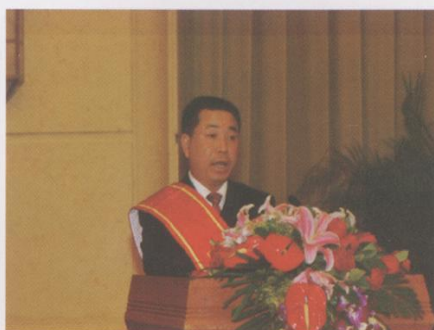


与会代表在换流站现场进行技术交流

辉煌历史名载电建史 二次创业再踏新征程 ---奋进中的湖北省输变电工程公司

湖北省输变电工程公司是从事输变电工程施工的省级专业队伍，具有国家电力工程施工总承包壹级企业资质和一级承装（修、试）电力设施许可证。公司现有在岗员工2017人，社会要求的各类持证上岗人员资格证书齐全。

曾参加了国内第一条500kV输电线路平武工程施工；承建国内第一座500kV交流变电站凤凰山变电站；第一座直流换流站葛洲坝换流站；第一个500kV长江大跨越工程金口跨越；率先在大江大河放线施工中采用不封航架线技术，并在输变电线路全过程施工中采用直升飞机、飞艇施工。率先承建我国1000kV晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程（荆门变电站电气安装）和特高压输电线路工程（第16标段）；承建了我国第一个1000kV特



公司总经理曹宗振作为先进个人代表
在国家电网公司召开的特高压交流试
验示范工程总结表彰大会上发言

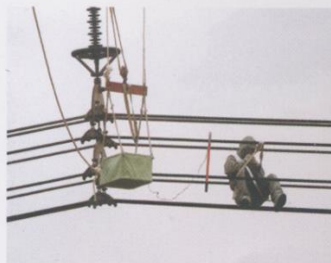
高压交流试验基地，率先中标我国首条向家坝—上海、锦屏—苏南±800kV直流工程，近年来相继在西北、西南取得一定市场份额，并参与赞比亚等一些国际项目技术合作。公司自2000年10月承接凤南线65km的运行维护线路以来，不断承接新的运行维护线路，截止2009年6月15日公司运行维护线路已达2197.985km。

公司是全国“五一劳动奖状”获得者，“国家电网抗灾救灾恢复重建功勋集体”，湖北省最佳文明单位，国家电网公司、湖北省电力公司文明单位，公司施工的多项工程获得国优、部优、省优及行优。

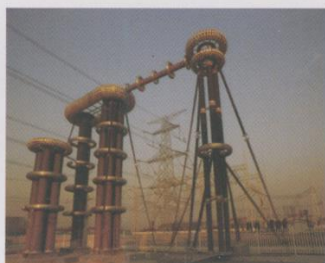
目前，该公司正在统一思想，凝聚人心，加快发展，为实现二次创业战略目标而努力奋斗！



LB-1型抱杆获得国家专利证书



1000kV特高压带电作业



承建的武汉特高压交流试验基
地2008年12月26日全部投运



1000kV特高压荆门变电站全景

成都供用电工程公司

成都供用电工程公司隶属于成都电业局，是一个具有独立法人资格的送变电二级施工企业，主要从事220kV及以下送、变电工程施工、电气设备的运行和维护，同时负责城区居民户表的抄表及辅助性工作。

公司创业20余年，一直致力于打造电力工程服务优质品牌，建立了强大的“一站式全程服务”功能，以性能价格比的持续领先优势赢得了市场的充分肯定和广泛赞誉，在市政建设、教育产业、房地产业、政府机关、工商企业等各界建立了广泛的客户网络和友好合作关系。迄今为止，公司已为社会各界提供了近2000个优质的配电工程，同时还承建了大量的输电、变电和配网工程，优质服务客户满意率一直保持在95%以上，在业界享有良好的口碑。



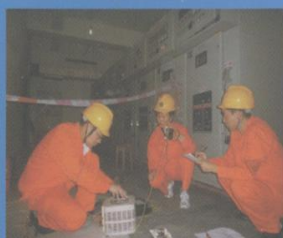
抗震救灾中抢修35kV中兴变电站



受成都电业局之命赴叙永抗冰抢险



新建铜锣社区配电工程



为客户设备做年检预试



为沙河景区提供代维服务