

江苏电机工程

JIANGSU DIANJI GONGCHENG

第 33 卷 第 4 期(总第 156 期)

2014 年 7 月 28 日出版



《江苏电机工程》 编辑委员会

顾 问 张凤祥 郑健超 严陆光
尹积军 黄其励 薛禹胜
张 龙 陈 刚

主 任 委 员 沈国荣

副 主 任 委 员 鞠 平 王海林 李 群
蒯狄正

委 员 袁晓辉 黄学良 李晓慧
张兴华 吴军基 张官元
王作民 费益军 陈云仑
莫建益 薛一如 叶 辉

主 编 薛一如

目 次

专论与综述

基于直流概率潮流的风电穿透功率极限计算	张文婷, 范立新(1)
配电网线路最优分段数算法研究及应用	王 峰, 李 颖, 王春宁(5)
新一代继电保护及故障信息管理主站的设计与实现	祁 忠, 笃 竣, 张海宁, 等(8)
汽轮机通流效率与机组热耗率关系的计算	李 刚, 胥建群, 汤 涛, 等(13)

故障诊断与检修策略

江苏电网 220 kV 及以上输电线路雷击跳闸分析	高 嵩, 周志成, 陶风波, 等(17)
直流故障引起的线路保护误动作事件分析	刘孝刚, 黄浩声, 崔晓祥, 等(21)
对两条线路相继跳闸的保护配置分析	刘 明, 伏祥运, 卢 笛, 等(24)

电网技术

电气设备 SF ₆ 气体检漏技术研究与应用	林 敏, 杨景刚, 贾勇勇, 等(27)
基于时域多周期同步和频域代数运算的谐波检测法	李安娜, 黄家晖, 熊杰锋(30)
微型燃气轮机发电建模与仿真研究	易桂平, 胡仁杰(34)
引入虚拟电抗的独立运行微电网改进下垂控制	黄春燕(39)

江苏省一级期刊

中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊

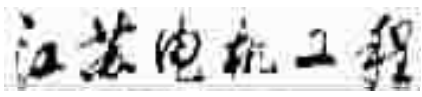
中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊

中国期刊全文数据库全文收录期刊

中文科技期刊数据库收录期刊

《CAJ - CD 规范》执行优秀期刊

(双月刊)



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

县域配电网配电自动化系统的通信方案选择	秦健,施金阳,孙超(44)
变压器调压区均压环的设计与优化	梅文哲,赵建,范小辉,等(48)
220 kV 变电站低压侧电压等级选择研究	丁诚(52)
分布式光纤测温系统在电力电缆在线监测中的应用	张春阳(56)
一起 220 kV 变电站母线 TV 二次回路的改造	王德全(59)
基于高压调功器的冲击负荷平衡研究	黄华,丁勇,常宝立,等(63)
基于电压补偿原理的避雷器泄漏试验方法研究	甘强,陈轩,邵新苍,等(66)
500 kV 线路远方跳闸保护运行分析及改进措施	虞晓洁,周云波(69)
配电变压器供应商生产制造能力评价体系研究	薛祥,张丹丹,周志强,等(72)

发电技术

火电厂净烟气烟道流场特性分析及流量测点选择	张振义,邹磊(75)
600 MW 机组脱硫增压风机与引风机二合一节能改造	于泳,马月明(78)

科普园地

火力发电厂电气设备状态检修	孙成林(81)
---------------	---------

信息	(23,51)
下期要目	(38)
广告索引	(16)

封面简介:

江苏射阳港发电有限责任公司是江苏沿海首座火电厂,为江苏省国信集团全资子公司,现有员工 617 人。“九五”、“十五”期间建成投产一、二期 4 台 13.75 万 kW 机组。“十一五”期间,通过关停 4 台 13.75 万 kW 机组建设三期 2 台 66 万 kW 超超临界燃煤发电机组。第一台 66 万 kW 机组已于 2011 年 10 月投入商业运营,第二台 66 万 kW 机组计划 2013 年 5 月份投产发电。该公司先后荣获全国模范职工之家、模范劳动关系和谐企业、厂务公开民主管理先进单位、“安康杯”竞赛优胜企业、绿化先进集体等国家级荣誉,以及电力系统文明单位、双达标企业、一流火电厂,省五一劳动奖状,省、市文明单位标兵、省 AAA 级“重合同守信用”企业,省、市先进企业党组织等称号。

CONTENTS

Thesis and Summary

Calculation of Wind Power Penetration Limit Based on DC Probabilistic Load Flow Computation	ZHANG Wenting, FAN Lixin(1)
Research on Optimal Sectionalizing Number of Distribution Lines	WANG Feng, LI Ying, WANG Chunling(5)
Design and Implementation of the New Generation of Relay Protection and Fault Information Management Station	QI Zhong, DU Jun, ZHANG Haining, et al.(8)
The Relationship Between Flow Path Performance and Heat Consumption Rate of Steam Turbine	LI Gang, XU Jianqun, TANG Tao, et al.(13)

Faults Diagnosis and Maintenance Strategy of Power Apparatus

Analysis of Lightning Fault on 220 kV and Above Transmission Lines in Jiangsu Power Grid	GAO Song, ZHOU Zhicheng, TAO Fengbo, et al.(17)
The Analysis of a Mal-operation Accident of Relay Protection Caused by DC System Fault	LIU Xiaogang, HUANG Haosheng, CUI Xiaoxiang, et al.(21)
The Analysis of Protection Configuration with an Actual Two-line Successive Tripping Accident	LIU Ming, FU Xiangyun, LU Di, et al.(24)

Electric Network Technology

Research and Application on Detection Technology of SF ₆ Leak in Electrical Equipment	LIN Min, YANG Jinggang, JIA Yongyong, et al.(27)
Power Harmonic Analysis Based on Multi-cycle Synchronous Sampling and Algebraic Operation in Spectrum	LI Anna, HUANG Jiahui, XIONG Jiefeng(30)
Modeling and Simulation of Micro Gas Turbine Generation	YI Guiping, HU Renjie(34)
Improved Droop Control Based on Virtual Impedance for Isolated Microgrid	HUANG Chunyan(39)
Communication Scheme Selection of Distribution Automation System for County Distribution Grid	QIN Jian, SHI Jinyang, SUN Chao(44)
Design and Optimization of Transformer Voltage Adjusting Zone Grading Ring	MEI Wenzhe, ZHAO Jian, FAN Xiaohui, et al.(48)
Low-side Voltage Level Selection of 220 kV Substations	DING Cheng(52)
Application of Distributed Fiber Optic Temperature Measurement System in Power Cables Online Monitoring	ZHANG Chunyang(56)
Discussion on the Secondary Circuit Remoulding of a 220 kV Bus TV	WANG Dequan(59)
Research of Impact Load Balancing Based On High-voltage Power Regulator	HUANG Hua, DING Yong, CHANG Baoli, et al.(63)
Research on Arrester Leakage Tests Based on Voltage Compensation	GANG Qiang, CHEN Xuan, SHAO Xincang, et al.(66)
Analysis of 500 kV Transmission Line Remote-tripping Protection and Improvements Measures	YU Xiaojie, ZHOU Yunbo(69)
Research on Evaluation System for the Manufacturing Capacity of Distribution Transformer Suppliers	XUE Xiang, ZHANG Dandan, ZHOU Zhiqiang, et al.(72)

Generation Technology

Flow Characteristics Analysis and Measurement Position Selection of Clean Gas Flue for Coal-fired Power Plants	ZHANG Zhenyi, ZOU Lei(75)
600 MW Unit FGD Booster Fan and Induced Draft Fan Co-retrofit For Energy-saving	YU Yong, MA Yueming(78)

Popular Science Field

The Condition-based Maintenance of Coal-fired Power Plant Electrical Equipment	SUN Chenglin(81)
--	------------------

Jiangsu Electrical Engineering(Bimonthly)

Competent Authorities Jiangsu Electric Power Company

Sponsor Jiangsu Electric Power Company

Jiangsu Society of Electrical Engineering

Editor and Publisher Editorial Department of Jiangsu Electrical Engineering

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

E-mail jsdj@chinajournal.net.cn(网外)

jee@js.sgcc.com.cn(网内)

Tel (025)86558772, 86558020

Fax (025)86558020

Publication Number ISSN 1009-0665

Post Code 211103

基于直流概率潮流的风电穿透功率极限计算

张文婷¹, 范立新²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 风力发电已经成为清洁能源中发展最快的一种发电方式, 确定风电穿透功率极限对风电并网的规划和运行有着重要作用。文中提出了基于直流概率潮流的风电穿透功率极限计算方法, 计算中通过直流概率潮流计算, 综合考虑风电场出力、发电机出力、节点负荷等因素的随机性, 得到含有风电场的电力系统中线路有功潮流的概率分布, 然后利用随机规划理论和改进的遗传算法求解风电穿透功率极限。最后以 IEEE30 系统为算例, 验证计算方法的有效性。

关键词: 直流概率潮流; 风电穿透功率极限; 机会约束规划; 改进遗传算法

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2014)04-0001-04

近年来, 随着国家对风能等清洁能源的高度重视, 风力发电市场不断扩大, 风电装机容量大幅增加。风电的波动特性是影响电力系统对其接纳能力的最大因素^[1]。为了能在保证系统安全运行的情况下尽可能地利用风能, 则必须求解出风电场能够接入某一电力系统的最大容量。

风电穿透功率极限是指系统能够接受的最大风电场装机容量占系统最大负荷的百分比^[2]。由于风电场的接入对电力系统会产生多种影响, 所以风电穿透功率极限的求解没有统一的办法。在求解风电穿透功率极限的过程中, 需要获取系统中的线路潮流分布情况。由于在系统规划设计阶段, 原始数据并不很精确且规划方案众多, 对于计算速度的要求比精确度更高, 因此产生的直流潮流可以在合理的误差内大大提高计算速度。概率潮流计算方法可计及电力系统运行的各种扰动和随机因素, 快速得到支路潮流的概率描述。在其几种主要的求解方法中, 蒙特卡罗随机模拟法算法简单, 但是运算量大, 耗时较长, 文献[3]指出传统的蒙特卡洛模拟忽略了系统的稳态运行。卷积法在处理大规模的电力系统时, 计算繁琐。半不变量法是卷积法的一种简化算法。文献[4]利用了半不变量法计算得到了接入大规模风电设备的电力系统中线路的概率潮流分布, 结果表明与蒙特卡洛模拟法相比, 这种方法在保证正确率的同时, 大幅减少了计算的时间。

1 直流概率潮流计算方法

1.1 理论基础

设随机变量 x 的概率密度函数是 $f(x)$, 期待值为 μ , 可以求出其 v 阶原点矩和中心矩:

$$\alpha_v = \int_{-\infty}^{\infty} x^v f(x) dx \quad (1)$$

$$\beta_v = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^v f(x) dx \quad (2)$$

半不变量 K_v 是随机变量的一种数学特征, 它可以由不高于相应阶次的各阶矩求得^[5]。为了简化级数形式, 定义 g_v :

$$g_v = \frac{K_v}{\sigma^v} = \frac{K_v}{\sigma^{\frac{v-2}{2}}} \quad (v=1, 2, \dots, 8) \quad (3)$$

式(3)中: g_v 为 v 阶规格化半不变量; σ 为标准方差。

利用规格化后的各阶半不变量 g_v , 可以把随机变量 x 的分布函数表示为以下形式的 Gram-Charlier 级数展开式:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} N(x) dx + N(\bar{x}) \left[\frac{g_3}{3!} H_2(\bar{x}) + \frac{g_4}{4!} H_3(\bar{x}) + \frac{g_5}{5!} H_4(\bar{x}) + \frac{g_6 + 10g_3^2}{6!} H_5(\bar{x}) + \frac{g_7 + 35g_3g_4}{7!} H_6(\bar{x}) + \frac{g_8 + 56g_3g_5 + 35g_4^2}{8!} H_7(\bar{x}) + \dots \right] \quad (4)$$

式(4)中: $f(x)$ 为随机变量 x 取值大于或者等于的概率; $N(x)$ 为标准正态密度函数; $N_{\gamma}(x)$ 为 Hermite 多项式, 这里用到的是规格化随机变量 $\bar{x} = \frac{x - \mu}{\sigma}$ 。

1.2 直流概率潮流模型

直流潮流算法关心的是电网有功潮流分布, 仅通过一次解维线性方程组便可得到有功潮流分布。对于大规模长距离电网, 基于文献[6]的一系列假设可得节点注入有功功率的计算方程的矩阵形式:

$$P = -B'\theta \quad (5)$$

式(5)中: P 和 θ 分别为 $n-1$ 阶节点有功功率注入和电压相角向量。

在直流概率潮流计算中, 可将公式写成一般矩阵的形式:

$$W = f(X) \quad (6)$$

$$Z = g(X) \quad (7)$$

式(6,7)中: W 为节点注入有功功率向量; X 为节点相角构成的状态变量; f 为功率方程; Z 为支路潮流向量; g 为支路潮流方程。

当系统的注入功率和支路潮流发生扰动时:

$$W = W_0 + \Delta W \quad (8)$$

$$Z = Z_0 + \Delta Z \quad (9)$$

将式(8,9)按泰勒级数展开并忽略高次项,得:

$$\Delta X = S_0 \times \Delta W \quad (10)$$

$$\Delta Z = G_0 \times \Delta X \quad (11)$$

其中:

$$S_0 = [f'(x)]^{-1} \quad (12)$$

$$G_0 = g'(x_0) \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)可得:

$$\Delta Z = G_0 \times S_0 \times \Delta W = T_0 \times \Delta W \quad (14)$$

运用半不变量 2 个重要的性质:(1) 随机变量之和的各阶半不变量等于各随机变量的各阶半不变量之和;(2) 随机变量 a 倍的 k 阶半不变量等于其阶半不变量的 a^k 倍。可以得到状态变量 ΔX 和 ΔZ 支路潮流的各阶半不变量,即:

$$\Delta X^{(k)} = S_0^{(k)} \times \Delta W^{(k)} \quad (15)$$

$$\Delta Z^{(k)} = T_0^{(k)} \times \Delta W^{(k)} \quad (16)$$

式(15,16)中: $S_0^{(k)}$ 和 $T_0^{(k)}$ 分别为矩阵 S_0 和 T_0 中元素的次幂构成的矩阵。

这样根据式(4)就可以在已知各节点发电机出力分布、负荷分布的情况下分别得到发电机与负荷的半不变量,然后求解出支路潮流的概率分布。同样地本文将风机视为节点负荷接入系统后,得到含有风电场的电力系统中支路潮流的概率分布。

2 风电穿透功率极限求解模型及算法

2.1 风电场随机出力模型

研究结果验证,大部分地区的年平均风速的概率分布几乎都符合 Weibull 分布^[7]。Weibull 分布的概率密度函数:

$$f(v) = \begin{cases} \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) & v \geq 0 \\ 0 & v < 0 \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中: v 为风速; $k(>0)$ 为形状参数; $c(>0)$ 为尺度参数。

风力发电机输出功率曲线如图 1 所示。它描述的是风力发电机出力与风速之间的关系。

根据图 1, 风电机组输出的有功功率 P_w 与风速 v 之间的函数关系:

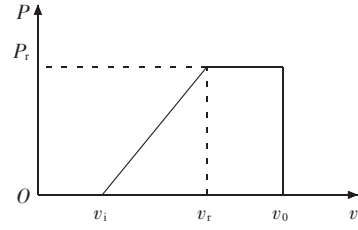


图 1 风电机组功率输出曲线

$$P_w = \begin{cases} 0 & v \leq v_i \\ k_1 v + k_2 & v_i \leq v \leq v_r \\ P_r & v_r \leq v \leq v_0 \\ 0 & v \geq v_0 \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中: $k_1 = P_r / (v_r - v_i)$, $k_2 = -k_1 v_i$ 。其中 P_r 为风机发电机的额定功率; v_r 为额定风速; v_i 为切入风速; v_0 为切出风速。

经统计,在绝大部分时间内风速维持在 v_{ci} 和 v_r 之间, P_w 与 v 近似为一次函数关系。在不考虑风电场尾流效应等因素时,风电场的有功出力 P_f 可以用运行的风机数乘以单台风机的出力求得:

$$P_f = n \times P_w \quad (19)$$

式(19)中: n 为运行的风机数; P_w 为单台风机的出力。

结合风速的概率密度函数可得风电场输出有功功率的概率密度:

$$f(P_f) = \frac{k}{nk_1 c} \left(\frac{P_f - nk_2}{nk_1 c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{P_f - nk_2}{nk_1 c}\right)^k\right) \quad (20)$$

其概率密度分布为三参数的 Weibull 分布函数。

2.2 随机规划模型

采用随机规划理论求解基于直流概率潮流的风电穿透功率极限,可将风电场可接入容量的最大化作为目标函数,系统可调参量(如发电机出力)作为控制变量,由控制变量决定的参量(如节点电压相角)为状态变量,直流潮流方程为等式约束,系统安全运行及稳定性水平为不等式约束。考虑到支路传输的有功功率存在一定几率越限,由直流概率潮流求解线路潮流概率分布后,可以得到有功功率越限的概率,其应该小于一个水平。所以给出输电线路输送有功功率上下限和系统频率偏移约束 2 个不等式约束条件。

2.2.1 目标函数

$$\text{目标函数: } \max P_w \quad (21)$$

2.2.2 约束条件

(1) 输电线路输送有功功率极限约束:

$$P_i \{-P_{\max} \leq P_{ij} \leq P_{\max}\} \geq \alpha_1 \quad (22)$$

式(22)中: P_{ij} 为输电线路传输的有功功率; $P_{\max}$ 为输电线路传输有功功率上限。

(2) 系统频率偏移约束:

$$P_r \{-\Delta f_{\max} \leq \Delta f \leq \Delta f_{\max}\} \geq \alpha_2 \quad (23)$$

式(23)中: Δf 为系统频率偏移; $\Delta f_{\max}$ 为系统频率偏移上限。

频率偏移可通过系统的静态频率特性计算:

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{K_s} \quad (24)$$

式(24)中: ΔP 为系统有功功率不平衡量; K_s 为系统单位调节功率。 K_s 包括发电机单位调节功率 K_G 和负荷单位调节功率 K_L , 即:

$$K_s = \sum K_G + K_L \quad (25)$$

其中:

$$K_L = \frac{\Delta P_L}{\Delta f} \quad (26)$$

$$K_L = \frac{\Delta P_L}{\Delta f} \quad (27)$$

2.3 算法流程

随机规划模型的求解采用改进遗传算法^[8]。其相较于传统的遗传算法增加了保留操作,即将上一代种群中的若干最优染色体直接复制到本代,为保持种群规模不变,将本代最差的染色体删去。数学上可以证明改进的遗传算法能以概率“1”收敛于全局最优解。

总的来说,采用随机规划和遗传算法求解基于直流概率潮流的风电穿透功率极限计算,就是通过遗传算法产生初代染色体种群,也就是随机产生风电场装机容量的初始种群后,综合考虑风电场出力,发电机出力,负荷功率等的随机性,将各节点注入功率视为相互独立的随机变量,通过直流概率潮流计算得到这些随机变量的概率分布后,检验是否满足设定的约束条件,然后进行交叉、变异、复制、保留操作,产生新的种群,如此反复直到设定的代数。基于直流概率潮流的风电穿透功率计算方法求解流程如图2所示。

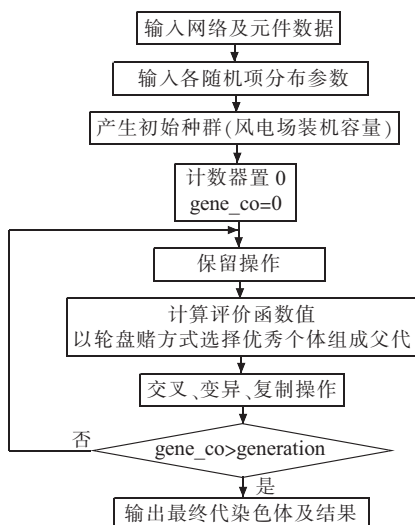


图2 基于直流概率潮流的风电穿透功率极限计算流程图

3 算例

本文采用 IEEE 30 节点网络作为测试系统,计算其接入风机后的有功潮流概率分布,以分析风电场对电力系统的影响,求解风电穿透功率极限。IEEE 30 系统有 30 个节点,41 条支路。其接线如图3所示。

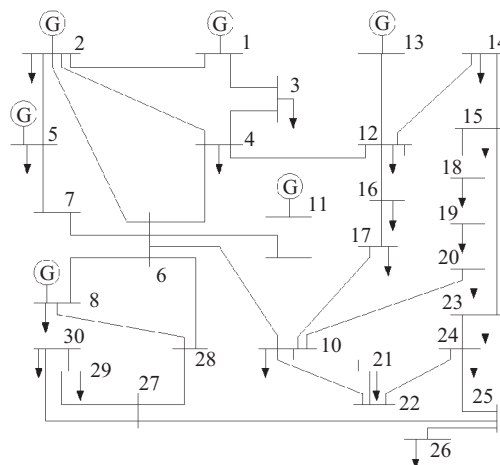


图3 IEEE 30节点测试系统

图3中节点1,2,5,8,11,13为发电机节点,将风电机视为负荷节点,风电并网接入点选择在22号节点。本例中将发电机随机出力视为均匀分布的连续性随机变量分布,其取值范围即为发电机功率的上下限。对于节点负荷,采用正态分布模型。假设风机以不同功率接入电力系统,通过 MATLAB R2012b 编程进行仿真计算系统的直流潮流分布。风机接入容量不同时,几个代表性支路对应的不过载概率如表1所示。

表1 不同风机接入容量时典型支路的不过载概率

风机接入电网容量 / p.u.	0.5	0.4	0.3	0.2
支路 2-4	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
支路 10-21	0.992 0	0.997 2	0.999 5	1.000 0
支路 16-17	0.999 9	1.000 0	1.000 0	1.000 0
支路 21-22	0.996 2	0.999 7	0.999 7	1.000 0
支路 22-24	0.952 6	0.984 7	0.984 7	1.000 0

从表1可看出,随着风机接入容量的增大,线路有功潮流的稳定性在变差,支路电流的过载概率增大,这会严重影响电网中的电能质量、频率稳定及安全性。此外,由表1中数据还可看出,支路21-22和22-24的过载概率最大,而距离节点22较远的支路2-4的过载概率很小,说明风电场的接入,使得距离风电场接入点越近的支路受到的影响越大。下面给定约束条件,假设风电场有功功率的最大变化率不超过其装机容量的20%。各约束的置信水平取值如表2所示。

首先选择风电装机容量作为染色体 $[P_w, 22]$, 在 $[0, 0.6]$ (总负荷大致接近于3) 范围内随机产生风电机

表 2 各约束条件的置信水平

约束条件	置信水平
频率偏移约束	0.98
线路传输极限约束	0.99

装机容量,经过 300 代的计算后,染色体逐渐收敛于最优解。最终生成的染色体为[0.232 3],代入校验函数得到表3。

表 3 越限概率校验

约束条件	不越限概率
频率偏移约束	0.980 0
线路传输极限约束	0.999 7

其置信水平符合要求,即为最优解。因此,在上述约束情况下的风机最大接入容量为 0.232 3 p.u., 此时整个系统的峰荷为 2.954 p.u., 故接在 22 号节点处风机的风电穿透功率极限为 $0.232\ 3/2.954=7.864\%$ 。

若将风电并网接入点改为 30 号节点,在以上相同的假设和约束条件下,染色体 $[P_w\ 30]$ 最终得到 [0.215 0],校验其越限概率得到表 4。

表 4 越限概率校验

约束条件	不越限概率
频率偏移约束	0.980 4
线路传输极限约束	0.990 2

则此时的风电穿透功率极限为 $0.215\ 0/2.954=7.278\%$ 。由此看出,风电穿透功率极限的大小与风电场并网的接入点有关,合理的选择风电并网的接入点,可以有效地提高风电穿透功率极限的大小。

4 结束语

本文提出了直流概率潮流模型,通过半不变量和 Gram-Charlier 级数展开方法,计算含有风电场的电力

系统中支路有功潮流的概率分布。在获取支路有功功率的概率分布基础上,采用随机约束规划模型对电力系统的潮流分布、频率波动等进行约束,通过改进的遗传算法求解系统的风电穿透功率极限。最后在 IEEE 30 系统中验证了模型的可行性。通过算例得到了符合置信水平的系统风电穿透功率极限数值。同时得出结论,风电并网后,距离风电场接入点越近的支路受到的影响越大,越容易过载,并指出接入点的选择对风电场规划有着重要作用。

参考文献:

- [1] 霍雨翀,范子恺.基于改进天气发生器的风速与日照模型组合预测方法研究[J].江苏电机工程,2013,32(3):6-9,12.
- [2] 廖萍,李兴源.风电场穿透功率极限计算方法综述[J].电网技术,2008,32(10):50-53.
- [3] HAN X, MU M, QIN W. Reliability Assessment of Power System Containing Wind Farm Based on Steady-state Power Flow [C]// Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th International Conference on. IEEE, 2010: 756-760.
- [4] DA SILVA A M L, ARIENTI V L. Probabilistic Load Flow by a Multilinear Simulation Algorithm[C]//IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution). IET Digital Library, 1990, 137(4): 276-282.
- [5] 王锡凡.电力系统优化规划[M].北京:水利电力出版社,1990: 138-148.
- [6] 张伯明,陈寿孙.高等电力网络分析[M].北京:清华大学出版社,1996:187-188.
- [7] 李军,胡非,王丙兰,等.风速的 Weibull 分布参数[J].太阳能学报,2012,33(10):667-1671
- [8] 张粒子,舒隽,林宪枢,等.基于遗传算法的无功规划优化[J].中国电机工程学报,2000,20(6):5-8.

作者简介:

张文婷(1991),女,江苏徐州人,硕士研究生,从事可再生能源在电力系统中应用以及电网规划研究工作;

范立新(1966)男,安徽巢湖人,高级工程师,从事继电保护和新能源研究工作。

Calculation of Wind Power Penetration Limit Based on DC Probabilistic Load Flow Computation

ZHANG Wenting¹, FAN Lixin²

(1.School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

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

Abstract: Among renewable sources of energy, wind power is becoming the fastest growing form of electricity generation. It is of great importance for the planning and operation of wind farm to calculate the wind power penetration limit. This paper proposes an approach to calculate the wind power penetration limit based on DC probabilistic load flow computation. First, it analyzes the influence introduced by wind farm to the load flow of the power system. After that, it builds a model to solve the wind power penetration limit by stochastic programming and genetic algorithm. Then results on IEEE30 system validate the proposed approach.

Key words: wind power penetration limit; DC probabilistic load flow; stochastic programming; genetic algorithm

配电网线路最优分段数算法研究及应用

王峰,李颖,王春宁
(南京供电公司,江苏南京 210019)

摘要:分析研究了配电网多种典型接线模式在不同负荷密度、不同变电站容量下计及可靠性收益的线路最优分段数。以配电网可靠性和经济性综合最佳为目标,考虑变电站、线路建设和运行等费用,采用“现值转年值”的方法将一次投资费用转化为年费用,确定各典型接线模式在多阶段负荷密度及普适性变电站场景下的最优分段数。最后通过仿真算例验证了本算法的合理性。

关键词:配电网;最优分段数;可靠性;经济性;等年值算法

中图分类号: TM41

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2014)04-0005-03

电力系统的基本功能是向用户输送电能,所有用户都期望以最低的价钱买到具有高度可靠的电能。然而,经济性与可靠性这2个因素总是相互矛盾的。从最优分段数的讨论来看,要提高供电可靠性,使停电损失减小,就必须增加网络建设投资成本。但是从经济性上考虑,线路分段越多,分段开关的投资也越多,并且线路安装的分段开关过多易造成相应的维护工作量和设备事故率的增加,并且在一定条件下,由于分段开关自身具有一定的故障率,当分段开关达到一定数量时,反而给整个配电网的可靠性带来负面效应。因此,通过技术经济分析,确定每条线路的最优分段数具有实际应用意义^[1,2]。

1 最优分段数分析基本思路

所谓最优分段数,就是指能够使选定的接线模式在选定地区的可靠性和经济性综合达到最佳的线路分段数,线路最优分段数的确定直接关系到电网接线模式的供电可靠性和建设经济性^[3]。城市配电网网架由线路组成,它可以分布成为干线和分支线,或者是经线和纬线加分支线。在干线中为了能够适应负荷的发展和线路的分割,减少停电用户的数量 and 进行必要的相互连接,就提出在线路上进行分段。为了使配电线路的运行更加灵活,减少事故时停电的用户数量,也为了使线路检修时受影响用户的数量最小,就需要对各种接线模式的分段情况进行具体的分析。

同一接线模式下,不同的分段情况使得停电时影响的用户数量是不同的。因此对于每一种接线模式,应该先找出在不同边界条件下该模式的最优分段情况。各种接线模式的最优分段数分析基本思路如下:考虑在不同的变电所容量和不同的负荷密度下,首先确定变电所的供电区域;再在这一供电区域内考虑由某种接线模式的不同分段情况的线路所构成的网架

结构;对每一种网络结构计算其年总费用,投资费用和可靠性等指标,最后根据计算指标的大小选择出最优分段数。配电网系统中典型接线模式有单辐射接线、双侧电源多分段单联络接线和两供一备接线、双侧电源双环式接线的多分段等结构,具体示意如图1—4所示^[4]。

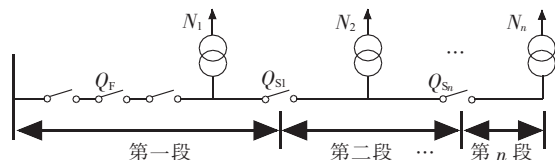


图1 多分段单辐射接线结构图

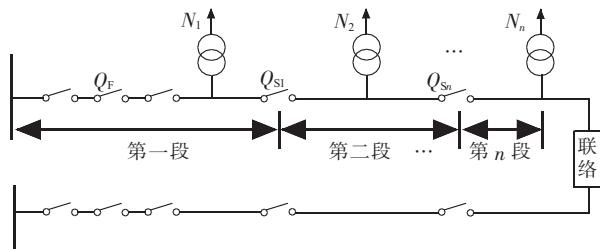


图2 多分段单环网接线结构图

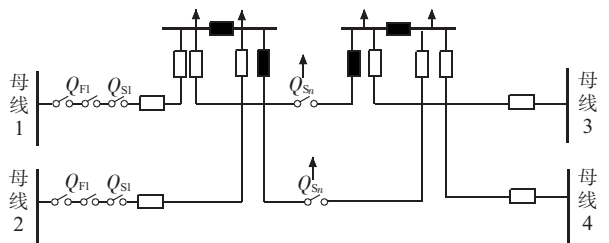


图3 多分段双侧电源双环式接线结构图

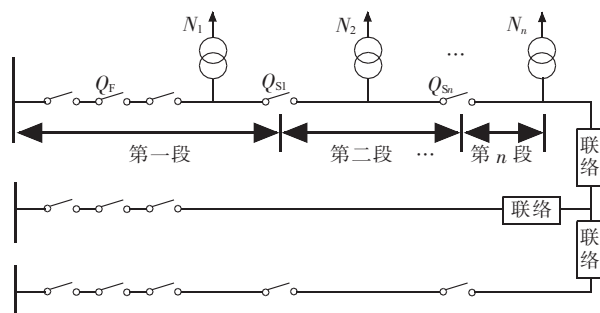


图4 多分段两供一备接线结构图

2 最优分段数计算模型

供电可靠性与总费用之间的曲线关系如图 5 所示。当有 100% 的供电可靠率时,用户的停电损失费用为 0。供电可靠性每增加一个百分点,供电企业为改善供电可靠性而增加的投资费用将增加,所以达到 100% 的供电可靠性在经济上也不一定是合适的,即随着可靠性的进一步提高,供电成本将急剧上升。总费用曲线上的最小值点是社会费用最小时所对应的点,这个点可以用来决定线路的供电可靠性水平。

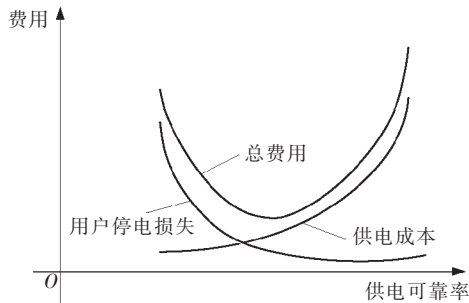


图 5 配电网供电可靠率与总费用之间的平衡曲线

在最优分段数的讨论中,对应一定的供电半径,随着分段数的增加,供电企业成本的增加将是线性的,是增加的分段开关的投资年值。这样依然能够从停电损失和供电成本的叠加曲线中找出最低点,这一点对应的就是总的经济性最优的分段开关数,即线路的最优分段数^[5]。

3 基于等年值算法的最优分段数确定

为不失一般性,假设变电站供电区域为圆形,那么变电站供电半径 R 即为该区域半径^[6]:

$$R = \sqrt{P_{\max} / \pi D} \quad (1)$$

式(1)中: $P_{\max}$ 为变电站最大负荷; D 为供电区域平均负荷密度, MW/km²。

对于完全放射状接线来说,单回主干线长度即为供电半径,而对于大多数接线模式而言,单回主干线长度需要考虑联络线的长度,具体做法是把联络线平均分摊到每一条主干线上。联络开关的处理也一样,平均分摊到所涉及的线路中。

3.1 最优分段数确定

以分段数为变量,分别计算停电损失 S 和配电网费用等年值 N_{FN} ,二者叠加曲线的最低点即线路的最优分段数。考虑可靠性和经济性的具体分析、计算方法如下所述。

3.2 可靠性计算

为简化计算过程,模型满足条件:(1) 供电区域设为圆形且负荷均匀分布;(2) 同一方案中各个变电所的变压器容量、台数和负载率均相同;(3) 接线模式均

取其最大经济负载率,单电源辐射状接线负载率取为 100%,不同母线出线的环式接线负载率取为 50%;(4) 变电站功率因数统一取为 0.9。

单辐射接线线路负载率最高可达 100%,一旦线路发生故障,负荷不能够转移,就会有相应的用户停电。一般情况下配电变压器的故障率很低,如果母线出现故障,则受影响的用户数为所有连接到该母线的出线所带的用户,平均停电时间为母线的平均修复时间。当线路或者分段开关出现故障时,对不同的分段故障分开进行分析。以多分段单放射状接线计算可靠性收益^[7],如图 1 所示。母线和第一段出现故障时,受影响的用户数为 $N_1+N_2+N_3$,平均停运时间即为线路的平均修复时间;第二段、第三段故障时,受影响的用户分别为 N_2+N_3 和 N_3 ,平均停运时间为线路的平均修复时间;另外,可以容易观察到,分段越多,线路因故障受到影响的用户数越少,从而线路的整体可靠性有一定程度的提高。设线路的分段数为 n ,该线路总用户为 N ,负荷均匀分布,每一段用户数为 N/n ,则线路的用户停电持续时间为:

$$\begin{aligned} \sum U_i N_i = & \lambda_L \times \frac{N}{n} \times \frac{R}{n} \times \left\{ \left(\sum_{i=1}^n i \right) \times t_0 + \left[\left(\sum_{i=1}^n i \right) - n \right] \times t_1 \right\} + \\ & \lambda_b \times \frac{N}{n} \times \left\{ \left(\sum_{i=1}^n i \right) \times t_2 + \left[\left(\sum_{i=1}^n i \right) - n \right] \times t_1 \right\} + \\ & \lambda_D \times \frac{N}{n} \times \left\{ \left(\sum_{i=1}^n i \right) \times t_3 + \left[\left(\sum_{i=1}^n i \right) - n \right] \times t_1 \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中: R 为供电半径, km; λ_L 为线路的平均故障率, 次/(km·a); λ_b 为分段开关的故障率, 次/年; λ_D 为负荷点自身故障率, 次/年; t_0 为线路的平均修复时间, h/次; t_1 为线路的倒闸时间, h/次; t_2 为分段开关的修复时间, h/次; t_3 为负荷点自身的修复时间, h/次。

其他几种接线模式线路的用户停电持续时间可应用类似方法计算。采用产电比算法将停电时间折合成经济效益 S :

$$S = \text{停电持续时间} \times \text{度电产值} \quad (3)$$

3.3 经济性计算

3.3.1 变电站经济性评估

变电站的综合费用包括投资费用和运行费用。变电站的投资费用包括变压器综合投资、配电装置投资以及一些不可预见的附加费用。变电站的运行费用包括一年中变电站的电能损耗以及维护、检修费等。变电站年运行费用 U_s 和等年值费用 N_{Fs} :

$$U_s = \alpha \Delta A_s + U_0 \quad (4)$$

$$N_{\text{Fs}} = C_s \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + U_s \quad (5)$$

式(4,5)中: U_0 为变电站的检修、维护费; α 为电价;

ΔA_s 为变压器全年电能损失总值; C_s 为变电站综合投资费用; r 为电力工业年投资回收率(贴现率), 取 10%; n 为变电站经济使用年限, 取 25 年。

3.3.2 线路经济性评估

(1) 线路投资费用。架空线和电缆投资费用:

$$Z_L = N_L \times k' \times L \times C_0 \quad (6)$$

$$C_L = N_L \times [L \times k' \times C_0 + C_d + (n-1) \times C_f + C_c] + M \times C_1 \quad (7)$$

式(7)中: N_L 为变电站出线总回数; k' 为线路曲折系数, 即用理想线路长度估算实际线路长度的比例系数, 对于不互联的接线方案, k' 取 1.1, 对于互联方案, k' 取 1.3; L 为每回主干线长度; C_0 为单位长度线路投资费用; C_d 为线路首端断路器的投资; C_f 为分段开关(即负荷开关)的投资; C_c 为联络开关分摊到每条支路的费用; n 为线路的分段数; M 为开关站个数; C_1 为每座开关站的投资费用。

其中, 单回主干线的长度包括该线路本身的长度以及联络线按均匀原则分担到该线路的长度。

(2) 线路年运行费用。年运行费用包括线路损耗费用和线路检修、维护费用:

$$U_L = \alpha \Delta A + U_1 \quad (8)$$

式(8)中: U_1 为线路的检修、维护费; α 为电价; ΔA 为线路全年电能损失总值。

$$\Delta A = N_L \times (\Delta P + K \Delta Q) \times \mu \times \tau \times \alpha \quad (9)$$

式(9)中: K 为无功经济当量; μ 为线路负荷分布系数, 取 0.33; τ 为最大负荷损耗小时数; ΔP , ΔQ 分别为负荷分段 i 上的有功和无功损耗。

(3) 线路综合费用等年值:

$$N_{FL} = C_L \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + U_L \quad (10)$$

式(10)中: r 为电力工业年投资回收率(贴现率), 取 10%; n 为线路经济使用年限(经济寿命), 架空线路取 30 年, 电缆线路取 40 年。

综合上所述, 配电网费用等年值即为变电站年费用和线路年费用之和:

$$N_{FN} = N_{Fs} + N_{FL} \quad (11)$$

4 算例

以江苏某重点城市为例, 考虑变电站容量为 $2 \times 63 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 负荷密度为 10 MW/km^2 , 分别计算架空线单辐射、双侧电源多分段单联络和二供一备 3 种接线模式的最优分段数。计算结果如表 1 和图 6 所示。

由计算结果可得, 在给定的计算条件下, 架空线单辐射、双侧电源多分段单联络和二供一备 3 种接线模式的最优分段数分别为 4, 3 和 5。随着分段数的增加,

表 1 架空线典型接线单位负荷年费用 $\text{万元} \cdot (\text{MW} \cdot \text{a})^{-1}$

分段数	单辐射	双侧电源多分段单联络	二供一备
1	6.433	6.866	9.388
2	5.626	6.218	8.257
3	5.454	6.110	7.993
4	4.419	6.127	7.919
5	5.436	6.192	7.917
6	5.478	6.281	7.954
7	5.533	6.384	8.009
8	5.597	6.495	8.076
9	5.667	6.612	8.151
10	5.740	6.732	8.232

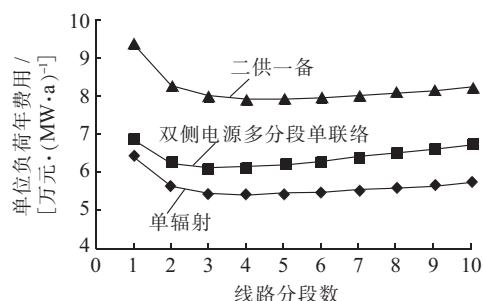


图 6 架空线单位负荷年费用对比图

单位负荷年费用先减小而后又逐渐增大, 导致该趋势的主要原因是随着分段数的增加, 即增加对分段开关的投资, 分段越多, 每段上的用户就越少, 每次由于故障或计划维修造成停电影响的户数就越少, 每段停电造成的损失逐渐减小, 因而负荷年费用逐渐减少; 而过了最优分段点之后, 分段设备等投资占据主导地位导致负荷年费用增加。

5 结束语

本文以配电网可靠性和经济性综合最佳为目标, 采用产电比法将可靠性折合为量化的经济效益, 结合配电设备的投资、运行和维护等费用, 研究分析了配电网各典型接线模式在多阶段负荷密度及普适性变电站场景下的最优分段数, 并得出了相应的计算方法。最后通过仿真算例验证了本算法的合理性。

参考文献:

- [1] 康庆平, 卢锦玲, 杨国旺. 确定城市 10 kV 配电网线路最优分段数的一种方法[J]. 电力系统自动化, 2000(13): 57-59.
- [2] 孙莉. 并列运行配电变压器经济运行软件设计[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(6): 43-46.
- [3] 陈毅勇. 浅析 10 kV 配电网的最优分段设置[J]. 广东科技, 2009(14): 183-185.
- [4] 葛少云, 张国良, 申刚, 等. 中压配电网各种接线模式的最优分段[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 87-91.
- [5] 陈冲, 陈小伟, 沈明慷, 等. 含分布式电源的配电网馈线系统保护研究[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(6): 6-10.

新一代继电保护及故障信息管理主站的设计与实现

祁忠, 笃竣, 张海宁, 李枫, 冯佳男, 刘焕志

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:分析了当前继电保护及故障信息管理(以下简称保信)主站系统存在的问题,提出了新一代保信主站的设计原则,着重阐述了新一代保信主站的软件结构设计、硬件结构设计、数据库设计和应用功能设计。新一代保信主站基于统一的应用支撑平台,以 IEC 61970 标准为基础并进行扩展,实现了对电网一次、二次设备及其关联关系的全景建模,实现了电网故障的智能分析功能。该系统既能作为独立的保信主站系统运行,也可与 EMS 系统集成在统一的平台上一体化运行,能够满足用户对保信主站系统不同的建设要求。文中所研制的系统已经在多个电网得到成功应用。

关键词:继电保护;管理主站;故障录波;电网故障分析

中图分类号: TM734

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)04-0008-05

近年来,为了实现对继电保护装置和故障录波装置的实时监视、远程控制,实现对电网故障的实时分析,各级电力调度中心相继建设了继电保护及故障信息管理(以下简称保信)系统,该系统对提高电网运行管理水平、提高事故的处理速度发挥了重要作用,已经成为继电保护运行管理、辅助分析和决策不可或缺的技术支持系统^[1-5]。随着电网二次系统建设的不断发展,应用水平的不断提高,对保信主站提出了更高的要求。现有的保信主站普遍存在以下几个问题:

(1) 功能设计简单,仅仅实现了对保护装置和故障录波装置的数据采集、监视、故障信息归档等基本功能,缺乏对数据的深入分析,对电网故障分析的智能化程度低。

(2) 大部分保信主站独立设计,没有遵循统一的建模规范,缺少标准的数据交换接口,与能量管理(EMS)系统间信息交互困难,容易形成信息孤岛,不能充分发挥保信系统的作用。

(3) 在调度集控一体化的情况下,需要将 EMS 系统与保信系统进行有效的整合,实现 EMS/保信系统的横向融合和一体化运行^[6,7]。

由于传统保信主站没有构建在统一的支撑平台之上,没有考虑与 EMS 系统的一体化设计,无法适应 EMS/保信一体化建设的需求。

1 保信主站的设计要求

现代电网日益趋于复杂,一个区域的保信主站通常要面对几百座不同电压等级变电站的接入,需要采集和处理几千台二次设备的信息,对二次设备的信息要进行综合分析,还要与 EMS 系统进行数据交互,获取电网模型和电网实时运行状态。保信系统具有数据结构和信息结构复杂、功能复杂、跨系统、可靠性和安全性要求高等特点,因此新一代保信主站在设计时,至少

遵循以下的设计原则:

(1) 保信主站应支持不同的硬件平台和不同的操作系统,能够跨平台混合运行;采用分布式系统设计,满足大规模子站接入的需要;采用模块化设计,方便系统功能的扩展。

(2) 保信主站应采用平台化结构,在基础平台上构建保信主站应用,从应用功能、图模库维护、人机界面展示等方面考虑与其他应用系统的一体化设计,实现应用系统之间的相互融合和信息集成,逐步实现更多的综合智能应用功能;

(3) 保信主站应基于 IEC 61970 标准构建保信应用模型,实现电网一二次设备模型及参数的全景建模,满足保信系统高级应用的需要。作为独立保信系统,应提供标准的服务接口,支持以 CIM/XML 文件进行电网模型的交互,支持以 SVG 格式文件进行电网图形的交互,支持以 E 格式文件进行电网实时断面的交换,实现保信系统与外部系统(如 EMS 系统)之间模型与数据的共享。

(4) 保信主站应支持信息的充分获取和共享,具有智能化的信息处理、展示及分析决策手段,能够实现基于电网运行信息的智能故障诊断等功能。

2 主站架构设计

2.1 主站软件结构

保信主站采用如图 1 所示的软件体系架构,由统一应用支撑平台和基于该平台一体化设计的保信应用组成。保信主站支持现今流行的各种硬件平台和操作系统。通用中间件屏蔽操作系统的差异,使得保信主站能够运行在多种操作系统和硬件平台上,具有很好的可移植性。统一应用支撑平台层构筑在通用中间件层之上,包括面向对象数据库管理平台、网络通信管理平台、图形开发平台等,为各类电力系统应用软件的开发提供网络通信、数据库、图形等方面的支持。保信应用软件在

统一支撑平台层之上,实现前置通信、模型管理、告警及事件记录、定值管理、在线监视、Web 发布、智能故障分析等功能。

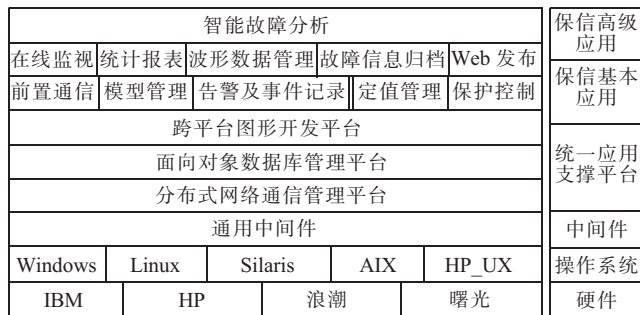


图 1 保信主站软件结构

2.2 主站硬件结构

保信主站有 2 种运行模式:独立保信主站系统,EMS/保信一体化系统。

独立保信主站典型硬件结构如图 2 所示。它由主备前置服务器、主备数据服务器、维护工作站、继保工作站、Web 服务器等硬件组成。通信服务器、数据服务器采用双机热备用方式运行,当值班机故障时,系统自动进行切换,由备机升为值班机运行,保证系统功能正常使用。主站设置专门的通信前置机与子站进行通信,实现了主站系统网络与调度数据网的隔离。主站通信网络采用双网冗余结构,双网采用均衡流量管理,有效地保证了网络传输的实时性和可靠性。按照“电力二次系统安全防护规定”,主站数据服务器与 Web 服务器之间通过单向隔离装置建立连接,将数据单向提供给 Web 服务器,保证数据信息的单向流通,保证保信系统的安全性。通过防火墙,与 EMS 系统进行数据交互。

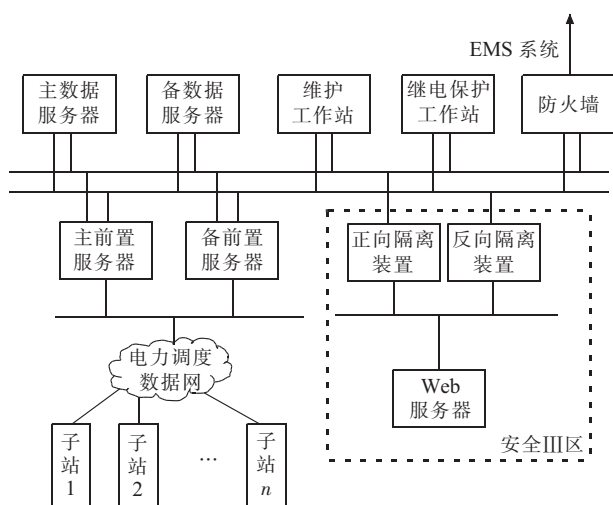


图 2 独立保信主站硬件结构

EMS/保信一体化系统典型硬件结构如图 3 所示。由于保信主站需要处理波形文件、定值等较大的数据,为了不影响 EMS 系统的实时性,保信应用通常单独配置前置服务器、数据服务器,但与 EMS 系统共用历史

服务器、Web 服务器、维护工作站等硬件。一体化系统利用应用分布式技术部署远动采集和保信采集任务在 EMS 前置服务器和保信前置服务器上,配置不同规约插件和数据模型插件,分布式采集远动数据和保信数据,保证了采集的实时性、可靠性和安全性。对于电网规模较小、子站数量有限的一体化系统,可以把保信主站的前置采集任务部署在 EMS 前置服务器上,保信主站的数据处理任务部署在 EMS 的数据服务器上,这样无需为保信应用单独配置服务器,可以简化系统结构,节省硬件投资。

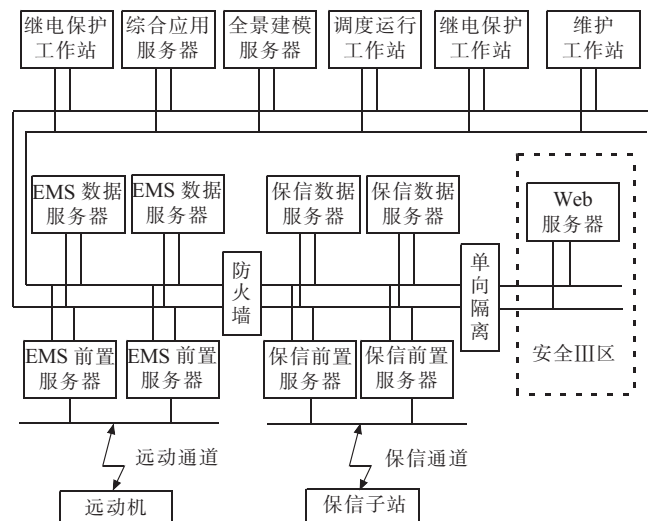


图 3 EMS/保信一体化系统硬件结构

3 数据库设计

保信系统建模涉及到一次设备模型、二次设备模型。IEC 61970 是电力一次系统的建模国际标准,完整定义了一次设备参数和电网拓扑结构,是 EMS 系统数据库的设计基础,但 IEC 61970 标准中关于二次设备的建模比较简单^[8],不能够满足保信主站的应用需求。因此保信主站数据库在设计时,以 IEC 61970 标准为基础并进行扩展,实现对电网一次、二次设备及其关联关系的全景建模。保信主站数据库结构如图 4 所示,采用这种结构,既便于独立保信系统从 EMS 系统导入电网模型,又便于一体化系统的统一建模,能够满足保信高级应用对电网模型的需求。

4 应用功能设计

4.1 模型管理

4.1.1 模型建立

保信系统的模型通常在子站端维护,主站通过 103 规约通用分类服务的方式向子站召唤配置信息,获取保信模型。子站建立的模型包括一次设备模型、二次设备模型以及一次、二次设备的关联关系,但一次设备模型并不完整,只包含了最基本的一次系统配置信

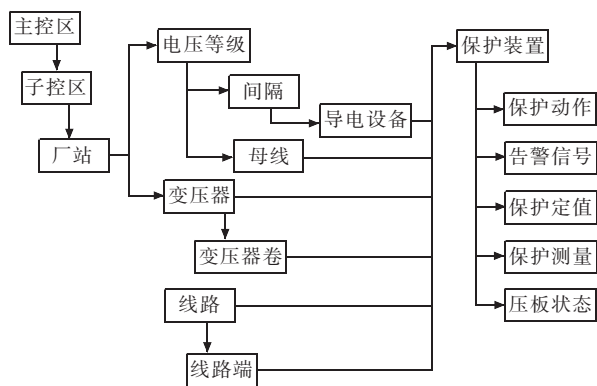


图4 保信主站数据库结构

息,缺少一次设备参数和电网拓扑结构,在进行智能故障分析时,这些信息并不可用的。所以保信主站不仅要从小站获取一次、二次设备模型,又要从EMS系统获取完整的电网一次模型,并对保信子站模型与EMS模型进行整合。新一代保信主站采用如下的建模步骤:

(1) 如果是独立保信主站,从EMS系统获取CIM/XML电网模型文件,并导入到数据库中,生成一次设备模型;如果是一体化系统,EMS系统的图模一体化绘图工具在填库时,会将电网一次设备模型和参数填入到保信应用的数据库中,这样保信主站的电网一次设备模型与EMS系统是一致的。

(2) 从保信子站召唤模型,先召唤站级配置,再召唤装置的配置,召唤成功后,生成子站的模型文件。

(3) 导入子站模型。导入时先处理子站的一次设备模型,通过一次设备名称或编码,在主站数据库中查找是否有相同的一次设备存在,如果存在则记下对应的主站一次设备对象,如果不存在则通过手工匹配方式,将子站的一次设备与主站的一次设备对象建立关联;再处理子站的二次设备模型,将装置、定值、软压板、状态量、模拟量等信息导入数据库中;最后处理一次、二次设备的关联关系,二次设备的属性结构中包括有子站一次设备编号,通过该编号可找到对应的子站一次设备,也就能找到对应的主站数据库中一次设备对象,从而在数据库建立一次、二次设备的关联关系。

如果是独立保信系统,并且不能从EMS系统获得电网模型,在这种情况下,子站的一次设备模型全部导入到主站数据库中,主站利用子站的一次设备模型,实现基本的信息展示功能。

4.1.2 模型查看和对比

由于保信子站的模型经常发生改变,主站需要重新召唤并重导模型。为了便于模型的维护,保信主站开发了模型查看、对比功能。模型查看按照“厂站→装置→信息组→信息点”的层次关系显示二次模型,并能查看每个对象的详细属性,便于检查子站模型的正确性。模型对比是将保信子站的二次设备模型与主站数

据库中的二次设备模型进行对比,对比分层进行,先对比装置配置,再对比装置的定值、软压板、状态量、模拟量等信息配置,如有变化,给出提示。这样在重导子站模型时,可以挑选部分模型有变化的装置导入,不用重导整个子站模型,提高导入的效率。

4.2 前置通信

前置系统采用实时、多任务、并行的通讯方式,与不同厂家不同型号的子站系统进行通信,实时采集子站上送的各类信息,并能下发各种查询和控制命令。前置系统采用分布式应用设计,将前置采集任务按通道部署在多个节点上,不仅能够满足大规模子站接入的要求,而且提高了采集的实时性和可靠性。前置系统支持实时通道、非实时通道的通讯方式,非实时通道专用于传输录波文件,实时通道传输除波形文件以外的所有信息,在主站操作界面上进行波形文件召唤或定值召唤时,无需选择哪个通道,由前置系统根据不同的命令类型,自动选择不同的通道下发给子站。

4.3 可视化运行监视

利用统一支撑平台的图形系统,实现保护信息的可视化监视。保信主站所需的地理接线图、厂站主接线图等都可从EMS系统获取。独立保信主站从EMS系统导入SVG格式图形文件,生成保信主站的图形。一体化系统保信主站与EMS系统共享厂站主接线图等画面文件,通过切换画面应用,来分别显示保护信息和EMS信息。

EMS系统的厂站主接线图上只有一次设备的运行状态,缺少二次设备的运行状态,而对保信应用来说,这是必不可少的。利用数据库中一次、二次设备的关联关系,保信主站在厂站主接线图上一次设备图元附近自动生成相关二次设备的状态图元。该图元通过不同的形状和颜色表示二次设备的不同运行状态,分别为“正常”、“告警”、“动作”、“通讯中断”、“检修”。由于一个一次设备可能关联有多个二次设备,这里的状态是多个相关二次设备合成状态。点击该状态图元,利用画面模板技术,自动生成二次设备的运行状态监视图,显示详细的保护运行状态信息。在厂站主接线图上,还可通过一次设备在线查询相关二次设备信息,包括保护定值、定值区号、压板状态、模拟量、状态量、告警事件、波形文件等内容,实现EMS/保信一体化监视。

4.4 定值管理

定值是继电保护装置的一个重要内容,是继电保护正确动作的依据。针对继保专业管理人员的实际需求,设计开发了以下定值管理功能:(1) 定值召唤功能。能够在线召唤保护装置的当前运行定值,可分CPU号召唤定值,也可分区号召唤定值。(2) 基准定值设定功能。能够将召唤上来的保护装置的当前运行

定值,经过人工核对无误后,设置为基准定值,基准定值带有时标。(3) 定值巡检功能。可设定定值巡检周期和巡检范围,定期召唤保护装置的当前运行定值,与数据库中的基准定值进行对比,当出现不一致时,给出告警提示。(4) 历史定值单功能。可将已经执行过的保护装置定值单保存为历史定值单,每个历史定值单带有时标、定值单编号等信息,提供历史定值单的检索和查询功能,可将保护装置的当前运行定值与历史定值单进行对比。

4.5 保护远方控制

保护远方控制功能包括远方修改保护定值、远方切换运行区号、远方投退软压板,开展继电保护装置的远方控制,可以减少停电次数,提高供电可靠性,减轻运行维护的工作量。保护远方控制的安全性、可靠性、稳定性是设计该功能时首要考虑的问题。为此,保信主站采用顺序化流程的远方控制技术,操作过程互相锁定,必须严格按照“召唤→操作人验证→操作对象验证→修改→审核人验证→下发修改→返校确认→执行修改→再次召唤→结果校核”的流程进行,并形成完整的操作记录,操作记录的内容包括操作人、定值单号、修改原因、审核人、修改前后定值、操作是否成功等信息,可供日后查询。用户权限分为责任区权限和功能权限,每个用户既要设置“区域”、“厂站”、“电压等级”等责任区权限,又要设置“召唤”、“修改”、“校核”、“浏览”等功能权限,只有同时具备责任区权限和功能权限,才能对保护装置进行远方控制。

4.6 智能故障分析

在电网发生故障时,大量的故障信息涌入保信主站,以往保信主站只是对告警事件和故障录波文件进行简单的展示和归档,由于缺少电网一次系统的完整模型,缺少故障发生时的开关动作情况、电网实时运行状态等信息,无法进行深入的故障分析,无法及时准确的诊断出电网故障元件。新一代保信主站智能故障分析模块综合利用保信系统的暂态数据、EMS系统的稳态数据,在故障发生时,迅速进行电网故障诊断,确定故障位置,分析故障性质,给出处理方案^[9-11]。智能故障分析逻辑如图5所示。

(1) 快速故障诊断。在事故发生后,根据实时所获得的保护动作事件、开关变位事件、事故前后电网运行方式等信息,利用通用保护模型知识库,基于保护动作链的方法进行快速故障分析,按照设备故障—保护动作—开关变位的因果逻辑分析,分析保护动作与开关变位信息的因果关系,判断出不合理的保护动作信息和不明原因的开关变位信息,形成快速电网故障诊断报告,包括跳闸时间、故障元件、可疑故障元件集、保护动作顺序事件信息、开关变位顺序事件信息、保护动作

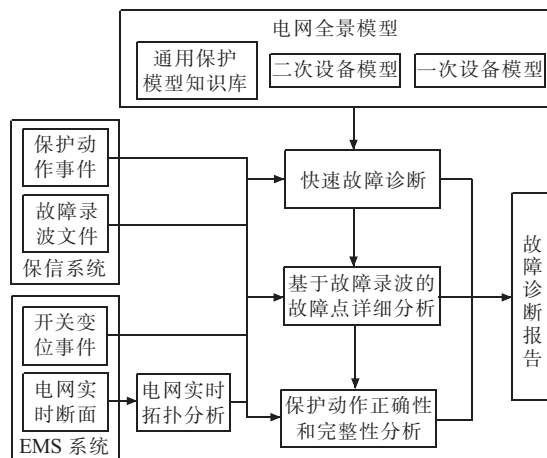


图5 智能故障分析逻辑图

和开关变位是否合理等。

(2) 故障点详细分析。根据快速故障诊断结果,召唤相应录波装置或保护装置的故障录波文件进行故障分析。对于确定的故障设备,分析出故障类型,故障相别、故障电流、故障电压等信息。对于可疑的故障设备,通过波形分析,检验是否确实发生故障。对区外故障引起的开关越级动作或误动事件,通过波形分析并结合相关的保护动作信息,明确事故的具体原因。

(3) 保护动作正确性和完整性分析。对双重化配置情况下两套保护装置的動作行为进行互校,在行为不一致情况下区分正确动作和不正确动作。基于故障录波文件的分析,对保护动作的完整性进行判断,对可疑的动作元件和可疑的遗漏元件进行提示。

(4) 具有友好的可视化界面,全方位展示故障信息数据。

5 结束语

本文研制的新一代保信主站系统已经成功应用于青海电网、云南电网、香港 CLP 电力公司、东莞电网等多个省地调的保信系统中。青海省调为独立保信主站系统,共接入了 50 多座变电站,覆盖了网内 750 kV, 330 kV, 110 kV 3 个电压等级,共接入保护装置及故障录波器装置超过 3000 余套,保护信息点超过 60 万点。青海保信主站运行稳定可靠,实现了对继电保护装置、故障录波装置的实时监视和远程管理,多次正确获取保护动作信息、故障录波文件、电网故障报告,实现了远程实时分析事故,提高了电力系统事故分析的效率。东莞地调为 EMS/ 保信一体化系统,基于一体化电网智能综合运行平台,实现了 EMS/ 保信系统的一体化建设和信息集成,实现了一体化采集、一体化建模、一体化监视、一体化存储等功能,为电网综合智能告警、电网故障的在线诊断等高级应用功能提供了数据和模型服务。

参考文献:

- [1] 燕京,陈政. 电网继电保护及故障信息管理系统设计[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 85-89.
- [2] 刘清瑞. 继电保护与故障信息管理系统的结构、功能和实现[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(4): 93-95.
- [3] 倪益民,丁杰,赵金荣,等. 电网继电保护及故障信息管理系统的实现[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 86-88.
- [4] 张颈,章坚明,朱炳铨,等. 220 kV 继电保护故障信息处理系统的设计[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(11): 61-64.
- [5] 刘志超,黄俊,承文新. 电网继电保护及故障信息管理系统的实现[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 72-75.
- [6] 刘敏,苏忠阳,熊文. 广州电网 EMS/ 继电保护管理信息一体化系统应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 79-82.
- [7] 苏忠阳,赵有铨,刘之尧. 能量管理系统和继电保护信息系统集成平台研究[J]. 南方电网技术, 2008, 02(6): 71-74.
- [8] 中国南方电网有限责任公司. 中国南方电网继电保护故障信息系统主站—子站通信与接口规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [9] 王家林,夏立,吴正国,等. 电力系统故障诊断研究现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 210-216.
- [10] 高振兴,郭创新,俞斌,等. 基于多源信息融合的电网故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 17-23.
- [11] 蒋宇,李明,张勇,等. 一种集中监控模式下电网故障诊断算法[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(1): 56-58.

作者简介:

- 祁忠(1977),男,江苏张家港人,高级工程师,从事保护信息管理系统研究和开发工作;
- 笃竣(1975),男,江苏南京人,高级工程师,从事变电站监控系统研究和开发工作;
- 张海宁(1977),男,湖北荆门人,高级工程师,从事保护信息管理系统研究和开发工作;
- 李枫(1981),男,江苏南京人,工程师,从事保护信息管理系统研究和开发工作;
- 冯佳男(1985),男,江苏盐城人,工程师,从事保护信息管理系统研究和开发工作;
- 刘焕志(1977),女,黑龙江双鸭山人,工程师,从事保护信息管理系统研究和开发工作。

Design and Implementation of the New Generation of Relay Protection and Fault Information Management Station

QI Zhong, DU Jun, ZHANG Haining, LI Feng, FENG Jianan, LIU Huanzhi
(NARI-Relays Electric Co.Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The problems existed in current relay protection and fault information management station (PFIMS) are analyzed. Based the analysis, the principles for designing the new generation of PFIMS are presented. The architectures for software, hardware, database design, and application function of the new generation of PFIMS are designed, and the new generation of PFIMS is based on a uniform application platform. The panoramic models of the grid primary equipment, secondary equipment and its affiliated are realized based on IEC 61970, and the grid failure intelligent analysis is implemented. The designed system can be run independently and interactively with EMS on the uniform platform. Successful application of the designed system has been achieved in several power grids.

Key words: relay protection; management station; fault recorder; grid fault analysis

(上接第7页)

- [6] Q/GDW 370—2009, 城市配电网技术导则[S].
- [7] 林韩,吴文宣,吴涵,等. 基于 SLCC 的中压配电网供电模型最优分段研究[J]. 华东电力, 2013(5): 919-923.
- 王峰(1984),男,浙江丽水人,工程师,研究方向为配电网规划;
- 李颖(1963),男,江苏南京人,高级工程师,从事供电企业情报管理及研究工作;
- 王春宁(1966),男,江苏南京人,高级工程师,从事供电企业科技开发及管理工作。

作者简介:

Research on Optimal Sectionalizing Number of Distribution Lines

WANG Feng, LI Ying, WANG Chunning
(Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: The optimal sectionalizing number of transmission line with the consideration of reliability for various typical connection modes with different load density and substation capacity is studied. The optimization uses an economy and reliability combined objective function, and the construction and operation costs of substations and lines are considered. With the optimization, the optimal sectionalizing number of lines for a multi-phase load density and a universal substation scenario is obtained. The simulation results validate the proposed approach.

Key words: distribution network; optimal sections; reliability; economy; average yearly value

汽轮机通流效率与机组热耗率关系的计算

李 刚¹, 胥建群², 汤 涛³, 刘浩民⁴

(1. 苏州热工研究院, 江苏 苏州 215004; 2. 东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096;

3. 上电电力股份有限公司, 上海 200090; 4. 东方电气股份有限公司, 四川 成都 610036)

摘 要: 建立汽轮机变工况热力计算程序, 并给出各缸效率与热耗率关系的数学模型, 对上海汽轮机厂 600 MW 超临界汽轮机进行热力计算, 分析通流性能变化与热耗率的关系。计算结果显示: 级组效率变化与热耗率及本缸效率变化量成线性关系; 级组承担功率越大、越靠近排汽端, 则级组效率变化对热耗率与本缸效率的影响越大; 低压缸效率改变对热耗率的影响最大, 高压缸其次, 中压缸最低; 基于数学模型的计算结果与变工况热力计算基本一致, 表明该数学模型计算精度很高。

关键词: 汽轮机; 通流效率; 热耗率; 热力计算

中图分类号: TK26

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)04-0013-04

汽轮机通流部分是将蒸汽热能转换为功的核心部件, 其完善程度对机组能耗水平有重要影响。当汽轮机通流部分性能偏离设计值(比如通流部件出现腐蚀、结垢、汽封磨损等), 必将引起汽轮机组热力特性的变化。因此, 估算通流部分性能偏差对整机热经济性的影响, 可以为通流部分的设计及优化、改造提供支持^[1-5]。

本文将编制汽轮机变工况热力计算程序, 并给出缸效率与热耗率关系的数学模型。以 600 MW 超临界汽轮机^[6]为例, 详细计算各级组效率、缸效率及机组热耗率间的关系; 并采用缸效率与热耗率关系的数学模型验证该 600 MW 超临界汽轮机变工况热力计算的正确性。

1 汽轮机变工况热力计算程序

当汽轮机组特性发生变化后, 整个汽轮机及热力系统的质量和能量平衡将重新分配。为此, 对变工况前后的汽轮机及热力系统必须做一些简化。计算过程的假设条件: (1) 各轴封漏汽率保持设计值; (2) 主汽流量、主汽温度、再热温度、背压恒定不变; (3) 各加热器抽汽管道与阀门压损系数不变, 加热器端差保持设计值; (4) 凝结水泵、疏水泵焓、给水泵焓升不变; (5) 当某个级组效率在较小范围变化时, 除低压缸末级组外, 其他各级组效率保持不变; (6) 低压缸末级组效率随蒸汽平均湿度变化, 湿度每增加 1 个百分点, 末级组效率将下降 1 个百分点^[5]。

在主汽流量确定的情况下, 假设 1 号至 8 号加热器与给水泵小汽轮机的抽汽量, 则可以计算出汽轮机通流部分各级组的蒸汽流量, 与设计工况进行比较, 应用弗留格尔公式可以求得各段压力。由于已知各段

抽汽的压力损失系数, 则可以确定各加热器内的压力, 即可求得各加热器压力下的饱和温度, 进而获得各处疏水与加热器进、出口水温; 汽轮机通流各段温度可以通过级组焓降确定。以上计算获得了变工况后热力系统各处的参数, 这将产生新的 1 组抽汽量。因此, 需要根据新获得的这组抽汽量重新进行迭代计算, 直到相邻 2 次迭代流量间误差小于 0.001% 为止。计算过程如图 1 所示。

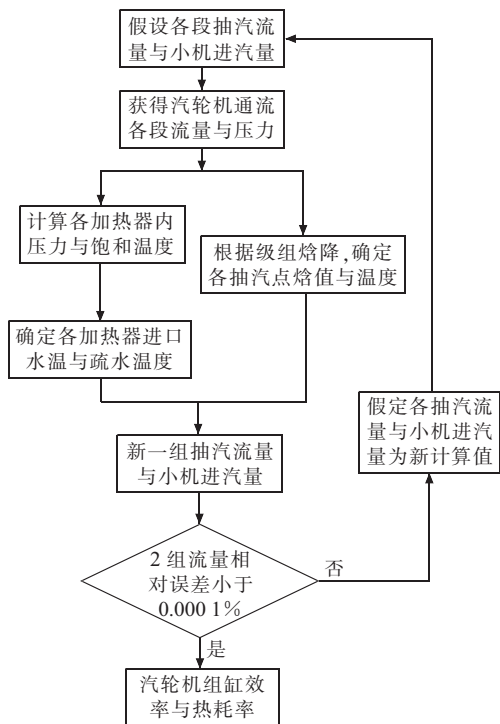


图 1 汽轮机变工况计算流程图

2 计算实例及分析

2.1 机组概况

上海汽轮机厂 N600-24.2/566/566 型汽轮机为引进美国 Westinghouse 技术生产, 机组编号 B191。根据机组

型式与抽汽布置对汽轮机进行级组划分,额定工况下高、中、低压缸效率分别为 87.96%,93.61%,90.06%,汽轮机各级组效率如表 1 所示。

表 1 上海汽轮机厂 N600-24.2/566/566 型
汽轮机级组划分

汽缸	级组号	级组位置	额定负荷级 组功率/MW	额定负荷 级组效率/%
高压缸	1	调节级	35.2	67.42
	2	调节级 - 1 号抽汽口	123.5	91.18
	3	1 号抽汽口 - 2 号抽汽口	37	90.58
中压缸	4	中压缸进汽 - 3 号抽汽口	86.8	92.85
	5	3 号抽汽口 - 4 号抽汽口	71.9	93.40
低压缸	6	低压缸进口 - 5 号抽汽口	69.1	94.14
	7	5 号抽汽口 - 6 号抽汽口	78.7	94.60
	8	6 号抽汽口 - 7 号抽汽口	37.4	95.33
	9	7 号抽汽口 - 8 号抽汽口	25.6	89.21
	10	8 号抽汽口 - 低压缸排汽	35.6	82.45

2.2 计算结果与分析

(1) 通流级组效率变化对机组热耗率的影响如图 2 所示。

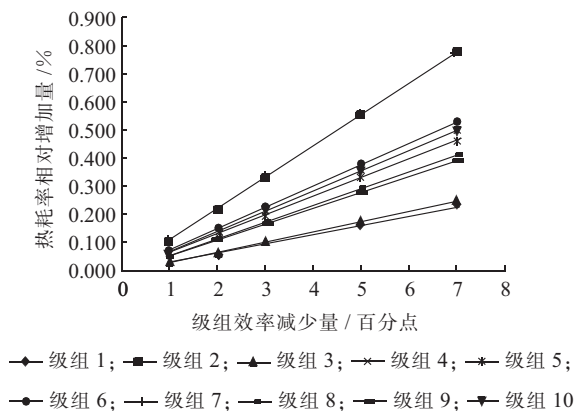


图 2 N600-24.2/566/566 汽轮机级组
效率变化与热耗率关系

由图 2 可见,各级组效率变化与热耗率变化量成线性关系;级组 2 与级组 7 效率变化对热耗率的影响最大,级组 1 与 3 效率变化对热耗率的影响最小。

(2) 各缸效率与缸内各级组效率变化间的关系如图 3—5 所示。

可见,各级组效率变化与该级组所在缸的效率改变量成线性关系;高压缸内,级组 2 对高压缸效率影响最大,级组 1 和 3 对高压缸效率影响基本相同,级组 3 影响稍大;中压缸内,2 个级组对该压缸效率影响基本

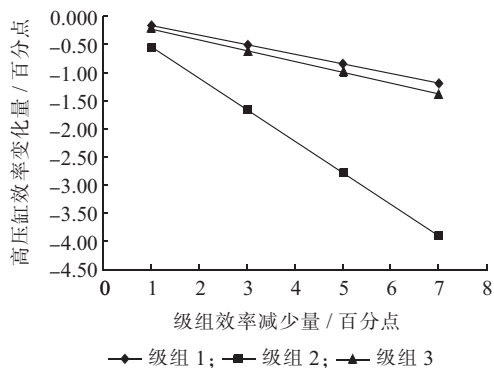


图 3 高压级组效率变化与高压缸效率关系

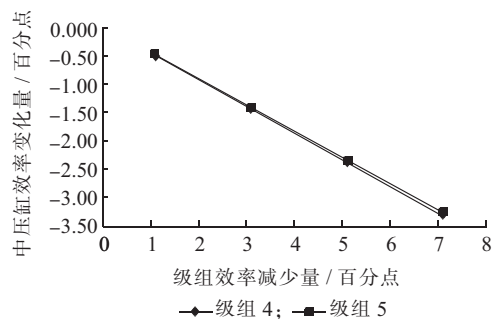


图 4 中压级组效率变化与中压缸效率关系

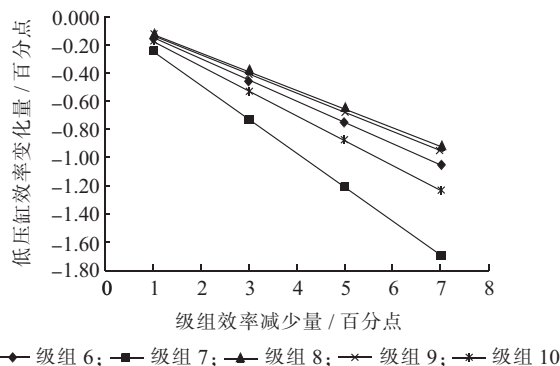


图 5 低压级组效率变化与低压缸效率关系

相同;低压缸内,级组 7 对低压缸效率影响最大,级组 8 影响最小。

(3) 改变缸内各级组效率,并计算得到相应缸效率变化量与热耗率改变量,可得各缸效率改变量与热耗率关系,如图 6 所示。

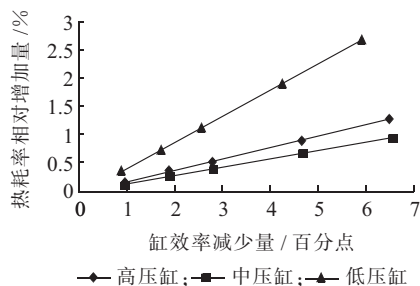


图 6 缸效率改变量与热耗率关系曲线

由图 6 可见,缸效率变化量与热耗率增加成正比例关系;在相同缸效率改变量情况下,低压缸导致的热

耗率增加最大,是高压缸的 2.2 倍,是中压缸的 3.0 倍。

(4) 根据变工况计算的分析,当某一级组效率变化时,其后边汽缸内的级组效率不变,故后边汽缸效率的变化值很小,可忽略不计。在程序的计算中也验证了这点,级组 4 效率变化 9 个百分点,低压缸效率变化 0.06 个百分点。

综合以上计算结果可见,同一缸内,级组承担功率越大,则级组效率变化对热耗率及本缸效率的影响也越大。在承担相同功率的情况下,越靠近排汽端,则级组效率变化对热耗率与本缸效率的影响越大,这是由于靠近排汽端的级组重热系数低,这些级组效率降低后,后面没有级组与抽汽来削弱它们的影响作用。

各缸效率变化对热耗率的影响不同,其中低压缸性能对热耗率的影响最大,中压缸最低,这主要是因为低压缸承担的功率最大,而且低压缸后直接排汽,损失得不到利用。高压缸效率变化会导致冷再热温度的变化,进而影响再热吸热量,从而降低对热耗率的影响作用,但是高压缸的效率变化不会导致中压缸进汽参数发生变化,所以就没有后面的重热作用,即高压缸只能通过再热减少自身的影响作用;相反,中压缸只能通过重热与后面各级抽汽作用降低自身对热耗率的影响。根据数据分析可得,相对于再热作用,中压缸后的重热与抽汽对削弱缸效率改变的影响有较大功能。若有多个级组效率同时发生了变化,则将各级组单独变化时引起的热耗率与缸效率改变量进行代数和运算,即可得到热耗率与缸效率总的变化量。以上计算程序在计算过程中假定了诸多不变因素,而这些因素在实际变工况过程中必定是要发生改变的。因此,本文的变工况热力计算程序宜作为汽轮机通流性能小偏差情况下的近似计算工具。

3 汽轮机缸效率与热耗率关系模型

3.1 缸效率与热耗率关系数学模型

基于 CONTON K C 及 WESTCOTT J C^[2]提出的评价汽轮发电机机组性能的数学方法,ZALETA-AGUILAR ALEJANDRO^[7]给出了评估汽轮机各缸效率变化与热耗率关系的简化数学模型。具体模型如下:

$$HR = \frac{N_e}{Q_0} \quad (1)$$

$$\Delta HR_{hp} = \frac{\Delta \eta_{hp} \Delta h_{hp} \dot{G}_{hp}}{N_e} - \frac{\Delta \eta_{hp} \Delta h_{hp} \dot{G}_{rh}}{Q_0} \quad (2)$$

$$\Delta HR_{ip} = \frac{\Delta \eta_{ip} \Delta h_{ip} LF}{\Delta h_{il}} \left(1 - \frac{\Delta \eta_{hp} \dot{G}_{hp}}{N_e}\right) \quad (3)$$

$$\Delta HR_{lp} = \frac{\Delta \eta_{lp} \Delta h_{lp}}{\Delta h_{il}} \left(1 - \frac{\Delta \eta_{hp} \dot{G}_{hp}}{N_e}\right) \quad (4)$$

式(1—4)中:HR 为热耗率; N_e 为机组发电功率; Q_0 循环吸热量; η 为缸效率; Δh 为各缸的实际焓降; $\dot{G}_{hp}$ 为高压缸等效流量(高压缸功率与高压缸实际焓降之比); $\dot{G}_{rh}$ 为再热蒸汽流量;LF 为中压缸的损失因子;下标“hp”表示高压缸;“ip”表示中压缸;“lp”表示低压缸;“il”表示中低压缸。

由式(2—4)可见,缸效率的变化量与热耗率的变化量成线性关系;缸内蒸汽焓降越大,该缸效率变化对热耗率的影响越大。

3.2 基于数学模型的计算分析

针对上海汽轮机厂生产 N600-24.2/566/566 型汽轮机,利用式(2—4)给出的数学模型计算各缸效率改变时机组热耗率的相对变化量,并与 2.2 节的变工况热力计算结果进行对比,结果如图 7 所示。

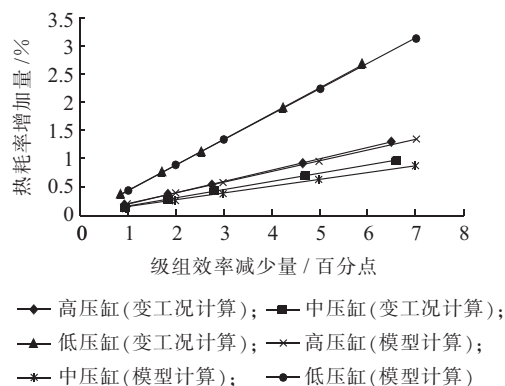


图 7 缸效率改变量与热耗率关系曲线

以 2.2 节汽轮机变工况计算的结果为基准,通过数学模型与变工况计算的对比发现,2 者计算结果基本一致,表明式(2—4)提供的数学模型具有很高精度,同时证明了以上变工热力计算的正确性。表 2 提供了某火电厂 ALSTOM 公司 800 MW 汽轮机缸效率变化与机组热耗率的关系^[5]。

表 2 ALSTOM 公司 800 MW 汽轮机缸效率变化对机组热耗率影响 %

汽缸	1%的缸效率增加对功率的影响	1%的缸效率增加对热耗率的影响
高压缸	0.31	0.19
中压缸	0.17	0.17
低压缸	0.45	0.45

由表 2 可见,低压缸对热耗率的影响是高、中压缸的 2~3 倍,高压缸对热耗率的影响略大于中压缸;高、中、低压缸效率同时增加 1% 导致的热耗率变化量之和小于 1%,这是由于回热与再热系统、阀门等设备性能对热耗率也有影响。表 2 反映规律与本文变工况及数学模型计算结果基本一致,表明本文热力计算及所得结论的正确性。

4 结束语

(1) 级组效率变化与热耗率及本缸效率变化量成线性关系;同一缸内,级组承担功率越大,则级组效率变化对热耗率及本缸效率的影响也越大。

(2) 在承担相同功率的情况下,越靠近排汽端,则级组效率变化对热耗率与本缸效率的影响越大。

(3) 在缸效率变化相同值时,低压缸效率改变对热耗率的影响最大,高压缸其次,中压缸最低。

(4) 缸效率与热耗率关系数学模型具有很高计算精度,同时该模型形式简单,便于工程应用。

参考文献:

- [1] DENTON J D. Loss Mechanisms in Turbomachines [J]. Journal of Turbomachinery, OCT.1993(115):621-656.
- [2] ZALETA-AGUILAR A. Thermodynamic Model of the Loss Factor Applied to Steam Turbines [J]. Int. J. Applied Thermodynamics, 2001,04(3):127-133.
- [3] 杨 涛,胥建群. 汽轮机通流部分结垢与热力参数变化的关系分析[J]. 江苏电机工程,2013,32(2):71-74.
- [4] PHILLIP J K, SIMON I H, ROBERT D B. Performance Guarantees and Testing of Steam Turbine Retrofits [C]. Proceedings of Asme Power, March 30, 2004-April 1, 2004, Baltimore, Maryland, USA.

- [5] 嵇国军,周荣勤. 某 125 MW 机组出力不足及热耗高原因分析[J]. 江苏电机工程,2012,31(2):74-77.
- [6] 邱云峰. 600 MW 超临界供热汽轮机及供热系统设计特点[J]. 江苏电机工程,2012,31(2):78-80.
- [7] ZALETA-AGUILAR A, RANGEL-HERNANDEZ V H, ROYO J. Exergo-Economic Fuel-Impact Analysis for Steam Turbines Sections in Power Plants [J]. Int. Thermodynamics, 2003, 06 (3): 133-141.

作者简介:

- 李 刚(1985),男,安徽六安人,工程师,从事电厂热动力装置方面的工作;
- 胥建群(1959),男,陕西汉中,教授,从事电站性能分析、故障诊断、寿命预测、仿真建模和汽轮机运行特性的教学与科研工作;
- 汤 涛(1987),男,河南驻马店人,工程师,从事发电厂节能改造工作;
- 刘浩民(1987),男,河南许昌人,工程师,从事火电站发电设备优化与选型等工作。

The Relationship Between Flow Path Performance and Heat Consumption Rate of Steam Turbine

LI Gang¹, XU Jianqun², TANG Tao³, LIU Haomin⁴

(1. Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China; 2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Shanghai Electric Power Company Limited, Shanghai 200090, China; 4. DongFang Electric CO.Ltd., Chengdu 610036, China)

Abstract: This paper established a thermodynamic calculation program for steam turbines operating under different conditions. Besides, a thermodynamic model was also presented to calculate the change of heat consumption rate due to turbine efficiency deviation. Thermodynamic calculation for a 600 MW supercritical steam turbine manufactured by Shanghai Steam Turbine Company was conducted in detail. The results show that linear relationship exists between the variation of stage group efficiency, the heat consumption rate, and the turbine efficiency. In the same cylinder, the more power the stage group takes on, the larger influence it has on the heat consumption rate and turbine efficiency. LP turbine efficiency has the most significant influence on the unit heat consumption rate, HP turbine efficiency secondary, and IP turbine efficiency in the end. Based on the thermodynamic model, the change of heat consumption rate was calculated, and the results were in the agreement with thermodynamic calculation program, which means that the present thermodynamic model is accurate enough for application. This work can serve as the foundation for analyzing unit heat consumption rate variation caused by performance deviation in turbine flow path.

Key words: steam turbine; flow path efficiency; heat consumption rate; thermodynamic calculation

广 告 索 引

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

· 故障诊断与检修策略 ·

江苏电网 220 kV 及以上输电线路雷击跳闸分析

高 嵩,周志成,陶风波,张星炜

(江苏省电力公司电力科学研究院,江苏 南京 211103)

摘 要:雷击是输电线路跳闸的重要原因。文中分析了 2013 年江苏电网 220 kV 及以上输电线路雷击故障特征及对策,对频繁跳闸的 500 kV 泰斗 5293 线故障杆塔进行了防雷性能计算,结合地形和雷电活动特点分析了该线路过长江段杆塔易遭雷击的原因,并提出防雷改造措施建议。

关键词:输电线路;雷击跳闸率;绕击;防雷措施

中图分类号:TM863

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)04-0017-04

雷击是引起架空输电线路跳闸的主要原因之一。根据故障统计数据,江苏电网每年因雷击引起的跳闸约占线路跳闸总数的 1/4,造成巨大经济损失,也严重威胁电网安全稳定运行。

造成输电线路雷击故障的原因是雷击时在输电线路形成的雷电过电压超过线路绝缘的耐受水平,使线路绝缘遭到破坏并发生闪络,从而导致系统跳闸或设备损坏。国内外多年来的雷击跳闸故障分析经验表明^[1,2],准确评价输电线路的耐雷水平是做好线路防雷工作的必要前提。防雷计算模型是准确评价输变电设备耐雷性能的重要工具和手段。目前,反击计算模型主要有行波法、ATP 程序、电磁场法、蒙特卡洛法等,绕击计算模型主要有电气几何模型(EGM)、先导发展模型(LPM)、雷电屏蔽模型等,这些模型的建立和提出,一定程度上解决了输电线路的防雷计算问题,但也各有其适用范围,还需进一步对这些模型进行相应地比较研究,充分考虑线路走廊雷电活动的强度、线路结构特征的以及地形地貌特点^[3],在计算雷击跳闸率时,根据需求和现场实际情况选择合适的模型进行计算,从而合理评估输电线路雷害风险,指导运行部门采取适宜的防雷技术措施,减少雷击故障的发生。

1 雷电活动特征

1.1 江苏雷电活动总体情况

江苏省位于长江流域,境内地势平坦,湖泊河流众多,雷电活动比较活跃。根据江苏 2005~2013 年的雷电样本数据,绘制出江苏省 9 年平均地闪密度分布图,如图 1 所示。

从图 1 中可以看出,江苏地区雷电活动较为频繁,江苏全省大部分地区处于多雷区(C 级),无少雷区(A 级),另外中雷区(B 级)、强雷区(D 级)面积较少。中雷区(B 级)主要分布在徐州北部、连云港和盐

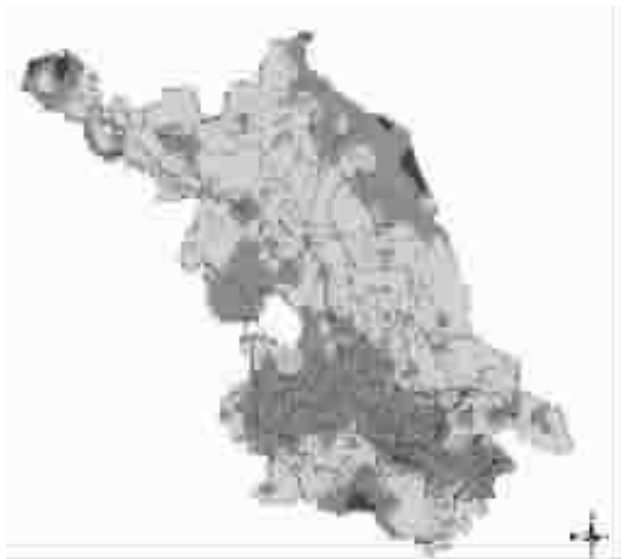


图 1 苏电网 9 年平均地闪密度分布图

城的东北部。多雷区(C 级)面积最大,其中 C1 级面积最广,主要分布在苏北大部分区域、沿海及苏南局部区域,C2 级主要分布在苏南和苏中。强雷区(D 级)面积较小,主要分布在淮安、南京、无锡等地。

1.2 雷电数据统计

雷电监测数据显示,2013 年省内雷电活动总体保持平稳,强落雷天气主要集中在无锡、苏州以及徐州、连云港局部地区。全年雷暴日为 146 天,平均地闪密度为 2.87 次/(km²·a),较往年有所下降,年均地闪密度值为近 5 年来的最低水平,如图 2 所示。

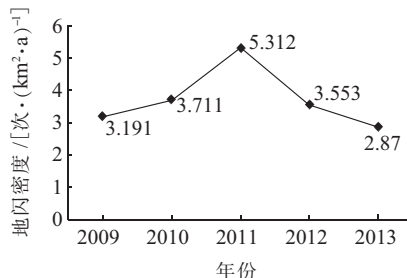


图 2 2009~2013 年江苏全省地闪密度统计情况

2 雷击跳闸情况分析

2.1 雷击跳闸基本情况

2013 年江苏电网 220 kV 及以上输电线路雷击跳闸数量如图 3 所示。省 220 kV 及以上线路雷击跳闸 22 起;其中,500 kV 线路 7 起,220 kV 线路 15 起。以每年 40 个雷暴日计算,500 kV 和 220 kV 线路雷击跳闸率分别为 0.077 6 次/(100 km·a)和 0.065 6 次/(100 km·a),雷击重合成功率为 80%左右。雷击跳闸率统计如表 1 所示。

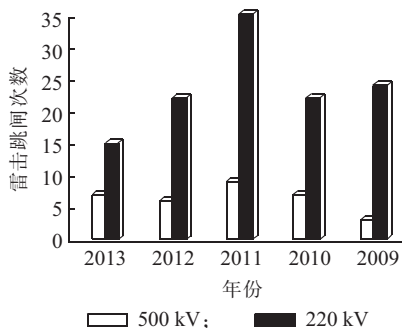


图 3 近五年同期雷击跳闸情况变化

表 1 雷击跳闸率统计

电压等级 /kV	雷击跳闸率/[次·(100 km·a) ⁻¹]			
	2011 年	2012 年	2013 年	运行规程
500	0.099 6	0.075 2	0.077 6	0.14
220	0.168 9	0.104 7	0.065 6	0.315

2.2 雷击故障特征分析

(1) 故障类型。根据雷电流幅值和防雷计算分析结果判断,2013 年 220 kV 及以上线路全部为绕击引起。从历年统计数据来看,江苏省 220 kV 及以上输电线路绕击跳闸比例均在 96%以上,反击跳闸次数较少,仅发生在个别 500 kV 线路。主要原因是多数引起跳闸的雷电流幅值不高,另一方面则与江南地区土壤电阻率较低有关。

(2) 故障地形。对雷击故障地形进行统计,2013 年线路雷击跳闸中,除 1 起发生在边坡地形外,其余均发生在平原地带,约占总雷击数 95%,表明江苏地区 220 kV 及以上线路雷击跳闸地形以开阔平原为主。

(3) 故障塔型。从雷击杆塔类型上看,2013 年线路雷击跳闸中,13 起发生在同塔双(四)回线的鼓型塔,占全部故障塔型的 59.1%,且雷击多发生在中相,这主要是因鼓型塔结构下,地线对中相导线的保护角偏大导致的,易引起绕击。故障塔型统计如表 2 所示。从故障杆塔高度上看,杆塔呼高 h 超过 30 m 以上的杆塔占跳闸数的 68.1%;30 m 以下故障杆塔比例为 31.9%;表明江苏省 220 kV 及以上线路呼高超过 30 m 的杆塔发生绕击概率相对较高,如图 4 所示。

表 2 220 kV 及以上线路雷击故障塔型

塔形	鼓型塔	酒杯塔	猫头塔	门型塔	干字塔
数量/个	13	2	3	1	3
比例/%	59.1	9.1	13.7	4.5	13.6

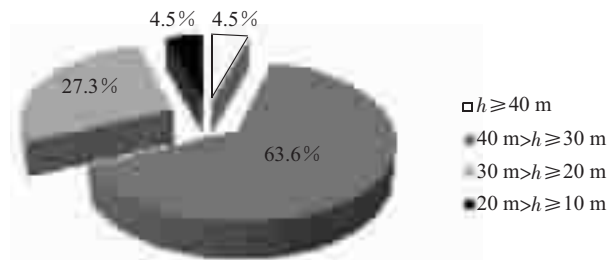


图 4 220 kV 及以上线路雷击故障杆塔呼高情况

(4) 外绝缘配置。经统计,江苏电网 220 kV 及以上线路雷击故障杆塔中复合绝缘子和长棒形瓷绝缘子使用率为 90.9%,其中复合绝缘子比例达 70%以上。江苏省电力公司电力科学研究院在实验室内对不同型式绝缘子进行了雷电冲击放电试验。试验结果表明,复合绝缘子和长棒形瓷绝缘子的雷电冲击性能均低于双伞型瓷绝缘子,相同结构高度下,瓷双伞绝缘子的雷电冲击放电电压较长棒形瓷绝缘子高 6.7%,较复合绝缘子高 11.7%,如表 3 所示。

表 3 不同型式绝缘子(正极性)雷电冲击 $U_{50\%}$

干弧距离/mm	复合绝缘子/kV	长棒形瓷绝缘子/kV	双伞型瓷绝缘子/kV
1100	708.8	917.52	828.63
2350	1 403.9	1 671.15	1 691.30
4300	2 720.6	2 846.8	3 037.91

3 防雷措施与对策分析

根据江苏电网运行经验,雷击重合不成一直是引发 220 kV 及以上线路故障停运的主要原因。采取有效的防护措施来提高线路防雷性能是控制雷击故障率的关键。目前,常用的防雷措施总体上有“疏”与“堵”两大类方式。

3.1 “堵塞型”防雷措施

(1) 减小地线保护角。为降低线路雷电绕击跳闸率,新建 220 kV 双回路垂直排列线路杆塔全高超过 40 m 时,架空地线对各相线的最大保护角应从现行设计的 20° 左右降低到 5° 以下^[4];500 kV 同塔双回路线路和大跨越塔应进一步降低架空地线对各相线的保护角应不大于 0° 。

(2) 架设旁路架空地线。架设旁路架空地线可有效防止 500 kV 输电线路的侧面来雷绕击导线的情况。这种措施对于侧面来雷的情况效果非常好,如在山坡外侧架设旁路架空地线,则可拦截从侧面过来绕击。

(3) 增加复合绝缘子长度。考虑到复合绝缘子在江苏电网的巨大使用量,为降低雷击闪络故障,对于多雷、强雷区新建线路以及塔窗口尺寸允许的老旧线路,应选用干弧距离较长的复合绝缘子,并在两端加装均压环。

(4) 安装塔头侧向避雷针。塔头侧向避雷针可安装在较易遭受绕击导线相所在横担上,如双回路杆塔中相横担、四回混压线路下层双回路的长横担上。侧向避雷针的保护范围为 15~20 m,线路实际运行经验表明,绕击多发生于杆塔两侧约 30 m 范围内^[5],因此侧向避雷针保护范围可达 50% 以上。

(5) 安装可控放电避雷针。由于线路弧垂使中间段保护角小于近杆塔段,加之杆塔位置也较高,绕击多发生在近杆塔段。可控放电避雷针主要用于山区保护易受雷电绕击的杆塔,但对于档距中央的保护有限^[6]。

3.2 “疏导型”防雷措施

除采用“堵塞型”方法来降低线路的雷击跳闸率外,还可采取“疏导型”办法,即适当降低输电线路的耐雷水平。通过定位雷击闪络和疏导工频电弧保护绝缘子串,以提高重合闸的成功率,不造成雷击停运故障。

(1) 加装绝缘子串并联间隙。采用保护间隙装置与绝缘子串并联,其距离小于绝缘子串的干弧距离。架空线路遭受雷击时,保护间隙因雷电冲击放电电压低于绝缘子串的放电电压首先放电,并将接续的工频电弧引至间隙端部,从而保护绝缘子免于电弧灼烧^[4]。应当注意的是,绝缘子串并联间隙不适用于 220 kV 及以上线路耐张塔,推荐在同塔双回线路使用,选择雷害风险较高的一回线进行安装。

(2) 安装线路型氧化锌避雷器。线路型氧化锌避雷器可以使输电线路的绕、反击耐雷水平得到大幅度提高,显著降低 500 kV 输电线路的绕击跳闸率。由于单支避雷器仅能保护安装相,综合考虑技术经济性,可在 500 kV 及以上核心骨干网架、大型电源(如核电)送出等战略性输电通道、过江大跨越、转角塔、高塔、山区、接地电阻大及其他雷击风险较高的重要线路的易击相安装线路避雷器。

4 典型 500 kV 雷击故障案例分析

4.1 泰斗 5293 线易击段故障原因分析

雷击故障与输电线路所处地形有密切关联。一般而言,山(风)口、山谷、河流、湖泊等地形的雷电活动比较剧烈,这类区域如建有大型输电线路则往往反复发生雷击,呈现出雷电易击段的特点。例如江苏 500 kV 泰斗 5293 线,该线路在泰州、江阴段跨越长江,总长度 80.8 km。近 5 年来,该线路频繁遭受雷击,且绝大多数雷击点集中位于在 56~73 号过长江区段 8 km 范围内,如表 4 所示。

表 4 泰斗 5293 线雷电易击段跳闸情况

线路名称	时间	故障塔(相)	故障类型
500 kV 泰斗 5293 线	2008-06-23 16:11	68(B)	绕击
	2008-06-23 17:52	60(B)	绕击
	2011-08-02 20:03	57(C)	绕击
	2012-08-21 15:17	73(B)	绕击
	2013-08-11 15:02	66(B)	绕击

(1) 根据雷电监测系统历史数据,统计出 500 kV 泰斗 5293 线过江段杆塔 2008~2013 年平均地闪密度。数据显示,500 kV 泰斗 5293 线过长江段近 6 年的平均地闪密度值高于 11.14 次/(km²·a),即表明该线路过长江段杆塔均处在 D2 级强雷区,其落雷数量明显高于江苏全省平均水平,雷电活动十分活跃,属雷击故障多发地区。其雷电活动情况如表 5 所示。

表 5 泰斗 5293 线过江段 2008~2013 年雷电活动情况

序号	杆塔号	地闪密度 N_g / [次·(km ² ·a) ⁻¹]
1	59~60 号	11.1~11.2
2	56~58 号、61~63 号、 67~69 号	11.2~12.1
3	66 号	12.1~12.6
4	64~65 号	12.6~13.5
5	70~73 号	14.2~17.4

(2) 根据故障记录,泰斗 5293 线过长江段的雷击塔型主要为 SZT1、SZT2、SKT 三类双回直线塔型。在统计雷电、地形、线路等相关参数的基础上,为校核泰斗 5293 线故障杆塔的雷击风险,对近年来发生过雷击的 57 号、60 号、66 号、68 号、73 号五基杆塔进行防雷性能计算,获得了各基杆塔的雷击跳闸率。其中绕击计算采用更能反应具体线路的地形特点的改进电气几何模型 (EGM),反击计算则采用仿真方法,利用 EMTP-ATP 程序建模计算,具体结果如表 6 所示。

表 6 泰斗 5293 线历史故障杆塔防雷性能计算结果

故障塔号	绕击跳闸率 / [次(100 km·a) ⁻¹]	反击跳闸率 / [次(100 km·a) ⁻¹]	反击耐雷水平 / kA	雷击跳闸率 / [次(100 km·a) ⁻¹]
57	0.612	0.712	178.10	1.324
60	0.336	0.704	168.88	1.040
66	0.094	0.428	215.65	0.522
68	4.211	1.614	129.30	5.825
73	0.553	1.064	169.95	1.617

从表 6 可知,各基故障杆塔的雷击跳闸率均明显高于国网公司运行规范要求的 0.14 次/(100 km·a)

(归算到 40 雷电日)。一般而言,影响输电线路雷击跳闸率的因素很多,包括地闪密度、雷电流幅值、线路保护角、线路绝缘水平、杆塔高度、杆塔接地电阻、地面倾角、地形地貌等。

(3) 通过上文分析,引起泰斗 5293 线雷击跳闸率偏高的原因可归结为:

① 该条线路易击段毗邻长江宽阔水域,局部风力较大;且江水水面电阻率低,起到引雷作用,大幅加强了局部落雷数量和地闪密度。

② 线路易击段因跨江需要,塔身设计相对较高,过长江段除大跨越塔和锚塔外,各基杆塔平均高度达到 64.93 m。随着导线距离地高度增加,大地的屏蔽作用减弱,线路受到雷电绕击的概率相应增加。

③ 泰斗 5293 线的绝缘子设计时采用了长棒形瓷绝缘子,由于安装引弧环,使得绝缘子干弧距离缩短,降低了杆塔耐雷水平。

4.2 防雷改造措施建议

综合考虑上述雷击故障原因和各类防雷措施的使用范围,建议对泰斗 5293 线过长江易击段杆塔选取“疏”、“堵”结合的防雷措施:

(1) 对 SZT1, SZT2, SKT 型杆塔安装线路避雷器。2011 年国家电网公司《架空输电线路差异化防雷工作指导意见》规定:500(330)kV 及以上核心骨干网架、大档距高塔及其他雷击风险较高的重要线路,可考虑安装线路避雷器。泰斗 5293 线为同塔双回线路,全线直线杆塔基本均为鼓型塔,根据线路结构、地形地貌情况以及杆塔耐雷水平分析结果,建议在泰斗 5293 线过江段 56~73 号杆塔中全部 SZT1, SZT2 和 SKT 型杆塔的两侧中相各加一个带间隙氧化锌避雷器,可切实降低这一区段线路的雷击跳闸率。

(2) 逐基杆塔安装可控放电避雷针。根据计算结果,泰斗 5293 线过长江段雷击跳闸均为绕击引起,因此建议对泰斗 5293 线 56~73 号逐基杆塔安装可控放

电避雷针,可控放电避雷针的引雷能力比传统避雷针强,而且有一定的保护角,这样就可以降低被保护杆塔遭受绕击的概率,用于保护易受雷电绕击的杆塔。

5 结束语

线路雷击跳闸对电网稳定运行影响巨大。随着江苏电网建设发展和通道及电磁环境相关要求的变化,220 kV 及以上线路杆塔的高度和同杆架设数量不断增加,总体防雷性能呈现下降趋势。因此线路运行维护部门应积极开展线路雷害风险评估,有针对性地采取“疏”与“堵”相结合的防雷改造措施,降低线路雷击跳闸率,提高雷雨季节供电可靠性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 阮 玲,谷山强,赵 淳,等.鄂西三峡地区 220 kV 线路差异化防雷技术与策略[J].高电压技术,2012,38(1):17-20.
- [4] 孙万忠.超高压线路绕击率计算方法探讨[J].四川电力技术,1999(6):1-3.
- [5] 周志成,马 勇,陶风波,等.雷击地线档距中央的反击性能分析[J].江苏电机工程,2012,31(6):11-14.
- [6] 张志劲,司马文霞,蒋兴良,等.超特高压输电线路雷电绕击防护性能研究[J].中国电机工程学报,2006,25(10):1-6.

作者简介:

- 高 嵩(1985),男,黑龙江牡丹江人,工程师,从事输电线路状态检修和技术研究工作;
- 周志成(1977),男,湖南株洲人,高级工程师,从事输变电设备状态检修管理及过电压技术研究工作;
- 陶风波(1982),男,江苏常州人,高级工程师,从事输变电设备状态检修管理及过电压技术研究工作;
- 张星炜(1983),男,江苏南京人,工程师,从事输电线路雷电监测技术研究工作。

Analysis of Lightning Fault on 220 kV and Above Transmission Lines in Jiangsu Power Grid

GAO Song, ZHOU Zhicheng, TAO Fengbo, ZHANG Xingwei

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

Abstract: Lightning strike is one of the major causes of transmission line accidents. This paper analyzes the characteristics and countermeasures of 220 kV and above transmission lines lightning faults occurred in Jiangsu power grid in 2013. The performance of lightning protection is calculated for the towers of 500 kV Taidou transmission line because they are frequently faulted. With the characteristics of terrain and lightning activities, the reasons that the section of transmission line over Changjiang River is easily struck by lightning are analyzed. Based on the analysis, several measures and suggestions are provided for achieving a better lightning protection.

Key words: transmission line; lightning strike tripping rate; shielding failure; lightning protection measures

直流故障引起的线路保护误动作事件分析

刘孝刚¹, 黄浩声², 崔晓祥¹, 蔡振辉¹

(1. 江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211102; 2 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 直流系统的可靠对于变电站的安全运行至关重要。文中针对一起区外故障下线路保护动作事件, 阐述了该故障分析思路和排查方法, 通过对直流监测系统动作信息、保护录波图进行分析, 确定故障原因是由于单个蓄电池内部故障引发的故障范围扩大, 最后针对存在的缺陷提出了整改和防范措施。

关键词: 直流故障; 区外故障; 保护动作

中图分类号: TM773

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)04-0021-03

直流系统是至关重要的电源系统, 它为电力系统的控制回路、信号回路、继电保护、自动装置及事故照明等提供可靠稳定的不间断电源, 还为断路器的分、合闸提供操作电源。尽管直流电源相对稳定可靠, 但由于其在电力系统应用中的特殊性和重要性, 极易使得直流系统自身故障演化成电力系统更大的故障^[1]。

1 保护动作情况

某日, 220 kV 线路 1 因风筝挂线发生 AB 相间短路, 线路两侧开关三跳未重合, 保护正确动作。11 s 后, 相邻 220 kV 变电站 A 线路 2 第一套保护 WXH-803 距离Ⅲ段动作, 跳开线路开关, 第二套保护 PSL-603 保护只启动, 未动作。故障系统接线示意图如图 1 所示。其中变电站 C 由变电站 A 通过线路 2 单线馈供。

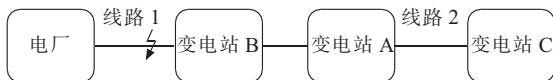


图 1 故障系统接线示意图

2 故障检查及分析

现场对 220 kV 变电站 A 线路 2 第一套 WXH-803 保护开展相关试验, 装置检查结果正常。检查发现变电站内第一套保护均启动。另外, 还发现站内Ⅱ段直流电源消失, 恢复供电后进行模拟全站所用电全失试验, 发现在切断直流Ⅱ段充电机交流电后, 直流电压有短时下降现象。为查找直流电压下降原因, 对站内直流电源系统进行了检查, 同时对直流系统故障原因开展分析。

2.1 Ⅱ段直流母线电压告警分析

故障发生时, 直流绝缘在线监测装置记录到Ⅱ段母线相关告警信息, 告警值为 69.2 V。装置Ⅱ段直流电压欠压定值为 198 V, 而此次动作值显示仅为 69.2

V, 表明故障发生时刻, 直流母线电压从额定 220 V 急剧下降, 导致在装置动作时, 第一个采样点幅值(69.2 V)已远低于定值。

2.2 Ⅱ段直流母线电压降低原因分析

针对直流电压下降的情况进一步开展分析, 图 2 为Ⅱ段直流系统脱开充电装置后, 由蓄电池组给直流负载带电的系统简图。绝缘监测装置中平衡桥的 2 个电阻阻值相等约 47 kΩ, 钳制直流正负母线对地电压。

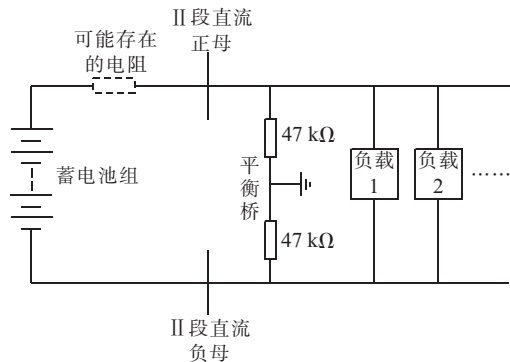


图 2 Ⅱ段直流系统简图

绝缘监测装置检测的直流电压是正母线与负母线之间的电压, 母线直流电压降低有可能是蓄电池组故障或是蓄电池组至直流母线电压之间有电阻分压, 如螺丝没有拧紧、接触不良等。对该回路进行了仔细的检查, 发现蓄电池组与正负母线的回路接触良好, 排除蓄电池组至直流母线电压之间存在电阻分压的可能。进一步检查Ⅱ段母线上蓄电池组在线监测装置相关告警信息, 发现故障当日凌晨, 在运行人员送上充电机交流电源给蓄电池组充电过程中, 30 号蓄电池电压 3 次超限, 最高电压达到 11.58 V, 如表 1 所示。根据 DL/T 724—2000《电力系统用蓄电池直流电源装置运行与维护技术规程》规定, 蓄电池组充电电压调整范围为 90%~130%(6 V, 12 V 阀控式蓄电池)^[2], 变电站站内蓄电池单节标称电压为 6 V, 充电电压范围应为 5.4~7.8 V, 30 号蓄电池充电电压明显过高。

充电过程中蓄电池电压过高是蓄电池内部存在故

表 1 单节蓄电池超限信息

故障类型	编号	报警值/V	时间
电压超限	30 号第 2 组	11.58	03-24 04:37
电池恢复	30 号第 2 组	07.50	03-24 13:02
电压超限	30 号第 2 组	07.91	03-24 16:20
电池恢复	30 号第 2 组	07.35	03-24 16:36
电压超限	30 号第 2 组	09.40	03-24 23:13
电池恢复	30 号第 2 组	07.48	03-24 23:58

障的一个特征,蓄电池内部故障会导致蓄电池组放电时端电压迅速下降,因此在变电站充电装置断电,由第二组蓄电池组直接带负载时,由于其 30 号蓄电池内部存在故障,致使蓄电池组直流电压迅速下降,造成直流系统失电故障。事后将该组蓄电池更换,对 30 号蓄电池进行电导测试,测试结果为 0 S,即内阻无穷大,表明蓄电池内部确实存在物理故障。

2.3 故障过程分析

线路 1 因风筝挂线发生 AB 相间短路,导致变电站 A 220 kV 母线 AB 相电压下降,35 kV 母线电压随之下降,变电站 A 1 号所用变(35 kV 侧电压取自本站一段母线)、2 号所用变(35 kV 侧电压取自 L1 线路,由变电站 C 转某 35 kV 变电站再接回变电站 A)低压侧 401、402 开关因失压瞬时脱扣跳开,站内直流母线 I、II 的充电装置失去交流电,由 2 组蓄电池给负载供电。变电站 A 直流系统结构如图 3 所示。

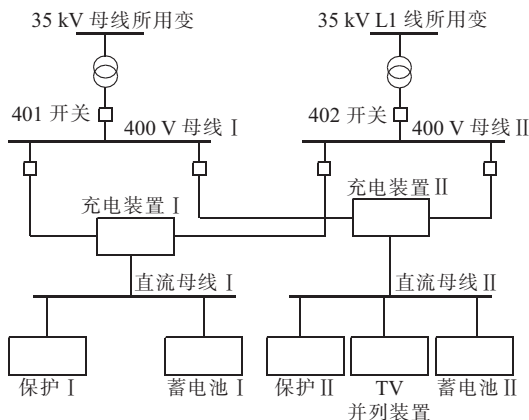


图 3 变电站 A 直流系统结构

I 段直流母线的蓄电池组带负载成功, II 段直流母线蓄电池组由于单节电池内部虚断,造成直流母线电压跌落,使接于 II 段直流母线的 220 kV 电压互感器(TV)并列装置中的交流电压切换继电器(单位置继电器)失去直流电而返回,导致全站保护失去母线电压。在区外线路故障的影响下,线路 2 第一套保护装置

WXH-803 启动,当三相母线电压消失后,相间测量阻抗为 0,由于保护正处于启动后的故障处理程序中,不判 TV 断线,因此在达到距离三段的延时后,保护动作出口跳开线路开关。WXH-803 保护故障录波如图 4 所示。

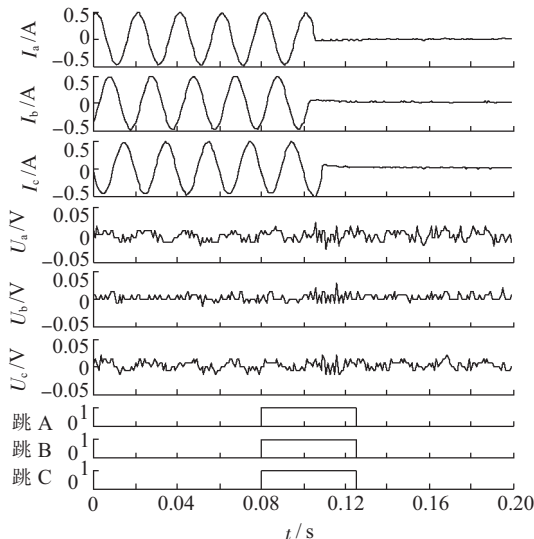


图 4 WXH-803 保护录波图

由图 4 可见,在保护跳闸前,线路 2 二次三相电压均已消失,而三相电流仍为正常的负荷电流,呈典型的 TV 断线特征。

线路 2 第二套保护由于 II 段直流母线失电造成装置失电,保护只启动没有动作出口。因此,本次故障是由于区外线路故障引起变电站 35 kV 母线电压下降,所变低压侧总开关因低压瞬时脱扣,造成 1 号、2 号充电机交流失电,全站直流负荷由 1 号、2 号蓄电池组供电。由于 2 号蓄电池组单节电池内部故障, II 段直流母线电压急剧下降,导致接于 II 段直流母线的 TV 并列装置失电,线路 2 第一套保护 WXH-803 装置三相电压消失,距离 III 段动作出口。

3 整改措施

本次故障暴露了诸多问题,如该变电站所用变交流电源设计不合理、蓄电池组在线监测系统功能不够完善及所变低压侧开关低压脱扣方式不合理等,需及时采取以下措施加以解决。

- (1) 加强直流系统的运行和维护。蓄电池正常都以浮充方式运行,因长时间不放电,负极板上的活性物质易产生硫化铅结晶,不易还原,为保证放电容量和延长使用寿命,必须对其进行定期充放电和日常维护。
- (2) 完善现有蓄电池在线监测系统功能。当某只蓄电池内部开路而引起其他蓄电池过充时能适时发出过充告警,蓄电池开路达到一定延时即可发出电池开路报警^[4]。
- (3) 规范所用变低压侧失压脱扣装置运行方式。

脱扣装置需带一定延时,以便与继电保护动作时间相配合,避免由于区外故障的短时扰动即导致所变低压侧失电。

(4) 严格执行反措,规范电压并列及切换回路设计。对 TV 并列装置进行严格检查,确保 TV 并列装置刀闸接点双位置开入^[3]。因 TV 并列装置涉及全站电压,其一旦失电,影响全站保护正常运行,必须使用双位置继电器,即使直流电源失去,由于继电器具有自保持功能,保护不会失去电压。

(5) 对于重要的 220 kV 联络变电站,所用变的两路交流电源应取自不同的可靠电源点,避免所用变两路电源同时失电。

4 结束语

通过详细地现场检查与分析,确定了区外故障下线路保护不正确动作的原因及直流蓄电池故障所在,

并进一步提出了整改措施,为防止类似直流系统故障的发生提供了借鉴。

参考文献:

- [1] 谭重伟,梅俊,欧阳德刚,等. 500 kV 变电站直流系统故障分析及应对措施[J]. 湖北电力,2006,06(3):29-31.
- [2] DL/T 724—2000,电力系统用蓄电池直流电源装置运行与维护技术规程[S].
- [3] 国家电网公司. 国家电网公司十八项电网重大反事故措施[M]. 北京:中国电力出版社,2005:76-89.
- [4] 黄森炯,王 晓,王 晴. 蓄电池故障对 110 kV 变电站安全运行影响分析探讨[J]. 蓄电池,2012,49(5):212-214.

作者简介:

刘孝刚(1971),男,湖南郴州人,高级工程师,从事继电保护工作;
黄浩声(1979),男,浙江温岭人,工程师,从事继电保护工作;
崔晓祥(1979),男,江苏兴化人,高级工程师,从事继电保护工作;
蔡振辉(1976),男,江苏启东人,工程师,从事继电保护工作。

The Analysis of a Mal-operation Accident of Relay Protection Caused by DC System Fault

LIU Xiaogang, HUANG Haosheng, CUI Xiaoxiang, CAI Zhenhui

(1. Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing, 211103, China)

Abstract: Reliable operation of DC system is very important for safe operation of substation. This paper uses an actual accident of the mal-operation of line protection caused by the rapid decline of DC voltage during the external fault to elaborate the analytical means of accidents. By analyzing the trip reports in DC system and fault records in line protection, it is confirmed that the expansion of fault area is caused by the internal fault of a single battery. Finally, several methods to improve supply reliability and avoid the similar accident are proposed.

Key words: DC fault; external fault; protection action

国家电网上半年投入 1588 亿元用于电网建设

2014 年 7 月 7 日,国家电网公司召开年中工作会。根据会议公布的数据,2014 年上半年,国家电网完成固定资产投资 1676 亿元,其中电网投资 1588 亿元,同比增长 8.9%;售电量 1.7 万亿 kW·h,同比增长 5.1%。国家统计局的相关统计表明,今年 1 至 5 月,拉动经济增长的“三驾马车”——投资、消费、出口的同比增速分别下降 3.2、0.5、13.9 个百分点,显示出我国经济增长仍面临较大下行压力。在这一背景下,电网投资保持较高增速,进一步凸显出其对我国经济增长的正面带动作用。国家电网公司是我国最大的电力供应企业,也是全球最大的公用事业企业。记者发现,经过持续投资,特高压电网、智能电网工程领域建设均取得重大进展。今年以来,国家电网公司特高压电网建设全面提速,哈密南—郑州、溪洛渡—浙西±800 kV 特高压直流工程建成投运,浙北—福州特高压交流工程进展顺利。国家电网“四交四直”8 项特高压工程和 3 条常规输电通道纳入国家大气污染防治行动计划。截至 6 月底,国家电网已建成投运“两交四直”特高压工程,在运在建特高压线路长度超过 1 万 km,变电(换流)容量超过 1 亿 kV·A。在智能电网工程领域,国家电网全力推进智能电网建设,目前浙江舟山柔性直流输电科技示范工程已建成投运,这是世界首个五端柔性直流输电工程。山东文登、河南天池、重庆蟠龙抽水蓄能项目获得核准,建成北京、上海、杭州电动汽车互动服务平台,积极推进京港澳、京沪等高速公路快充站建设。与此同时,国家电网还启动了 6 类 16 项智能电网创新示范工程。国家电网公司相关人士表示,我国已提出要推动能源消费革命、供给革命、技术革命和体制革命,强调发展远距离大容量输电技术,以坚强智能电网建设承载和推动这一要求,符合我国的战略部署。因此,下半年国家电网将继续推动特高压和智能电网建设,在坚强智能电网发展上实现新突破。

摘自《江苏电力信息网》

对 2 条线路相继跳闸的保护配置分析

刘 明, 伏祥运, 卢 笛, 庄海龙, 张志福
(连云港供电公司, 江苏 连云港 222004)

摘 要:分析了连云港市 220 kV 佟圩变佟西 767 开关因为外力因素引起单相接地的跳闸事故, 晨兴电厂银圩 761 开关在同一时间跳闸, 通过查找故障原因并分析线路各侧的保护配置情况、保护装置原理等, 发现目前连云港地区个别 110 kV 线路保护配置中存在的问题, 深入分析了各保护装置的逻辑和顺序, 给出了解决依据, 并根据现场实际情况提出了改进措施。

关键词:单相接地; 事故跳闸; 线路保护; 保护配置

中图分类号: TM773

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)04-0024-03

单相接地是 110 kV 及以下电压等级线路经常发生的故障, 单相接地后接地点的零序电压升至最高, 零序电流也随着距离短路点的远近而大小变化^[1,2]。发生永久性单相接地短路时, 保护应该快速可靠而有选择性地切除故障点, 缩小停电范围, 在实际电网中, 由于电源点的增加和电网规模的不断加大, 线路保护之间的配合会出现失去选择性的问题, 保护整定部门和电网生产现场也在根据问题逐步改善现有的保护配置。

1 一起非典型故障的分析

1.1 系统模型及简介

220 kV 佟圩变系统接线如图 1 所示。其 220 kV 和 110 kV 侧均为双母线接线方式, 为了便于分析, 图中将 110 kV 侧简化为单母线分段接线方式, 35 kV 侧为单母线接线方式; 佟圩变为单变运行的变电站, 主变容量 180 MV·A, 主变为自耦变压器带平衡绕组, 这样可以保证高次谐波的通道, 使得感应电动势的波形不会发生畸变, 从而提高变压器带不平衡负载的能力, 稳定中性点电压, 提高电能质量。

佟圩变所配置的保护有主变的主保护配置差动 I 套和差动 II 套, 其中电流互感器断线闭锁差动保护, 本体重瓦斯投跳闸, 本体轻瓦斯、压力释放、油温高、本体油位异常、风冷消失投信号, 后备保护配置高压侧复压过流保护、零序方向保护, 中压侧复压过流和零序过流保护, 低压侧复压过流保护以及失灵保护; 110 kV 线路配置三段接地距离保护、三段相间距离保护、四段零序过流保护, 线路测量方向指向线路, 重合闸投入。

1.2 发生事故

如图 1 所示, 佟圩变佟西 767 开关保护测距 0 km, 佟西 767 线路 2~3 号杆有吊车碰线, 造成 C 相

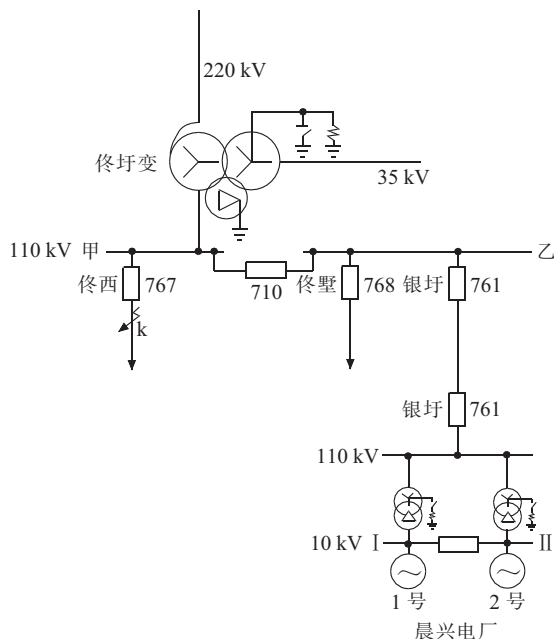


图 1 佟圩变系统接线图

导线断股, 发生永久性单相接地, 重合不成功; 同一时间内, 晨兴电厂银圩 761 开关跳闸, 保护屏上零序保护、差动保护和距离保护均有信息打出, 2 号机组解列。经过现场检查确认并查阅故障信息得知保护具体动作情况如表 1 所示。

表 1 保护动作情况

时间/ms	场所	保护动作情况
0	晨兴电厂	银圩 761 开关零序 II 段保护动作, 方向指向晨兴电厂 110 kV 母线
1076	佟圩变	佟西 767 开关零序 II 段保护动作
1098	佟圩变	佟西 767 开关分闸

1.3 保护配置及动作情况

佟西 767 线路 C 相接地故障时零序电流在网络中的流向如图 2 所示。佟圩变自耦变压器接地, 佟西线所供的西墅变主变中性点不接地, 晨兴电厂 2 号主变接地, 因此零序电流流向佟圩变主变和晨兴电厂 2 号变压

器,接地点零序电压最高,实际的零序电流方向为由故障点流向接地点,而零序电流的正方向规定为母线流向线路,与零序电流的实际方向相反,在多电源系统中保护装置会根据零序电流的正方向而有选择性地动作,系统中单相接地发生在佟西线出口侧,零序电流正方向由母线流向线路,应该由佟圩变佟西 767 开关保护动作切除故障。

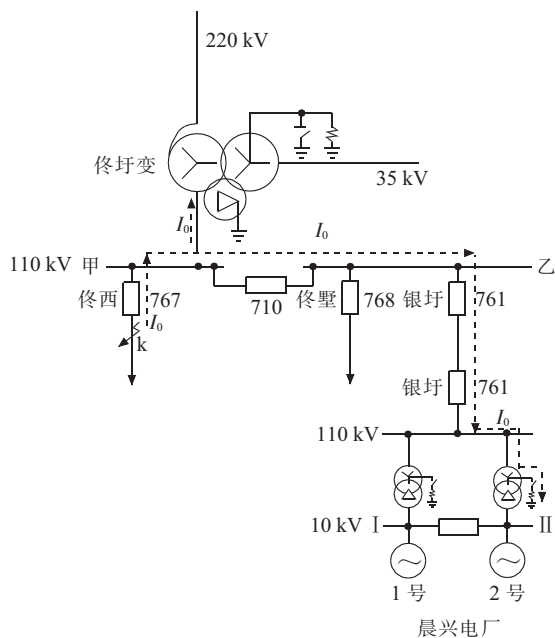


图2 零序电流分布图

佟西 767 开关采用的保护装置为许继 WXH-811A, 用于 110 kV 线路的主保护和后备保护中,其四段零序保护和三段接地距离保护均投入,零序 I 段电流定值整定为 9000/75 A,动作时限 0 s,零序 II 段电流定值整定为 1800/15 A,动作时限 0.5 s。晨兴电厂银圩 761 开关采用的保护装置为南瑞继保 RCS-9611C,用于 110 kV 以下电压等级的非直接接地系统或小电阻接地系统线路的电流保护中,在连云港地区正常用作 10 kV 线路的保护装置,其零序 I 段电流定值整定为 12 A,动作时限 0 s,零序 II 段电流定值整定为 2 A,动作时限 0.2 s。

1.4 事故及保护动作分析

分析表 1 中的保护动作情况可以看出,晨兴电厂银圩 761 开关零序 II 段保护先动作,1076 ms 后佟圩变佟西 767 开关零序 II 段保护动作;故障点在佟西 767 线路 2~3 号杆,应该由佟西 767 开关零序 I 段保护或接地距离 I 段保护动作瞬时切除故障点,而零序 I 段和接地距离 I 段保护并未启动出口;另外晨兴电厂告知银圩 761 开关保护的方向为由线路指向母线,按照规定的方向,银圩 761 开关保护不应该动作跳闸,它却启动出口了;带着疑问通过保护整定方案和定值单来查找原因。

1.4.1 零序 I 段保护未出口原因分析

被保护线路较短时运行方式对零序保护范围的影响如图 3 所示。I 为最大运行方式时零序 I 段的保护范围,II 为最小运行方式时零序 I 段的保护范围。

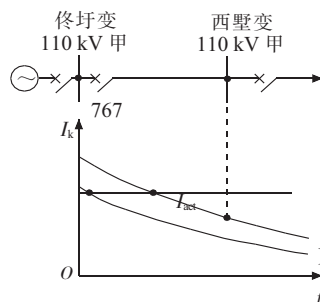


图3 运行方式对零序保护范围的影响

零序保护按照系统最大运行方式进行整定,由于系统中接地点的数量和位置在不断变化,它受系统运行方式的影响很大,佟西线全长 7.2 km,对于这样的短线路来说,零序 I 段保护的范围会变得更小,系统运行方式的变化导致了零序 I 段保护范围为零的情况,所以佟西 767 线路零序 I 段保护未出口。

1.4.2 接地距离 I 段保护未出口原因分析

接地距离保护测量的是故障点至保护装置处的阻抗,它受系统运行方式的影响很小,保护范围较稳定。当导线通过树木、吊车或其他物体对地发生短路时,过渡电阻较大,可达到几十欧姆;故障点离保护装置越近,保护整定的数值越小,则过渡电阻的影响就会越大,阻抗继电器的动作特性受过渡电阻的影响也较大。过渡电阻与阻抗关系如图 4 所示。 R_g 即为接地短路时的过渡电阻,767 保护装置的测量阻抗 Z_{mA} 等于 R_g 。

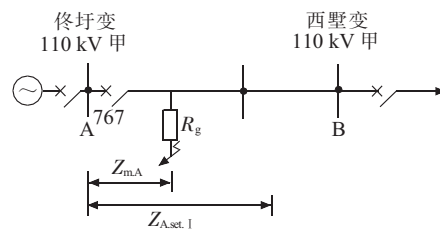


图4 过渡电阻与阻抗关系

佟西 767 开关保护装置 WXH-811A 使用的为偏移阻抗继电器,佟西 767 线路 C 相经吊车接地时,为非金属性接地,过渡电阻较大,另外接地距离 I 段定值为 1.14/0.12 Ω ,数值较小,受过渡电阻的影响会更大,如图 5 所示。短路点离保护装置很近,过渡电阻很容易就超出距离保护的的范围,这就是接地距离 I 段未启动出口的原因。

1.4.3 零序 II 段保护出口原因分析

假设晨兴电厂银圩 761 开关的零序 I 段启动电流为 $I_{act-761}^I$,零序 II 段启动电流为 $I_{act-761}^{II}$,由继电保护原理知道 $I_{act-761}^{II} \geq I_{act-761}^I$,当零序电流大于整定的启动电

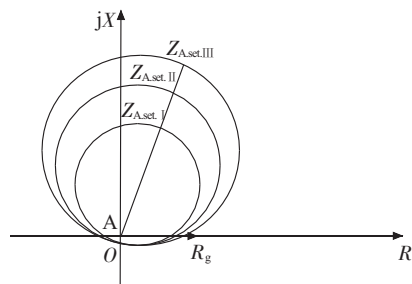


图 5 过渡电阻对接地距离保护影响的分析

流数值,保护装置就会出口动作。晨兴电厂为环保热电厂,银圩 761 开关保护装置 RCS-9611C 测得的零序电流为 2.63 A,大于零序 II 段整定值 2 A,但该装置未装设功率方向元件,并不识别零序电流的方向,零序电流达到整定值就会动作,很显然 $2.63 \text{ A} > 2 \text{ A}$,同时佟西 767 线路出口的故障点正在晨兴电厂银圩 761 开关零序 II 段保护范围之内,因此银圩 761 开关以 0.2 s 时限出口跳闸,由于晨兴电厂银圩 761 开关跳闸,当时在向银圩 761 线路输送出力的 2 号机组解列,负荷由 0.5 万 kW 降至 0,1 号机组继续运行,负荷由 0.47 万 kW 降至 0.27 万 kW,发热量为 52 t/h,继续供热。紧接着,佟圩变佟西 767 开关零序 II 段保护以 0.5 s 的时限出口跳闸,切除故障点,本次故障应该由佟西 767 开关动作出口直接切除短路点,而晨兴电厂侧却先于佟西 767 开关动作跳闸,这样就失去了继电保护的选择性和可靠性要求,容易对电力系统造成较严重的危害。

2 改进措施

2.1 升级保护装置

晨兴电厂所用的保护装置 RCS-9611C 常用于连云港地区 35 kV、10 kV 线路中,不能满足 110 kV 线路的保护配合要求,由于它不判别零序电流的方向即行动作,会造成保护动作失去可靠性,升级晨兴电厂侧的保护装置可以解决这一问题。

2.2 零序保护定值自适应

由于零序保护定值是按系统最大运行方式整定的,在其他运行情况下保护的缩小,如果能够给

保护装置整定 N 套定值,实时监测电力系统运行中的有关参数,并在发生故障瞬间快速获得故障类型以及系统阻抗,按照条件切换至适应于现有运行方式的整定值,再与实际零序电流进行比较,以确定保护是否应该动作于跳闸^[3]。

2.3 减小过渡电阻的影响

如果佟圩变佟西 767 开关的接地距离 I 段采用不同特性的阻抗元件,其整定值都一样的时候,全阻抗继电器在 +R 轴所占的面积较大,则受过渡电阻的影响越小,因此可以采用全阻抗继电器的保护装置;还可以采用多边形动作特性、圆与四边形组合动作特性的阻抗元件,均可有效减小不同情况下过渡电阻对保护装置的影响。

3 结束语

通过深入分析连云港地区一起典型的接地故障,非典型的保护动作情况,发现了电网中现有保护配置所存在的问题,研究分析了问题产生的原因,并给出了解决方法。

参考文献:

- [1] 张自伟,李加庆,夏伟伟.一起 10 kV 出线保护跳闸分析与探讨[J].江苏电机工程,2012,31(4):18-20.
- [2] 张磊.一起由于 10 kV 线路拒动引起主变越级跳闸的事故分析[J].江苏电机工程,2012,31(2):16-17.
- [3] 贺家李,宋从矩.电力系统继电保护原理[M].北京:中国电力出版社,2010:13-17.

作者简介:

- 刘明(1986),男,江苏徐州人,硕士研究生,从事电力系统调度运行、电力系统负荷预测等方面的研究工作;
- 伏祥运(1977),男,江苏连云港人,博士研究生,从事电力系统调度运行管理、无功功率补偿和谐波抑制等方面的工作;
- 卢笛(1977),男,江苏连云港人,工程师,从事电力系统调度运行等方面的工作;
- 庄海龙(1979),男,湖北秭归人,工程师,从事电力系统调度运行等方面的工作;
- 张志福(1977),男,江苏连云港人,工程师,从事电力系统调度运行等方面的工作。

The Analysis of Protection Configuration with an Actual Two-line Successive Tripping Accident

LIU Ming, FU Xiangyun, LU Di, ZHUANG Hailong, ZHANG Zhifu

(Lianyungang Power Supply Company, Lianyungang, 222004, China)

Abstract: The accident of the successive tripping accident of Tongxi 767 and Yinwei 761 caused by in Chenxing Power Plant is analyzed. The tripping of Tongxi 767 which caused by some external force factors in 220 kV Tongwei substation of Lianyungang finally results in the tripping of Yinwei 761. Through analyzing the causes of the accident, the protection configuration of the line and the principles of protection device, some problems existing in current 110 kV line protection configuration are discovered. With a deeply analysis of the action logic and order of protections, some measures for improving the protection are proposed.

Key words: single-phase grounding; accident trip; line protection; protection configuration

电气设备 SF₆ 气体检漏技术研究与应用林 敏¹, 杨景刚², 贾勇勇², 赵 科², 高 山², 张子阳¹

(1.江苏省电力公司, 江苏 南京 210036; 2.江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘 要:针对目前 SF₆ 气体泄漏现场检测工作效率不高的问题,从检测精度、实施方法、检测用时及现场检测效果等方面,论述了电气设备 SF₆ 气体检漏技术的现状,对比分析了各种检测技术的优缺点和适用范围。在此基础上重点阐述了基于窄带滤波技术的 SF₆ 气体红外成像检漏技术的检测原理及优缺点,并根据近几年的检测工作经验,详细阐述了红外成像检漏法在现场测试要点及推荐方法,最后通过一起案例对该方法进行了分析说明。

关键词: SF₆ 气体泄漏; 窄带滤波技术; 红外检漏技术; 激光检漏技术

中图分类号: TM835

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2014)04-0027-03

SF₆ 气体是一种良好的高压设备绝缘介质,有很高的介质强度,具有极好绝缘性能和灭弧性能。采用 SF₆ 气体绝缘的电气设备目前已广泛应用于高压和超高压领域,它具有体积小、重量轻、容量大、成套速装、维修量少等优点,在电力系统中的应用越来越广泛。但运行中的 SF₆ 气体绝缘设备发生泄漏缺陷时,会产生多方面危害。SF₆ 是一种温室气体,泄漏后会污染环境,增加温室效应^[1];大量聚集在地面上的 SF₆ 气体会产生使人窒息危险;严重的 SF₆ 气体泄漏会造成设备绝缘性能下降,最终可能会引起重大事故;部分 SF₆ 气体分解产物具有很强的毒性和腐蚀性,发生气体泄漏后会影响到靠近设备的运维人员安全;SF₆ 气体价格昂贵,大量泄漏导致设备运维成本增加。

1 传统 SF₆ 气体检漏技术

以往的 SF₆ 电力设备检漏手段主要集中在抽真空检漏法、包扎法和化学检测法。

(1) 抽真空检漏法。在设备未充入 SF₆ 气体前,对设备进行抽真空处理,并保持一段时间,观察其真空度降低的值是否满足设计要求。该方法仅用于出厂或大修后检漏,且精度较差,适用范围较小,需要大型真空泵及真空计,检漏所需时间较长,实施成本较大,目前已经很少采用了。

(2) 肥皂气泡法。在疑似泄漏点处涂抹肥皂水,观察是否有气泡产生,以此判断是否有泄漏点。该方法虽然不需要仪器,但其精度较差,无法评估泄漏量的大小,检漏所需时间较长,且检测范围有限,某些设备无法进行带电检测。

(3) 包扎法。在疑似泄漏点处使用塑料薄膜包扎,再使用 SF₆ 定量检测仪检测包扎部位的气体含量。该方法适用于定量检测,多用于出厂试验或大修后检测,检测结果受包扎是否严密的影响较大,且精

度较差。

(4) “卤素效应”检漏法。所谓“卤素效应”是指金属铂在一定温度下发生正离子发射,当遇到卤素气体时,正离子发射会急剧增加,相应地发射特性就是“卤素效应”。该检测方法既可用于 SF₆ 一般定性检漏也可以用于精确定量检漏。该方法不便于现场 SF₆ 气体泄漏点的精确定位,只能定位存在一定浓度的 SF₆ 气体区域,且工作量大。当出现微风时就不具备检漏条件,室外现场使用时受环境因素制约性大,性能不稳定。

(5) 热导检测器法。热导检测器的检测原理是基于不同组分与载气之间有不同的热导系数,当被检测组分通过热导池时,热敏元件温度发生变化,导致电阻发生变化,从而导致内部电桥不平衡,输出电压信号。该检测方法也可用于 SF₆ 一般定性检漏和精确定量检漏。其缺点与“卤素效应”检漏法相同,漏点检测不够直观,受现场环境制约,性能不稳定。

(6) 激光成像检漏法。该技术的工作原理是仪器主动发射一定波长的激光能量,泄漏出来的 SF₆ 吸收来自激光的能量,使其温度得以上升,产生跟周围环境更大的温差,然后通过红外探测器成像,原理如图 1 所示^[2]。

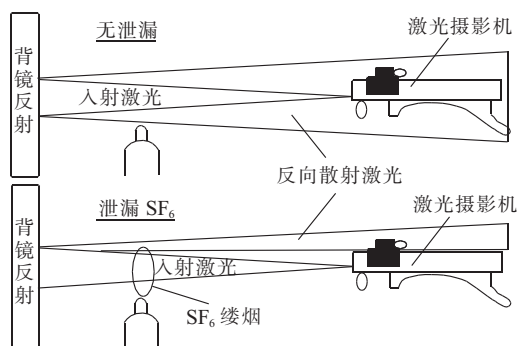


图 1 激光成像检漏技术原理示意图

传统 SF₆ 气体减口技术在检测 SF₆ 气体的泄漏方面实现突破,其检测结果也较为直观。但是激光成像检漏仪存在许多缺点,如激光发生器的限制,机身体积庞大且重,在现场拍摄及移动比较困难;激光器工作时耗

电较大,需要蓄电池或交流电源供电,很不方便;另外,激光成像检漏仪采用的是反向散射/吸收成像技术,对于一些没有背景的设备,某些 SF_6 泄漏点是无法检测出来的,这也是该技术存在的一个缺憾。

上述几种方法各有利弊,在执行过程中受限制的因素较多,很难检查出泄漏点,同时工作量很大,泄漏点不直观,很多情况下还必须先对设备停电,然后检修人员手持检测设备逐步接触密封部位,寻找可能发生的泄漏部位。另外在有限的停电时间内,也不能马上进行处理,必须记录泄漏部位,然后准备好备品备件,等到下一次停电时再进行处理。这样就造成了处理 1 个设备的 SF_6 气体泄漏缺陷,需要设备至少停电 2 次的情况,检修工期长,效率低下。

鉴于上述 SF_6 气体检漏技术的一些不足和缺陷,研究新的、可实现带电检测、远距离巡检 SF_6 气体检漏技术就显得尤为重要。

2 SF_6 气体红外成像检漏技术

研究表明^[3],一定浓度的 SF_6 气体对红外线吸收极强,而空气吸收较弱,造成其两者的红外影像具有不同的特性,表现为泄漏点处的 SF_6 气体与周围环境的温度有微小的差别, SF_6 气体浓度越高这种温度差异越大,使得通常可见光无法观察的 SF_6 气体泄漏现象,在红外探测器及先进的红外探测技术的帮助下变得清晰可见。

研究表明, SF_6 气体对红外光谱吸收性最强的波长为 $10.6\ \mu\text{m}$,而一般的红外测温仪的工作波段比较宽,约为 $0.7\sim 14\ \mu\text{m}$,其检测到的干扰信号较多,无法直接用于 SF_6 气体红外检漏工作。因此要实现红外检漏,关键技术是设计一款窄带滤波装置,将红外成像仪器的工作波段限制在 $10.3\sim 10.9\ \mu\text{m}$ 的范围内,否则会因为其他气体对红外光谱的吸收而影响检测精度,且其温度分辨率不大于 $0.025\ ^\circ\text{C}$,

目前较成熟的技术是利用制冷型量子井探测技术(QWIP),检测由于 SF_6 气体吸收红外光谱产生的微弱变化量,从而达到 SF_6 气体泄露的目的,其检测工作原理如图 2 所示。

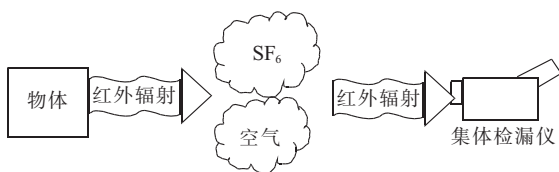


图 2 SF_6 气体泄露红外可视化检漏原理示意图

红外成像检漏是最新的 SF_6 检漏技术,较传统的泄漏检测技术有着不可比拟的优势,同时也能给实际工作中创造较大的经济效益及社会效益。

(1) 红外检漏技术可进行带电检测,大大减少因

停电检漏而带来的损失。

(2) 红外检漏技术可进行非接触、远距离检测,人员检测工作更安全。

(3) 红外检漏技术可实时捕捉微量 SF_6 气体泄漏,并以图像显示出来,准确定位故障点,省时省力。

(4) 采用纯红外接收成像,不需要额外发射激光补助能量,因此仪器体积较小,现场操作简单,可在各种环境、天气和背景下进行检测。

(5) 现有红外检测装备大多同时具备红外和可见光成像功能,每种成像方式还同时具备视频和图像拍摄模式,便于后期进行更细致的分析。

(6) 红外检漏技术较其他检漏技术,现场工作用时较短,现场检测工作效率高。

另外,与传统检漏技术相比较,现有红外检漏技术及其装备也存在一定的劣势。即目前 SF_6 气体泄漏红外检测装备价格昂贵,大面积推广的成本较高;进行 SF_6 气体红外检漏时,要求工作人员具有一定的工作经验与技巧;红外检漏技术仅能实现定性检测,无法进行定量检漏,因此该方法仅可用于运行设备检测。

3 红外成像检漏现场测试要点

3.1 现场检漏工作顺序

根据近几年的工作经验,建议按照如下顺序进行 SF_6 泄漏点查找:密度继电器→阀门及管道→法兰→本体→转角(GIS)及底座→空间狭小部位。

(1) 密度继电器作为 GIS 设备的辅助测试部件,其内部多为二次元件,在安装运行维护阶段往往会忽视对其进行密封性试验,而成为 SF_6 气体泄漏的薄弱环节。

(2) SF_6 气体管道多采用硬连接、铜焊接等工艺,在生产、安装环节很容易出现各类问题,如密封圈质量不佳、焊接处开裂等问题较为突出。

(3) 设备法兰(顶部、中间、底座)面较容易出现漏气现象,如在拧螺丝时力矩过大过小、未按照对角紧固、密封圈质量不佳等,均会出现异常泄漏。

(4) 如果在 GIS 壳体浇筑成型阶段或焊接时工艺控制不严,往往会出现沙眼或焊孔,在 GIS 设备出厂或交接验收时未及时发现,运行一段时间后就出现 SF_6 气体泄漏现象。

(5) 由于空间窄小,导致某些部位难以用常规检测方法进行泄漏测试,往往在安装和交接中过程忽视这些部位的监测,应在运行阶段加强检测。

3.2 根据补气周期确定泄漏检测工作

常规红外可视化检漏仪具有一定的检测精度,并非对所有泄漏情况进行监测。根据近几年工作经验,建议结合 SF_6 气体密度继电器的示数变化速度和补气周

期进行 SF₆ 泄漏检测。现有的红外检测仪一般可检测到补气周期在 6 个月以内的漏气缺陷,现场检测结果如图 3—5 所示。当补气周期超过 6 个月时,需要在夜间、无风、晴朗的环境下,采用高精度测试仪才能监测到微弱的漏气现象,现场检测结果如图 6、图 7 所示。



图 3 补气周期为 1 个月以内的 SF₆ 气体泄漏成像图



图 4 补气周期为 1 至 3 个月的 SF₆ 气体泄漏成像图



图 5 补气周期为 1 至 3 个月的 SF₆ 气体泄漏成像图



图 6 补气周期为 6 至 12 个月的 SF₆ 气体泄漏成像图



图 7 补气周期为 12 个月以上的 SF₆ 气体泄漏成像图

4 案例分析

某 500 kV 变电站运行维护人员发现 5071 断路器 A 相、B 相相继出现低气压报警,补气周期大约为 2 个月,随即采用红外和激光成像检测法分别进行泄漏点定位。红外检漏结果显示,5071 断路器 A 相线路侧极柱和 B 相母线侧极柱合闸电阻法兰上部分别存在一个气体泄漏点,其中 B 相泄漏严重程度大于 A 相,如图 8、图 9 所示。激光检漏没有发现 SF₆ 气体泄漏点。



(a) SF₆ 气体泄漏点红外图像



(b) SF₆ 气体泄漏点

图 8 5071 断路器 B 相红外检漏



(a) SF₆ 气体泄漏点红外图像



(b) SF₆ 气体泄漏点

图 9 5071 断路器 A 相红外检漏

结合停电计划对该设备进行解体检修,发现 B 相断路器操作连杆箱存在砂眼,A 相断路器法兰密封胶圈脱离“密封槽”而存在不正常的挤压,设备运行一段时间后发生气体泄漏现象。随后更换连接箱和密封圈后泄漏现象消失。

5 结束语

综上所述,相比于常规方法,红外可视化检漏技术具有可进行带电检测、可进行非接触、远距离检测、可实时捕捉微量 SF₆ 气体泄漏等优点。缺点则是无法进行定量检测,但作为一种设备运行巡检技术,检测、定位泄漏点是首先解决的问题,然后根据包扎法进行定量检测。因此,建议加大红外可视化检漏技术的发展和推广力度,建立现场检测导则、规范,加强技术交流,提高 SF₆ 气体检漏工作效率。

参考文献:

- [1] 佟智勇,甄利,张远超. SF₆ 开关设备检漏及漏点处理现场实践[J]. 高压电器,2010,46(5):92-94.
- [2] 吴剑敏. 激光成像技术在电力系统中的应用[J]. 上海电力,2008,15(2):192-195.
- [3] 李鸣青. 提高 GIS 设备漏气处理成功率[J]. 山东电力技术,2010,17(6):27-30.

作者简介:

林 敏(1956),男,福建福州人,高级工程师,从事输变电设备运行维护技术分析和管理工作的;

杨景刚(1984),男,陕西咸阳人,工程师,从事变电设备状态评价及技术监督工作;

贾勇勇(1986),男,江西九江人,工程师,从事变电设备状态评价工作;

赵 科(1984),男,江苏无锡人,工程师,从事变电设备的状态评价工作;

高山(1974),男,江苏盐城人,高级工程师,从事变电设备状态评价工作;

张子阳(1982),男,安徽蚌埠人,高级工程师,从事输变电设备状态分析及管理工作。

(下转第 33 页)

基于时域多周期同步和频域代数运算的谐波检测法

李安娜¹, 黄家晖¹, 熊杰锋²

(1.东南大学电气工程学院,江苏 南京 211189;2.江苏省电力公司电力科学研究院,江苏 南京 211103)

摘要:提出了一种电网谐波数字测量新方法,时域多周期同步采样的频域代数运算法,给出该方法实现的具体硬件配置。该方法主要包括时域多周期硬件同步采样和频域叠加运算 2 个关键环节。多周期同步采样用 100 MHz 高频脉冲对电网频率进行实时测量跟踪,保证 10 个周波采样同步偏差小于 0.03%;进而对采样信号的矩形窗频谱进行简单的代数运算,可达到加 Hanning 窗的精度。仿真实验表明,新方法可在每 10 个周波实现电网谐波的高精度测量,精度满足国标 A 级标准。

关键词:多周期同步采样;谐波测量;加窗傅里叶变换

中图分类号: TM76

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)04-0030-04

谐波和间谐波测量是谐波问题中的一个重要分支,也是分析治理谐波问题的出发点^[1]和主要依据。谐波测量的主要作用^[2]有:(1) 鉴定实际电力系统和谐波源用户的谐波水平是否符合标准的规定;(2) 用于谐波源设备和其他电气设备调试、投运时的测量,以确保设备投运后电力系统和设备的安全经济运行;(3) 谐波故障的诊断;(4) 实时补偿设备(有源电力滤波器(APF)等)补偿的依据等。

目前 IEC 推荐的谐波检测算法,其本质为离散傅立叶变换(DFT)算法。考虑电网信号的波动性,该方法截取“一定时间宽度”的数据进行分析,国际电工委员会(IEC)推荐采样窗宽为 200 ms,5 Hz 的频率分辨率^[3,4]。由于 IEC 算法精确计算的前提是尽量实现同步采样,因而规定 10 周波的最大同步偏差不得超过 $\pm 0.03\%$,同时规定同步偏差超过该值时必须对时域采样信号加 Hanning 窗以消弱同步偏差对精度的影响。调整采样策略减小同步偏差以实现采样的尽可能同步,主要包括软件同步和硬件同步法。其中软件同步法有双速率采样^[5]、优化选择采样点数^[6]2 种方法;硬件同步则通过增加锁相环硬件电路对信号进行实时频率跟踪,实时调整采样频率,实现同步采样。因电网频率总在波动,无论软件还是硬件同步,在采用快速傅立叶算法进行谐波计算时将引入非均匀采样导致的误差。鉴于此,提出一种电网谐波数字测量新方法:时域多周期同步采样的频域代数运算法。该方法首先将多周期同步采样理论应用于现场可编程门阵列(FPGA)中,以实现每 10 个周波电网信号的实时跟踪。在时钟频率为 100 MHz 时不仅保证同步偏差满足 IEC 标准,同时保证 10 周波的采样为均匀采样,消除了非均匀采样带来的误差。进而对计算得到的频谱信号进行简单的代数运算,可达到加 Hanning 窗的精度。MATLAB 仿真验证了该算法的有效性。

1 时域多周期同步采样的频域代数运算法

1.1 DFT 算法误差来源

采用 DFT 算法求取谐波参数往往存在偏差,主要取决于 3 个方面:

(1) 信号混迭, DFT 计算的信号是有限带宽信号,对于采样信号需要外加前置低通滤波器,用于滤除不需要分析的频段信号,由于不能实现理想低通滤波器,导致不需要检测的高次谐波分量与需要检测的低次谐波分量在频谱上产生混迭带来的误差;

(2) 模拟数字采样芯片(ADC)、电压互感器(TV)、电流互感器(TA)所带来的误差;

(3) 同步偏差,信号频谱离散示意图如图 1 所示。周期信号同步采样与非同步采样示意图如图 2 所示。同步采样时,图 1 中 $X_{\text{a}}(\omega)$ 或 $X_{\text{d}}(\omega)$ 与 $X(\omega)$ 重合,且泄漏频谱在整次谐波点上的幅值为 0,此时根据采样值可以精确地计算出各次谐波的参数,非同步时, $X_{\text{a}}(\omega)$ 或 $X_{\text{d}}(\omega)$ 与 $X(\omega)$ 不重合,且泄漏频谱在整次谐波点上的幅值不为 0,必然导致测量误差。

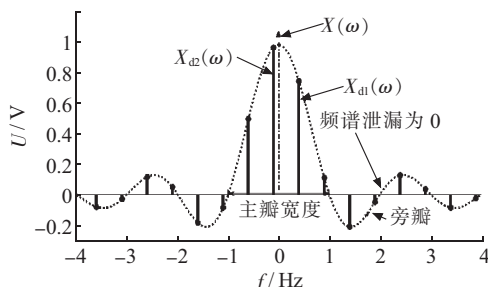
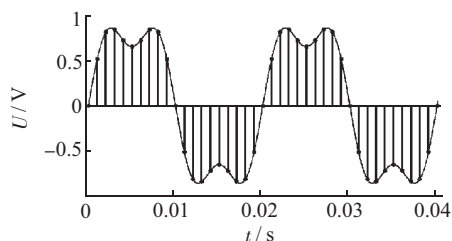


图 1 频谱泄漏和栅栏效应图



(a) 同步采样

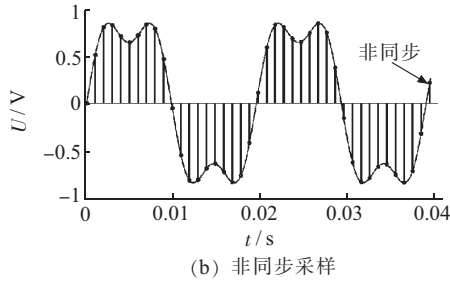


图2 周期信号同步采样与非同步采样

3个方面误差来源同步偏差一般占主要部分。实际工程中,采样是不可能严格同步的,不同步的原因主要来自电网频率的飘移和DSP(数字信号处理器)的定时误差2个方面。

1.2 多周期同步采样

多周期同步采样是一种硬件同步采样技术,可实现“整数倍”周波信号内的“均匀采样”。其硬件原理如图3虚线框所示。将被测非正弦信号通过带通滤波和过零比较器整形后送入FPGA,由FPGA生成同步采样控制信号实现AD同步采样^[7]。其中带通滤波器可防止对一个周波内有多个过零点的波形出现误检,如图4所示。多周期同步采样原理如图5所示。

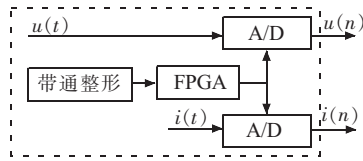


图3 硬件原理图

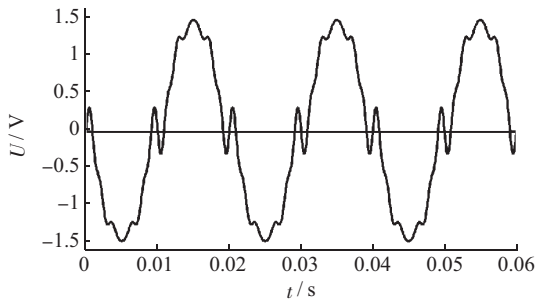


图4 电压时域波形

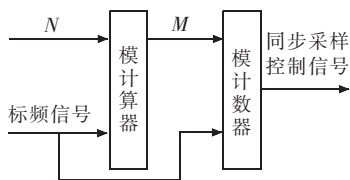


图5 多周期同步采样

以 p 个工频周期信号作为参考闸门信号,经电网信号上升沿同步后生成实际闸门信号,将频率较高的标频信号(100 MHz)作为填充脉冲对实际闸门进行计数得到 N ,由式(1)得到采样模值 M ,进而输出下一个测量区间的同步采样控制信号。

$$M = \frac{N}{p \times S} \quad (1)$$

式(1)中: S 为每周波采样点数。

设标频信号的频率和周期分别为 f_0, T_0 ,被测工频信号周期的实际值和测量值分别为 T_x, T_x' ,采样窗口长度为 p 个工频周期,则:

$$T_x' = NT_0/p \quad (2)$$

被测信号周期的绝对误差为:

$$dT_x' = |T_x' - T_x| = T_0/p \cdot dN \quad (3)$$

式(3)中, $dN = \pm 1$,其相对误差为:

$$\frac{dT_x'}{T_x} \approx \frac{dT_x'}{T_x'} = \frac{1}{N} \quad (4)$$

由式(4)可知,被测工频信号的周期误差与脉冲计数值 N 有关,标频信号频率 f_0 越高, p 值越大,误差越小。设相邻2个10周波的采样区间基波频率不变,图6给出基波频率为49.5~50.5 Hz,步进0.000 1 Hz, $p=8$, $f_0=100$ MHz时,采用多周期同步采样时10个周波的同步偏差(0.01%)。由图6可见,10个周波的同步误差小于0.002%。

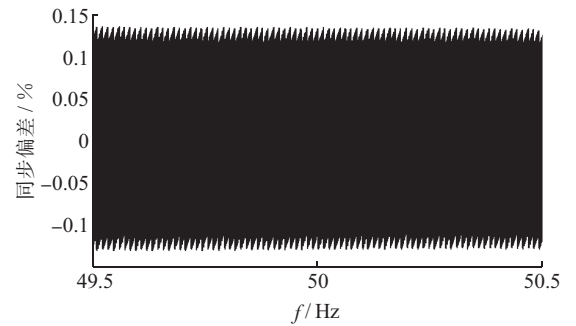
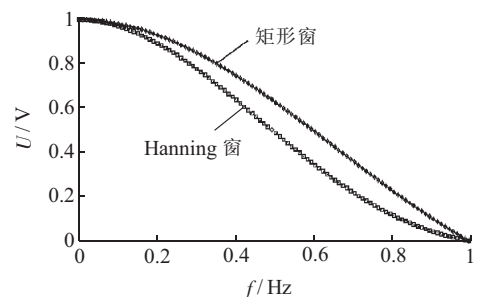


图6 多周期同步采样同步误差

1.3 频域代数运算

每10周波采样同步偏差小于 $\pm 0.03\%$ 时,IEC采样矩形窗对信号加窗频谱计算,当采样的同步偏差超过该设定值时,IEC推荐采用加Hanning窗后进行频谱计算。矩形窗和Hanning窗的归一化幅频特性如图7所示。

由图7可见当矩形窗和Hanning窗在保证主瓣分辨率相同的情况下,Hanning窗的各次旁瓣远小于矩形窗旁瓣,可以有效地削弱同步偏差对精度的影响。时



(a) 主瓣特性

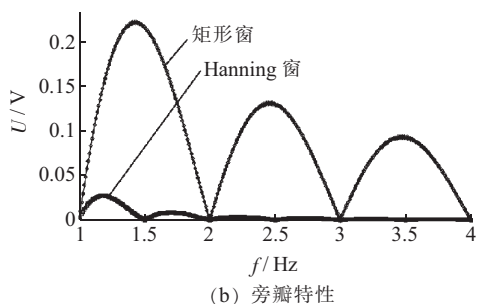


图 7 矩形和 Hanning 窗归一化幅频特性

域中对采样信号直接加 Hanning 窗将带来运算量的增加,以每 10 周波 2048 点为例,每次频谱计算需要额外增加 2048 次乘法运算。本文提出一种频域代数运算法,先对时域采样信号直接求取矩形窗频谱,进而采用下式:

$$X(m) \Big|_{\text{Han}} = \frac{1}{2} [X(m) - \frac{1}{2} [X(m-1) + X(m+1)]] \Big|_{\text{Rec}} \quad (5)$$

在频域中可直接得到加 Hanning 窗的频谱值,频域代数运算法矩形窗频谱运算量与传统方法一样,移位和加减运算量远小于 2048 点乘法运算。

1.4 硬件配置和算法步骤

时域多周期同步采样的频域代数运算法具体实现时一种硬件配置方案和算法步骤如图 8 所示。

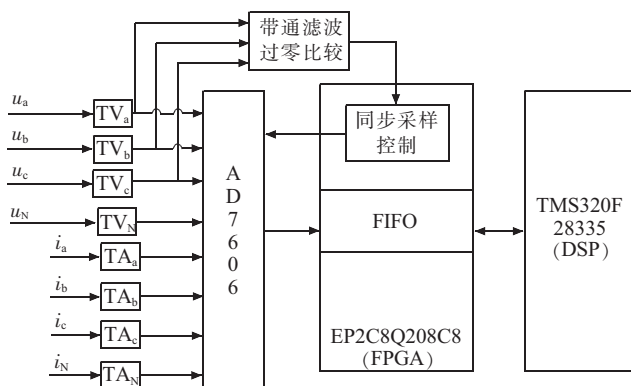


图 8 新方法硬件配置

(1) TV 和 TA: 用于实现电气隔离和信号变换,具体选择时需要考虑互感器的带宽、线性度和精度;

(2) 8 路同步采样芯片 AD7606: 16 位 AD, 在同步采样控制下,实现电压和电流同步采样;

(3) 带通滤波和过零比较器: 非正弦信号通过由通用运放 LM258 实现的二阶带通滤波电路提取出基波分量,将该分量经 LM293 实现的过零比较电路生成“被测信号”送入 FPGA;

(4) FPGA: 由 EP2C8Q208C8 实现同步采样控制和 16 位 FIFO(先进先出);

(5) DSP: 在浮点 TMS320F28335 中^[8],将 FIFO 存放的电压采样信号和电流采样信号进行 FFT 运算得到各次谐波值。

2 仿真实验

为验证本文所提算法的有效性和高精度,采用 MTALAB 对该方法进行验证。仿真信号按照电能质量监控终端测试的要求,为简便起见,取基波电压有效值为标么值 1,2 次至 50 次谐波电压有效值分别为基波有效值的 0.5% U_N 和 3% U_N ,各次谐波有效值允许误差分别为 0.05% U_N 和 5% U_H ,其中 U_N 为基波电压有效值, U_H 为谐波电压有效值。其电压信号时域波形分别如图 9 和图 10 所示。

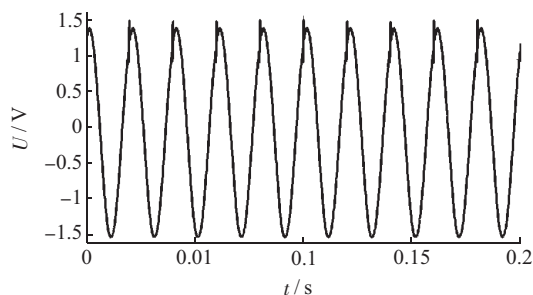


图 9 谐波电压有效值为基波有效值 0.5% 波形

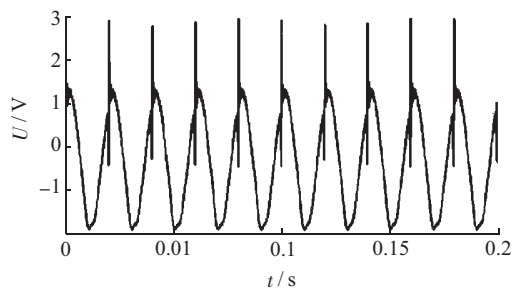


图 10 谐波电压有效值为基波有效值 3% 波形

前文表明多周期同步采样法每 10 周波同步偏差小于 0.002%,为更好说明本文方法的有效性,实际仿真中选取同步偏差仅为 0.02%。图 11 和图 12 给出此时 2 个算例的谐波计算精度,由图 11 和图 12 可见,即便按此同步偏差,谐波计算精度仍均满足电能质量监控终端谐波测量精度要求,精度满足国标 A 级标准。

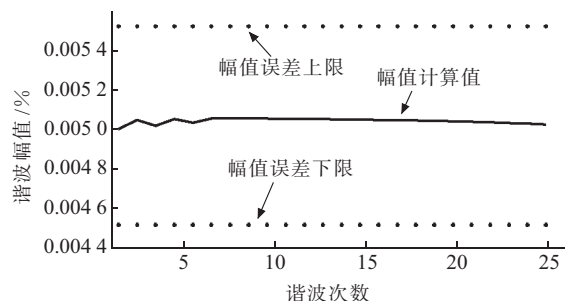


图 11 谐波电压有效值为基波有效值 0.5% 测量结果

3 结束语

本文提出了一种电网谐波数字测量新方法,即时域多周期同步采样频域代数运算法。该方法主要优点:

(1) 采用基于 FPGA 的多周期同步采样技术,可

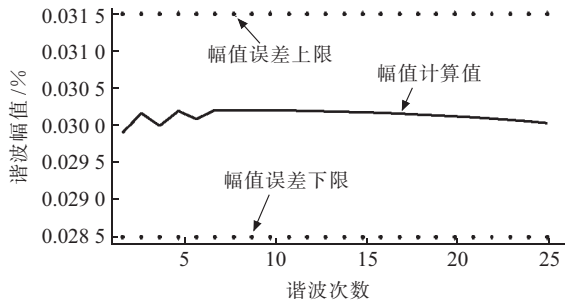


图 12 谐波电压有效值为基波有效值 3%测量结果

实现每 10 周波同步采样误差小于 0.002%, 远小于 IEC 规定的同步偏差限值, 而且随着 FPGA 主频的不断提升, 采样同步偏差越来越小;

(2) 提出根据矩形窗频谱进行简单的移位和加法运算, 以达到加 Hanning 窗函数的谐波计算精度, 相对传统时域加窗法运算速度更快。

由于该方法充分考虑了采样同步策略和算法实现的实时性, 其同步偏差小于 IEC 限值一个数量级, 其谐波计算精度满足国标 A 级标准。本文同时给出该方法具体实现的一种硬件配置方案, 该方案将用于某种高精度电能质量分析仪的设计中。

参考文献:

[1] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功补偿[M]. 北京: 机

械工业出版社, 1998: 35-37.

[2] 吕润余. 电力系统高次谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 185-187.

[3] General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto, IEC Std[S]. 61000-4-7, 2002: 27.

[4] Power Quality Measurements Methods, Testing and Measurement Techniques, IEC Std[S]. 61000-4-30, 2002: 37.

[5] 方伟林, 王立功. 双速率同步采样法在交流测量中的应用[J]. 电测与仪表, 1997, 34(4): 21-23.

[6] 潘华, 黄纯, 王联群. 电力参数微机测量中采样周期的优化校正方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(5): 71-75.

[7] 张志文, 王承林, 王伟, 等. 新型多周期同步和倍频锁相的频率跟踪技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(5): 119-123.

[8] 李宇峰. 基于 TMS28335 的智能电网快速采样系统设计[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(6): 35-39.

作者简介:

李安娜(1991), 女, 江苏靖江人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定分析、电能质量;

黄家晖(1993), 男, 江苏靖江人, 本科, 研究方向为电网电能质量测量与控制;

熊杰锋(1976)男, 湖北武汉人, 博士后, 研究方向为功率理论、电能质量测量理论与电能质量测量仪设计。

Power Harmonic Analysis Based on Multi-cycle Synchronous Sampling and Algebraic Operation in Spectrum

LI Anna¹, HUANG Jiahui¹, XIONG Jiefeng²

(1.School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 211196, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing, 211103, China)

Abstract: A new method for harmonic measurement in power system is proposed, and the hardware schematic of implementing it is discussed. The proposed method is based on the multi-cycle synchronous sampling and simple algebraic operation in spectrum. The multi-cycle synchronous sampling technique guarantees that the synchronous sampling error with 10 cycles is under 0.03%. Then the harmonic components of the spectrum is obtained by simple algebraic operations, which enjoys the same accuracy as Hanning windowed DFT. The simulation results validate the proposed method, and the accuracy of the proposed method meets the national A-level standards.

Key words: multi-cycle synchronous sampling technique; Harmonic measurement; windowed DFT

(上接第 29 页)

Research and Application on Detection Technology of SF₆ Leak in Electrical Equipment

LIN Min¹, YANG Jinggang², JIA Yongyong², ZHAO Ke², GAO Shan², ZHANG Ziyang¹

(1.Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210036, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing, 211103, China)

Abstract: The efficiency of SF₆ leak detection is not satisfied currently. From the angles of detection accuracy, implementation methods, time-consuming of detection and detection results, this paper gives a brief review of the status of detection technology of electrical equipment SF₆ leak, and a comparative analysis of the advantages and disadvantages of various detection techniques is made. Based on the analysis, the detection principle and the advantages and disadvantages of infrared imaging technology for SF₆ leakage based on narrowband filter are described. With the application experience of the detection in recent years, the main points of infrared imaging detection and some detection methods are presented. Finally, the infrared imaging technology for SF₆ leakage is illustrated with a case analysis.

Key words: SF₆ leakage; Narrowband filtering; Leak detection with infrared; Leak detection with laser

微型燃气轮机发电建模与仿真研究

易桂平, 胡仁杰

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对发电用微型燃气轮机, 介绍了不同模式下不同控制方式的数学模型, 基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台构建其不同运行模式下的仿真模型。仿真结果验证了在联网时功率参考值变化和孤岛时负荷需求变化的条件下, 微型燃气轮机的动态响应性能良好, 输出功率均能迅速准确地跟踪需求, 暂态过程持续时间短暂。

关键词: 微型燃气轮机; PSCAD/EMTDC; 仿真模型

中图分类号: TM611

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)04-0034-05

近年来, 以风力发电、光伏电池和微型燃气轮机等为代表的分布式发电(DG)技术的发展已成为人们关注的热点。其中, 微型燃气轮机发电系统是一种技术上最为成熟、商业应用前景最为广阔的分布式发电技术, 其相关研究问题已被列为国家“863”专项研究计划。微型燃气轮机一般是指功率在几百千瓦以内的小型热动装置, 与常规发电机组相比, 微型燃气轮机具有寿命长、可靠性高、燃料适应性好、环境污染小和便于灵活控制等优点, 它是分布式发电的最佳方式, 可以靠近用户, 无论对中心城市还是远郊农村甚至边远地区均能适用。本文建立了微型燃气轮机的数学模型, 把微型燃气轮机及电气部分当作一个整体, 利用 PSCAD/EMTDC 分析了微型燃气轮机发电系统在联网与孤岛运行模式下的动态特性。

1 微型燃气轮机发电系统结构

微型燃气轮机采用空气轴承或径流式叶轮机械, 机组尺寸小、结构简单, 能够产生大量品质极佳余热烟气, 其温度在 600℃左右, 利用价值较高, 是目前分布式能源系统特别是小型冷热电联产系统的主要动力设备。微型燃气轮机产品主要包括 2 种结构, 一种为分轴(split-shaft)结构, 另一种为单轴(single-shaft)结构。分轴结构微型燃气轮机动力涡轮与燃气涡轮采用不同转轴, 通过变速齿轮与发电机相连, 由于降低了发电机转速, 可以直接并网运行; 单轴结构微型燃气轮机中燃气涡轮与发电机同轴, 因此发电机转速较高, 需要采用电力电子器件进行整流逆变, 才能接入大电网^[1]。

单轴结构微型燃气轮机发电系统具有系统效率高, 结构紧凑, 可靠性高的特点, 是微型燃气轮机的主流产品, 本文主要研究单轴微型燃气轮机模型及运行特性。典型的单轴结构微型燃气轮机发电系统如图 1 所示。

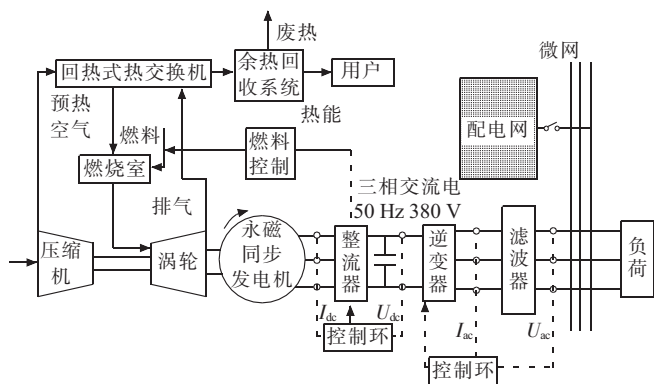


图 1 微型燃气轮机发电系统结构

系统由微型燃气轮机、永磁同步发电机、整流器、逆变器和负荷组成, 其中微型燃气轮机透平包括压缩机、燃料室、能量回收器以及带一个负荷的动力透平机。其基本的工作原理: 从离心式压气机出来的高压空气首先在回热器内经涡轮排气预热, 然后进入燃烧室与燃料混合并得到充分燃烧, 高温燃气输入向心式涡轮做功, 直接带动燃气轮机驱动内置式高速发电机, 通常燃气涡轮旋转速度可高达 30 000~100 000 r/min, 需要采用高能永磁材料(如钕铁硼材料或钕钴材料)的永磁同步发电机, 其产生的高频交流电流经过整流逆变后, 转化为工频交流电能输送至负荷或交流电网^[2]。

2 微型燃气轮机建模分析

(1) 转子方程:

$$\frac{\pi}{30} J \frac{dn}{dt} = M_T - M_c - M_f - M_g \quad (1)$$

式(1)中: n 为转速; M_T , M_c , M_f 和 M_g 分别为透平转矩、压气机转矩、轴系摩擦转矩和发电机转矩; J 为整个轴系的转动惯量^[3]。

(2) 燃烧室和透平之间的热部件不稳定传热方程:

$$\alpha A l \left(\frac{T_B + T_3}{2} - T_p \right) = G_T c_{pg} (T_B - T_3) \quad (2)$$

$$\alpha A l \left(\frac{T_B + T_3}{2} - T_p \right) = A l d p c \frac{dT_p}{dt} \quad (3)$$

式(2,3)中: T_B, T_3, T_p 分别为燃烧室出口温度、透平入口温度和管道金属壁平均温度; α 为沿气流流程换热系数; A 为单位长度上的换热面积; l 是全部气道流程长度; d 为在过渡过程中起作用的热部件金属表面厚度; ρ 是热部件金属的密度; c 为金属比热^[4-6]。

(3) 由于管道容积的存在,使在过渡过程引起了容积中所容纳气体量的改变,从而造成进、出口流量之间的差异。压气机和燃烧室(回热器)之间的容积方程:

$$V \frac{d\rho_2}{dt} = G_c - G_B \quad (4)$$

式(4)中: V 为是压气机与燃烧室间的管道容积; ρ_2 为管道中空气密度; G_c 和 G_B 分别为压气机出口与燃烧室入口空气流量^[7]。

(4) 燃气轮机系统中的回热器是一个很大的蓄热元件,对整个燃气轮机的动态性能有显著的影响。把回热器作为一个集中容积处理,将再按分布参数研究所得到的结果对其中参数进行适当的修正。对燃气、空气和金属壁面有以下3个方程:

$$G_c c_{pa} (T_2' - T_2) = \alpha_a A_a (T_m - \frac{T_2' + T_2}{2}) \quad (5)$$

$$G_T c_{pg} (T_4 - T_4') = \alpha_g A_g (\frac{T_4' + T_4}{2} - T_m) \quad (6)$$

$$P_m c_m \frac{dT_m}{dt} = \alpha_g A_g (\frac{T_4' + T_4}{2} - T_m) - \alpha_a A_a (T_m - \frac{T_2' + T_2}{2}) \quad (7)$$

式(5—7)中: T_2, T_2' 分别为压气机出口和回热器空气出口温度; T_4, T_4', T_m 分别为透平出口、回热器燃气出口温度和金属壁面的平均温度; c_{pa}, c_{pg}, c_m 分别为空气、燃气和金属壁面的比热; α_a, α_g 分别为空气、燃气与金属壁面的换热系数; A_a, A_g 分别为空气侧和燃气侧的换热面积; G_c, G_T 分别为空气和燃气流量; P_m 为参与换热的金属质量^[8]。

微燃机系统转速控制对控制品质有很大影响,其方程是动态数学模型的一个关键部分。本文考虑调节系统的调速器方程和执行机构方程,采用比例—积分(PI)控制规律,传递方程:

$$X_B = -X_n (\delta + \frac{T_s}{S}) \quad (8)$$

式(8)中: X_B, X_n 分别为对燃料流量和转速的相对增量的拉氏变换; δ 为调节机构的放大倍数; T_s 为调速器积分时间常数。

3 逆变器模型及控制策略

逆变器的作用是接受整流器输出的直流,并将其逆变成工频交流供给负荷。通常根据微网不同的运行方式,对各个微电源采用不同的控制,其中控制形式有

2种:控制原动机部分和控制逆变器部分。由于大部分微电源都采用逆变器作为接口,为了保证控制的统一和简单,本文采用控制逆变器的方式对微电源进行控制。当微网并网运行时,为减少对大电网的冲击,逆变器采用PQ控制,按照指定功率输出来控制其与电网的功率交换,由大电网提供电压和频率的支撑;孤岛运行时,通过控制逆变器来控制负荷端的电压及频率(简称V/f控制),以维持整个微网的电压和频率。另外,通常逆变器输出的工频电流含有谐波,所以要在逆变器输出端加装LC滤波器,滤除开关频率及其邻近频带的高次谐波,使谐波畸变率小于5%。具体的逆变器模型如图2所示,微网供应本地负荷,通过开关BRK接入配电网并网运行;当大电网发生故障时,开关BRK断开,进入孤岛运行,保证负荷电能质量的要求。

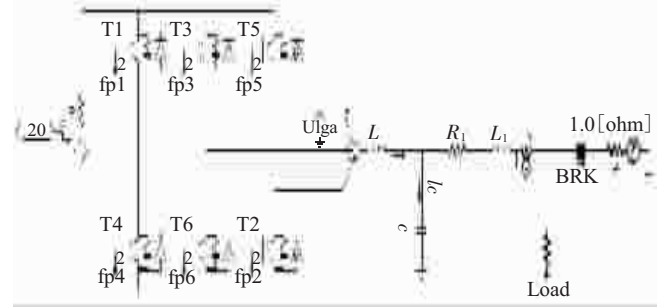


图2 三相PWM逆变器主电路拓扑

3.1 PQ控制

由图2可知,微型燃气轮机发电系统输出功率:

$$\bar{S} = P_{mt} + jQ_{mt} = ui^* \quad (9)$$

式(9)中: P_{mt} 为微型燃气轮机发电系统输出的有功功率; Q_{mt} 为其输出的无功功率; u 为负荷侧电压; i 为负荷侧电流。

通过选择合理的同步旋转轴在派克变换下将逆变器输出电压电流 abc 分量转化为 dq 分量,可得:

$$\bar{S} = P_{mt} + jQ_{mt} = ui^* = (u_d + ju_q)(i_d - ji_q) = (u_d i_d + u_q i_q) + j(u_q i_d - u_d i_q) \quad (10)$$

由此可得电流内环 dq 轴参考值为:

$$\begin{cases} i_{dref} = \frac{P_{mt}}{u_d} \\ i_{qref} = -\frac{Q_{mt}}{u_d} \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可得PQ控制模型,如图3所示。根据有功和无功功率参考值 P_{ntref}, Q_{ntref} 及交流母线电压 u_{abc} ,采用锁相环PLL,进行派克变换,利用上式可得 dq 轴电流参考值,功率控制转变为电流控制。

3.2 V/f控制

当微网孤岛运行时,需通过控制逆变器来控制微型燃气轮机发电系统负荷侧的电压及频率(简称V/f

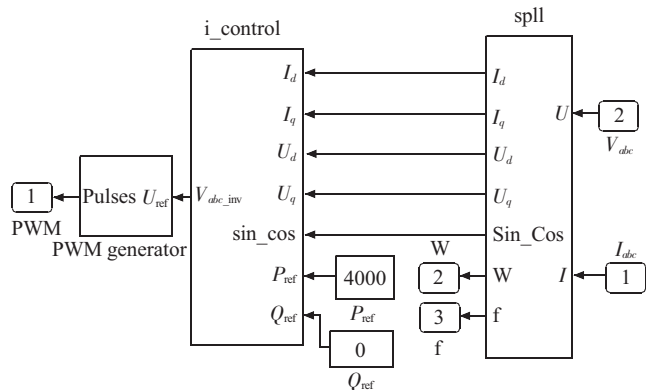
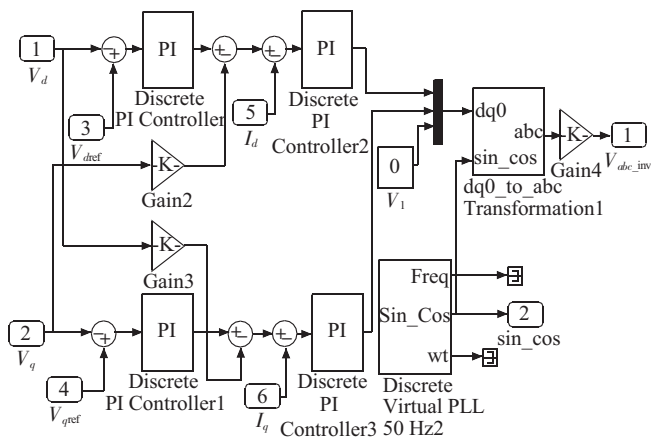


图3 PQ控制模型

控制),从而维持整个微网的电压和频率;微型燃气轮机发电系统的有功和无功功率输出根据负荷需要进行自动调节。本文采用电压电流双环控制的PWM逆变器,把逆变器出口的电压及频率控制为给定值,电压幅值设为310 V,频率为50 Hz,可得到电压参考值 u_{dref} , u_{qref} ,对其进行派克变换,可得到 dq 轴上电压参考值 u_{dref} , u_{qref} 。通过采集滤波器输出端口电压信号,可以计算出逆变器电压 dq 轴分量 u_d , u_q ,与 dq 轴电压参考值进行比较后通过PI控制使得输出波形跟踪给定值,其输出作为电流内环的给定;内环是瞬时负荷电流值的反馈,采用PI控制,该环节增加了逆变器的阻尼系数,使整个系统更加稳定。 V/f 控制框图如图4所示。

图4 V/f 控制模块内部结构图

4 微型燃气轮机的动态特性仿真分析

4.1 联网运行模式下功率参考值变化

微型燃气轮机的额定容量设定为15 kW,额定电压为310 V,负荷大小为20 kW。仿真时间80 s,仿真步长0.000 05 s。微型燃气轮机在联网模式下采用 P/Q 控制,给定有功和无功功率的参考值,燃气轮机将按照给定的参考值进行出力。0~20 s微型燃气轮机的有功参考值给定为15 kW,剩余的5 kW负荷由大电网供应;20~40 s有功参考值改变为13 kW,剩余的7 kW负荷

由大电网供应;40~60 s有功参考值降至9 kW,大电网向负荷提供11 kW的有功电能;60~80 s有功参考值变为13 kW即20~40 s的运行状态^[9]。微型燃气轮机有功和无功功率如图5所示。逆变器输出的电压和电流波形如图6所示。

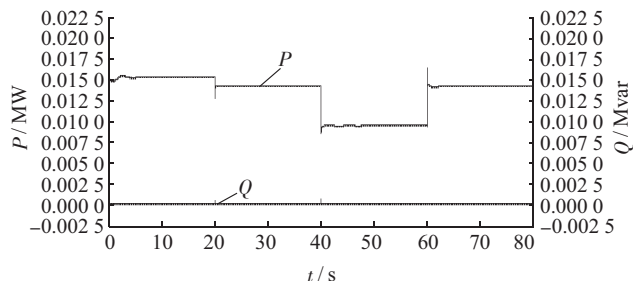


图5 微型燃气轮机有功和无功功率

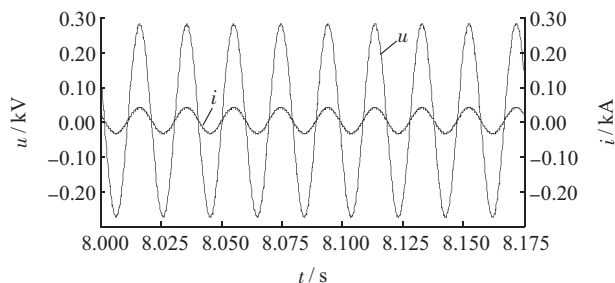


图6 整流器交流侧电压和电流

从图5有功和无功功率的响应曲线可以看出,微型燃气轮机并网逆变系统能够快速有效地跟踪外界给定的功率指令值,并且当功率指令参考值改变时,电压源逆变器的控制系统能够及时跟踪参考指令的变化,迅速地调整逆变器的输出功率。并且暂态响应的时间很短,且响应过程相当的平稳。从图6可看出,由于此时无功参考值设置为0,因此整流器交流侧输入的电压和电流波形相位一致,保持了整功率因数运行,在后续的仿真中,微型燃气轮机的无功参考值将不为0,届时整流器交流侧输入的电压和电流波形相位不再一致,由于电网带有感性负荷,因此电流相位将超前电压相位。整流器交流侧输入电压和电流波形为三相正弦波形,能满足整流器的运行要求。经过整流升压电路输出的直流电压如图7所示。 U_{dc} 基本保持了平稳运行,只有在有功参考值转换瞬间有微小的波动,且升压电路将输入的交流电压幅值升高。微型燃气轮机原动机的机械特性如图8所示。从图8可看出,微型燃气轮机的机械转矩 T_m 能够很好地跟随电磁转矩 T_e 的变化,且振荡过程持续时间短,波动幅度小,能很快地进入稳态运行,较好地实现了恒功率控制的目标。原动机的转速曲线如图9所示。在微型燃气轮机调速差的控制下,转速 ω 能很好地维持在额定转速的附近,当微型燃气轮机的有功出力为额定容量15 kW时,转速 ω 基本保持在1.0 p.u.,当有功出力降低至13 kW时,转速 ω 经小

幅振荡稳定在 1.002 5 p.u.处,当有功出力降低至 9 kW 时,转速 ω 再次上升,小幅振荡后稳定在 1.015 7 p.u.处,当有功出力恢复到 13 kW 时,转速 ω 也恢复到 20~40 s 的状态。原动机需要的燃料量曲线如图 10 所示,燃料量基本跟随负荷变化,当微型燃气轮机的有功出力为额定容量 15 kW 时,燃料需求量 W_f 基本保持在 1.0 p.u.,当微型燃气轮机的有功出力下降时,燃料需求量也随之下降,有功出力上升时,燃料需求量也随之上升,动态响应时间短暂且波动平滑。原动机的排气温度,如图 11 所示。

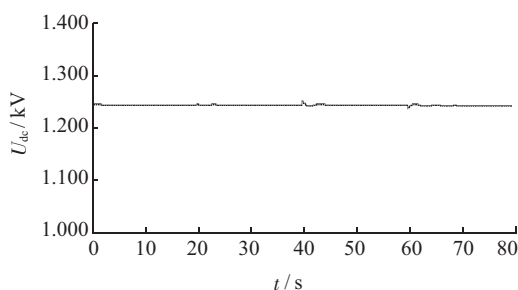


图 7 整流器直流侧电压

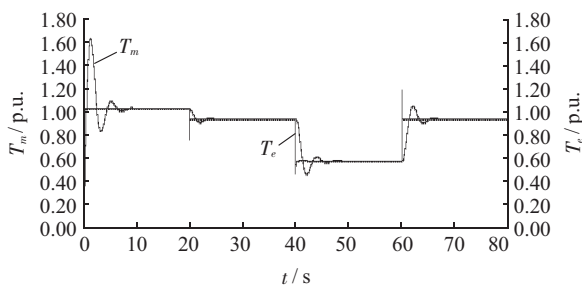


图 8 微型燃气轮机机械转矩与电磁转矩

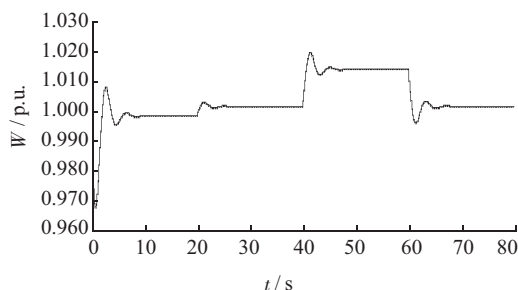


图 9 微型燃气轮机转速

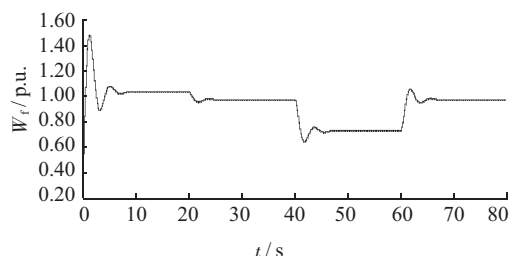


图 10 微型燃气轮机燃料需求量

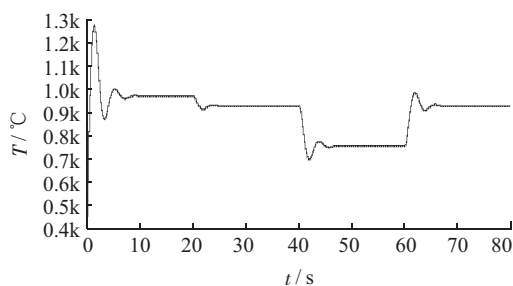


图 11 微型燃气轮机排气温度

的额定容量设定为 15 kW,额定电压为 310 V,负荷大小为 10 kW。仿真时间取 60 s,仿真步长 0.000 05 s。微型燃气轮机在孤岛模式下采用 V/f 控制,燃气轮机将根据负荷变化改变出力。0~20 s 微型燃气轮机的负荷为 10 kW;20~40 s 负荷增至 15 kW;40~60 s 负荷降为 13 kW^[10]。

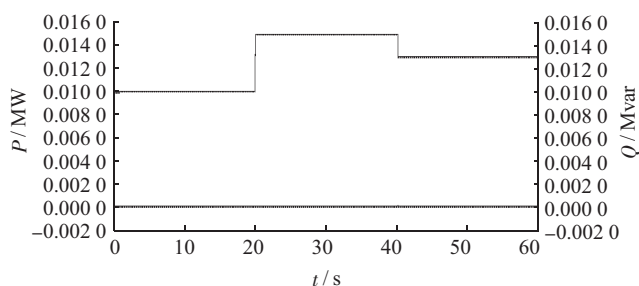


图 12 微型燃气轮机有功和无功功率

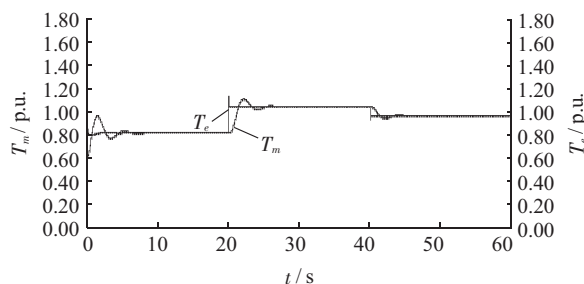


图 13 微型燃气轮机机械转矩和电磁转矩

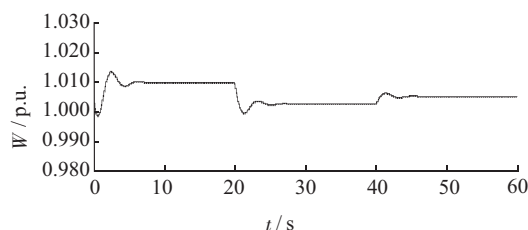


图 14 微型燃气轮机转速

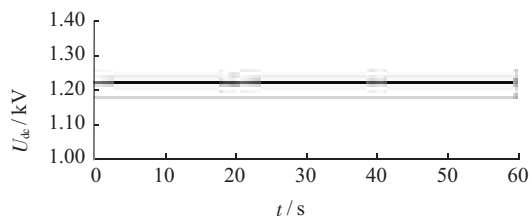


图 15 微型燃气轮机整流器输出直流电压

4.2 孤岛运行模式下负荷改变

对孤岛模式下微型燃气轮机在负荷改变时的动态特性进行仿真和分析如图 12—15 所示。微型燃气轮机

由图 12 可知, V/f 控制下的微型燃气轮机发出功率能够准确迅速地追踪负荷变化,在负荷需求变化时,

由于控制系统的良好性能,功率变化暂态过程迅速且稳定。图 13 显示微型燃气轮机产生的机械转矩能精确跟踪且与永磁同步发电机产生的电磁转矩平衡。从图 14 可以发现微型燃气轮机的转速在任何情况下都能做到仅与参考转速产生微小偏差,在微型燃气轮机输出功率为额定值时,转速为 1.0 p.u.。图 15 显示了整流器直流侧输出电压基本维持稳定在 1.24 kV,仅在负荷变化时有微小波动。

5 结束语

本文所建立的微型燃气轮机发电系统仿真模型,不仅可如实反映微型燃气轮机自身的动态特性,而且将微型燃气轮机、电力电子装置以及负荷之间的相互联系动态地表现了出来,这是等效处理或者分开建模难以实现的。本文所建立的逆变器模型,附加合理的控制后同样适用于其他采用逆变器作为接口的分布式电源,如太阳能光伏发电、燃料电池等,为进一步研究微电网中各种分布式电源之间的协调控制奠定了基础。

参考文献:

- [1] 崔恒志,黄奇峰,杨世海,等.冷热电联供型微电网容量规划优化研究[J].江苏电机工程,2013,32(3):39-42.
- [2] SAHA A K, CHOWDHURY S, CHOWDHURY S P, et al. Modeling and Performance Analysis of a Microturbine as a Distributed Energy Resource[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2009, 24

(2): 529-538.

- [3] 李政,王德慧,薛亚丽,等.微型燃气轮机的建模研究(上)—动态特性分析[J].动力工程,2005,25(1):13-17.
- [4] 安连锁,张健,王震,等.微型燃气轮机启动特性的模拟与分析[J].电力科学与工程,2008,24(2):20-22.
- [5] HAUGWITZ S. Modelling of Microturbine System[D]. Lund: Lund Institute of Technology, 2002.
- [6] 翁一武,翁史烈,苏明.以微型燃气轮机为核心的分布式供能系统[J].中国电力,2003,36(3):1-4.
- [7] TRAVERSO A, CALZOLARI F, MASSARDO A. Transient Analysis of and Control System for Advanced Cycles Based on Micro Gas Turbine Technology[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(2): 340-347.
- [8] 余又红,孙丰瑞,张仁兴.基于 MA TLAB 的面向对象的燃气轮机动态仿真研究[J].燃气轮机技术,2003,16(1):53-56.
- [9] 维斗,徐向东.热动力系统建模与控制的若干问题[M].北京:科学出版社,1996:67-75.
- [10] POOLE G, SALSI A G. A Software Environment for the Modeling Simulation and Control of Industrial Gas Turbine Engines[J]. 1991:358-363.

作者简介:

易桂平(1981),男,江西吉安人,博士研究生,从事电力电子技术应用、微网电能质量方面的研究工作;
胡仁杰(1962),男,江苏苏州人,博士生导师,从事光伏发电、电能质量管理及超级电容器储能方面的研究工作。

Modeling and Simulation of Micro Gas Turbine Generation

YI Guiping, HU Renjie

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The mathematical models of micro gas turbines with different control modes and operation modes are introduced. Simulations for the micro gas turbines with different operation modes are implemented in PSCAD/EMTDC platform. The simulation results show that the dynamic response performance of micro gas turbines are satisfied for the cases of power reference value changing in grid-connected operation mode and load demand changing in island operation mode. The output power of the both cases can track demand changing quickly and the duration of transient process is short.

Key words: micro gas turbine; PSCAD/EMTDC; simulation model

下 期 要 目

- 大型地区电网调度控制系统海量历史数据处理技术
- 基于源网协同的风电并网系统双层优化调度
- 基于 D-S 证据理论的母线负荷预测
- 基于改进 PSO 算法的含风电场电力系统网架扩展规划研究
- 小电阻接地系统零序电流 II 段保护整定策略研究
- 高硫煤对燃煤机组的影响分析
- 500/220 kV 电磁环网解合环方式评价方法研究
- 太阳能光伏电池建模与动态特性仿真

引入虚拟电抗的独立运行微电网改进下垂控制

黄春燕

(南通供电公司,江苏 南通 226000)

摘要:下垂控制是微电网常用控制方法之一。文中分析了线路功率传输特性,表明在传输线路呈阻性的低压微电网中,采用 P - f 和 Q - V 下垂控制会造成功率控制耦合;通过改变控制器参数使得逆变器等效输出阻抗呈感性的方法效果不佳。文中引入“虚拟阻抗”的思想,在逆变器的输出端模拟出一个大小可控的虚拟电抗,保证线路呈感性,并对 Q - V 控制曲线进行修正,以保证电压稳态精度。将改进下垂控制与传统下垂控制在 PSCAD/EMTDC 中进行仿真对比。结果表明,改进下垂控制的无功分配效果更好。

关键词:微电网;微电源;逆变器;下垂控制;虚拟电抗

中图分类号: TM72

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)04-0039-05

微电网是解决分布式电源(DG)并网的有效途径^[1]。根据不同种类微电源的输出特性,微电源的控制方法有下垂控制、 PQ 控制和 Vf 控制^[2]。下垂控制模拟传统发电机的下垂特性来实现并联控制,利用 P - f 和 Q - V 下垂特性实现对有功和无功的解耦控制^[3]。但 P - f 和 Q - V 下垂控制适用的一个前提条件是线路的电抗 X 远大于其电阻 R ,而在低压微电网中线路电阻值通常大于线路电抗值,功率传输 P - f 和 Q - V 的对应关系不再存在,逆变型微电源并联运行采用下垂控制将无法实现功率的正确分配。

为避免功率控制耦合现象,有些学者提出虚拟同步旋转轴的解耦控制策略^[4]。文献[5]提出虚拟有功无功传输控制的方法,利用正交矩阵变换将实际的 PQ 值转换为虚拟 PQ 值。文献[6]提出可以在逆变电源输出端和负载之间串联一个大的电感或者安装隔离变压器,以保证逆变电源到负荷之间的阻抗为感性,这样 P - f 和 Q - V 下垂控制的前提条件就能够满足了,但是电感的投入增加了系统的体积和成本,当输出电流中含有高次谐波成分时,电感上将产生很大的谐波压降,从而使输出电压失真严重。文献[7]通过设计控制器参数使输出阻抗呈感性,但是阻抗大小不能确定。

1 DG 并网逆变器结构及控制原理

1.1 DG 并网逆变器结构

微电网由 DG、储能装置、负荷、传输线路和控制系统等元件和模块组成。绝大多数 DG 通过逆变或者整流/逆变的电力电子变换器接入微电网母线。假设 DG 直流侧装设有储能装置,因此可将 DG 并网逆变器侧电压视为一个恒定值,则 DG 并网逆变器结构如图 1 所示。

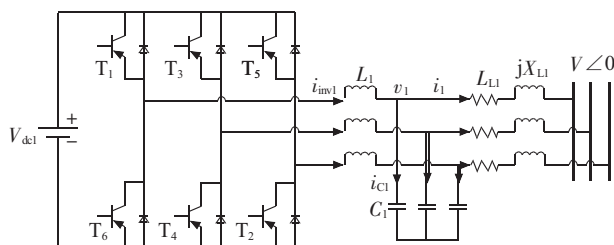


图 1 DG 并网逆变器结构

图 1 中, V_{dc1} 为 DG 直流侧电压; i_{inv1} 为并网逆变器交流侧输出电流; L_1 为滤波电感; v_1 为滤波电容电压,也是 DG 输出电压(忽略滤波电阻); i_{c1} 为滤波电容电流; C_1 为滤波电容; i_1 为 DG 输出电流; R_{L1} 为 DG 并网传输线电阻; X_{L1} 为 DG 并网传输线电抗; V 为微电网交流母线电压。

1.2 并网逆变器控制原理

逆变器控制方法由最初的无环控制^[8],改进成单环控制^[9],现在常采用电压电流双环控制^[10,11]。选择滤波电容电流作为控制变量构建电流内环,选取滤波电容电压作为控制变量构建电压外环。电压外环能够保证 DG 输出电压的稳定,同时给电流内环提供电流参考值;电流内环按照电压外环输出的电流参考值进行电流控制,对非线性负载扰动的适应能力增强,输出电压的谐波含量小。电流内环采用比例(P)控制,电压外环采用比例—积分(PI)控制,简化的双环控制系统结构如图 2 所示。

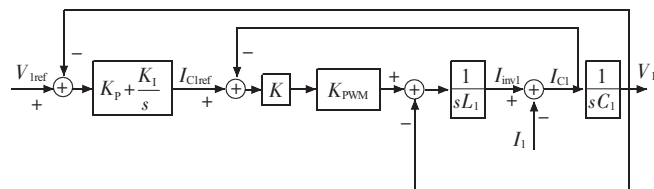


图 2 简化的双环控制系统结构

图 2 中, K_p , K_i 是外环比例积分系数, K 是内环比例系数, K_{PWM} 是逆变器放大系数。以 V_{ref} 为输入, V_1 为输

出,可以得到电压环传递函数:

$$V_1 = \frac{KK_p K_{PWM} s + KK_I K_{PWM}}{L_1 C_1 s^3 + KK_{PWM} C_1 s^2 + (KK_p K_{PWM} + 1)s + KK_I K_{PWM}} V_{1ref} - \frac{L_1 s^2}{L_1 C_1 s^3 + KK_{PWM} C_1 s^2 + (KK_p K_{PWM} + 1)s + KK_I K_{PWM}} \quad (1)$$

该传递函数的前半部分体现了控制系统的稳定性,后半部分体现了负载电流所产生的扰动的影响,可简化为:

$$V_1 = G(s) V_{1ref} - Z_{inv}(s) I_1 \quad (2)$$

式(2)中: $G(s)$ 为电压比例增益传递函数,理想情况下 $G(s)=1$; $Z_{inv}(s)$ 为逆变器等效输出阻抗。

由式(1)可知, $Z_{inv}(s)$ 不仅与滤波器参数有关,还与控制器参数有关,当滤波器参数确定时,可以通过设计合适的控制器参数,使 $Z_{inv}(s)$ 呈感性或阻性。由图2可得电压环的开环传递函数:

$$G_o(s) = \frac{KK_p K_{PWM} s + KK_I K_{PWM}}{L_1 C_1 s^3 + KK_{PWM} C_1 s^2 + s} \quad (3)$$

2 基于控制器参数设计的下垂控制

2.1 下垂控制原理

以2个电源并联运行为例分析下垂控制原理,如图3所示。

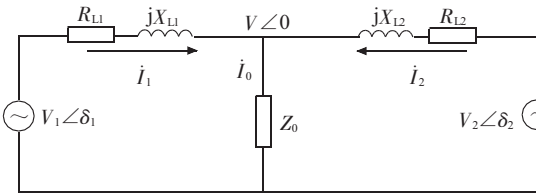


图3 功率传输示意图

图3中,设 $V_k \angle \delta_k$ 为第 k 个电源的输出电压, $k=1,2,\dots$; R_{Lk} 和 X_{Lk} 分别为第 k 个电源的并网传输线电阻和电抗; $V \angle 0$ 为负荷端交流母线电压,也是负载 Z_0 上的电压; i_k 为第 k 个电源的输出电流, i_0 为负载电流。第 k 个电源输出的有功功率和无功功率分别为:

$$P_k = \frac{V_k [R_{Lk} (V_k - V \cos \delta_k) + V X_{Lk} \sin \delta_k]}{R_{Lk}^2 + X_{Lk}^2} \quad (4)$$

$$Q_k = \frac{V_k [X_{Lk} (V_k - V \cos \delta_k) - V R_{Lk} \sin \delta_k]}{R_{Lk}^2 + X_{Lk}^2} \quad (5)$$

在高压输电系统中,传输线路电抗远大于电阻,即 $X_{Lk} \gg R_{Lk}$,可以将 R_{Lk} 忽略,并且功率角 δ_k 很小,可近似得到 $\sin \delta_k \approx \delta_k$, $\cos \delta_k \approx 1$,则式(4)和式(5)化简为:

$$P_k = \frac{V_k V}{X_{Lk}} \delta_k \quad (6)$$

$$Q_k = \frac{V_k (V_k - V)}{X_{Lk}} \quad (7)$$

在低压配电系统中,传输线路电阻通常大于电抗,即 $R_{Lk} > X_{Lk}$;考虑到功率角 δ_k 通常很小,则式(4)和式(5)化简为:

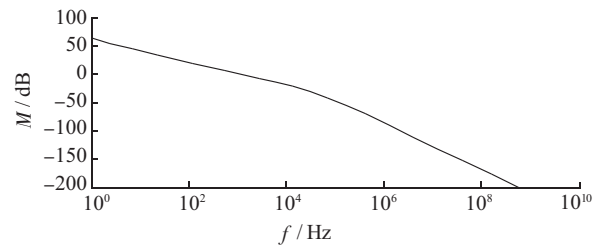
$$P_k = \frac{V_k (V_k - V)}{R_{Lk}} \quad (8)$$

$$Q_k = -\frac{V_k V}{R_{Lk}} \delta_k \quad (9)$$

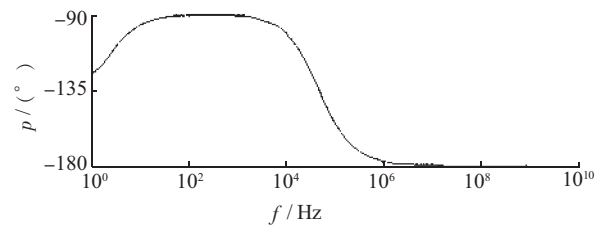
由此可见,低压、高压系统的功率传输表达式有所不同,从而下垂控制的表达式也有所不同。当线路传输线阻抗中电抗远大于电阻时,采用有功-频率($P-f$)和无功-电压($Q-V$)的解耦控制方式;反之采用有功-电压($P-V$)和无功-频率($Q-f$)的解耦控制方式。根据线路的阻抗特性,选择正确的下垂控制方式才能实现有功无功的解耦控制。

2.2 下垂控制的不足

微电网属于低压配电网范畴,传输线路呈阻性,根据上文的分析,宜采用 $P-f$ 和 $Q-V$ 的反调差下垂控制方式,但是现有的逆变电源下垂控制方法大多采用 $P-f$ 和 $Q-V$ 的传统下垂控制方式。设置控制器的参数,使其既能保证控制系统的稳定性,又能保证控制系统具有一定的稳态和动态性能指标,同时还能保证在工频附近逆变器等效输出阻抗 $Z_{inv}(s)$ 呈感性,并且该值与线路实际阻抗之和也呈感性。取滤波器参数 $L=0.8$ mH, $C=1600$ μ F,为了得到合适的控制器参数,采用经验法^[12]和频域响应曲线相结合,得到控制器参数 $K=0.6$, $K_p=10$, $K_I=100$ 时, $Z_{inv}(s)$ 呈感性,此时 $Z_{inv}(s)$ 的频域响应曲线如图4所示。可以看出,逆变器等效输出阻抗 $Z_{inv}(s)$ 在50 Hz附近呈感性,在高频段呈阻性。



(a) $Z_{inv}(s)$ 的幅值曲线



(b) $Z_{inv}(s)$ 的相角曲线

图4 $Z_{inv}(s)$ 的频域响应曲线

此时,电压环的开环传递函数 $G_o(s)$ 的波特图如图 5 所示。从图 5 可知系统稳定,具有一定的幅值裕度和相位裕度。

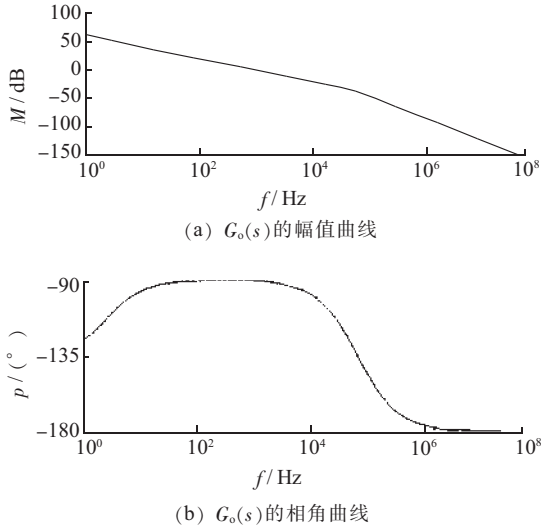


图 5 $G_o(s)$ 的波特图

以上分析表明,整定的 K, K_P, K_I 既能够满足系统控制性能的要求,也能保证逆变器等效输出阻抗 $Z_{inv}(s)$ 呈感性。接下来分析 $Z_{inv}(s)$ 的数值大小,将 L, C, K, K_P, K_I 值代入 $Z_{inv}(s)$ 计算公式,令 $s=j314$,求得频率为 50 Hz 时逆变器等效输出阻抗:

$$\begin{cases} |Z_{inv}| = 1.046 \times 10^{-4} \Omega \\ X_{inv} = 1.0459 \times 10^{-4} \Omega \\ \theta = 88.946^\circ \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可见,此时逆变器的等效输出电抗值非常小,不足以使线路具有高压输电线路的特性。保持 L 和 C 值不变,在 $K \in [0.001, 10], K_P \in [0.001, 1000], K_I \in [0.001, 3000]$ 的范围内寻找 X_{inv} 的最大值为:当 $K=0.001, K_P=0.001, K_I=159$ 时, $X_{inv}^*=0.2873$ 。但是,此时 K 值很小,控制系统的快速性很差,如果外界发生一个小扰动,则系统达到稳定状态所耗费的时间很长。其次,如果逆变电源与负载之间的实际低压线路长度较长,则该 X_{inv}^* 值就不足以使可控电源与负载之间的等效线路阻抗具有高压线路的感性性质。

以上分析表明,控制器参数设计法不能同时满足系统性能和逆变器等效输出阻抗值的要求,所以本文引入虚拟电抗的思想对下垂控制加以改进。

3 引入虚拟电抗的改进下垂控制

为了使逆变电源与负载之间的输出阻抗呈感性,又不在逆变器的输出端真正接入一个电感,可以采用“虚拟电抗”的概念,在逆变器的输出端模拟出一个远大于逆变器到负载之间电阻的虚拟电抗^[13]。通过在逆

变电源电压电流双环控制的电压指令值中减去虚拟电抗上的压降来实现模拟出一恒定的电抗,记虚拟电抗为 X_{vir} ,得到新的电压参考值:

$$u_{k,vir}^* = u_k^* - L_{k,vir} \frac{di_k}{dt} \quad (11)$$

式(11)中: u_k^* 为第 k 个 DG 的电压环电压参考值; $L_{k,vir}$ 为第 k 个 DG 至负载之间的虚拟电感,虚拟电抗 $X_{k,vir} = \omega L_{k,vir}$; i_k 为第 k 个 DG 的输出电流; $u_{k,vir}^*$ 为计及虚拟电抗的电压参考值。引入虚拟电抗后的闭环系统控制框图如图 6 所示。

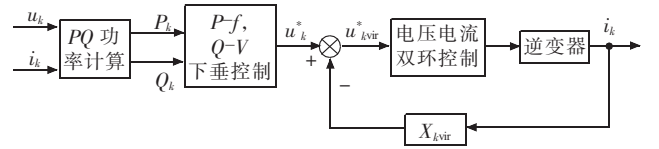


图 6 引入虚拟电抗后的闭环系统控制框图

此时逆变器电压环传递函数:

$$u_k = G(s) u_{k,vir}^* - Z_{k,inv}(s) i_k = G(s) (u_k^* - s L_{k,vir} i_k) - Z_{k,inv}(s) i_k = G(s) u_k^* - (s L_{k,vir} + Z_{k,inv}(s)) i_k = G(s) u_k^* - Z'_{k,inv}(s) i_k \quad (12)$$

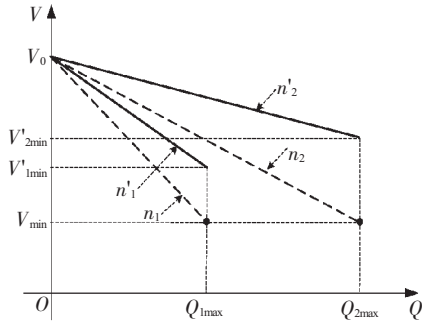
由式(12)可以看出,等效输出阻抗 $Z'_{k,inv}(s) = s L_{k,vir} + Z_{k,inv}(s)$,当 $L_{k,vir}$ 取远大于逆变器到负载电阻值时,就可确保线路阻抗呈感性,而且电流电压环参数的设计确保了 $Z_{k,inv}(s)$ 对于基频呈感性,进一步增大了等效电抗。采用虚拟电抗法将逆变电源与负载之间的电抗值加以改变,可以保证线路阻抗主要呈感性,满足了下垂控制的前提条件,但是也牺牲了系统输出电压的稳态精度,输出电压值较未采用虚拟电抗法时有所下降。因此,可对下垂特性曲线进行改进,将虚拟电抗上的压降纳入考虑范围,以提高输出电压稳态精度^[13]。因虚拟电抗上不消耗有功功率,只消耗无功功率,所以只需修正 $Q-V$ 下垂特性曲线。定义逆变电源输出电压和负载电压之差 ΔV_k 与逆变电源发出的无功功率 Q_k 之比为 K_k 。引入虚拟电抗后,线路呈感性,按式(7)可得:

$$K_k = \frac{\Delta V_k}{Q_k} = \frac{X_{k,vir}}{V_k} \quad (13)$$

由于需控制 V_k 在一定范围内变化,一般为额定值的 $\pm 5\%$,且 $X_{k,vir}$ 为设定的电抗值,所以 K_k 可近似视为一恒定值。2 个逆变电源修正前 $Q-V$ 下垂系数分别为 n_1 和 n_2 ,最大无功功率输出为 Q_{1max} 和 Q_{2max} ,允许电压最小值为 V_{min} 。如图 7 所示。

当 2 个逆变电源均发出最大无功功率时, $X_{k,vir}$ 上的压降为 $K_k Q_{kmax}$,从而将 $Q-V$ 下垂特性曲线的电压最小值修正为:

$$V'_{kmin} = V_{min} + K_k Q_{kmax} \quad (14)$$

图7 修正前后的 Q - V 下垂特性曲线

由此可得修正下垂特性曲线的 Q - V 下垂系数为:

$$n'_k = \frac{V_0 - V'_{kmin}}{Q_{kmin}} \quad (15)$$

此时下垂特性曲线的表达式:

$$V_k = V_0 - n'_k Q \quad (16)$$

将修正后的下垂特性曲线用在图6中,有利于提高电压稳态精度。

综上所述,引入虚拟电抗后,可以保证逆变电源到负载之间的线路阻抗呈感性,从而 P - f 和 Q - V 下垂特性曲线能够正确实现功率分配;采用修正后的下垂控制曲线提高了电压的稳态精度。

4 仿真分析

为了验证基于虚拟电抗的改进下垂控制的有效性,将传统的下垂控制与基于虚拟电抗的改进下垂控制进行仿真对比。采用的微电网仿真系统结构如图8所示。

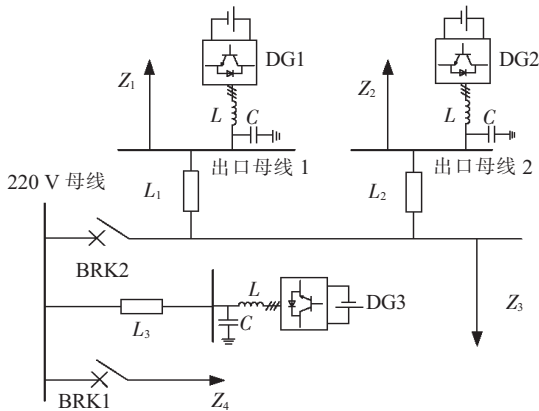


图8 微网仿真系统结构

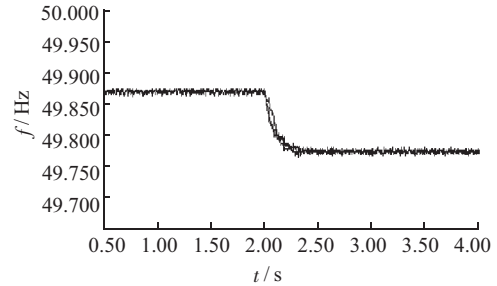
图8中,3个DG并联运行,额定电压 V_{dc} 为800V,容量均为10kW,母线电压等级为220V;线路1,线路2,线路3的长度分别为200m,300m,200m,线路单位阻抗参数为 $r=0.641 \Omega/\text{km}$, $x=0.101 \Omega/\text{km}$ (电抗参数为工频值);负载采用恒阻抗模型,参数设置为 $Z_1=Z_2=(50+j3.14) \Omega$, $Z_3=Z_4=(30+j12.56) \Omega$ 。

设3个DG的 P - f 下垂系数 $m_1:m_2:m_3=4 \times 10^{-5}:6 \times 10^{-5}:12 \times 10^{-5}=2:3:6$, Q - V 下垂系数 $n_1:n_2:n_3=3 \times 10^{-5}:3 \times$

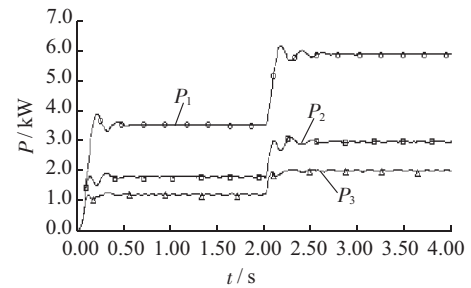
$10^{-5}:3 \times 10^{-5}=1:1:1$,3个DG的控制器参数: $L=0.6 \text{ mH}$, $C=1500 \mu\text{F}$, $RL=0.01 \Omega$, $K=0.6$, $K_i=10$, $K_f=100$ 。

4.1 传统下垂控制仿真

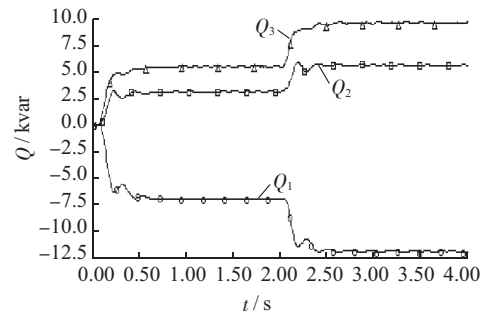
DG1,DG2,DG3均采用传统下垂控制, $t=2 \text{ s}$ 时,开关BRK1闭合,负载 Z_4 投入,仿真结果如图9所示。



(a) 系统频率



(b) 3个DG输出的有功功率



(c) 3个DG输出的无功功率

图9 传统下垂控制仿真结果

仿真启动后微网很快达到稳定。由图9(a)可知, $f_1=f_2=f_3$,即3个DG的频率输出一致,则微网的频率唯一,否则微网一直处于频率不稳定状态。 $t=2 \text{ s}$ 时,负载 Z_4 投入,3个DG增加有功出力,系统频率下降,符合一次调频特性。由图9(b)可知,有功出力始终按照有功下垂系数的反比承担负载有功功率, $P_1:P_2:P_3=6:3:2$ 。 $t=2 \text{ s}$ 时 Z_4 投入,经过一段时间后,微网再次达到稳定,3个DG按比例共同承担新增的负载有功功率,此时仍然有 $P_1:P_2:P_3=6:3:2$ 。由图9(c)可知,在整个仿真过程中,无功出现了严重的不平衡:DG1吸收无功,DG2和DG3发出无功,3者之和为负载所需无功,当 Z_4 投入后,3个DG的无功差别更大。出现上述现象的原因是低压配电网线路呈阻性时,如式(9)所示,逆变电源输出的无功功率不仅与电压幅值有关,而且与相角有关,因而传统下垂控制失效,无功功率得不到正确分配。

4.2 基于虚拟电抗的改进下垂控制仿真

DG1,DG2,DG3 采用基于虚拟电抗的改进下垂控制,取 $L_{1\text{vir}}=L_{2\text{vir}}=L_{3\text{vir}}=4\text{ mH}$, $t=2\text{ s}$ 时负荷 Z_4 投入,仿真结果如图 10 所示。

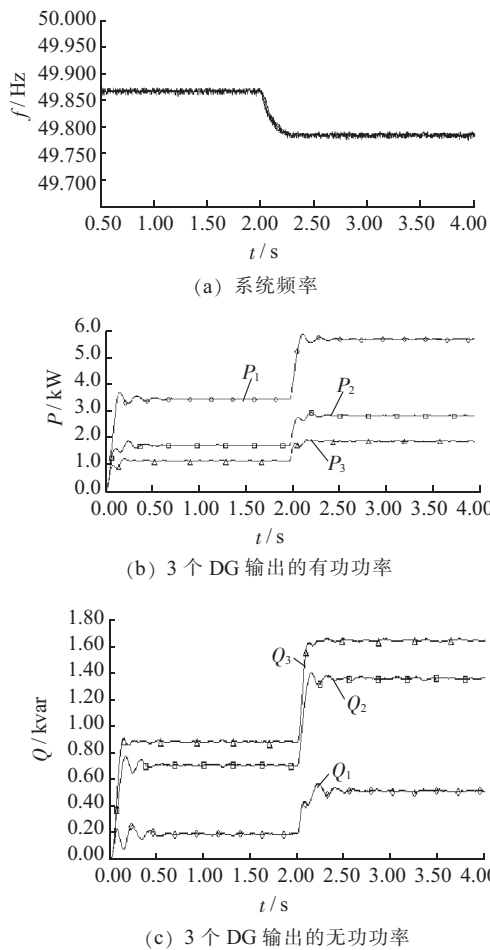


图 10 基于虚拟电抗的改进下垂控制仿真结果

由图 10 可知,3 个 DG 均采用基于虚拟电抗的改进下垂控制之后,微网同样能够稳定运行。图 10(a)表明,3 个 DG 的频率输出一致;图 10(b)表明,3 个 DG 始终按有功下垂系数的反比共同承担负载有功功率。图 10(c)表明,采用基于虚拟电抗的改进下垂控制后,DG1,DG2,DG3 能较好地实现无功负荷的均分,所发出的无功均为正值,避免了部分发出无功,部分吸收无功的情况。值得注意的是,虽然引入了虚拟电抗且 $n_1:n_2:n_3=1:1:1$,但 $Q_1:Q_2:Q_3\neq 1:1:1$,其原因有 2 点:(1) 虽然修正了下垂特性曲线,将虚拟电抗上消耗的无功纳入了考虑范围,但是只是采取了近似计算方法,由下垂特性曲线计算出来的电压参考值精度降低了;(2) 实际线路的长度不一致,当各个逆变电源的输出外特性和线路阻抗不一致时,仅利用 $Q-V$ 下垂控制是无法实现 DG 输出无功严格按无功下垂系数的反比分配的,即使在线路为纯感性的情况下也是如此,这一点有别于 $P-f$ 下垂控制。3 个 DG 输出的电流与采用传统下垂控制时相比,均有所下降,如表 1 所示。

表 1 2 种控制方法电流比较

控制策略	DG1 电流		DG2 电流		DG3 电流	
	$t<2\text{ s}$	$t>2\text{ s}$	$t<2\text{ s}$	$t>2\text{ s}$	$t<2\text{ s}$	$t>2\text{ s}$
	6	10	13	20	8	15
传统下垂控制策略						
本文所提控制策略	3	5	5	9	2	4

由表 1 可知,改进下垂控制使得无功能在 DG 中合理分配,避免了某些 DG 的无功过载,因此大大降低了线路电流。

5 结束语

$P-f$ 和 $Q-V$ 下垂控制能实现功率分配的前提条件是线路呈感性。分析表明,通过设计控制器参数使得微电网中线路呈感性的方法不能同时满足系统性能和逆变器等效输出阻抗值的要求。因此,基于虚拟阻抗的思想,在逆变电源的输出端模拟出一个远大于逆变器到负载之间电阻的虚拟电抗,确保线路呈感性,从而满足了 $P-f$ 和 $Q-V$ 下垂控制的应用条件。仿真表明,该方法可以确保 $P-f$ 和 $Q-V$ 下垂控制在阻性线路环境中有很好的功率分配效果,验证了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等.微电网研究综述[J].电力系统自动化,2007,31(19):25-34.
- [2] 王成山,肖朝霞,王守相.微网综合控制与分析[J].电力系统自动化,2008,32(7):98-103.
- [3] 肖朝霞,王成山,王守相,等.含多微型电源的微网小信号稳定性分析[J].电力系统及其自动化,2009,33(6):81-85.
- [4] 朱永利,姚建国,刘骥.微电网关键技术及研究现状.江苏电机工程[J].2012,31(3):81-84.
- [5] BRABANDERE K D, BOLSENS B, DEN KEYBUS J V, et al. A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107-1115.
- [6] GUERRERO J M, MATAS J, VICUÑA L G, et al. Decentralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters Using Resistive Output Impedance [J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 2007, 54(2): 994-1004.
- [7] 王成山,肖朝霞,王守相.微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J].电工技术学报,2009,24(2):100-107.
- [8] ENGLER A. Applicability of Droops in Low Voltage Grids [J]. International Journal of Distributed Energy Resources, 2005, 01(1):1-6.
- [9] LASSETER R H. Microgrids and Distributed Generation [J]. Journal of Energy Engineering American Society of Civil Engineers, 2007, 133(3):144-149.
- [10] HERNANDEZ-ARAMBURO C A, GREEN T C. Fuel Consumption Minimization of a Microgrid [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(3):673-681.

之间的配电通信骨干网和配电终端节点与变电站之间的配电通信终端接入网。

1.2.1 相关骨干通信网现状

苏州地区包括昆山县区在内的电网,电力专用光缆通信网络已经覆盖到 35 kV 以上的变电站、生产调度大楼、供电营业厅以及其他各类生产办公基地。苏州地区电力光缆通信网分为 2 层结构,汇聚层、接入层。

苏州地区电力通信网已建成汇聚层主网和备网 2 个光传输网络。汇聚层主网采用网状网结构,技术体制为 ASON, 带宽为 2.5 GB, 保护方式为动态重路由保护, 环网采用中兴光传输设备, 节点包括苏州供电公司所辖的市县(区)公司及 500 kV 变电站, 共 13 个节点。汇聚层备网网络为单环结构, 技术体制为 SDH, 带宽为 10 GB, 保护方式为复用段保护; 环网采用中兴 S385 光传输设备, 节点包括苏州供电公司所辖的市县公司以及常熟变(中继站), 共 7 个节点。

昆山区电力通信网接入层网络已建成 2.5 GB 相交双主环+6 个支环的 SDH 环网结构。主环容量为 2.5 GB, 采用中兴 S320,S330,S360,S385 等多种型号光传输设备, 包括昆山供电公司及部分 220 kV 变电站, 共 13 个节点; 支环容量为 622 MB, 采用中兴 S320,S330,S360 等型号光传输设备, 包括昆山区部分 220 kV 变电站, 110 kV 及 35 kV 变电站, 6 个支环共 65 个节点。其中, 与本工程相关的 2 号至 4 号支环包括花桥变、古南变、曹安变、公桥变、集善变、金城变、陆家变、合丰变、玉峰变、秧浦变、震川变、兵希变、邵泾变、鹿城变等 14 个节点。

1.2.2 相关终端接入网现状

苏州地区电网于 2011 年在苏州工业园区环金鸡湖地区开展配电自动化建设，相应建成了该区域的配电通信接入网。苏州工业园区配电通信接入网采用工业以太网技术和 EPON 技术相结合的方案，变电站到开闭所、环网柜划为配电通信主环，采用工业以太网通信方式，对小区变以下终端和其他零散的终端采用 EPON 通信方式。昆山县区尚未开展配电自动化建设，没有建成配电通信终端接入网。

1.3 配电通信相关概念

国际主流研究表明, 智能电网发展大体可分为 4 个阶段, 即高级量测体系 (AMI)、高级配电运行 (ADO)、高级输电运行 (ATO) 和高级资产管理 (AAM)。其中 AMI 是智能电网的第一步, 在 AMI 的基础上实现 ADO, ATO 及 AAM^[1]。智能配电通信网要求覆盖 AMI 中智能电能表和负荷控制管理的业务节点, 覆盖 ADO 中高级配电自动化、网络保护、分布式能源接入的业务节点, 覆盖 AAM 中设备运行状态监测节点^[2]。

1.4 配电自动化系统通信通道需求分析

馈线自动化是实现配电网自动化的核心,也是解决配电网供电可靠性问题的主要环节^[3]。昆山花桥国际商务城配电自动化实施区域内的电缆线路本期需要实现主站集中式馈线自动化功能。主站集中式馈线自动化是主站根据各配电终端检测到的故障报警,结合变电站、开闭所等的继电保护信号、开关跳闸等故障信息,启动故障处理程序,确定故障类型和发生位置,并采用声光、语音、打印事件等报警形式,在自动推出的配网单线图上,通过网络动态拓扑着色的方式明确地表示出故障区段,根据需要,主站可提供事故隔离和恢复供电的一个或两个以上的操作预案,辅助调度员进行遥控操作,达到快速隔离故障和恢复供电的目的。

结合上述自动化功能分析,花桥国际商务城配电自动化工程只需实现 ADO 中的高级配电自动化业务,该类业务仅在终端站点与主站之间交互信息,终端站点之间不需要交互信息,因此仅需组织配电终端站点与自动化主站之间的双向通信通道,其单向通道时延要求小于 500 ms,每个终端站点的通道带宽要求约为 30 kb/s。在安全性方面,根据《电力二次系统安全防护规定》及《电力二次系统安全防护总体方案》的要求,智能配电网中的配电自动化业务属于电力监控系统的范畴,必须使用专用网络的生产控制大区来承载。在可靠性方面,智能配电网应考虑通信通道备用且具有自愈功能,通信设备的可靠性应为工业级。

2 配电自动化通信系统建设方案

2.1 配电自动化通信电路建设技术原则

昆山花桥国际商务城配电自动化工程的通信电路属于配电通信网范畴,其建设应遵循以下原则:

(1) 配电通信网的建设结合配网业务发展和通信技术发展前景,统一规划,分步实施、适度超前,避免重复建设。

(2) 配电通信网按照骨干层、接入层分层建设模型,通信方式的选用应遵循“实用性、可靠性、可扩展性、可管理性”的原则。

(3) 配电通信网骨干层充分利用现有光纤通信网络资源,接入层优先采用光纤通信,其他通信方式作为补充。

(4) 配电通信接入网结构应以配电网网架结构为基础,要考虑到未来电网网架的变动和发展,通信接入网需适度预留一定的通信容量,为通信网络的变更、扩容提供保障。

2.2 骨干通信网建设方案

结合上述现状分析,昆山区通信骨干网采用 SDH 制式的光缆通信方式,光缆通信已覆盖到所有 35

kV 及以上等级的变电站。该网络 110 kV 古南变与昆山供电公司主站之间仍有 155 Mb/s 空余带宽可用。本期利用现有 SDH 光传输网作为配电通信骨干网,并采用 IP over SDH 的技术体制构建配电通信骨干网构架。根据前述通道需求分析,本期工程 10 个配电站点最大带宽需求为 300 kb/s,110 kV 古南变与配电自动化主站之间需占用 SDH 光传输网 300 kb/s 带宽。

2.3 终端接入网建设方案

2.3.1 终端接入网通信方式的确定

目前,适用于配电通信终端接入网的通信方式有:光纤专网—工业以太网技术、光纤专网—EPON 技术、无线宽带专网、无线公网、中压电力线载波等。这几种通信方式的优缺点如表 1 所示。

表 1 终端接入网常用通信方式比较

通信方式	优点	缺点
光纤专网	带宽高,易组网,方便接入; 安全性高,可靠性高, 实时性高;受环境干扰小	建设成本较高, 主要是光缆 建设成本高
无线宽带专网	建设成本适中; 施工简便无需布线; 应用范围广,可用性高	安全性低; 较易受到环境干 扰,可靠性低; 频段及功率受限
无线公网	建设成本低; 施工简便无需布线; 应用范围广,可用性高	安全性、实时性低; 较易受到环境干 扰,可靠性低; 运行成本高
中压电力 线载波	建设成本低; 施工简便,无需布线; 专网运行,安全性高	带宽低; 可靠性、 实时性一般; 组网灵活性差

由表 1 可以看出,光纤专网方式虽然投资较高,但其通道的安全性、可靠性较高,传输时延有保障。本配电自动化工程涉及的 110 kV 古南变 4 号、5 号出线均为电缆线路,长度各 5 km,沿线已经预留了光缆敷设管道,因此,对于本工程来说,若采用光纤专网通信方式,敷设光缆是切实可行的,工程造价适中。考虑到本工程配电自动化终端均按“三遥”功能设计,其他通信方式难以满足其安全性、可靠性以及实时性要求,建议采用光纤专网通信方式。

2.3.2 终端接入网通信方案比选

(1) 光纤专网通信方式有 2 种技术可选,工业以太网和 EPON(基于以太网的无源光网络)。这 2 种通信技术的优缺点如表 2 所示。

根据表 2 的分析结论,结合本期工程配电网一次网架结构简单、易于成环的特点,同时考虑到苏州地区已经先行实施的城市区域配电自动化系统通信电路的运行经验,昆山花桥国际商务城配电通信接入网推荐采用工业以太网技术组建光纤自愈以太环网。其突出优势是环形拓扑结构简单清晰,工业以太网技术成熟,保护倒换时间可以达到毫秒级,此外其强大灵活的交

表 2 工业以太网和 EPON 技术比较

通信技术	优点	缺点
工业以太网技术	环形拓扑,结构简单; 技术成熟,兼容性强; 易于实现 QoS 业务区分及 VLAN 划分	不能抵抗多点 失效故障
EPON 技术	灵活组网,易于部署; 可抵抗多点失效故障; 扩展性强	传输距离受限; 标准不完善,厂商 间兼容性差; 电力系统应用时间 短,运行经验不足

换功能,方便灵活扩展业务,同时也可支持多种其他网络结构。

(2) 根据本期一次网架结构,昆山花桥国际商务城配电通信接入网可以采用链型、单环网、双环网等拓扑结构组网。各拓扑结构的优缺点比较如表 3 所示。

上述 2 个方案投资相差不大,双环网组网方案虽然占用更多的纤芯资源,并需对 2 个骨干节点设备进

表 3 拓扑结构比较

拓扑结构	优点	缺点
链型网	结构简单; 占用光缆资源较少	保护机制缺乏, 可靠性差
单环网	结构简单; 占用光缆资源较少; 可以抵御除接入点之外的任何单点失效故障	接入点失效故障会导致所有配电自动化信息无法上传
双环网	可靠性更高; 可以抵御任何单点失效故障	占用更多光缆资源

行改造,但是配电自动化业务通过不同的网络、不同的接入点接入配电通信骨干网,可靠性更高,故推荐昆山花桥国际商务城配电通信接入网采用双环网结构的接入网方案,如图 2 所示。

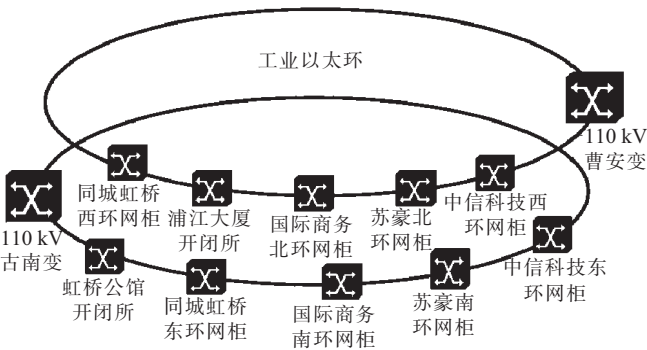


图 2 配电终端接入网拓扑结构

3 结束语

本文以花桥国际商务城配电自动化工程为例,在分析配电自动化系统的通信通道需求的基础上,首先对几种常用通信方式进行分析比选,在通信方式确定后再对通信技术体制进行比选分析,最后进行拓扑结

构设计。最终确定了该工程采用双工业以太环网的配电终端通信接入网方案。本文仅仅为县域配电自动化系统提供了一种通信方案的选择设计思路。然而由于配电网接线型式、配电站点分布密度、供电负荷特性等配电网一次网架多种多样。配电自动化实施方式也不尽相同,有的采用主站集中式,有的采用分布式,有的采用混合式。此外,目前适用于配电网的通信技术也多种多样,并且还有新的通信技术正不断涌现出来,以上诸多因素决定了配电自动化通信电路解决方案的多样性。至于其它的县域配电自动化工程,到底采用哪种通信方案更合理,需要具体问题具体分析,因地制宜地选择最适合自己工程的通信方案,但不能违背经济、实用、安全、可靠、可扩展等基本原则。

参考文献:

- [1] 李卫良,田 伟,王晓丹. 以 AMI 为核心的智能配用电技术体系研究[J]. 江苏电机工程,2011,30(3):1-6.
- [2] 黄 盛. 智能配电网通信业务需求分析及技术方案[J]. 电力系统通信,2010,31(10):10-12.
- [3] 朱 姝,黄 伟,朱维成. 新型配电终端结构与数据传输[J]. 江苏电机工程,2011,30(6):34-37.

作者简介:

秦 健(1970),男,江苏启东人,高级工程师,从事电力工程建设方面的管理及研究工作;

施金阳(1970),男,江苏如东人,高级工程师,从事电力系统通信规划设计工作;

孙 超(1984),男,湖北十堰人,工程师,从事电力系统通信规划设计工作。

Communication Scheme Selection of Distribution Automation System for County Distribution Grid

QIN Jian¹, SHI Jinyang², SUN Chao²

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

2.Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China)

Abstract: With further promoting the implementation of smart distribution grid, distribution automation system is gradually covering the rural distribution grid. Since the distribution automation system is currently implemented only in urban areas, there are no implementation lessons available to draw upon for rural areas. Whether the communication scheme used in urban areas is suitable for rural areas is not clear. In this paper, we take Kunshan Huaqiao International Service Business Park distribution automation project as example to introduce how to select the communication scheme for the rural distribution automation system from the angles of channel demands, determination of communication methods, comparison of communication scheme and etc.

Key words: smart distribution grid; distribution automation; communication scheme; selection

(上接第 43 页)

[11] 陈 波,朱凌志,朱晓东. 并网光伏电站低电压穿越仿真与分析[J]. 江苏电机工程,2012,31(5):13-17.

[12] 薛亚丽,李东海,徐 峰,等. 最优 PI 控制器参数整定及评价[J]. 清华大学学报(自然科学版),2004, 44(8):1067-1070.

[13] LI Y W, KAO C N. An Accurate Power Control Strategy for Power-electronics-interfaced Distributed Generation Units Oper-

ating in a Low-voltage Multibus Microgrid [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(12): 2977-2988.

作者简介:

黄春燕(1988),女,江苏启东人,助理工程师,从事配电专业运行管理工作。

Improved Droop Control Based on Virtual Impedance for Isolated Microgrid

HUANG Chunyan

(Nantong Power Supply Company, Nantong, 226000, China)

Abstract: Droop control is one of the commonly used control methods in microgrids. This paper analyzes the transfer characteristic of line power and reveals that in a low voltage microgrid with big resistance transfer lines, droop control of P - f and Q - V will lead to power coupling. Changing the controller parameters to make the equivalent output impedance of inverter inductive is not an absolutely effective method. Based on the idea of 'virtual impedance', a simulated virtual reactance with controllable value is added into the equivalent output impedance of inverter, which makes the transfer line inductive. The Q - V control curve is modified to ensure the steady-state accuracy of voltage control. The improved and conventional droop control methods are compared by simulations in PSCAD/EMTDC. The simulation results show that the reactive power allocation effort of improved droop control is better.

Key words: Microgrid; micro sources; inverters; droop control; virtual reactance

变压器调压区均压环的设计与优化

梅文哲, 赵建, 范小辉, 黄郑宇
(苏州供电公司, 江苏 苏州 215000)

摘要:为改善变压器调压区电场环境, 提出在变压器调压区安装均压环以改善其电场分布。利用有限元法计算了均压环各结构参数时的调压区电场。提出了在均压环参数设计的 2 种不同的优化方式(常规的分步优化方式和神经网络最优化方式), 并加以比较后得出其对最终优化结果的不同影响。在神经网络最优化方式中, 通过神经网络构建均压环参数—调压区电场的输入—输出模型, 利用最优化方法构建优化算法, 并利用程序语言实现完成了变压器调压区均压环结构参数的神经网络最优化设计, 真正实现了均压环参数的全局优化设计。

关键词:变压器调压区; 均压环; 有限元; 分步优化; 神经网络; 全局优化

中图分类号: TM402

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)04-0048-04

变压器作为电力系统传输电能的核心部件, 其正常运行极具重要性。调压区是变压器中完成电压调节的重要区域, 随着电压等级的攀升, 调压区的电场环境更加恶劣。通常情况下, 调压区分接开关电极的不规则形状, 金具结构会导致高压电极和接地端附近电位的快速衰减, 在临近高压电极和接地端处产生较高的电场。长期运行中容易导致局部放电, 引起局部油温升高和油的裂解, 加速绝缘油的热老化及击穿, 成为了变压器运行的重大隐患。优化其电场分布对整个变压器的安全运行起着非常关键的作用。

在调压区安装均压环改善其电场分布。均压环的作用主要是降低调压区内某些部位(比如套筒)和两端金具表面过高的电位梯度, 可以将最大场强从高压电极与接线端金具转移到保护环的外侧, 最大场强值也会显著降低, 电场分布趋于均匀。另外, 均压环还有引弧、防止金具表面放电、漏电起痕及电腐蚀, 并且能消除沿面放电引起的绝缘油老化^[3]。因此, 采用均压环改善调压区电场和电位分布具有重要的工程和学术意义。均压环的尺寸、安装位置等参数的确定以及方案的最优化是至关重要的。通常采用的分步优化只是一种局域优化方法, 具有一定的局限性。为实现多参数多输出量下的优化设计, 试图探索合适的优化方法, 拟采用神经网络方法及最优化理论进行其全局优化设计。

1 带均压环调压区电场分布的计算

1.1 有限元计算模型的确定

根据实际结构特点, 在仿真之前, 从工程的角度进行如图 1、图 2 所示简化。

均压环、电极、套筒和垫片等合起来组成的系统场域是一个有界的三维电场, 使用有限元法进行电场

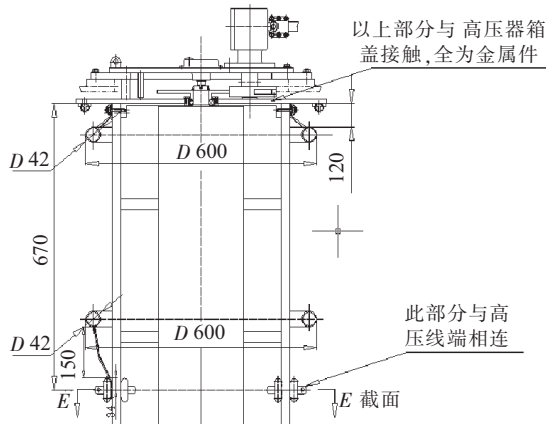


图 1 变压器调压区结构示意图

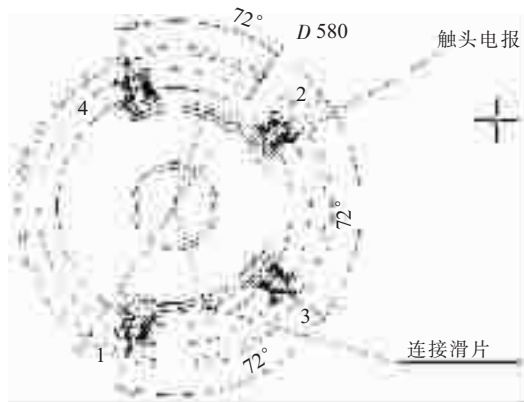


图 2 调压区剖面结构示意图

分布计算^[2]。得到调压区电场的计算方程和边界条件。

(1) 计算区域内电位满足 Laplace 方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

(2) 变压器箱盖及低压端均压环表面电位满足:

$$\varphi = \varphi_{st1} \quad (2)$$

(3) 高压触头及高压端均压环表面电位满足:

$$\varphi = \varphi_{st2} \quad (3)$$

(4) 介质分界面上满足:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 \\ \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \end{cases} \quad (4)$$

调压区有限元模型如图 3 所示。

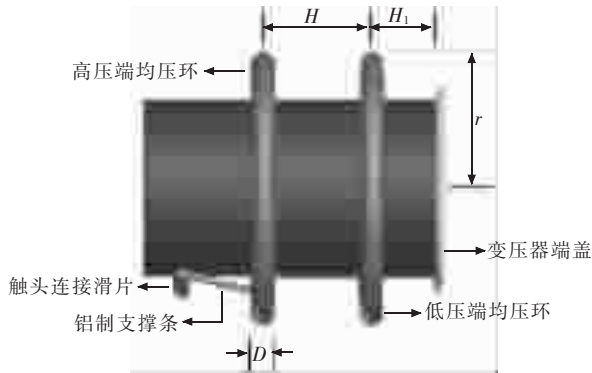


图 3 变压器调压区的有限元模型

1.2 计算结果

以均压环的结构尺寸(环径 r , 管径 D , 均压环间距 H , 低压端均压环与接地板间距 H_1)为参数分析其值选取对调压区电场分布的影响。首先设定均压环各参数范围, 如表 1 所示。

表 1 仿真中均压环的参数设置 mm

结构参数	最小值	最大值
均压环半径 r	272	322
管径 D	22	44
均压环间距 H	278	358
低压端均压环与接地板间距 H_1	188	78

当均压环参数值取 $r=272$ mm, $D=22$ mm, $H=318$ mm, $H_1=168$ mm 时, 得到了一组仿真结果, 包括高、低压端均压环电场, 变压器端盖电场, 内、外绝缘筒电场分布情况。由仿真结果分析可发现, 绝缘圆筒的表面最大场强远低于高、低压均压环及接线端金具的表面最大场强, 故在分析中以均压环及接线端金具的表面最大场强最小为目标, 重点考虑通过改变均压环的结构尺寸及安放位置来实现电场最优分布。

2 均压环的常规分步优化设计

将探索在均压环参数设计的 2 种不同的优化方式(常规的分步优化方式^[2-10]和神经网络最优化方式^[11])对电场分布最终结果的影响。在均压环设计中多采用分步优化的方法, 即每次先确定一个参数作为优化变量, 其余为定值, 进行目标函数的求解。根据不同参数下目标函数取值的大小, 断定所选参数对目标函数的影响。这种分步优化的方法可以缩小优化变量的取值范围, 并了解其与目标函数可能存在的规律。现依次选取环径 r , 管径 D , 均压环间距 H , 低压端均压环与端盖

间距 H_1 作为分步优化变量, 探究其各自取值与调压区电场分布的关系。得到的 r, D, H, H_1 与调压区电场分布关系如图 4—7 所示。

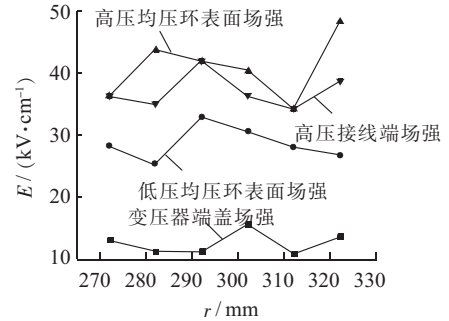


图 4 均压环环径改变对电场分布的影响

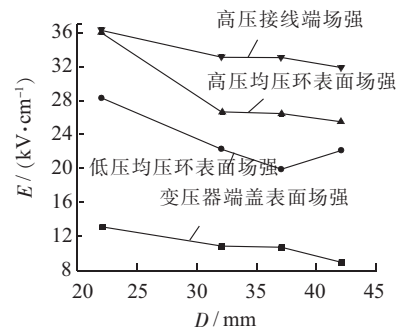


图 5 均压环管径改变对电场分布的影响

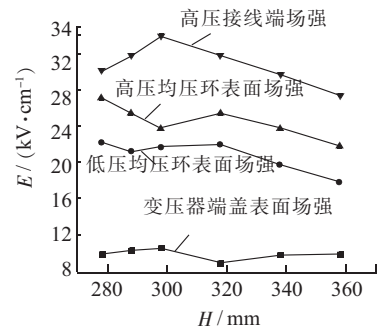


图 6 均压环间距改变对电场分布的影响

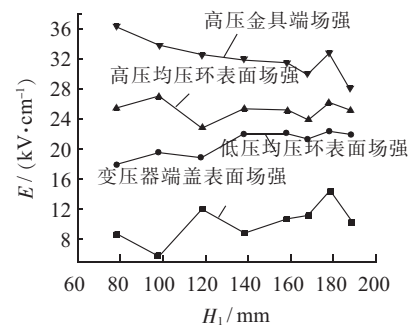


图 7 低压端均压环与箱盖间距改变对电场分布的影响

分步优化虽然可以明确反映均压环不同参数对电场分布的影响, 但是这些参数的组合并不是一组准确的最优参数, 即它们只是近似或局部最优解。这是由于均压环结构参数与调压区电场分布之间是一个非线性的关系, 无法简单的利用各参数的局部最优值组合出所有参数的全局最优值。

3 均压环结构参数的神经网络优化设计

随着电压等级不断攀升,对电场环境的严格要求显然需要更加优良的优化方法。为获得最优化解,提出通过神经网络构建均压环参数—调压区电场的输入—输出模型,利用最优化方法构建优化算法,并利用程序语言实现来完成变压器调压区均压环结构参数的优化设计。均压环参数优化设计的目标就是求取一组 r, D, H, H_1 的值,使得 E_1 与 E_2 取得最小值。然而, r, D, H, H_1 与 E_1, E_2 之间的关系是一种多维非线性关系,这种关系很难用简单函数直接给出。通过让神经网络学习和训练,就可以得出隐含输入/输出数据关系的非线性映射模型。这种模型可以逼近输入和输出之间的多维非线性特性,从而建立输入与输出之间的关系。

为了利用神经网络建立 r, D, H, H_1 和 E_1, E_2 之间的映射关系,采用如前所述的有限元方法计算出一些样本供神经网络训练和验证使用,再由已建立的神经网络模型计算出各结构参数变化下的 E_1, E_2 , 根据合适的算法从中找出满足优化目标的均压环的最优结构参数。

3.1 均压环结构参数神经网络优化模型

调压区电场分布与均压环结构参数之间满足如下映射关系:

$$(E_1, E_2) = f(D, r, H, H_1) \quad (5)$$

这里采用三层前馈式神经网络来构建均压环优化模型,网络的输入为均压环环径、管径、均压环间距和低压端均压环与端盖间距。网络的输出为高、低压端均压环表面最大场强。其结构如图 8 所示。

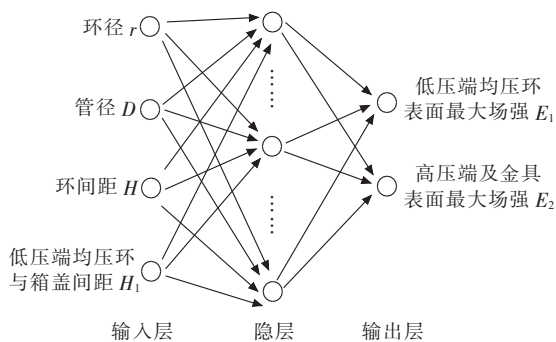


图 8 神经网络模型结构

3.2 神经网络模型构建

为了使网络模型快速收敛,按下式进行归一化的处理:

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6)$$

网络输入层与隐含层的传递函数取为 $\log[s(x)]$, 隐含层与输出层的传递函数取为 $\tan[s(x)]$ 。通过反复试验对比,网络隐层神经元个数取为 13 个。网络训练算法取为 L-M 方法,则:

$$\log[s(x)] = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (7)$$

$$\tan[s(x)] = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}} \quad (8)$$

3.3 均压环参数最优化方法的研究

最优化方法是指在给定的约束条件下,构建问题的数学模型并确定目标函数,找出决策变量的值,使得目标函数达到最小或最大值。这里构建的神经网络模型有 2 个输出变量。当均压环参数变化时,对应的 2 个输出(高、低压均压环表面最大场强)均会变化。在均压环结构参数的优化设计中,由于输入输出模型的非线性特性,无法简单的通过诸如 $E_1 + E_2$ 和 $E_1 - E_2$ 之类的简单函数作为寻求最优解问题的目标函数,如图 9 所示。而且由于神经网络的双参数输出,与以往的均压环结构参数的神经网络优化设计相比又存在特殊性。如何在双参数输出的情况下,通过合适的算法寻求到均压环结构参数的全求解域最优解是优化设计的关键。对于不同的结构参数输入,通过神经网络可以得到相应的电场强度输出。将均压环结构参数 r, D, H, H_1 依次在 $[302, 322]$, $[32, 42]$, $[318, 358]$ 和 $[118, 168]$ 区间内都以 1 为步长变化(单位 mm),作为输入向量,通过神经网络模拟输出。

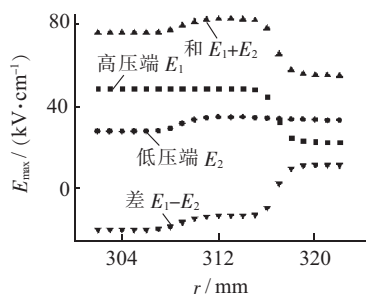


图 9 改变 r 对电场分布及简单目标函数 $E_1 + E_2$ 和 $E_1 - E_2$ 的影响

基于最优化理论,得到的目标函数算法和最优化求解模型。

目标函数: $\min[\max(E_1, E_2)]$

约束条件: $x \in S$

其中 S 为输入向量 x 的可行域 (Feasible Region 可取值集合)。 E_1, E_2 分别为高低压端均压环表面最大电场输出向量。采用方法 $\max()$ 比较 E_1 和 E_2 返回较大值作为输出向量元素。同时采用方法 $\min()$ 寻找输入向量的最小值,返回其寻获值及对应结构参数。利用程序设计方法实现算法后,得到的最优化结果:均压环环径 $r=322$ mm; 管径 $D=42$ mm; 均压环间距 $H=357$ mm; 低压端均压环与端盖间距 $H_1=166$ mm。此时,高压端均压环表面最大场强 $E_1=27.416$ 9 kV/cm, 低压端均压环表面最大场强 $E_2=23.559$ 4 kV/cm。

4 结束语

(1) 经过对变压器调压区模型的适当简化, 利用有限元法计算出在不同结构参数条件下调压区的电场分布情况。对均压环结构参数进行了分步优化设计并分析了均压环的结构参数改变对电场分布的影响。

(2) 提出采用神经网络方法构建均压环参数—调压区电场的输入—输出模型, 利用最优化方法构建优化求解模型, 并利用程序语言实现来完成变压器调压区均压环结构参数的全局优化设计。

(3) 针对均压环神经网络最优解寻求过程中遇到的如何在双输出时寻求正确的目标函数算法及其实现这一问题, 详细探索并给出准确算法及其实现方法。该方法在对于多输入结构参数多场强约束的匀场设计具有普遍的指导意义。

参考文献:

- [1] 文远芳. 高电压技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001: 1-80.
- [2] 王 斌, 彭宗仁. 500 kV 线路绝缘子电压分布的有限元法计算[J]. 电瓷避雷器, 2003(1): 13-15.
- [3] 朱德恒, 严 璋. 高电压绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992: 25-100.
- [4] 甄永赞. 直流输电线下存在建筑物时合成电场计算的有限元方

法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 121-122.

- [5] 杨 杰, 吉晓波, 周国华. 均压环对复合绝缘子电场分布影响的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(2): 24-25.
- [6] 刘 振, 卞星明, 王黎明, 等. 特高压直流复合绝缘子均压环设计[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 137-141.
- [7] 韩社教, 戴栋马, 马西奎, 等. 应用有限元法计算氧化锌避雷器电位分布[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 105-108.
- [8] 韩长伟, 戈兴茹, 刘 兵, 等. 电容式电压互感器均压环优化设计[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(3): 21-25.
- [9] 毛凤麟, 王雪松. 复合绝缘子均压环对电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 39-42.
- [10] 卫李静. 伞盘及绝缘长度对 220 kV 复合绝缘子场强的影响[J]. 水电能源科学, 2011, 29(7): 60-62.
- [11] 司马文霞, 杨 庆, 孙才新, 等. 基于有限元和神经网络方法对超高压合成绝缘子均压环结构优化的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 115-120.

作者简介:

梅文哲(1989), 男, 湖北松滋人, 工程师, 研究方向为电力系统无功补偿、继电保护及电场计算;

赵 建(1980), 男, 江苏泰州人, 工程师, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用;

范小辉(1984), 男, 江苏苏州人, 工程师, 研究方向为电力系统状态检修;

黄政宇(1989), 男, 江苏常熟人, 工程师, 研究方向为配网自动化。

Design and Optimization of Transformer Voltage Adjusting Zone Grading Ring

MEI Wenzhe, ZHAO jian, FAN Xiaohui, HUANG Zhenyu

(Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215000, China)

Abstract: The Voltage Adjusting Zone (VAZ) is critical to transformer voltage regulation. When the voltage level rises, the electric field environment of the VAZ becomes worse. Grading rings for improving the electric field distribution in VAZ are designed, and two methods to optimize the locations of grading ring are proposed. One optimization method is the normal step-by-step calculation method in which the grading parameters are optimized one by one and the other one is based on neural network model which is capable to obtain the global solution.

Key words: grading ring; voltage adjusting zone; finite element; step-by-step calculation; neural network; global optimization

新能源汽车打九折有望拉动需求

日前国务院决定对新能源汽车免征车辆购置税, 有业内人士认为, 这一决定所形成的优惠力度, 对消费者具有比较大的吸引力。免征车辆购置税以后, 购买新能源汽车的花费将减少 1~2 万元。以比亚迪为例, 扣除国家和上海市的补贴之后, 原本购买一辆比亚迪上路的总花费在 16 万元左右, 现在免去车辆购置税 1.2 万元, 相当于打了个九二折, 降价幅度不小。然而, 市场对新能源汽车充电难的问题始终有所顾虑。从使用的实际情况来看, 购买电动车的消费者大多都能在自己家里或单位完成充电。退一步说, 即使公共充电桩在短期内无法建设到位, 目前有条件购买新能源汽车的消费者数量也已经能消化地方上的相关指标。"记者从经销商处了解到, 70%~80% 有固定车位的车主都能与小区协调好建设充电桩的事宜, 不会影响新能源汽车的使用。而从长期来看, 充电设施的不足的确阻碍了部分潜在消费者购买新能源汽车, 这也成为行业发展的隐患。不过, 近期各地方政府关于充电桩的政策也在陆续出台。北京到 2017 年将建设 1 万个快速充电桩, 上海明年充电桩数量将超过 6000 个。近日又传北京将出台措施, 要求新建小区停车位配建充电桩的比例不低于 18%。相应的, 各大厂商也在积极布局充电桩设施, 充电桩接口标准不统一的难题有望得到解决。2014 年 7 月 8 日, 中德签署合作协议, 2 国电动汽车的充电接口将完全统一, 未来比亚迪、宝马、奔驰等车企将采用同样标准的充电接口。

摘自《江苏电力信息网》

220 kV 变电站低压侧电压等级选择研究

丁 诚

(连云港供电公司,江苏 连云港 222004)

摘 要:随着城市负荷密度的不断增大,35 kV 公用电网的作用逐渐削弱,对 220 kV 变电站低压侧电压等级选择提出了新的要求。文中综合考虑电网的成本费用,基于最小年费用法,构建了以负荷密度和 35 kV 负荷所占比例为变量的电网发展成本费用模型,通过算例分析,验证了模型在选择 220kV 变电站低压侧电压等级方面具有一定的指导意义。

关键词:220 kV 变电站;电压等级选择;负荷密度;最小费用

中图分类号:TM715

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)04-0052-04

随着城市负荷密度的不断增大,110 kV 变电站布点间距缩小,10 kV 电网可直接覆盖,35 kV 公用电网的作用将逐渐削弱,未来 35 kV 公用电网的规模也将不断减小。基于这种情况,新建及改造的 220 kV 变电站变比较多选 220/110/10 kV,以充分利用 220 kV 变电站的 10 kV 间隔出线,优化中压电源点布局。但是对于中小型工业用户,仍然适合采用 35 kV 电压等级的专线供电^[1-4]。

1 电网发展成本费用模型

1.1 模型假设

设定在一个理想的圆形供电区域,负荷均匀分布,由 1 座 220 kV 变电站供电,位于圆形供电区域的圆心。220 kV 变电站容量为 $2 \times 180 \text{ MV} \cdot \text{A}$,考虑 1.8 的容载比,负荷为 200 MW。圆形供电区域的面积根据负荷密度变化而变化。在确定负荷密度后,在 35 kV 负荷所占比例变化的条件下,分别计算 2 种方案的综合费用。总费用有初始投资费用、网损费用和运行维护费用 3 部分组成。采用“现值转年值法”,按照“最小年费用法”对 2 种方案的综合费用进行比较,目标函数^[5,6]:

$$F_n = Z \left[\frac{r_0 (1+r_0)^{n_s}}{(1+r_0)^{n_s} - 1} \right] + E_{\text{loss}} + E_{\text{rs}} \quad (1)$$

式(1)中: F_n 为平均分布在 n 年内整个系统的年费用; Z 为网络的初始投资; n_s 为网络的经济使用年限,取 20 年; r_0 为电力工业的投资回报率,现阶段取 10%; E_{loss} 为网损费用; E_{rs} 为运行维护费用。

1.2 计算条件

(1) 220 kV 电网。220 kV 变电站变比为 220/110/35 kV 时,35 kV 间隔为 12 个;220 kV 变电站变比为 220/110/10 kV 时,10 kV 间隔为 24 个。

(2) 110 kV 电网。110 kV 容载比为 2.0。110 kV

变电站容量为 $2 \times 50 \text{ MV} \cdot \text{A}$,变比为 110/10 kV,10 kV 间隔为 24 个。每座 110 kV 变电站进线为 2 条,需要占用 220 kV 变电站的 2 个 110 kV 间隔。

(3) 35 kV 电网。35 kV 负荷均为专用负荷,仅作为负荷点。每条 35 kV 线路限额电流为 400 A,极限输送容量为 23 MW,取负载率为 70%,输送容量为 16 MW。每条线路即为一个负荷点。

(4) 10 kV 电网。每条 10 kV 线路限额电流为 400 A,极限输送容量为 6.6 MW,专线负载率取 70%,输送容量为 4.6 MW;公线负载率取 50%,输送容量为 3.3 MW。

(5) 35 kV 负荷比例。在 220 kV 变电站变比为 220/110/35 kV 时,35 kV 负荷由 220 kV 变电站供电;在 220 kV 变电站变比为 220/110/10 kV 时,则假定的 35 kV 负荷由 10 kV 专线供电,随机由 220 kV 和 110 kV 变电站供电。35 kV 负荷的比例为 20%,30%,40%,50%,60%,70%。

(6) 供电半径计算。考虑负荷均匀分布,220 kV 变电站到每座 110 kV 变电站为等距离,每座 110 kV 变电站的供电区域的面积也相等,并近似为圆形。

在 220 kV 变电站变比为 220/110/35 kV 时,110 kV 变电站划分供电区域不考虑 220 kV 变电站,即 110 kV 变电站供电面积=供电总面积/110 kV 变电站座数,每条 110 kV 线路的长度可以近似等于 110 kV 变电站供电区域的半径。每条 10 kV 线路的长度等于 110 kV 变电站供电区域的半径。

在 220 kV 变电站变比为 220/110/10 kV 时,110 kV 变电站划分供电区域需要考虑 220 kV 变电站,即 110 kV 变电站供电面积=供电总面积/(110 kV 变电站座数+1),所以每条 110 kV 线路的长度可以近似等于 110 kV 变电站供电区域的半径的 2 倍。每条 10 kV 线路的长度等于 110 kV 变电站供电区域的半径。同理,每条 35 kV 线路的长度为 35 kV 负荷点面积的半径。

(7) 投资单价。220 kV 变电站的单价为 12 000 万/座,110 kV 间隔的机会成本为 1000 万元/个;110

kV 变电站的单价为 5000 万元 / 座;110 kV 电缆线路的单价为 300 万元 /km;35 kV 电缆线路的单价为 200 万 /km;10 kV 电缆线路单价为 100 万元 /km。

2 算例分析

以负荷密度 10 MW/km² 为例。首先确定供电区域总面积为 20 km²,半径为 2.5 km,分别考虑 35 kV 负荷的比例为 20%,30%,40%,50%,60%,70%。

2.1 方案 A

220 kV 变电站变比为 220/110/35 kV。

2.1.1 初始投资

(1) 根据 35 kV 用户负荷计算 110 kV 变电站降压负荷,110 kV 变电站降压负荷=供电区域总负荷-35 kV 负荷,然后根据容载比(110 kV 容载比取 2.0)计算出所需的 110 kV 变电容量及主变台数,最后确定所需的 110 kV 变电站座数。1 座 110 kV 变电站需 2 条 110 kV 进线,需占用 2 个 110 kV 间隔。根据 110 kV 变电站座数及供电半径计算所需 110 kV 线路的工程量。

(2) 根据 35 kV 用户负荷确定 35 kV 线路条数,供电半径计算所需 35 kV 线路的工程量。

(3) 根据 10 kV 总负荷,确定需要的 10 kV 公用线路总条数。然后根据 110 kV 变电站的数量确定 110 kV 变电站的供电半径,计算出 10 kV 主干线总长度。方案 A 初始投资费用的计算过程及结果如表 1 所示。

由表 1 可见,随着 35 kV 负荷的增加,初始投资费用会减少,主要原因是由于 10 kV 负荷比例的降低,110 kV 电网的投资减少。

2.1.2 运行维护费用

为简单计算,年运行维护费用取初始投资的 8%。方案 A 运行维护费用的计算结果如表 2 所示。

2.1.3 网损费用

线路损耗电量计算公式:

$$Q_L=0.4 \times 3 \times I^2 \times r \times L \times \tau_{\max} \quad (2)$$

式(2)中: I 为线路的最大电流; r 为线路的导线电阻率; L 为线路的主干线长度; $\tau_{\max}$ 为最大负荷损耗小时数。

方案 A 的网损费用的计算结果如表 3 所示。

2.1.4 总费用

方案 A 总费用的计算结果如表 4 所示。

由表 4 可见,初始投资的费用所占比例最大,超过了 60%。

2.2 方案 B

220 kV 变电站变比为 220/110/10 kV。

2.2.1 初始投资

(1) 将 220 kV 变电站视为 1 座容量为 2×50 MV·A 的 110 kV 变电站,供电负荷为 50 MW,110 kV 变电站降压负荷=供电区域总负荷-50 MW,然后根据

表 1 方案 A 初始投资

35 kV 用户 负荷比例 / %	20	30	40	50	60	70
35 kV 用户 总负荷 / MW	40	60	80	100	120	140
35 kV 专线 条数 / 条	3	5	6	7	9	10
110 kV 网供 负荷 / MW	160	140	120	100	80	60
110 kV 容载比	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
110 kV 变电 容量 / (MV·A)	320	280	240	200	160	120
110 kV 主变 台数 / 台	7	6	6	5	4	3
110 kV 变电站 座数 / 座	4	3	3	3	2	2
110 kV 线路 长度 / km	10.1	8.7	8.7	8.7	7.1	7.1
110 kV 间隔 数量 / 个	8	6	6	6	4	4
35 kV 线路 长度 / km	4.4	5.6	6.2	6.7	7.6	8.0
10 kV 线路 条数 / 条	60	52	45	38	30	23
10 kV 线路 供电半径 / km	1.3	1.5	1.5	1.5	1.8	1.8
10 kV 主干线 总长度 / km	76	76	66	55	54	41
110 kV 变电站 投资 / 万元	20 000	15 000	15 000	15 000	10 000	10 000
110 kV 线路 投资 / 万元	3029	2623	2623	2623	2141	2141
110 kV 间隔 投资 / 万元	8000	6000	6000	6000	4000	4000
35 kV 专线 投资 / 万元	874	1129	1236	1335	1514	1596
10 kV 主干线 投资 / 万元	7571	7577	6557	5537	5354	4105
初始总 投资 / 万元	39 474	32 328	31 416	30 495	23 009	21 842
初始投资 年值 / 万元	4737	3879	3770	3659	2761	2621

表 2 方案 A 运行维护费用

35 kV 用户 负荷比例 / %	20	30	40	50	60	70
初始总投 资 / 万元	39 474	32 328	31 416	30 495	23 009	21 842
年运行维护 费用 / 万元	3158	2586	2513	2440	1841	1747

容载比(110 kV 容载比取 2.0)计算出所需的 110 kV 变电容量及主变台数,最后确定所需的 110 kV 变电站座数。1 座 110 kV 变电站需要 2 条 110 kV 进线,需要占用 2 个 110 kV 间隔。根据 110 kV 变电站座数及供电半径计算所需 110 kV 线路的工程量。

(2) 10 kV 专线负荷,即为方案 A 的 35 kV 负荷,

表 3 方案 A 网损费用

35 kV 用户 负荷比例 / %	20	30	40	50	60	70
35 kV 线路 长度 / km	4.4	5.6	6.2	6.7	7.6	8.0
10 kV 主干线 总长度 / km	76	76	66	55	54	41
35 kV 线路网损 电量 / (万 kW·h)	8	10	11	12	14	14
10 kV 线路网损 电量 / (万 kW·h)	70	70	61	51	49	38
网损总电量 / (万 kW·h)	78	80	72	63	63	52
网损总 费用 / 万元	23	24	22	19	19	16

表 4 方案 A 总费用

35 kV 用户 负荷比例 / %	20	30	40	50	60	70
初始投资 费用 / 万元	4737	3879	3770	3659	2761	2621
运行维护 费用 / 万元	3158	2586	2513	2440	1841	1747
网损费用 / 万元	23	24	22	19	19	16
总费用 / 万元	7918	6490	6305	6118	4621	4384

由 10 kV 电压等级的专用线路供电,根据 110 kV 变电站的数量确定,确定 110 kV 变电站的供电半径,计算出 10 kV 专线总长度。

(3) 确定 10 kV 公用负荷,10 kV 公用负荷=供电区域总负荷-10 kV 专线负荷,根据 10 kV 公用负荷,确定需要的 10 kV 公用线路总条数。然后根据 110 kV 变电站的数量确定,确定 110 kV 变电站的供电半径,计算出 10 kV 主干线总长度。

方案 B 的初始投资费用的计算过程及结果如表 5 所示。

由表 5 可见,方案 B 的初始投资变化较小,主要原因是由于 110 kV 变电站座数一直维持不变。

2.2.2 运行维护费用

为简单计算,年运行维护费用取初始投资的 8%。方案 B 运行维护费用的计算结果如表 6 所示。

2.2.3 网损费用

计算公式同本文 2.1.3 节的式(2)。方案 B 网损费用的计算结果如表 7 所示。

2.2.4 总费用

方案 B 总费用的计算结果如表 8 所示。

由表 8 可见,初始投资费用所占的比例最大,超过了 60%。

2.3 经济性比较

重复以上步骤分别计算不同负荷密度下的综合费用并比较结果,不同负荷密度下 2 个方案总费用的对

表 5 方案 B 初始投资

10 kV 专线 负荷比例 %	20	30	40	50	60	70
10 kV 专用 线路负荷 / MW	40	60	80	100	120	140
10 kV 公用 线路负荷 / MW	160	140	120	100	80	60
220 kV 供 10 kV 负荷 / MW	50	50	50	50	50	50
110 kV 网供 负荷 / MW	150	150	150	150	150	150
110 kV 容载比	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
110 kV 变电 容量 / (MV·A)	300	300	300	300	300	300
110 kV 主变 台数 / 台	6	6	6	6	6	6
110 kV 变电站 座数 / 座	3	3	3	3	3	3
110 kV 线路 长度 / km	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7
110 kV 间隔 数量 / 个	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
10 kV 专用 线路条数 / 条	10	15	20	25	29	34
10 kV 公用 线路条数 / 条	55	48	41	34	28	21
10 kV 线路 供电半径 / km	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
10 kV 主干线 总长度 / km	82.0	79.5	77.0	74.5	71.9	69.4
110 kV 变电站 投资 / 万元	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000
110 kV 线路 投资 / 万元	2623	2623	2623	2623	2623	2623
110 kV 间隔 投资 / 万元	6000	6000	6000	6000	6000	6000
10 kV 主干线 投资 / 万元	8202	7950	7698	7445	7193	6940
初始总 投资 / 万元	31 825	31 573	31 320	31 068	30 816	30 563
初始总投资 年值 / 万元	3819	3789	3758	3758	3698	3668

表 6 方案 B 运行维护费用

10 kV 用户 负荷比例 / %	20	30	40	50	60	70
初始总投 资 / 万元	31 825	31 573	31 320	31 068	30 816	30 563
年运行维护 费用 / 万元	2546	2526	2506	2485	2465	2445

比结果如表 9 所示。

(1) 无论负荷密度如何变化,35 kV 用户负荷所占比例在 40%~50%出现拐点,当 35 kV 用户负荷小于拐点时,方案 A 投资大于方案 B 投资,此时选择方案 B 更经济;当 35 kV 用户负荷大于拐点时,方案 B 投资大于方案 A 投资,此时选择方案 A 更经济。

表 7 方案 B 网损费用

10 kV 用户 负荷比例 / %	20	30	40	50	60	70
10 kV 线路 长度 / km	12.6	18.9	25.2	31.5	36.6	42.9
10 kV 公线 长度 / km	69.4	60.6	51.7	42.9	35.3	26.5
10 kV 专线网损 电量 / (万 kW·h)	23	34	46	57	66	78
10 kV 公线网损 电量 / (万 kW·h)	64	56	48	40	33	24
网损总电量 / (万 kW·h)	87	90	93	97	99	102
网损总 费用 / 万元	26	27	28	29	30	31

表 8 方案 B 总费用

10 kV 用户 负荷比例 / %	20	30	40	50	60	70
初始投资 费用 / 万元	3819	3789	3758	3728	3698	3668
运行维护 费用 / 万元	2546	2526	2506	2485	2465	2445
网损费用 / 万元	26	27	28	29	30	31
总费用 / 万元	6391	6342	6292	6243	6193	6143

(2) 方案 A 费用随着 35 kV 用户负荷所占比例的增大而降低的较为明显;而方案 B 费用变化则很小。

(3) 考虑到 35 kV 负荷具有一定的偶然性,采用方案 A 存在一定的风险。在不能确定 35 kV 负荷的情况下,采用方案 B 则可以有效地规避风险。

3 结束语

通过建立电网发展最小费用模型,针对不同负荷密度,在 35 kV 负荷所占比例变化的条件下,分别计算 2 种方案的综合费用。得出了以下结论:在确定 35 kV 负荷所占比例可以达到 40% 以上时,建议 220 kV 变电站低压侧采用 35 kV 电压等级;否则,建议采用 10 kV 电压等级。

参考文献:

- [1] 张 斌,杨高才. 湖南电网 220 kV 变电站采用 35 kV 电压等级出线分析[J]. 湖南电力,2011,32(2):6-8.
- [2] 何春庚,钟 清. 广东 35 kV 电压等级电网的发展现状与趋势

表 9 不同负荷密度下两种方案的总费用

负荷密度 /[MW· (km ²) ⁻¹]	方案	35 kV 用户负荷比例					
		20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %
1	方案 A/ 万元	12 931	11 441	10 856	10 265	8558	7809
	方案 B/ 万元	11 129	10 972	10 816	10 659	10 502	10 345
	差值 / 万元	-1802	-468	-40	394	1944	2536
5	方案 A/ 万元	8878	7438	7177	6912	5375	5040
	方案 B/ 万元	7299	7229	7159	7089	7018	6948
	差值 / 万元	-1580	-210	-18	176	1643	1908
10	方案 A/ 万元	7918	6490	6305	6118	4621	4384
	方案 B/ 万元	6391	6342	6292	6243	6193	6143
	差值 / 万元	-1527	-148	-13	125	1572	1759
20	方案 A/ 万元	7239	5819	5688	5556	4088	3920
	方案 B/ 万元	5749	5714	5679	5644	5609	5574
	差值 / 万元	-1490	-105	-9	88	1522	1654
50	方案 A/ 万元	6637	5224	5141	5058	3614	3508
	方案 B/ 万元	5180	5158	5136	5113	5091	5069
	差值 / 万元	-1457	-66	-6	56	1477	1561

[J]. 广东电力,2005,18(5):21-25.

- [3] 陈根永,张新民,孙启伟. 农网规划建设中配网电压等级的选择分析[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(7):119-123.
- [4] 陈永明,杨茹,汤大海,等. 无后备灵敏度的 220 kV 变压器后备保护整定[J]. 江苏电机工程,2013,32(3):57-59.
- [5] WILLIS H L. 配电系统规划参考手册[M]. 2 版. 范明天,刘 健,张毅威,等译. 北京:中国电力出版社,2013:144-162.
- [6] 徐 悦,王天华,李宁可,等. 基于综合费用最小的 10 kV 开闭所容量选择实用算法[J]. 电网技术,2011,35(S2):867-869.

作者简介:

丁 诚(1972),男,江苏镇江人,高级工程师,从事电网规划工作。

Low-side Voltage Level Selection of 220 kV Substations

DING Cheng

(Lianyungang power supply company, Lianyungang 222004, China)

Abstract: As urban load density increase, the role of 35 kV grid gradually weakened. Meanwhile, new demands are raised for the selection of 220 kV substation low-side voltage level. A grid development cost model considering load density and 35 kV load proportion is proposed based on the minimum annual cost method. Simulation results verify that the proposed model is with a certain significance in guiding the selection of 220 kV substation low-side voltage level.

Key words: 220 kV substations; voltage level selection; load density; minimum cost

分布式光纤测温系统在电力电缆在线监测中的应用

张春阳

(无锡供电公司, 江苏 无锡 214061)

摘要:随着智能电网的普及, 分布式光纤测温技术成为国内外研究的热点。文中总结了分布式光纤测温系统的研究现状, 对基于拉曼散射测温系统的基本原理及其特点进行了分析, 解析了基于光纤测温的电缆监测系统的结构, 最后重点介绍了分布式光纤测温系统在电力电缆中在线监测中的应用, 并以实例证明了分布式光纤测温系统是目前电力电缆在线监测实现故障诊断及定位技术的最有效手段。

关键词:分布式光纤测温系统; 工作原理; 在线监测

中图分类号: TP212

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)04-0056-03

随着经济社会的发展, 能源问题日益突出。为了响应国家走可持续发展道路的号召, 国家电网决定大力发展智能电网。智能电网对可靠性和稳定性的要求越来越高, 给电网的日常运行维护工作也带来了新的挑战和机会。在电力系统中, 电力电缆主要是用来进行电能的传递, 电缆常常因长期运行而发生绝缘老化, 由于所处外部环境恶劣及内部高负荷电流而引起局部高温甚至火灾, 而传统的运行维护方法主要靠人工进行日常巡视, 这需要大量人力和设备, 不能准确、快速地反映电力电缆的健康状况, 大大影响了电网的安全、可靠运行。因此, 很有必要对电力电缆进行实时在线监测, 从而能够及时进行故障诊断和定位, 使事故消除在萌芽状态。智能配电网中光纤复合架空相线(OPPC)和光纤复合低压电缆(OPLC)的大量使用, 为分布式光纤测温系统在电力电缆在线监测中的应用打下了扎实的基础。

基于分布式光纤传感技术的优势, 其理论和应用研究一直是国内外研究的热点^[1]。1981年英国的南安普敦大学首次提出了分布光纤温度传感器系统的定义, 1987年英国YORK技术有限公司首次推出了商品化的拉曼后向散射效应的DTS分布式光纤温度传感系统。目前, 国外关于分布式光纤测温系统的研究已经相当成熟, 其测量距离最长可达30 km, 温度分辨率最高可达0.5℃, 空间定位精度最高可达0.5 m; 而国内同类产品的监测距离最大为5 km, 空间分辨率为2 m, 温度分辨率为1℃, 国内产品相比国外产品在性能指标上还存在一定的差距。

1 分布式光纤测温系统工作原理及特点

1.1 定位原理

分布式光纤测温系统在时域中利用OTDR(Optical Time-Domain Reflectometer)技术原理来对

不同的温度点进行精确定位。OTDR技术基于光的瑞利散射和背向反射原理, 当光脉冲在光纤中进行信息传递时, 光纤上的每一处都会发生散射现象, 散射大小和光功率强弱成正比, 光功率和光纤的衰耗情况有关。由于瑞利散射是全方位的, 有一部分光会反向传输到输入端形成背向散射光, 利用OTDR探测器测量到的入射信号到达某测温点后返回信号所用的时间, 可以初步计算出该测温点的位置^[2], 即:

$$L = \frac{C \times \Delta t}{2n} = \frac{3 \times 10^8 \times \Delta t}{2n} \quad (1)$$

式(1)中: L 为测温点距离入射点的距离; C 为光脉冲在真空中的速度; n 为光纤纤芯的折射率大小; t 为信号从发射到返回的时间。

1.2 测温原理

DTS(Distributed Temperature Sensor)光纤分布式温度测量系统利用光子的拉曼散射温度效应来实现温度的检测。光纤本身不仅进行信号传输, 还用于探测温度, 即传播传感一体化。当激光脉冲在光纤中传输时, 光纤分子的热振动和光子相互作用发生能量交换会产生拉曼散射。若一部分光能转换成热振动, 则会产生一个比光源波长长的光, 称之为斯托克斯光(Stokes), 如果一部分热振动转换成光能, 则会产出一个比光源波长短的光, 称之为反斯托克斯光(Anti-Stokes)^[3-5]。

Stokes 光强:

$$I_s \propto \left[\frac{1}{\exp(hc\Delta\gamma/kT) - 1} + 1 \right] \times \lambda_s^{-4} \quad (2)$$

Anti-Stokes 光强:

$$I_a \propto \left[\frac{1}{\exp(hc\Delta\gamma/kT) - 1} + 1 \right] \times \lambda_a^{-4} \quad (3)$$

由于Stokes光强度受温度的影响很小, 可忽略不计, Anti-Stokes光强度会随着温度的变化而变化。而Anti-Stokes光与Stokes光的强度之比提供了一个关于温度的函数关系式, 即:

$$R(T) = \frac{I_a}{I_s} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_a}\right)^4 \exp(-hc\Delta\gamma/kT) \quad (4)$$

式(2—4)中: I_a, I_s 分别为 Anti-Stokes 和 Stokes 的光强度; λ_a, λ_s 分别为 Anti-Stokes 和 Stokes 的波长; h 为普朗克常量; c 为光速; k 为波尔兹曼常数; T 为绝对温度; $\Delta\gamma$ 为偏移波数。

光在光纤中传输时后向拉曼散射光沿光纤原路返回,被光纤探测单元接收。测温主机通过测量背向拉曼散射光中 Anti-Stokes 光与 Stokes 光的强度比值的变化就可实现对外部温度变化的监测。

1.3 工作原理

分布式光纤测温系统的原理是利用激光在光纤中传输时产生的拉曼(Raman)散射和光时域反射原理来获取空间温度的分布情况,其工作原理如图1所示。

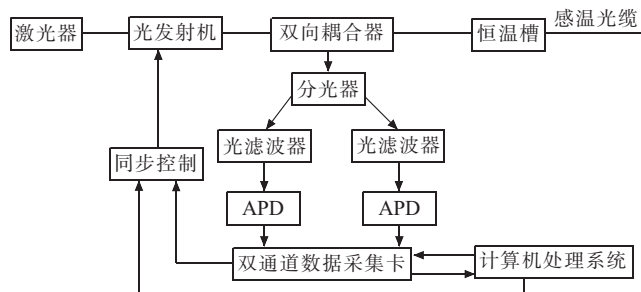


图1 工作原理图

光发射机在同步控制单元的触发下,形成一定周期和持续时间的短脉冲光,该脉冲驱动半导体激光器产生大功率的光脉冲,脉冲光通过光耦合器连接到恒温槽,然后进入传感光纤。其中,恒温槽用于系统标定温度。同时,双向耦合器将散射回来的后向拉曼光耦合至光处理系统。通过分光器,滤出 Stokes 光和 Anti-Stokes 光,分别进入不同的光路进行处理。由于散射光中还夹杂着其它散射光和干扰光,所以需要两路光进行一定的带通滤波处理。由于后向拉曼散射光的强度非常微弱,拉曼散射光进而通过 APD(雪崩光电二极管)进行光电转换和放大,得到一定范围的有效电压值。然后由数据采集单元进行高速数据采样并转换为数字量,最后经过信号处理器对信号进一步处理,便可将温度信息实时计算出来。同时根据光纤中光的传输速度和后向光回波的时间对温度信息定位。

工作人员根据实际情况预先在系统中预先设定测温光纤的始末长度与测温的距离间隔,以每个点测得的温度值作为提取对象,在数据提取程序下对这些点所在光纤上的刻度值进行定义,从而实现对监测点的温度值实时在线监测。分布式测温系统按照设定的间隔每隔一定时间针对所有监测点记录相关温度数据,随着通信网络的大力发展,网络结构越来越复杂,线路长度越来越长,产生的数据也越来越大,相关管理和处

理也越来越困难,如采用传统人工的检查和处理,则工作量非常巨大,且容易遗漏与出错。分布式测温系统采用数据库系统编程的方式来进行数据导入、异常数据的检验、数据处理后的导出等操作,并能够与常规温度计实测温度进行差值比较,按差值大小来进行自定义显示,进行修改或者剔除等处理操作,提高了光纤数据前处理工作的效率。系统采用统计检验方法识别温度异常值。统计检验方法采用统计理论进行观测资料检验,因为有一定的数学依据和判断标准,很大程度上减少了分析人员的主观性,也不依赖于分析人员的经验和技术水平。对于异常温度测值,程序可以根据识别因子判断并作出标记,如果程序判断为温度异常数据,将通过操作将异常温度测值直接剔除。

1.4 技术特点

传统的电温度传感器包括传统的热电偶传感器、热电阻传感器以及特殊的半导体传感器等,这些传感器容易受电磁干扰,同时易燃、易爆,腐蚀性差。由于是点式测量,有盲区,在现实工作中,也不便于安装、布线,维护工作量大,成本高。分布式光纤测温系统与传统的电缆感温系统相比,有以下优点:

- (1) 以光纤为媒介,光纤的纤芯材料为二氧化硅,耐腐蚀,不受电磁干扰,使用于特殊场合;
- (2) 线性测量,无盲区,可以准确地测出光纤沿线任一点的温度量,灵敏性高,信息量大,数据直观;
- (3) 光纤体积小,重量轻,抗拉伸,同时纤细柔软,便于安装;
- (4) 监测距离长(可至 10 km),一条光缆即可完成控制和信号传输,所有设置都在终端完成,整个系统简单稳定,易于维护操作;
- (5) 温度达到报警值,不影响系统的正常使用,可靠性高,使用寿命长。

2 分布式光纤测温系统在电力电缆中的应用

2.1 在线监测系统网络结构

基于分布式光纤测温的电缆监测系统可采用 B/S 结构,其网络结构如图2所示。

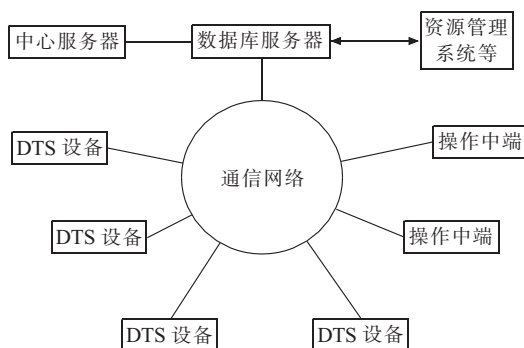


图2 在线监测系统结构图

DTS 设备负责进行测温,将所得的数据保存在数据库服务器中,中心服务器完成综合监视、数据管理、事件管理、台账管理、统计管理和系统管理。用户可以通过操作终端连接到监测服务器,获取相关数据,完成各项任务,实现系统的各项操作功能。同时,该监测系统网络级互通接口实现与其他网管系统、资源管理数据库系统等系统互通,从而实现资源共享。该监测系统能查询其他系统的相关数据,其它系统也能从该在线监测系统中提取自己所需的信息。通过这种基于 B/S 的模式控制简单,系统扩展性好。

2.2 实际应用效果

(1) 无锡某电力管廊 10 kV 电力电缆采用了外置式光纤测温系统进行在线监测。状态检测主机和 DTS 测温主机均安装于监控室的控制柜中,探测光缆沿着电缆表面敷设,且每隔 1 m 使用尼龙扎带或固定夹具进行绑扎,探测光缆安装示意如图 3 所示。



图 3 外置探测光缆安装示意图

探测光缆既可以作为温度传感器感应温度信息,又可以作为信息传输通道将相关温度信息传送给 DTS 测温主机进行处理。DTS 测温主机与电力电缆状态监测主机之间通过 TCP/IP 协议进行通信,通过检测主机内置软件实现对 DTS 测温主机和监测范围进行相关配置,DTS 测温主机将温度信息传送给电力电缆状态监测主机内置软件进行后期处理,输出实时电缆温度及报警信息等。

(2) 无锡某小区 1 号公配所至 2 号楼的 10 kV 电力电缆采用了内置式光纤测温系统进行在线监测。状态检测主机和 DTS 测温主机均安装于公配所的控制柜中,采用光纤复合电缆中的内置光纤来进行探测,安装示意如图 4 所示。



图 4 内置探测光缆安装示意图

分布式光纤测温技术在电力电缆中的应用,可以有效地监测电缆在不同负载下的发热状态,积累历史数据;通过载流量分析,可以保证在不超过电缆允许运行温度的情况下,最大限度地发挥电缆的传输能力,降低其运行成本;进行老化监测,发现电力电缆上的局部过热点,及时采取相关降温措施,延缓电力电缆老化的速度;进行实时故障监测,及时发现电缆运行过程中的外力破坏等。

(3) 电力电缆状态监测主机一般安装于变电站监控室或者中央控制室内,电力电缆状态测温软件通常内置于主机内,用户可以通过状态监测系统可以及时、准确地了解电力电缆的工作状态。分布式光纤测温系统界面可以实时地显示各电力电缆线路上的温度分布曲线、各点温度随时间的变化曲线、不同区域的独立报警、最高温度的报警、温度上升速率的报警等。

3 结束语

基于分布式光纤测温系统的电力电缆在线监测系统,通过将导线、电缆张力、温度、垂度、信息和电气相关信息相结合,不但能够实现实时对电力电缆负荷情况的在线监测,还能够及时、准确地进行限制电缆载流量瓶颈点的温度监控和定位,方便了电力部门及时调整负荷和线路的日常维护,减少了由于停电对用户带来的经济损失。更为重要的是,通过将故障电量信息与温度信息进行实时显示处理,能够对电力电缆故障进行及时报警,迅速准确地确定电力电缆的故障点位置,指导相关检修人员及时赶到事故地点进行电力电缆修复,大大提高了供电的可靠性。分布式光纤温度测量系统是目前电力电缆在线监测最有效的手段之一。

参考文献:

- [1] 张颖,张娟,郭玉静,等. 分布式光纤温度传感器的研究现状及趋势[J]. 仪表技术与传感器,2007,08(3):1-2.
- [2] AOYAMA K, NAKAGAWA K, ITOH T. Optical Time Domain Reflectometry in a Single-mode Fiber[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1981, 17(6): 862-868.
- [3] 刘扬,侯思祖. 基于拉曼散射的分布式光纤测温系统分析研究[J]. 电子设计工程,2009,17(1):23-25.
- [4] AHANGRANI M, GOGOLLA T. Spontaneous Raman Scattering in Fibers with Modulated Probe Light for Distributed Temperature Roman Remote Sensing [J]. Journal of Lightwave Technology, 1999(8): 1379-1391.
- [5] 刘文,杨坤涛,许远忠. 基于自发 Raman 散射分布式光纤测温系统设计[J]. 光通信研究,2005 (4):54-56.
- [6] 吴为国,茅丰. 基于无线通信技术的电缆测温实时监测系统[J]. 江苏电机工程,2013,32(3):54-56.

作者简介:

张春阳(1971),男,江苏无锡人,工程师,从事电力通信管理工作。

(下转第 62 页)

一起 220 kV 变电站母线 TV 二次回路的改造

王德全
(淮安供电公司,江苏 淮安 223200)

摘 要:220 kV 变电站距离保护、方向保护等对母线电压互感器(TV)二次电压大小、方向有着严格要求,因此在对二次电压回路改造时不仅不能使电压失电、短路,还应注意回路接地、TV 极性等问题。文中介绍了一起 220 kV 变电站母线 TV 二次回路改造案例,并对改造中应注意的问题提出一些探讨,且能对类似的工程改造有所帮助。

关键词:母线 TV;二次回路;改造

中图分类号:TM63

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)04-0059-04

众所周知,220 kV 变电站母线电压互感器(TV)二次电压合格与否,直接关系 220 kV 变电站保护、测量、计量等装置能否安全、稳定运行,因此在对 220 kV 变电站母线 TV 二次电压回路改造过程中不仅不能使电压失电、短路,还应注意回路接地、TV 极性问题,要严格掌握母线 TV 二次回路原理及相关反事故措施要求^[1,2]。

1 二次回路简介

220 kV 变电站主接线大多采用双母线或单母线分段接线方式,其母线 TV 设置一般有 2 组,分别置于两段母线。每组 TV 二次侧的 3 个次级接线方式为 Y/Y/ Δ (开口),分别用于保护(测量)、计量、保护回路。老式的母线 TV 二次电压接入 TV 端子箱,经自动空气开关或熔断器、TV 隔离刀闸辅助接点后,接至控制室或保护室的中央信号继电器屏,由并列继电器实现电压的自动并列,再接至电压小母线和计量屏表

计。但是近几年这种老式回路已被逐步改造,新的回路取消了原有的中央信号继电器屏,由独立的电压并列装置屏代替,其新的回路构成是 TV 二次电压接入 TV 端子箱,经自动空气开关或熔断器后,接至控制室或保护室的电压并列屏,由电压并列装置实现电压的自动切换和并列,最后接至电压小母线和计量屏表计。

2 一起改造案例

某 220 kV 变电站主接线为双母线带旁路接线方式,如图 1 所示。原先的 TV 二次电压并列切换回路是由独立的电磁式继电器组成,置于中央信号继电器屏,而新的 TV 二次电压并列切换回路是置于三套 NSD200-YB1 型装置内,分别是 220 kV、110 kV、35 kV TV 二次电压并列装置,组成一面独立的电压并列屏。在具体施工时,为确保安全,实施分段改造,将回路接线及其分并列操作、监控等功能逐渐转移至新的电压并列屏。改造过程要求一次运行方式做相应调整。

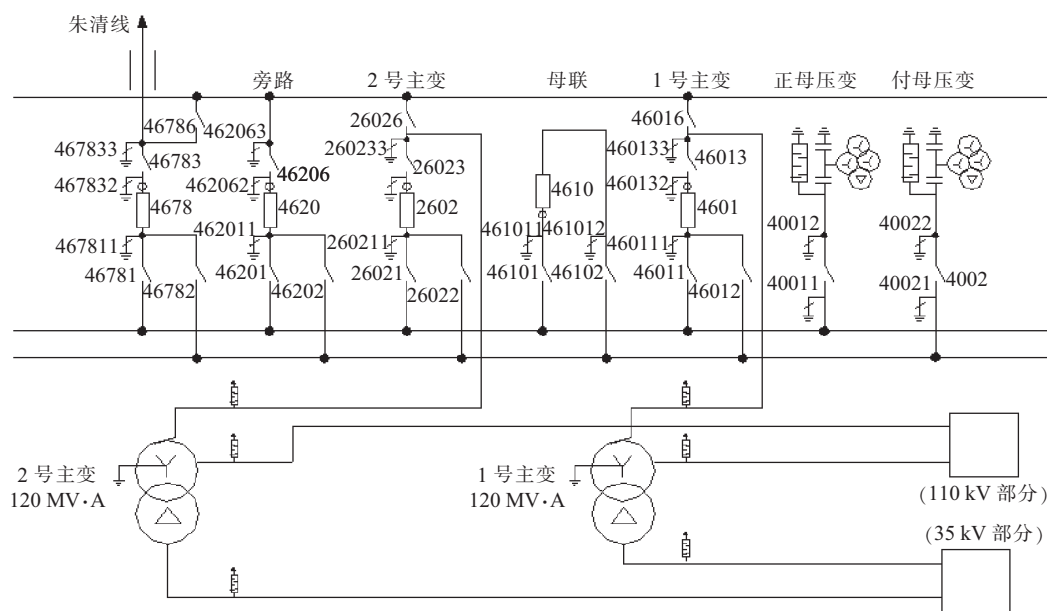


图 1 变电站 220 kV 系统一次接线图(部分)

2.1 正母 TV 二次回路改造

强制并列 220 kV TV 二次电压 (将原中央信号继电器屏上 220 kV TV 二次电压切换把手切至“并列”位置), 保证二次电压 I 段母线不失电, 停运 220 kV 正母 TV。此时变电站内保护、测量等取自的 220 kV TV 二次电压, 是由 220 kV 付母 TV 经原中央信号继电器屏供出。

拆除 220 kV 正母 TV 端子箱至原中央信号继电器屏的二次电缆, 这些电缆作用是取 220 kV 正母 TV 二次电压和 TV 刀闸辅助常开接点。重新敷设 220 kV 正母 TV 端子箱至新电压并列屏二次电缆 (可提前敷设) 并接线, 电压并列屏内的电压电缆应接入切换前正母电压端子, 如图 2 所示中的 1D2-1, 1D2-3, 1D2-5, 1D2-7, 1D3-1, 1D3-3, 1D3-5 端子。

对新电压并列屏内接线检查, 确认无误后, 运行 220 kV 正母 TV, 对新电压并列屏内二次接线及装置通电, 并进行定相试验, 确保电压回路在切换和并列前后均没有短路、断路等不正常情况。此时完整的定相试验非常重要, 短接付母 TV 隔离开关位置开入端子, 如图 3 所示中的 1D1-3, 1D1-7, 使付母 TV 二次电压切入装置 (图 2 中 2GWJ 接点闭合); 正母 TV 隔离开关

位置开入端子因正母 TV 已运行无需短接 (图 2 中 1GWJ 接点已闭合); 短接母联位置开入端子, 如图 4 所示中的 1D1-1, 1D1-9, 使 I, II 段电压母线并列 (图 2 中 BLJ 接点闭合)。分别测量用于保护、测量回路的端子之间电压, 结果如表 1 所示。分别测量用于计量回路的端子之间电压, 结果如表 2 所示。从定相试验结果看, 220 kV TV 二次电压并列装置及其二次回路正常。运行 220 kV 正母 TV 后, 在新电压并列屏上强制并列 220 kV TV 二次电压 (因用于电压并列的母联位置开入电缆还接在原中央信号继电器屏, 所以在新电压并列屏短接母联位置开入端子 1D1-1, 1D1-9 即可)。新电压并列屏切换后的电压 (输出电压) 回路接线, 分别接至 220 kV 保护、测量、计量、故障录波等装置屏顶小母线, 与原中央信号继电器屏输出电压并联, 为 220 kV TV 二次电压逐渐过渡至新电压并列屏, 最终退出原中央信号继电器屏做好准备。因新电压并列屏和原中央信号继电器屏的输出电压分别由 220 kV 正、付母 TV 供出, 注意在接线时, 无论先接电缆的哪一端, 另一端都会带电, 应防止电压短路、接地。完善新电压并列屏遥信回路接线, 并完成与监控中心的信号核对。至此, 220 kV 正母 TV 二次电压回路改造工作结束。

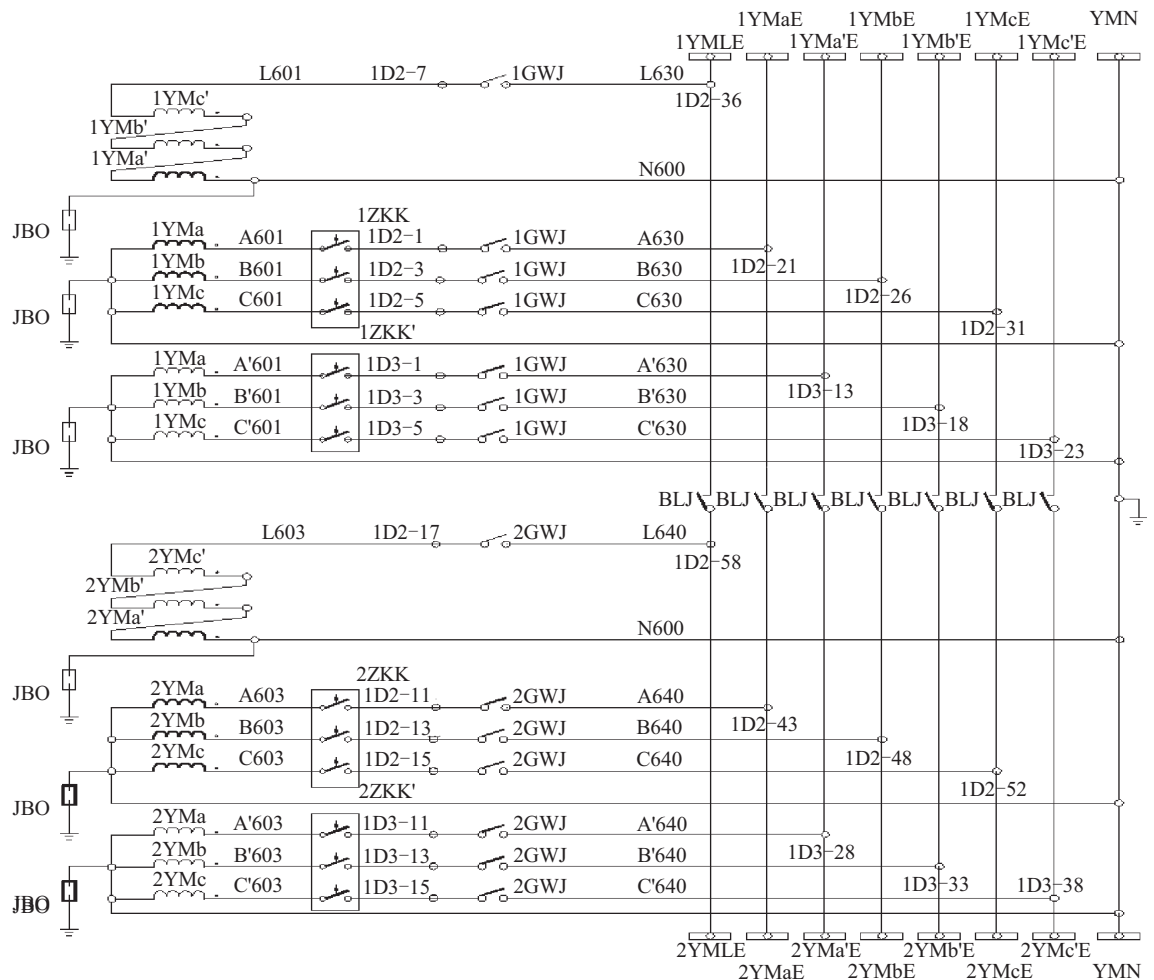


图 2 新电压并列屏二次电压回路图

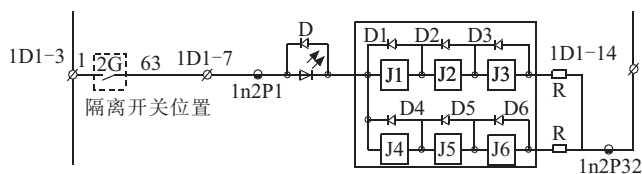


图3 付母二次电压切换继电器回路

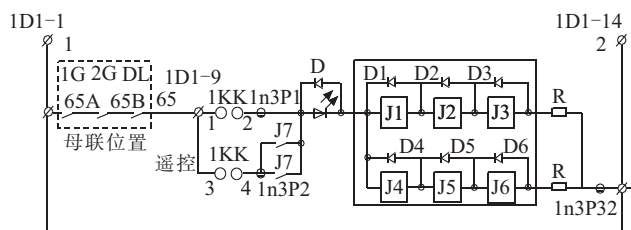


图4 正母与付母二次电压并列继电器回路

表1 保护与测量回路的端子之间电压 V

端子号	A601 (1D2-1)	B601 (1D2-3)	C601 (1D2-5)	L601 (1D2-7)
A603 (1D2-11)	0	100.2	100.1	57.7
B603 (1D2-13)	100.0	0	100.1	57.8
C603 (1D2-15)	100.3	99.8	0	57.9
L603 (1D2-17)	57.8	57.7	57.9	0

表2 计量回路的端子之间电压 V

端子号	A601' (1D3-1)	B601' (1D3-3)	C601' (1D3-5)
A603' (1D3-7)	0	100.2	100.1
B603' (1D3-9)	100.3	0	100.4
C603' (1D3-11)	100.2	100.1	0

2.2 付母 TV 二次回路改造

停运 220 kV 付母 TV, 此时变电站内保护、测量等取自于 220 kV TV 二次电压由 220 kV 正母 TV 经新电压并列屏输出。拆除原中央信号继电器屏上所有用于 220 kV TV 二次电压回路的电缆。此时 220 kV 付母 TV 端子箱至原中央信号继电器屏的电压电缆没有电, 可放心拆除, 但原中央信号继电器屏至各屏顶小母线的输出电压仍带电 (为新电压并列屏输出电压返供电), 在拆除接线时, 应防止电压触电、短路。

断开新电压并列屏内付母 TV 隔离开关位置开入端子 1D1-3, 1D1-7 接线 (见图 3), 使付母 TV 二次电压不能切入装置, 如图 2 所示 2GWJ 接点断开 (因新电压并列屏为强制并列状态, 防止运行 220 kV 付母 TV 后, 若二次接线错误导致电压短路等情况)。敷设 220 kV 付母 TV 端子箱至新电压并列屏二次电缆 (可同前

面一起敷设), 并接线, 电压并列屏内的电压电缆应接入切换前付母电压端子, 如图 2 所示。1D2-11, 1D2-15, 1D2-17, 1D3-7, 1D3-9, 1D3-11 端子。

运行 220 kV 付母 TV, 在新电压并列屏内进行 I, II 段电压核相试验, 确保 220 kV 付母 TV 二次电压回路接线正确, 两段电压可以并列。核相试验方法同定相试验方法, 但端子有别, 分别测量用于保护、测量回路的电压切换前端子 1D2-11, 1D2-13, 1D2-15 与电压切换后端子 1D2-43, 1D2-48, 1D2-53 之间电压, 分别测量用于计量回路的电压切换前端子 1D3-7, 1D3-9, 1D3-11 与电压切换后端子 1D3-28, 1D3-33, 1D3-38 之间电压, 同相端子间电压应为 0 V。

在新电压并列屏 1D1-3, 1D1-7 端子 (见图 3) 处接入取自于付母 TV 隔离刀闸位置的二次电缆, 并列 220 kV 正、付母线 TV 二次电压后, 拆除屏后母联位置开入端子 1D1-1, 1D1-9 (见图 4) 短接线, 接入取自母联断路器及刀闸位置的二次电缆, 完善所有接线。至此, 220 kV 母线 TV 二次电压回路改造工作全部完成, 接下来进行 110 kV, 35 kV 部分的改造, 方法相同。

3 改造需注意的问题

3.1 二次回路的保护

TV 相当于一个电压源, 当二次回路发生短路时将会出现很大的短路电流, 如果没有合适的保护设备将故障切除, 将会使 TV 及其二次回路烧坏, 其保护设备一般采用快速熔断器或自动空气开关。电压回路具体采用哪种保护方式, 主要取决于电压回路所接的继电保护和自动装置的特征。1 随着微机保护技术的成熟, 距离保护装置一般都具有性能良好的电压回路断线闭锁功能, 电压回路故障不会引起保护误动。对于本工程而言, 在接有距离保护的电压回路采用了熔断器作为电压回路的故障保护, 运行情况良好。《国家电网公司十八项电网重大反事故措施》2012 年修订版要求: TV 中性线不得接有可能断开的开关或熔断器等^[2]。但 TV 二次侧应在各相回路和开口三角的试验芯上配置保护用的熔断器或自动开关, 且应尽可能靠近二次绕组的出口处装设, 以减小保护死区, 通常安装在 TV 端子箱内, 端子箱应尽可能靠近 TV 布置。开口三角绕组不能短接, 否则在系统发生接地故障时会影响到其他次级电压的正确测量, 出现长时间接地故障时, 可能会造成 TV 二次绕组烧坏。

3.2 二次回路的接线

(1) 为减小回路压降, TV 二次回路一般采用 4 mm² 以上截面的电缆芯线, 特别是如本工程案例所示, 户外 TV 安装处与保护室距离较远时, 采用了 6 mm² 截面。TV 二次接线还要注意绕组的极性, 特别是开口

三角回路,在新投运时要认真检查其极性是否符合方向保护等要求。

(2) TV 二次回路接地的主要目的是防止一次高压通过 TV 绕组之间的电容耦合到二次侧时可能对人身及二次设备造成威胁。但如果有 2 点接地或多点接地,当系统发生接地故障,地电网各点间有电压差时,将会有电流从 2 个接地点间流过,在 TV 二次回路产生压降,该压降将使 TV 二次电压的准确性受到影响,严重时影响保护装置动作的准确性。在本工程案例中各电压等级的 TV 应统一采用了中性点接地,并且全站各 TV 二次回路共用一个零相电压小母线,在主控室一点接地。

3.3 二次回路的切换和并列

本工程案例中,变电站 220 kV 电气主接线为双母线接线,为了保证保护装置及测量、计量等设备采集的二次电压与一次对应,必须设置二次电压的切换和并列回路。双母线接线的母线二次电压并列条件:在一次母联或分段断路器在合闸位置,并且两侧的隔离刀闸也在合闸位置,当 1 台 TV 停运,只有停运的 TV 一次隔离刀闸分开,并且二次电压总开关断开时,二次回路才允许并列。在 TV 停运时,首先断开二次空气开关,防止由于 TV 隔离刀闸辅助接点问题或切换继电器问题,使得二次回路的电压倒送至一次侧,由于 TV 变比很大,一次的电容电流将使二次回路过载,造成正常运行的 TV 二次总开关跳闸,影响计量及保护装置的正

常运行^[3]。在双母线接线的变电站中,采用自动切换的方式,能做到一、二次操作的基本同步,一般使用双位置继电器,即使直流电源消失或隔离刀闸辅助接点接触不良,继电器接点将保持在原有位置,提高自动切换的可靠性。需要注意二次回路中的中性线不能经切换继电器的接点切换,防止因切换继电器的动作而使二次回路失去接地点。

4 结束语

220 kV 变电站母线 TV 二次回路改造是一项涉及运行间隔较多、危险点较多、较为复杂的工程,不仅要在改造过程中确保安全,还要在改造过程中不留隐患,确保各保护装置不能因为电压问题而发生不正确动作等。能否保证工程安全顺利完成,则需要设计、施工、验收等涉及各个环节的所有从业人员认真、尽责地做好各项工作。

参考文献:

- [1] 支叶青. 继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2010:241-247.
- [2] 国家电网公司. 国家电网公司十八项电网重大反事故措施(2012 年修订)[Z]. 北京:国家电网公司,2012.
- [3] 李 斌,黄奇峰,杨世海. 高压多绕组电压互感器二次负荷配置优化与改造工程实施[J]. 江苏电机工程,2012,31(5):5-8.

作者简介:

王德全(1978),男,江苏淮安人,高级技师,从事继电保护、直流专业工作。

Discussion on the Secondary Circuit Remoulding of a 220 kV Bus TV

WANG Dequan

(Huaian Power Supply Company, Huaian 223200, China)

Abstract: The distance protection and directional protection in 220 kV substation require a lot on the secondary voltage size and direction of bus TV. Therefore, during the period of secondary voltage loop reform, constant voltage must be kept and the problems of loop ground and voltage polarity must be avoid. A 220 kV substation bus TV secondary loop reform is introduced in this paper. Based on the introduction, some problems should be noticed for future similar projects are discussed.

Key words: TV; secondary loop; reform

(上接第 58 页)

Application of Distributed Fiber Optic Temperature Measurement System in Power Cables Online Monitoring

ZHANG Chunyang

(Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214061, China)

Abstract: With the popularity of smart grids, the distributed optical fiber temperature measurement technology has become a hot research area both at home and abroad. This paper introduces the research status of distributed optical fiber temperature measurement system, the basic principles and characteristics of Raman scattering measurement system, the structure of the cable temperature monitoring system based on fiber cable temperature measurement, and the application of distributed optical fiber temperature measurement system in the online monitoring of power cables. An actual example is taken to verify that the distributed optical fiber temperature measurement system is the most effective means to achieve fault diagnosis positioning in power cables online monitoring.

Key words: distributed optical fiber temperature measurement system; operation principles; online monitoring

基于高压调功器的冲击负荷平衡研究

黄 华,丁 勇,常宝立,陈赤汉
(南京南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211102)

摘 要: 针对工业轧机、电弧炉等冲击性负荷运行时,有功功率波动幅度大且频次密集的问题,提出采用高压调功器(HVPR)来镜像平衡冲击负荷造成的功率波动,维持电网频率稳定。文中介绍了高压调功器的组成和控制原理,冲击负荷平衡控制策略,并通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件对调功器的功率控制进行验证,最后给出了现场冲击负荷平衡试验波形。

关键词: 高压调功器;冲击负荷平衡;晶闸管阀组

中图分类号: TM711

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)04-0063-03

钢铁企业由于存在大量的轧机、电弧炉等冲击性负荷,正常生产时系统总负荷会出现幅度大、频次密集的有功功率波动,导致系统频率也出现大幅度波动,会对附近发电机组的电磁转矩造成影响,严重情况下,电弧炉冲击会引起发电机组内部谐振,造成机组长期疲劳损伤,冲击负荷还会对网架结构较为薄弱的地区电网的安全稳定运行产生不利影响^[1-4]。为避免冲击负荷对发电机组和电网系统造成的不利影响,文献[5]建立了有功冲击动态控制模型,通过实时计算电网的有功冲击承受能力,对随机的冲击负荷进行错峰控制,避免冲击负荷的瞬变叠加放大,破坏电网稳定,这种方案不可避免地会对日常生产造成干扰。

本文提出采用高压大容量调功器来镜像平衡(镜像平衡是指任一时刻,调功器功率和冲击负荷功率一升一降,两者功率之和平衡在某一恒定功率)冲击负荷造成的功率波动,高压调功器基于晶闸管三相交流调压原理^[6],通过改变晶闸管的触发角度,来改变热水锅炉的三相输入电压,从而无级调节锅炉消耗功率,使锅炉功率与冲击负荷功率镜像对称,达到总负荷稳定,避免了系统频率的剧烈波动。

1 调功器组成与控制策略

根据测算,1 min 内钢厂所有冲击负荷的最大功率波动约 150 MW,单套高压调功器容量 40 MW,共有 4 套调功器,接入 10 kV 母线。高压调功器由晶闸管阀组、负载电感、滤波器、热水锅炉组成,如图 1 所示。阀组由一定数目的反并联晶闸管(VT₁和 VT₂)串联组成,晶闸管阀组与负载电感 L₀ 三相串联,负载电感出线接额定功率为 40 MW 的热水锅炉,负载电感的作用是减小高压调功器运行中产生的谐波,降低阀组开通时的电流上升率。为了避免高压调功器运行中产生的谐波流入系统,配置由 L₁,C₁ 组成的 5 次滤波器和 L₂,C₂ 组成的 7 次滤波器。

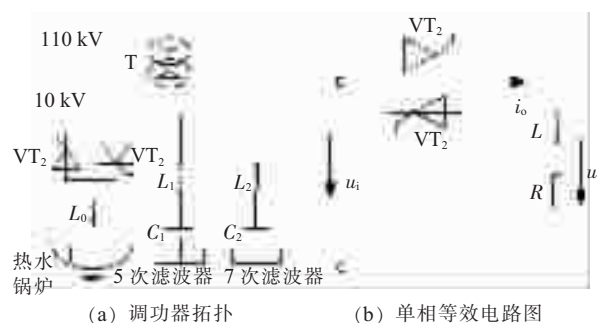


图 1 高压调功器拓扑及等效电路图

高压调功器与静止无功补偿器(SVC)相比,虽然都是基于三相交流相控调压原理,但有着本质上的区别。SVC 是按三相角形接线,它既可以对负荷无功进行补偿,使得补偿后的系统无功为 0,也可以对母线电压进行控制,维持电压稳定^[7,8];而高压调功器是按三相星形接线,通过调节晶闸管阀组的导通角度来调节热水锅炉的输入电压,从而调节热水锅炉消耗的功率,也即调功器只能吸收有功,对负荷有功进行镜像平衡,使得系统有功平衡在某一恒定功率,达到频率稳定的目的。由于热水锅炉是纯阻性负载,因此可以用电阻来等效,得到的高压调功器的单相等效电路图,如图 1(b)所示。

设输入电压 $u_i = \sqrt{2} U_i \sin \omega t$, 则输出电压有效值:

$$U_o = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} (\sqrt{2} U_i \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = U_i \sqrt{\frac{\theta}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha - \sin(2\alpha+2\theta)}{2\pi}} \quad (1)$$

式(1)中: α 为晶闸管阀组的触发角; θ 为晶闸管阀组的导通角;且 α 与 θ 所示关系^[1]:

$$\sin(\theta+\alpha-\varphi) = \sin(\alpha-\varphi) e^{-\frac{\theta}{\tan \varphi}} \quad (2)$$

式(2)中: $\varphi = \arctan(WL/R)$ 为负载阻抗角。

由式(1)、式(2)可知,输出电压有效值与导通角和触发角相关,而导通角与触发角的关系是一个非线性超越方程,因而输出电压与触发角之间没有确定的函数关

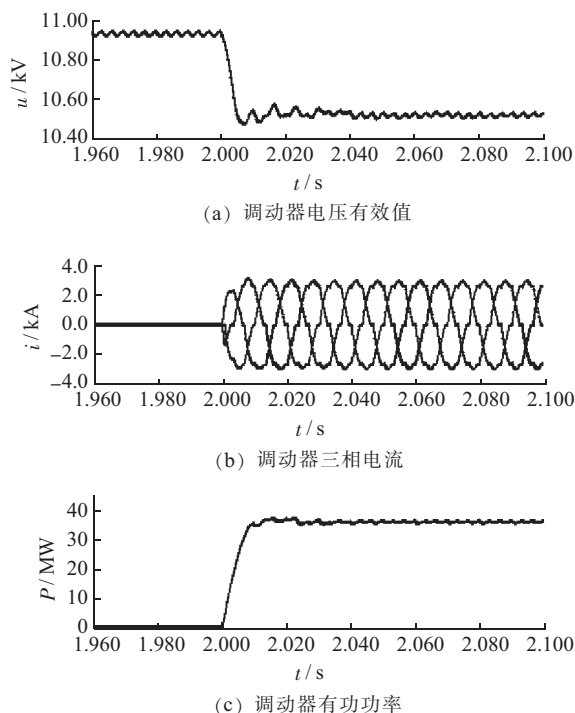


图5 高压调功器阶跃响应试验

4 试验验证

利用高压调功器去平衡钢厂内 2150 主传动生产线上的冲击负荷,冲击负荷波动范围为 0 到 50 MW,冲击负荷平均值 25 MW,设置高压调功器基值 35 MW,高压调功器最大出力 70 MW,平衡效果如图 6 所示。高压调功器对冲击负荷的波动功率进行了镜像平衡补偿,平衡后的总负荷功率曲线为一平滑的直线,达到了冲击负荷平衡的效果。

5 结束语

针对工业轧机、电弧炉等冲击性负荷运行时,有功功率波动幅度大且频次密集的问题,提出采用高压调功器来镜像平衡冲击负荷造成的功率波动,维持电网频率稳定。通过 PSCAD/EMTDC 仿真和现场冲击负荷平衡试验波形验证了基于高压调功器的冲击负荷平衡方案的正确性。

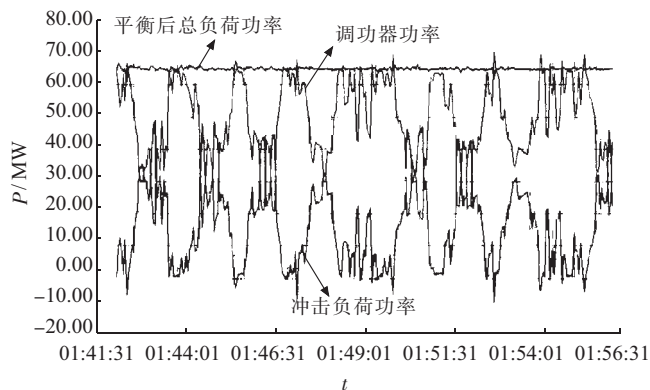


图6 冲击负荷平衡试验波形

参考文献:

- [1] 王建华,高卫恒,别朝红,等.冲击负荷对电力系统可靠性影响的分析[J].中国电机工程学报,2011,31(10):59-65.
- [2] 彭 卉,邹 舒,付永生,等.冲击负荷接入电网的电能质量分析与治理方案研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(1):54-61.
- [3] 刘丽霞,岑海凤,李晓辉,等.天津电网大容量冲击负荷对邻近发电机组影响的仿真研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(20):43-47.
- [4] 高 超,程浩忠,李宏种,等.大容量冲击负荷对地区电网暂态稳定性影响[J].电网技术,2008,32(1):31-35.
- [5] 叶海燕,宋明中,李振锋.区域电网有功冲击负荷动态控制系统开发[J].宝钢技术,2012(5):77-80.
- [6] 陈 坚.电流电子学—电流电子变换和控制技术[M].北京:高等教育出版社,2003:219-225.
- [7] 王云洁,胡 甬.SVC 电压稳定控制和抑制低频振荡交互影响研究[J].江苏电机工程,2013,32(1):23-25.
- [8] 黄 峰.静止无功补偿系统非线性最有控制器设计[J].江苏电机工程,2012,31(5):58-61.

作者简介:

- 黄 华(1984),男,江苏南通人,工程师,研究方向为电力电子技术
在电力系统中的应用;
- 丁 勇(1981),男,江苏南通人,工程师,研究方向为电力电子技术
在电力系统中的应用;
- 常宝立(1981),男,河北唐山人,工程师,研究方向为电力系统稳定
分析;
- 陈赤汉(1962),男,陕西西安人,工程师,研究方向为电力电子技术
在电力系统中的应用。

Research of Impact Load Balancing Based On High-voltage Power Regulator

HUANG Hua, DING Yong, CHANG Baoli, CHEN Chihan
(Nari-Relays Electric Co.Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In order to cope with the problems of large amplitude fluctuation and intensive frequency of active power brought by impact load, such as industrial mill and electric-arc furnace, high-voltage power regulator is used to maintenance frequency stability. The composition and control scheme of high-voltage power regulator and the control strategy for impact load balancing are introduced. Finally, simulations are implemented in PSCAD/EMTDC to validate the control strategy of high-voltage power regulator.

Key words: high-voltage power regulator; thyristor valve; impact load balancing

基于电压补偿原理的避雷器泄漏试验方法研究

甘强, 陈轩, 邵新苍, 吉亚民

(江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 直流参考电压 U_{1mA} 和 0.75 倍 U_{1mA} 下的泄漏电流测量是避雷器交接和例行试验项目之一。220 kV 及以上避雷器常采用多节单元, 由于避雷器制造工艺、均压环影响等原因, 同一相避雷器各单元的伏安特性存在一定差异, 当差异较大时, 必须拆除引线, 分单元进行避雷器直流泄漏试验。在对 220 kV 及以上避雷器伏安特性进行分析的基础上, 提出了 1 种基于电压补偿原理的避雷器直流泄漏试验方法, 设计了 1 台可调极性直流高压发生器。通过现场实用, 验证了试验方法的有效性。

关键词: 电压补偿; 不拆引线; 可调极性; 直流高压发生器

中图分类号: TM862

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)04-0066-03

直流参考电压 U_{1mA} 和 0.75 倍 U_{1mA} 下的泄漏电流测量是避雷器交接与例行试验项目之一, 可有效地反应避雷器阀片是否存在受潮、老化。220 kV 及以上电压等级避雷器每相分为若干单元, 由于制造工艺等原因, 各节避雷器的伏安特性存在一定差异, 甚至差异较大(偏差达到 5% 左右)。同时, 相关文献也提出避雷器均压环对直流泄漏试验存在一定的影响^[1-3]。针对此类避雷器须拆除上引线, 分单元进行避雷器参考电压及直流泄漏电流测试, 由此带来了检修时间的延长和大量的人力、物力投入。

本文在传统的直流高压发生器的基础上, 增加 1 台可调极性的直流高压发生器, 在下节避雷器下部法兰处施加一可调极性的直流电压, 与传统直流高压发生器进行配合, 使避雷器上下 2 个单元直流泄漏电流同时达到 1 mA, 一次性完成两节避雷器的直流参考电压试验后, 2 台直流发生器同步降压至 0.75 倍 U_{1mA} 可同时完成 2 个单元的直流泄漏电流测试。通过现场应用, 验证了试验方法的有效性。

1 传统测试方法的局限性

对两节型的 220 kV 避雷器, 传统不拆引线进行避雷器下单元直流试验的方法如图 1 所示。

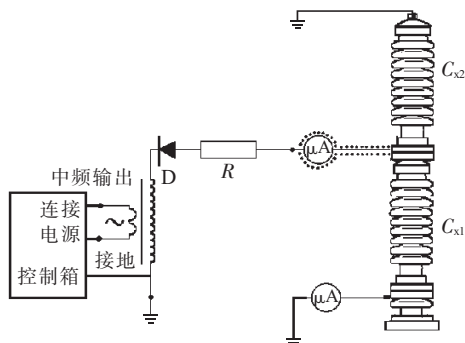


图 1 不拆引线进行避雷器直流试验原理图

图 1 中, 负极性直流高压施加于避雷器上下 2 个单元连接法兰处, 经一微安表测量避雷器 2 个单元的总泄漏电流; 拆除避雷器底部法兰与放电计数器的连接, 将底部法兰经另一微安表接地, 测量避雷器下单元泄漏电流, 计算 2 台微安表电流差值得到避雷器上单元的直流泄漏电流。传统方法存在以下局限性:

(1) 上下 2 个单元避雷器的伏安特性存在差异, 不可能同时到达 1 mA, 因此直流参考电压的测量需分 2 次进行; 同时避雷器 2 个单元的 0.75 倍 U_{1mA} 也不相同, 泄漏电流测试也需分 2 次进行。

(2) 当同相避雷器 2 个单元参考电压差异较大时, 在对参考电压较高的单元进行直流试验时, 试验设备可能出现过载。

如图 2 所示, 避雷器上下 2 个单元 U_{1mA} 相差约为 4 kV 时, 当 U_{1mA} 较大的避雷器单元泄漏电流达到 1 mA 时, U_{1mA} 较小的避雷器单元的直流泄漏电流已达到 8 mA。试验设备输出电流已远超出其额定电流(一般为 3 mA), 此时须拆除引线分单元进行试验。

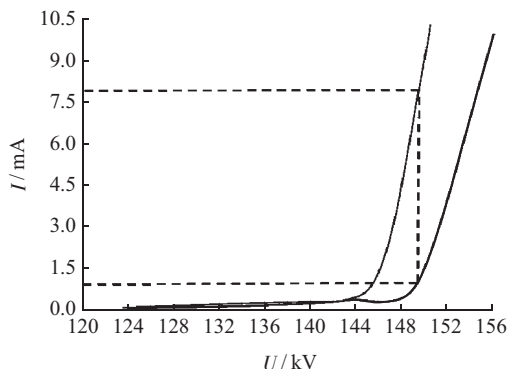


图 2 避雷器伏安特性曲线图

2 基于电压补偿原理的流测试方法

为了解决传统方法的局限性, 且提出一种基于电压补偿原理的不拆引线试验方法, 其原理如图 3 所示。

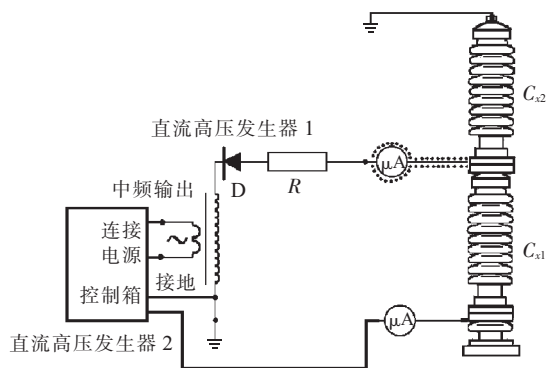


图3 电压补偿法运用于220 kV 避雷器直流试验原理图

图3中,直流高压发生器1为传统的负极性直流高压发生器,直流高压发生器2为可调极性的直流高压发生器,可根据试验情况输出正或负极性的直流高压。若避雷器下单元参考电压大于避雷器上单元,调节直流高压发生器1,避雷器上单元泄漏电流先达到1 mA时,保持直流高压发生器1的输出电压不变,选择直流高压发生器2输出极性为正极性,调节其电压,使避雷器下单元泄漏电流达到1 mA。避雷器上单元的参考电压为直流发生器1的输出电压,避雷器下单元的参考电压为直流发生器1和直流发生器2输出电压的绝对值之和。

将直流高压发生器1与直流发生器2的输出电压同步降为75%,避雷器下单元的泄漏电流为与避雷器底部法兰相连的微安表电流值,避雷器上单元的泄漏电流为2台微安表电流绝对值之差。若避雷器上单元参考电压大于避雷器下单元,在一定电压下保持直流发生器1输出电压不变,选择直流发生器2极性为负极性,预加电压5 kV,使避雷器上单元泄漏电流大于下单元。调节直流发生器1使上单元泄漏电流达到1 mA后,调节直流发生器2,使下单元泄漏电流也达到1 mA。读取并计算2个单元的参考电压,继而将直流高压发生器1与2的输出降为75%,读取并计算2个单元的0.75倍 U_{1mA} 下的泄漏电流。

3 可调极性倍压电路设计

直流发生器2为可调极性直流高压发生器,额定输出电压为5 kV,额定输出电流为3 mA,其倍压电路的原理如图4所示。

图4中D1至D7为二极管,通过切换开关接入电路;当D1至D6接入电路时,倍压电路输出正极性高压,如图5所示。当D2至D7接入电路时,倍压电路输出负极性高压,如图6所示。

为给避雷器泄漏电流提供通路,在输出端对地并联一泄流电阻,阻值为2 MΩ;对地并联一放电间隙,避免避雷器击穿后,直流高压发生器2承受过高电压。

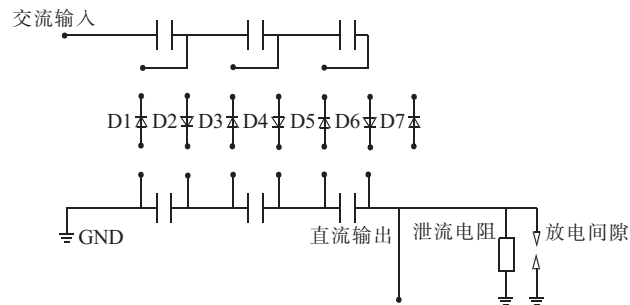


图4 可调极性倍压电路原理图

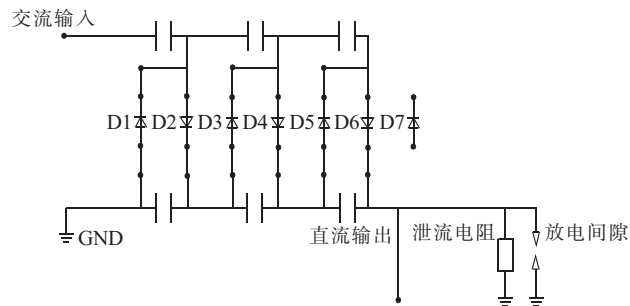


图5 可调极性倍压电路正极性输出原理图

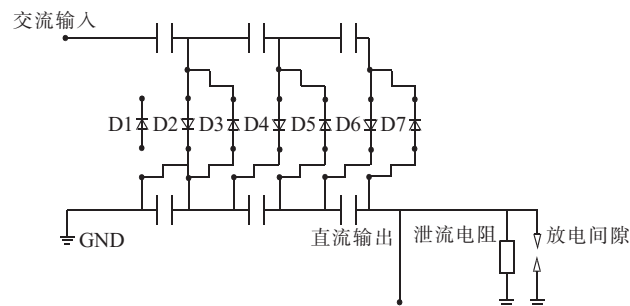


图6 可调极性倍压电路负极性输出原理图

4 测量逻辑设计

测量逻辑框图如图7所示。电流采样通过具有蓝牙通信功能微安表实现,微安表1、微安表2的泄漏电流读数通过蓝牙传输至仪器,计算出上节与下节避雷器泄漏电流,仪器内部处理单元根据计算结果自动调整可调极性直流高压发生器输出电压极性,达到电压补偿的目的。

5 现场应用

某500 kV变电站1号主变220 kV侧避雷器需进行例行试验,交接试验时该避雷器不带引上线进行测试,A相下单元 U_{1mA} 为160.6 kV, $I_{0.75U_{1mA}}$ 为10 μA;上单元 U_{1mA} 为157.4 kV, $I_{0.75U_{1mA}}$ 为8 μA。本次例行试验分别采用以下2种方式进行了测试。

首先用传统不拆引线测试方法对该相避雷器进行测试,第一步测试上单元,1 mA参考电压为156.7 kV,此时下单元泄漏电流为912 μA。第二步测试下单元,升压至158.8 kV时,避雷器下单元泄漏电流为937

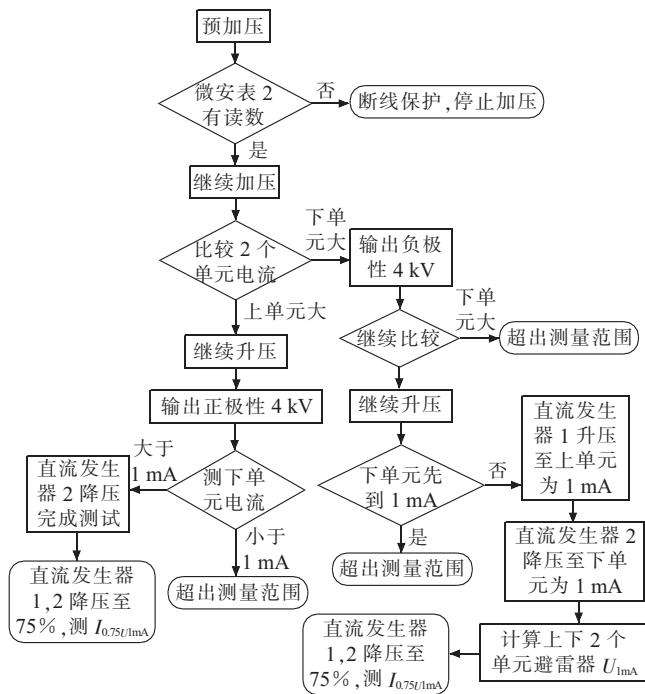


图 7 测量逻辑框图

μA , 避雷器上单元泄漏电流为 $2090 \mu\text{A}$, 总电流超过直流高压发生器 3 mA 的额定输出电流, 仪器过流保护动作, 传统不拆线测试方法已无法完成测量。

现场使用新研发的装置对该避雷器进行测试, 直流高压发生器 1 输出电压为 156.8 kV 时, 避雷器上单元泄漏电流达到 1 mA , 此时避雷器下单元泄漏电流为 $913 \mu\text{A}$, 调节直流高压发生器 2, 输出电压极性为正极性, 幅值为 3.1 kV , 此时避雷器下单元泄漏电流也达到 1 mA 。读取电压值后, 将 2 台直流高压发生器输出电压降为 75% , 计算 2 个单元的参考电压与泄漏电流, 试验数据如表 1 所示。

本次测试一次接线、升压, 同时完成了 2 节避雷器的测试; 直流参考电压测试方法与交接相比误差小于 0.5% , 泄漏电流测试结果与交接数据基本保持一致, 表明该方法与传统方法具有等效性。传统方法进行试

表 1 电压补偿法运用于 220 kV 避雷器直流试验数据

安装位置	本次试验数据		交接试验数据	
	$U_{1\text{mA}}/\text{kV}$	$I_{0.75U_{1\text{mA}}}/\mu\text{A}$	$U_{1\text{mA}}/\text{kV}$	$I_{0.75U_{1\text{mA}}}/\mu\text{A}$
下单元	159.9	9	160.6	10
上单元	156.8	6	157.4	8

验时, 避雷器底座几乎不承受电压; 电压补偿法测试时, 避雷器底座须承受数千伏的电压 ($< 5 \text{ kV}$), 在原理上存在测试误差。从现场实测的结果来看, 表面清洁过的避雷器底座绝缘电阻通常 $> 5000 \text{ M}\Omega$, 新方法造成的测量误差小于 $1 \mu\text{A}$, 在工程测量过程中可忽略。

6 结束语

(1) 220 kV 及以上电压等级避雷器各节的伏安特性存在一定差异, 当差异较大时, 传统不拆引线的试验方法因测试设备容量限制, 可能导致试验无法开展, 须拆除引线进行测试。

(2) 电压补偿法通过增加 1 台可调极性直流高压发生器, 可以在不拆引线条件下的完成避雷器的参考电压及泄漏电流测试。现场应用表明, 该方法与传统方法有较好的等效性, 具有实用推广意义。

参考文献:

- [1] 吴东文. 500 kV 氧化锌避雷器上节单元 $0.75U_{1\text{mA}}$ 泄漏电流测试误差分析[J]. 电瓷避雷器, 2012, 250(6): 62-66.
- [2] 秦家远. 雷击下金属氧化物避雷器 ATP 仿真模型分析[J]. 电瓷避雷器, 2007, 220(6): 41-44.
- [3] 王静君, 李文书, 杜积贵. 氧化锌避雷器带电测试方法应用分析[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(2): 57-59.

作者简介:

甘 强 (1978), 男, 重庆人, 工程师, 从事电气试验工作;
陈 轩 (1989), 男, 江苏南京人, 助理工程师, 从事电气试验工作;
邵新苍 (1989), 男, 江苏无锡人, 助理工程师, 从事电气试验工作;
吉亚民 (1972), 男, 江苏盐城人, 高级工程师, 从事高电压与绝缘技术研究工作。

Research on Arrester Leakage Tests Based on Voltage Compensation

GAN Qiang, CHEN Xuan, SHAO Xincang, JI Yamin

(Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China)

Abstract: The arrester current leakage tests for the case of DC reference voltage equals to $U_{1\text{mA}}$ and $0.75U_{1\text{mA}}$ are routine projects. The 220 kV and above arresters are often comprised of multi-section units. Since arresters' manufacturing processes and other factors affecting the pressure ring, some differences are existed between each unit's voltage characteristics in the same phase arrester. When the differences are relatively large, DC leakage tests must be carried out on each unit of the arrester with removing connecting lead. Based on the analysis of the 220 kV and above arrester's voltage characteristics, a DC leakage test method of arresters based on the principle of voltage compensation is proposed. Also, a DC high voltage generator which is capable to adjust its polarity is designed. The field tests validate the proposed test method.

Key words: voltage compensation; without removing connecting lead; adjustable polarity; DC high voltage generator

500 kV 线路远方跳闸保护运行分析及改进措施

虞晓洁,周云波
(常州供电公司,江苏 常州 213003)

摘 要:文中就常州电网 500 kV 线路远方跳闸保护的运行现状,结合运行校验中发生的误跳闸情况,对远方跳闸保护装置的配置方式及就地判别装置功能工作逻辑进行了分析,从现场运行、安全可靠的角度,对 500 kV 线路远方跳闸保护装置的选用、配置、设计、改造及运行操作方面提出了改进意见和整改措施。

关键词:远方跳闸;配置方式;整改措施

中图分类号:TM773

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)04-0069-03

500 kV 系统远方跳闸是指线路一次故障或异常(过电压、高抗故障、开关失灵)时,经由一定的媒介(如高频通道中的慢速通道、光纤通道)传输切除对侧开关的一种功能保护^[1]。基于电力系统安全要求,相关联线路保护收到远方跳闸命令后,迅速将与该线相连的 2 个断路器跳开,使故障点及时切除。常州地区 2 座 500 kV 变电站处于华东电网枢纽位置,担负着华东电网的西电东送,火水电的交汇,北电南送的重任。但因分期建设而不断改造扩建,远方跳闸保护型号较多,通道、跳闸逻辑等有所不同,远方跳闸装置的安全可靠运行直接关系着华东电网的安全运行。

1 500 kV 远方跳闸装置配置方式比较

1.1 远方跳闸配置原则

远方跳闸信号可以按传输方式分为采用非数字通道和数字通道 2 种,采用非数字通道传输方式在传输通道上易受各种干扰信号的影响,接点信号的传输可靠性较差,在运行中易误动。采用数字通道传输方式具有快而可靠的优点^[2]。因此过去对 500 kV 线路远方跳闸的配置原则:对采用非数字通道的,执行端应设置故障判别元件,如晋陵变装设 ABB 公司的 REL531 保护,远方跳闸通道为载波通道的慢速通道,加装了 ABB 公司的 REL511 就地判别装置;对采用数字通道的,执行端可不设置故障判别元件,如武南变、晋陵变装设 ABB 公司的 REL561 的线路保护。

1.2 远方跳闸逻辑的分析比较

因武南变分期建设而不断改造扩建,目前站内远方跳闸保护根据配置不同,跳闸逻辑分为 3 种方式。

(1) 方式 1,2 条线路保护仅有一套就地判别装置以及后备远跳逻辑 LDD 的配置。方式 1 采取“二取二”、“二取一”、“一取一”跳闸方式,此配置方式为最早期的,较为经济,仅用一套就地判别装置,缺点是判别装置故障时转为后备跳闸逻辑,不经判别跳闸,可

靠性低。另外当其中一路通道故障或停用时,需经延时跳闸,增加切除故障时间,影响系统稳定性。

(2) 方式 2,无就地判别装置的配置。无就地判别装置的保护利用分相电流差动通道,直接传送远方跳闸信号至对侧,跳对应断路器和线路主保护共用跳闸出口。由于采取直跳式容易受到干扰而误动,华东曾执行采用远方跳闸输入光耦增加 20 ms 延时以躲过干扰的反措,以提高远方跳闸保护动作可靠性。此方式优点为配置简单,比较经济,缺点为易受干扰而误动,可靠性相对较差。

(3) 方式 3,2 套线路保护分别配有就地判别装置的配置。此方式一路通道对应一套就地判别装置,每一套就地判别装置收到远跳信号后开放正电源,经就地判别装置判别,条件满足出口,实现远跳。其优点为 2 路通道,就地判别装置完全独立,2 套保护之间没有联系,回路简洁,操作方便,可靠性高。3 种配置方式比较如表 1 所示。

表 1 3 种远方跳闸配置方式比较

类型	可靠性	简单 复杂性	操作方便	是否需 改造	综合 评价
方式 1 配置	一般	接线 复杂	复杂	是	较差
方式 2 配置	一般	简单	简单	是	一般
方式 3 配置	高	较简单	简单	否	较好

通过分析 3 种配置方式及运行情况,可见方式 3 为今后优选方案,也是目前上级电网公司要求的配置方式。现最新要求所有远方跳闸回路需在接收端装设远方跳闸就地判别装置,远方跳闸命令需经本地就地判别后跳闸出口,远方跳闸就地判别装置采用一取一判别方式,并应包括低有功功率等电气量判据逻辑。

1.3 就地判别工作逻辑的分析比较

常州 500 kV 变电站投运的远方跳闸就地判别装置有 3 种,ABB 公司的 REL501,REL511 以及南瑞公司的

RCS-925A。

(1) ABB 公司的就地判别装置工作逻辑为通过其 I/O 接口输入通道信号, 由 CPU 作出逻辑判断后, 实现跳闸, 以型号 REL511 为例, 简单工作逻辑如图 1 所示。

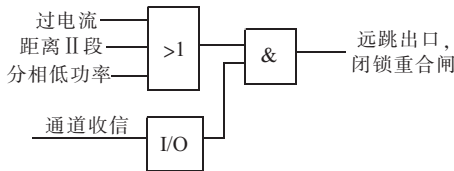


图 1 ABB 公司 REL511 简单工作逻辑

(2) 南瑞公司生产的以 RCS-925A 工作逻辑为例, 在通道(该通道投入且无故障)收信时启动, 收信启动动作后展宽 7 s, 开放继电器正电源, 判据满足后出口后跳相关断路器并闭锁重合闸。简单跳闸逻辑如图 2 所示。

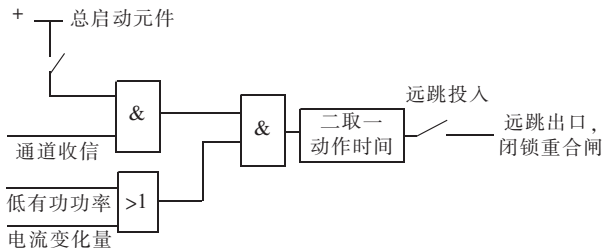


图 2 RCS-925A 远方跳闸简单工作逻辑

2 远方跳闸运行分析

远方跳闸保护装置在多年的运行中未发生过误动情况, 且运行良好。仅在一次定期试验中发生误跳开关的情况。

2.1 校验时的一次和二次设备状态

2009 年 9 月 3 日, 对武南变 500 kV 晋武 5287 线路保护校验, 校验时的一次运行状态: 晋武 5287 线路停役, 5012 断路器、5013 断路器为开关检修状态, 5011 断路器运行, 3 号主变为运行状态。具体接线如图 3 所示。

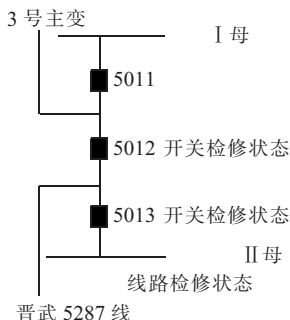


图 3 校验时的一次接线

二次保护配置情况: 第一块屏装有第一套线路保护 REL531 (V2.0) 和第一套远跳及就地判别装置

REL511 (V2.5), 第二块屏装有第二套线路保护 REL531 (V2.0) 和第二套远跳及就地判别装置 REL511 (V2.5)。在保护校验中需做联跳断路器试验, 因此线路 5012 断路器、5013 断路器为合闸状态, 远方跳闸为信号状态, 跳闸隔离单元 1LP 内插入大插把。

2.2 保护校验过程

在对 REL511 进行功能验收而校验远方跳闸功能时, 校验人员输入模拟远方跳闸信号, 保护动作出口, 此时保护为信号状态, 跳闸隔离单元 1LP 内插入了大插把, 实际应无相关开关跳闸, 但保护动作后本处于合上状态的 5012、5013 2 个断路器跳开了, 显然这是不正常的现象, 5012、5013 2 个断路器应判为误跳闸。

2.3 误跳闸原因分析

针对这一不正常现象进行检查分析, 保护的输入输出回路如图 4 所示。

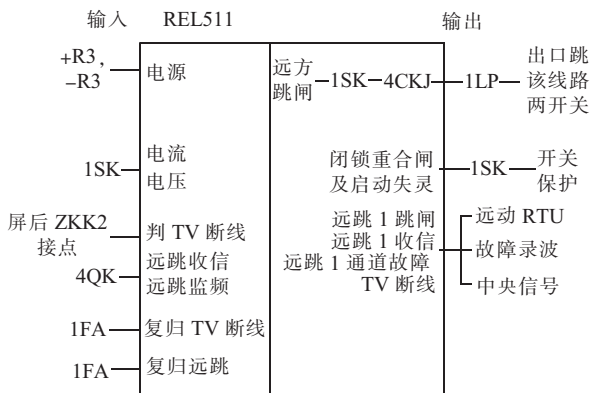


图 4 REL511 的输入输出示意图
(1LP 为远跳出口插把, 1SK 为远跳试验插把)

分析结果为 REL511 远方跳闸就地判别装置的闭锁重合闸回路 (BLOCK AR1, BLOCK AR2) 经试验插孔 1SK 的 10、11 分别接入 2 个断路器失灵保护的跳闸回路, 由失灵重跳回路跳开 5012 断路器和 5013 断路器, 而 REL511 远方跳闸就地判别装置原理图上此回路仅标明闭锁重合闸。即现场在停用远方跳闸时在断路器跳闸隔离单元 1LP 内插入大插把, 仅隔离远跳的跳闸出口, 并没有隔离试验插孔失灵回路, 所以在做试验时失灵回路仍然是通的, 远方跳闸出口后保护装置给 5012 断路器、5013 断路器保护 REL551 发了失灵重跳信号, 导致 5012 断路器、5013 断路器误跳闸。

2.4 对回路检查及整改

由此现场对此类接线方式远方跳闸的停启用操作进行了整改, 规定停用时在断路器跳闸隔离单元内插入了大插把以及在 1SK 试验插孔单元内闭锁重合闸及启动失灵插孔内插入小插把。通过上述改变操作在不改动接线情况下克服了回路存在的不合理, 并对其他回路进行检查, 以防也存在此问题。针对常州 500 kV 变电站几种不同的接线方式, 对远方跳闸的停启用

操作总结,有以下几种操作方式:

(1) 无就地判别装置,如晋陵变和武南变的 REL561,RCS-931D 等,远跳停用操作远跳投退断路器;

(2) 就地判别的跳闸、闭锁重合、启动失灵均经独立出口,如武南变 REL561+REL511 等配置,远跳停用操作独立出口插把(压板);

(3) 就地判别的跳闸、闭锁重合经独立出口,远跳不启动失灵,如武南变 REL531+REL501,REL521+RCS925 等配置,远跳停用操作独立出口插把(压板);

(4) 就地判别的跳闸经独立出口,闭锁重合、启动失灵不经独立出口,如武南变的 REL531+REL511,停用远方跳闸同时操作独立出口和试验插把;

(5) 就地判别无独立出口,只有试验插把,远跳不启动失灵,如晋陵变 REL531+REL511 配置,远跳停用操作试验插把;

(6) 就地判别无独立出口,只有试验插拔,启动失灵,如武南变 REL521+REL501 配置,远跳停用操作试验插把。

3 改进建议和措施

3.1 回路及操作改进意见

对远方跳闸保护的接线采用跳闸、闭锁重合闸(或启动失灵)均经就地判别装置独立出口的方式,此接线方式较为简单、直接、可靠,操作起来简单明了。因此对于就地判别装置无独立出口,借线路主保护出口的接线方式应加装完全的独立出口插把(压板);部分保护闭锁重合闸或启动失灵不经独立出口的应改接线,保证就地判别装置的跳闸、闭锁重合、启动失灵等出口均经就地判别装置独立出口插把(压板),出口与主保护完全独立,优化操作步骤。可以减少误操作、漏操作的危险性,保障电力系统的安全稳定运行。对暂时难以改接线的情况应在停启用操作上注意,停用时应完全隔离出口、闭锁重合闸、启动失灵等出口。

3.2 是否要启动失灵的建議

因设计原因,常州 500 kV 变电站内有一部分远方跳闸动作后启动失灵保护,有一部分则不启动失灵保护。基于常州 500 kV 变电站内所有线路均为短线路,

且没有装设高抗,结合常州地区实际运行状况,对这 2 种情况进行比较,则认为短距离以及没有装设高抗的线路采用不启动失灵保护的接线较好。

首先失灵保护的原则是不考虑 2 个断路器同时失灵,对于失灵保护动作后发远跳信号跳对侧断路器的情况,对侧保护收到远跳信号后经就地判别三跳相关断路器并闭锁重合闸,已不需要再次启动失灵。其次在对侧线路远端故障,过电压情况启动远方跳闸的情况下,装置收到远跳信号,若远跳出口的同时启动失灵保护,此时断路器拒动未能跳闸,但此时故障电流有可能达不到失灵保护启动设定值,失灵保护启动条件不满足,无法动作出口,设计失灵回路只起到了失灵重跳的作用,失灵回路没有实际意义。

3.3 对保护定期校验的要求

加强保护的定期校验及试验,必须针对多种型号、不同配置方式的远方跳闸制定全面可靠的试验项目和方案,有条件时安排运行方式进行 500 kV 线路实际联动试验,及时发现问题,确保校验质量和试验安全,提高装置的运行健康水平,从而提高可靠性。

4 结束语

综上所述,提高远方跳闸保护装置的可靠性,从变电运行角度在远方跳闸保护回路、停启用操作等方面进行整改,消除安全隐患。并在运行维护中加强保护的定期校验及试验,提高保护装置的可靠性,使 500 kV 远方跳闸保护装置不断改进,完善,为提高 500 kV 系统安全运行发挥积极作用。

参考文献:

- [1] 申芸,王晓洁.浅析 500 kV 线路保护的远方跳闸功能[J].江苏电机工程,2011,30(2):36-37.
- [2] 张全元.变电运行现场技术问答[M].2 版.北京:中国电力出版社.2009:342.

作者简介:

虞晓洁(1983),女,江苏常州人,工程师,从事 500 kV 变电站监控运行技术管理工作;

周云波(1962),男,江苏常州人,研究员级高级工程师,从事供电企业生产技术管理工作。

Analysis of 500 kV Transmission Line Remote-tripping Protection and Improvements Measures

YU Xiaojie,ZHOU Yunbo

(Changzhou power supply company, Changzhou 213003, China)

Abstract: A detailed introduction is given to the Changzhou 500 kV grid line remote-tripping protection configuration wiring mode in this paper. Combing the introduction to the accidents of protection mal-operation, the remote-tripping protection configuration mode and operational logic of Local discriminating devices are analyzed. Based on the analysis, several improvement measures and suggestions are provided from the views of field operation and reliability.

Key words: remote-tripping; configuration mode; improvement measures

配电变压器供应商生产制造能力评价体系研究

薛祥¹, 张丹丹², 周志强², 刘亚青²

(1.江苏省电力公司物资供应公司, 江苏南京 210036; 2.华中科技大学, 湖北武汉 430074)

摘要: 配电变压器对电网安全非常重要, 需对供应商生产制造能力进行评价。文中采用了层次分析法, 结合配电变压器生产过程中各个关键节点, 形成了配电变压器供应商生产制造能力评价体系, 为规范供应商行为, 提高业主单位对产品质量监督与管理提供了一定的参考依据。

关键词: 配电变压器; 供应商; 评价体系; 层次分析法

中图分类号: TM46

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)04-0072-03

配电变压器直接面向电力用户, 是配电网关键设备, 每年各电网公司系统新入网配电变压器数万台, 其运行工况、运行质量直接关系电网的安全运行^[1-3]。2009年以来, 国家电网公司、南方电网公司采用集中招标方式采购变压器, 企业竞争激烈。国内不少配电变压器生产企业经济效益下滑明显, 由此导致一些企业降低产品质量去恶性竞争, 2009年至2011年配电变压器不合格率依次为24.1%, 30%, 31%, 其抽检合格率一度低至70%。网上运行变压器产生事故以近5年的产品为多, 电网安全不容乐观^[4]。由于配电变压器生产技术较为简单, 生产技术门槛比较低, 因此很多中小企业均参与其中。数量众多的供应商亦对供应商的管理提出了要求。根据最近几年的抽查结果显示, 国内中小型企业生产的中小容量电力变压器的问题较为突出^[5]。

基于上述形势, 本文采用层次分析法, 针对配电变压器生产全寿命周期的各个环节进行综合分析, 提出了配电变压器供应商生产制造能力评价体系。

1 层次分析法

配电变压器生产制造过程复杂, 生产制造过程中影响其质量的因素众多, 需要对配电变压器生产制造过程进行深入的分析, 提取关键要素, 以达到科学、快速地评价配电变压器生产制造能力的目的。配电变压器生产制造过程涵盖从配电变压器的设计到最终出厂试验整个过程。其中产品设计开发质量、原材料质量把控情况、生产工艺过程及质量控制、出厂试验情况是其关键要素。而相关要素之下, 又可以细分为不同的要点, 以原材料质量把控情况为例, 可以分为电磁线、硅钢片、变压器油、绝缘等相关其他原材料的评价分析。

在众多评价方法中, 有比较评判法、主观评判法、层次分析法等。采用比较评判法不利于配电变压器这

种供应商数目较大时, 评价节点较多的产品; 主观评判法则由于人为主观性太大, 易遭质疑。而层次分析法则适用于这种评价节点多、评价对象数目大的情况。基于此, 本文选定采用层次分析法作为分析方法。

层次分析法(AHP)是1971年由Satty提出的一种实用的多因素决策方法。该方法以其定性与定量相结合处理各种决策因素的特点, 以及系统、灵活、简洁的优点, 迅速地在社会、经济等领域中得到广泛应用^[6-9]。AHP的思想是首先通过建立清晰的层次结构来分解复杂问题, 其次引入测度理论, 通过两两比较, 用相对标度将人的判断标量化, 并逐层建立判断矩阵, 然后求解各判断矩阵的权重, 最后计算方案的综合权重并排序。在采用AHP法解决复杂的决策问题时, 由单个专家的判断来建立判断矩阵往往带有一定片面性^[10], 为实现决策的科学性与民主, 可由多个专家来参与两两比较^[11]。但是由于目前还没有任何一个专家可以准确地说配电变压器供应商评价体系各个指标权重, 如何计算权重成为本体系的一大难点。其次, 由于配电变压器生产过程很多指标难以量化, 如何进行规范性量化, 成为本评价系统的又一难点。

基于上述情况, 本评价系统采用如下处理方式:

(1) 初始权重分配采用平均指标分配, 从上级指标往下分配, 后续根据设备运行的数据库反馈修改指标权重, 即: 准则层权重根据准则数目平均分配, 再根据方案层则根据对应的准则层指标下属方案数目平均分配。根据权重分配原则, 准则层的权重 $Q_{\text{准则层}}$ 为:

$$Q_{\text{准则层}} = 1/N \quad (1)$$

式(1)中: N 为准则层的个数。

而方案层的权重 $q_{\text{方案层}}$ 为:

$$q_{\text{方案层}} = 1/n \times Q_{\text{准则层}} \quad (2)$$

式(2)中: n 为准则层的下属方案层的个数。

(2) 评分采用评价人员主观评分, 取平均值的方法。由系统提供评分方案, 由设备供应商依据方案层内容进行答辩, 评分人员根据答辩内容及厂家实际情况进

行评分,取最终得分的平均值。

(3) 取 M 名供应商,依据上述方法进行评价打分,提供其得分排名,形成矩阵 A ,并根据运行统计数据,依据其故障率形成矩阵 B ,对 A, B 进行归一化处理,形成矩阵 A_g, B_g , 归一化公式:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} \quad (3)$$

式(3)中: $X=\{x_{ij}\}; Y=\{y_{ij}\}; X$ 为原始矩阵; Y 为归一化后矩阵; $\bar{x}_j$ 为第 j 列平均值; S_j 为标准差。

对比 A_g, B_g , 采用穷举法反复修改指标权重,使 A_g 与 B_g 相同,处理流程如图 1 所示。

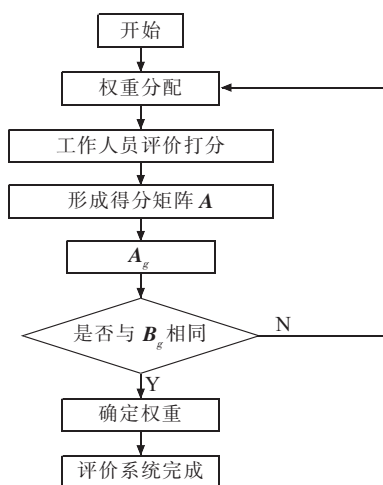


图 1 处理流程图

2 配电变压器供应商生产制造能力评价体系

依据配电变压器供应商生产制造能力评价要素,配电变压器供应商生产制造能力评价指标体系应从产品设计开发能力、原材料质量把控情况、生产工艺过程及质量控制、出厂试验能力、总体质量管理体系 5 个方面来考虑。

(1) 产品设计开发能力是保证产品最终质量的前提。评价供应商设计能力的首要要素为该供应商对产品设计的重视与投入程度,其直接体现在企业的设计研发资金占销售收入比例以及研发人员比例,其次能直接量化设计能力的指标有企业自行研发的通过国家变压器质检中心试验的新型产品数量以及企业新产品数量占总产品数量比例,同时还应该关注供应商在与客户交流时能否保证设计技术资料的完整性,这直接关系到供应商能否按照客户的特殊要求来进行设计的变动与产品的改造。其中,产品设计开发能力的下属方案层为:

- ① 设计研发资金占销售收入比例;
- ② 研发人员比例;
- ③ 自行研发的通过国家变压器质检中心试验的

新型产品数量;

- ④ 企业新产品数量占总产品数量比例;
- ⑤ 设计技术资料完整性。

(2) 原材料质量把控情况是企业开展策略采购行为过程中的供应商绩效表现。对于配电变压器这一复杂的系统来说,任一主要原材料存在质量问题都会导致最终的产品不合格。为此,供应商须建立自己的原材料供应商评价体系,同时要有配电变压器主要原材料的进厂质量控制方法。其中,原材料质量把控情况的下属方案层为:

- ① 原材料供应商评价体系;
- ② 原材料进厂质量检验标准;
- ③ 硅钢片进厂质量控制;
- ④ 铜线材进厂质量控制;
- ⑤ 变压器油进厂质量控制;
- ⑥ 变压器油箱进厂质量控制;
- ⑦ 选择原材料性能与经济性把控规范。

(3) 生产工艺过程及质量控制是从主要生产环节中提取关键要素进行评价,同时还应关注供应商生产过程中的不合格品的处理情况、成品与原材料、零部件的追溯性情况。其中,生产工艺过程及质量控制的下属方案层为:

- ① 工艺控制文件及执行情况;
- ② 硅钢片剪叠工艺及质量控制;
- ③ 绕组制作工艺及质量控制;
- ④ 引线焊接工艺及质量控制;
- ⑤ 线圈预装工艺及质量控制;
- ⑥ 器身装配工艺及质量控制;
- ⑦ 总装质量控制;
- ⑧ 器身干燥处理及真空注油质量控制;
- ⑨ 生产过程不合格品的处理情况;
- ⑩ 成品与原材料、零部件的追溯性情况。

(4) 配电变压器的出厂试验质量把控情况是包含对供应商出厂试验能力、试验设备、出厂试验项目等的评价以及是否有不合格的记录情况,不合格品的记录与处理体现了供应商对最终质量的重视程度。其中,出厂试验情况的下属方案层为:

- ① 试验项目及设备情况;
- ② 试验执行及记录情况;
- ③ 试验设备维护及校准情况;
- ④ 试验不合格品记录及处理。

(5) 总体质量管理体系是考察配电变压器供应商对 ISO 9000 的执行情况。其中,总体质量管理体系的下属方案层为:

- ① 质量体系认证情况;
- ② 质保职责如何保证;

- ③ 质量记录保持情况;
- ④ 图纸、工艺规程和相关文件如何分发控制;
- ⑤ 设备管理情况。

综合上述分析,以产品设计开发能力、原材料质量把控情况、生产工艺过程及质量控制、出厂试验能力、总体质量管理体系 5 个方面建立变压器供应商制造能力作为准则层,在每一评价指标的具体评价内容中选取最为有效、实用的且可见的项目构建配电变压器供应商评价体系方案层,形成配电变压器供应商生产制造能力评价指标体系,如图 2 所示。

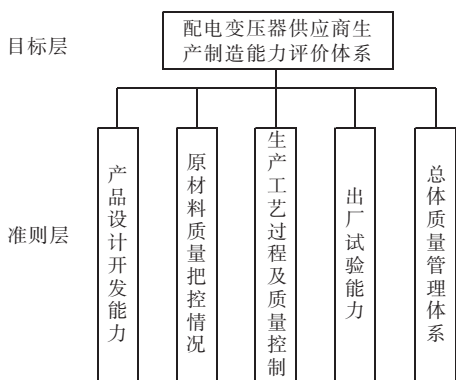


图 2 配电变压器供应商生产制造能力评价体系

根据初始权重分配原则,各一级指标(产品设计开发能力、原材料质量把控情况、生产工艺过程及质量控制、出厂试验能力、总体质量管理体系)对供应商生产制造能力的评价影响程度相同,因此认为一级指标间的相对权重相同,均为 20%。而针对“产品设计开发能力”一项,由于其下属方案层共有 5 项,则每项的权重均为 20%,则在整个系统中的权重则为 $20\% \times 20\% = 4\%$,即“设计研发资金占销售收入比例”、“研发人员比例”、“自行研发的新产品数量”、“新型产品数量占总产品数量比例”和“设计技术资料完整性”占总系统的权重各为 4%。方案层的量化原则依据实际运行经验和工艺要求共同制定,分值为 100 分,评价人员可根据实际运行经验进行评价打分。

3 应用案例

根据上述评价系统,对 A,B,C,D 4 家配电变压器供应商进行了评价,评价结果如表 1 所示。

表 1 供应商评价

供应商	得分
A	92
B	90
C	85
D	63

其中,A,B 供应商为国内知名生产厂商,电力变压器销售量均位居全国前 10;C 供应商为中型配电变

压器生产企业,企业引入了完善的生产管理制度,产品出口至日本、巴基斯坦等国;D 供应商为某小型变压器生产企业,从事配电变压器生产年限较短,相关管理规范尚未到位。从该评分可以看出,本体系能有效评价供应商生产制造能力。

4 结束语

针对目前配电变压器生产企业存在的质量问题,创造性提出配电变压器供应商监督评价体系,采用层次分析法,结合实际运行经验,采用平均分配权重,后续经验数据修正的方法,构建整个评价体系。依据配电变压器供应商生产制造能力评价要素,通过分析大量国内外配电变压器领军企业数据及管理经验、国家/行业标准及规程,制定了可操作性强,能切实反映实际过程中的关键可见环节的评价指标体系以及指标量化原则。从产品设计开发能力、原材料质量把控情况、生产工艺过程及质量控制、出厂试验能力、总体质量管理体系 5 个方面建立了配电变压器供应商生产制造能力评价指标体系,重点评价供应商生产制造能力以及质量管控机制,可间接掌握配电变压器生产制造过程的质量控制情况。为配电变压器供应商监督评价提供了强有力的工具。

参考文献:

- [1] 孙 莉. 并列运行配电变压器经济运行软件设计[J]. 江苏电机工程. 2012,31(6):43-46.
- [2] 吴 鹏,陆云才,陈铭明,等. 江苏电网非晶合金变压器综合评估[J]. 江苏电机工程. 2013,32(3):1-5.
- [3] 陈荣华,叶 勇. 高能耗配电变压器的节能改造[J]. 江苏电机工程. 2009,28(3):39-41.
- [4] 陈金猛,孙 萌,李志新. 基于全寿命周期的配电变压器质量管控方法研究[J]. 中国机电工业. 2012, 05(12):120-122.
- [5] 陈金猛,毕天姝,王庆杰,等. 电力变压器抽检(抽查)质量问题分析及管控措施研究[J]. 变压器,2014, 51(1):62-65.
- [6] 汪 勇,魏 巍. 电子商务网站的层次分析法评价模型构建[J]. 湖北大学学报(自然科学版),2010,32(01): 50-53.
- [7] 王小云,蓝少华. 档案信息质量评价之指标权重分析及运用——基于层次分析法[J]. 档案学通讯,2010,01(1):41-45.
- [8] 张国方,孙翠伟. 基于层次分析法对我国电动汽车市场的研究[J]. 上海汽车,2010,01(11):35-37.
- [9] 赵 颖,赵庆国. 基于层次分析法的中小企业自我评价模型及其应用[J]. 现代经济(现代物业下半月刊), 2009,08(2):3-5.
- [10] 李春好,孙永河,贾艳辉,等. 变权层次分析法[J]. 系统工程理论与实践,2010,30(4):723-731.
- [11] 丁家玲,叶金华. 层次分析法和模糊综合评判在教师课堂教学质量评价中的应用[J]. 武汉大学学报(社会科学版),2003, 56(2):241-245.
- [12] 赵静月. 变压器制造工艺[M]. 北京:中国电力出版社,2009: 123-136.

火电厂净烟气烟道流场特性分析及流量测点选择

张振义¹, 邹磊²

(1.国华徐州发电有限公司, 江苏 徐州 221166; 2.江苏方天技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:针对火电厂脱硫系统后净烟气烟道内烟气流量及污染物排放测量准确性较差的问题,采用计算流体力学(CFD)软件对某135 MW机组脱硫系统后净烟气烟道内流场特性进行了数值模拟,分析了不同烟气流量下烟道内的流场分布特性。结果表明,烟气流量的变化对烟道内的速度分布影响不大,速度最均匀的区域出现在下部水平烟道的中部区域,在该区域安装流量测点较好。

关键词:净烟气烟道;流量测量;数值模拟

中图分类号:TK223.6

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)04-0075-03

火力发电厂烟气排放流量是环保监测的重要数据^[1],烟气在线监测设备大多安装在烟囱前的烟道上。由于烟道内烟气流动复杂,随意布置的流量测点无法合理反映实际流量,烟气流量的测量精度无法达到规范要求。燃煤机组改建脱硫工程后,由于场地空间限制,脱硫系统后净烟气通往烟囱的烟道较短,且存在多处拐角,这些均给烟气流量测点的安装带来了困难。由于测点安装位置不当,在线监测设备监测到的流量值往往波动较大、精度较低,有的甚至出现较长时间无流量值的情况,而且在不同工况下,由于烟气量的不同,相同位置的流场分布也可能会发生改变。若测点安装在涡流区还会引起监测设备的强烈震动^[2]。目前,火电厂普遍存在由于烟气流量测点安装位置不当造成测量值准确性差的问题。数值模拟作为一种成熟的研究技术在电站锅炉流场分析中得到了广泛的应用^[3,4]。

1 计算模型及边界条件

1.1 计算模型

数值计算的物理模型采用实际的净烟气烟道的结构数据,计算区域为从脱硫系统的烟气换热器(GGH)出口连接处到烟囱烟道连接处的净烟气烟道的连接面,计算模型如图1所示。从图1中可看出,烟气自GGH流出后至下行烟道,经转弯至下部水平烟道,再转弯至上行烟道,进一步转弯至上部水平弯曲烟道,最后至烟囱烟道连接处。

计算模型采用烟道的实际结构尺寸,其中的坐标轴为:X向基本为烟气的主流方向,零点设定在GGH出口烟道的轴线处;Y向为高度方向,坐标值采用工程实际的标高数值;Z向为烟道的深度方向,零点设定在下部水平烟道的轴线位置。本文中所指的下部烟道包括了GGH后下行烟道、转弯、下部水平烟道及

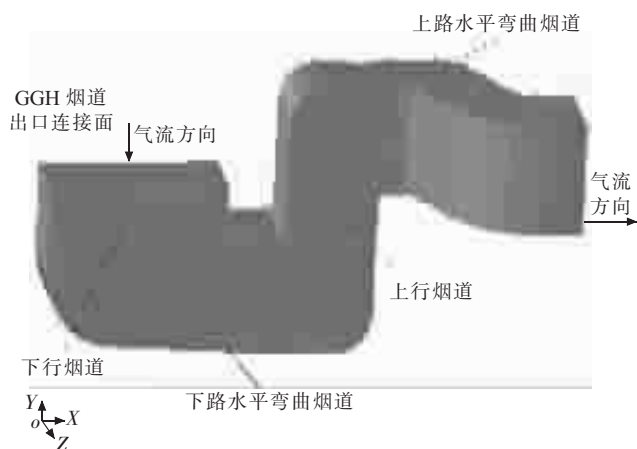


图1 净烟气烟道流场计算区域示意图

进一步转弯后的上行烟道;上部水平弯曲烟道则主要是指下部上行烟道转水平后的、为适应烟囱位置的水平弯曲烟道。

采用 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型来模拟烟道内气相湍流流动,其控制方程包括连续性方程、动量方程、能量方程、 k 方程、 ε 方程。若不考虑热交换的单纯流场问题,则不需要包含能量方程^[5]。上述控制方程可表示为如下通用形式:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho V\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S \quad (1)$$

在三维直角坐标系下, $k-\varepsilon$ 双方程模型的控制方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\Phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\Phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\Phi)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial\Phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma \frac{\partial\Phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma \frac{\partial\Phi}{\partial z}) + S \end{aligned} \quad (2)$$

式(1,2)中: Φ 为待求解的物理量; Γ 为扩散系数; $\text{div}(\rho V\Phi)$ 为对流项; $\text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi)$ 为扩散项; S 为源项。对于特定意义的 Φ ,具有特定的量 Γ 和 S 。在通用形式方程中,当 Φ 分别为1, $U(u, v, w)$, k , ε 时,分别对应连续性方程、动量方程、 k 方程和 ε 方程。

1.2 边界条件

按照设计烟气量 $1\,012\,604\text{ Nm}^3/\text{h}$ 和 50% 设计烟气量共进行了 2 个工况条件的数值计算, 烟气温度按照设计值 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 计算。入口采用流量边界条件, 出口采用压力边界条件, 压力按照设计值给定, 设定烟气流动与壁面无滑移且壁面按绝热处理。收敛残差标准设定为 10^{-4} 。为简化计算, 视烟气为单一气体, 不考虑不同烟气成分对计算结果的影响。

2 数值计算结果

2.1 净烟气烟道内流场特性分析

净烟气烟道在 100% 设计烟气量工况下的流场分布如图 2、图 3 所示。其中, 图 2 为烟道流场速度分布立体图, 以下部水平烟道轴线垂直面和上部水平弯曲烟道的 3 个不同标高水平面上的速度分布来反映整个烟道内的速度分布情况; 图 3 为净烟气烟道内流场速度矢量分布图。

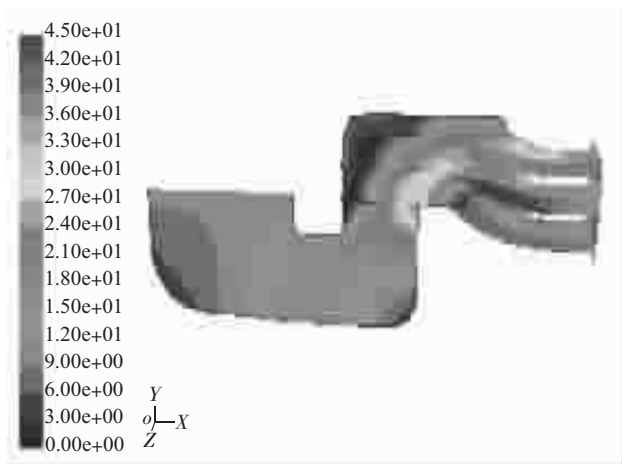


图 2 设计烟气流量工况下烟道流场速度分布立体图

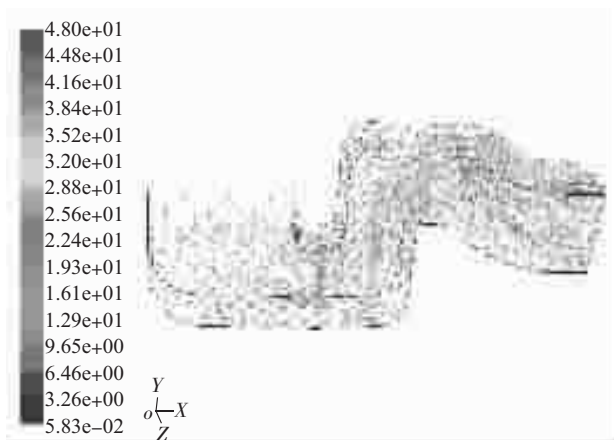


图 3 烟道流场速度矢量分布图

从图 2 和图 3 可以看出, 烟道内的速度场整体情况: GGH 后烟道下行转弯进入下部水平烟道后, 烟气速度趋于均匀; 烟气继续流动经水平转垂直转弯后, 在上行过程中, 除弯头局部出现低速区域外, 速度也较均

匀; 但在烟气再转水平流动时, 由于垂直转水平转弯和为适应烟囱布置的烟道水平弯曲的存在, 导致这水平转弯烟道开始前的上部转弯区 (图 2、图 3 中的左上角) 出现一个低速回流涡流区; 此后由于烟道的 2 个连续转弯和上部水平弯曲烟道的尺寸较短, 导致整个上部水平弯曲烟道内速度分布严重不均匀。

净烟气烟道局部截面上速度分布情况如图 4—6 所示。其中, 图 4 为下部烟道轴线垂直面 ($Z=0$) 上的速度分布, 图 5 为上部水平弯曲烟道轴线水平面 (标高 $Y=12\,000\text{ mm}$) 上的速度分布, 对应下部烟道, 图 6 则为下部水平烟道中部 ($X=7200\text{ mm}$ 处) 垂直 X 轴的截面、上行烟道 ($X=11\,526\text{ mm}$ 处) 垂直 X 轴的截面上和烟道出口垂直面上的速度分布, 以反映烟道在 Z 向上速度分布的均匀性。

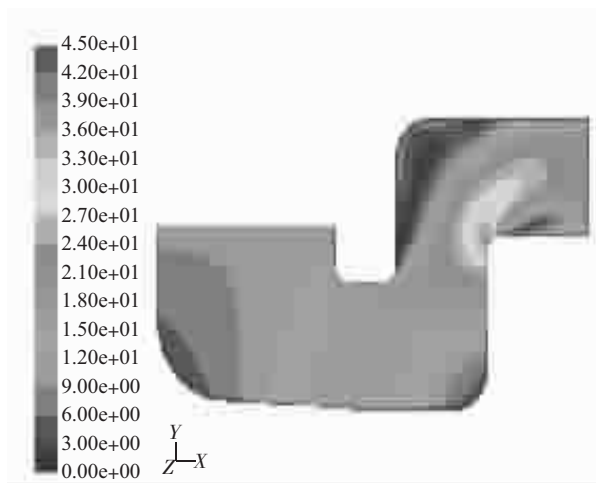


图 4 下部烟道轴线垂直面 ($Z=0$) 上的速度分布

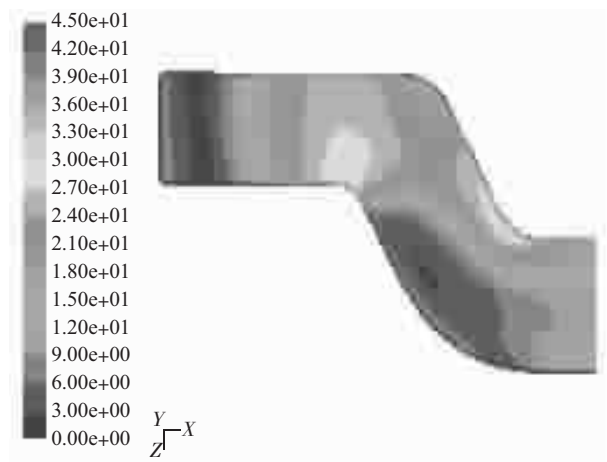


图 5 上部水平转弯烟道轴线水平面 ($Y=12\,000\text{ mm}$) 上的速度分布

从图 4 和图 5 可以看出, 在上部水平弯曲烟道内侧、上部出现高速区, 而外侧、下部出现低速区。从图 6 可以看出, 为了适应烟囱的布置, 通往烟囱的弯曲烟道尺寸较短, 从而导致这种不均匀分布一直延续到出口面。对于下部烟道及其后转弯上行烟道, 烟气速度分布

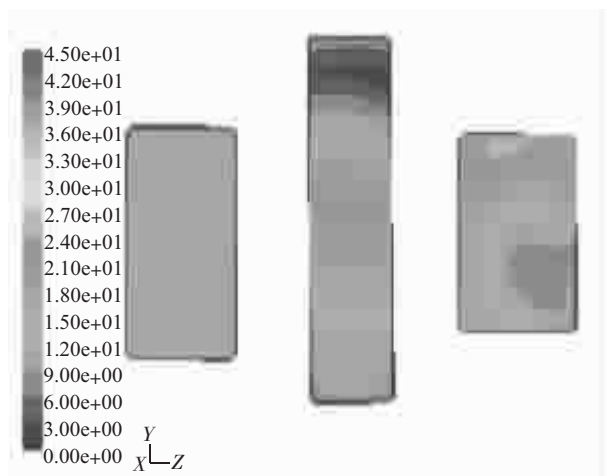


图6 下部水平烟道($X=7200\text{ mm}$)和上行烟道($X=11\ 526\text{ mm}$)处垂直截面上和烟道出口的速度分布

基本是均匀的。分析 100%设计烟气量工况下的流场分布可知,净烟气烟道下部速度分布较均匀,速度最均匀的区域出现在该段的中部水平烟道区域,在该区域内烟气速度变化较小,在 $15\sim 18\text{ m/s}$ 范围内;上部水平弯曲烟道内烟气经历 3 次转向后,在烟道垂直截面上的速度分布严重不均;烟道中各弯头的圆弧过渡处都不同程度的出现了局部低速或高速区。

2.2 不同烟气量对烟道内速度分布的影响

为了反映不同烟气量对净烟气烟道内流场分布的影响,本文对 50%设计烟气量工况下烟道内流场进行数值模拟。该工况下烟道流场速度分布立体图如图 7 所示。为与图 2 进行对照比较,图 7 同样给出下部水平烟道轴线垂直面和上部水平弯曲烟道的 3 个不同标高水平面上的速度分布情况。

对于 50%设计烟气流量的计算工况,计算结果显示,除速度的数值外,计算得到的烟道内速度分布总体上与设计烟气流量工况(图 2)几乎一致,可以看出,烟气流量的变化对烟道内的速度分布影响很小。

3 结束语

(1) 下部水平烟道速度分布相对较均匀,速度最均匀的区域出现在该段的中部水平烟道区域;上部水

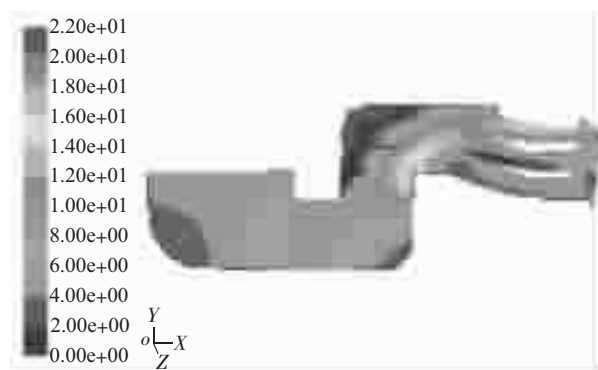


图7 50%设计烟气流量工况下烟道流场速度分布立体图

平弯曲烟道内烟气经历 3 次转向,在烟道垂直和水平方向的速度分布都不均匀。

(2) 烟气流量的变化对烟道内的速度分布影响不大,烟气流量从设计流量减少 50%,除速度数值外,烟道内的速度分布几乎一致。

(3) 通过对某电厂脱硫系统后净烟气烟道内流场的数值计算分析发现,在该烟道下部水平烟道段中部安装烟气流量测点相对较好。

(4) 通过数值模拟计算结果可以合理选择烟气流量测点,从而提高烟气流量测量精度。

参考文献:

- [1] 王万林,齐小娟. 火电厂烟气排放流量测量方法研究[J]. 浙江电力,2009(6):17-19.
- [2] 白江文,魏威,周强,等. 烟气排放连续监测系统及其常见故障分析处理[J]. 江苏电机工程,2011,30(3):78-80.
- [3] 邹磊,高小涛,黄磊. 基于 CFX 的炉内空气动力场的数值模拟研究[J]. 江苏电机工程,2009,28(4):81-84.
- [4] 陈雯,于向军. 基于 FLUENT 的风粉管道风速流场模拟[J]. 江苏电机工程,2008,27(6):72-75.
- [5] 王福军. 计算流体动力学分析 CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:7-11.

作者简介:

张振义(1964),男,江苏徐州人,工程师,从事电站运行管理工作;
邹磊(1985),男,湖北黄冈人,工程师,从事电站锅炉燃烧优化、性能试验和计算机数值模拟的研究工作。

Flow Characteristics Analysis and Measurement Position Selection of Clean Gas Flue for Coal-fired Power Plants

ZHANG Zhenyi¹, ZOU Lei²

(1. Guohua Xuzhou Power Generation Co.Ltd., Xuzhou 221166, China;

2. Jiangsu Frontier Electrical Power Technology Co.Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of gas flow and pollutant emission concentration measurement, the computational fluid dynamics (CFD) software was used to simulate the flow field in clean gas flue for one 135 MW power plant. The distribution of the flow field characteristics in clean gas flue was analyzed with different gas flow. The results show that variation of the gas flow has no significant influence on the distribution of velocity in flue. The best uniform area appears in the middle of lower horizontal flue, and the appropriate position for flow measurement could be installed in this region.

Key words: clean gas flue; flow measurement; numerical simulation

600 MW 机组脱硫增压风机与引风机二合一节能改造

于泳,马月明

(华润电力常熟有限公司,江苏常熟 215536)

摘要:在燃煤电厂增压风机与引风机合并改造中,分析了静叶可调轴流引风机和动叶可调轴流引风机的设备特点、初投资、运行和节能效果。根据分析结果,风机应选用动叶可调轴流引风机。改造实例也证明采用动叶可调轴流风机,在保证风机安全稳定运行的同时,还可以降低投资,且节能效果明显。

关键词:动叶可调;静叶可调;轴流风机;节能

中图分类号:TK223.26

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)04-0078-03

根据国家环保政策和江苏省地方政府要求,在2013年底,江苏省所有燃煤机组的旁路烟道均要全部拆除,并且全省运行火电机组均要建设完成脱硝装置(SCR)。火电机组旁路烟道拆除后,增压风机和引风机串联布置的方式就显得过于复杂。为了便于调节,可将增压风机与引风机合并改造^[1]。引风机与增压风机合并可简化系统、减少系统阻力和占地面积、降低运行成本,在保证机组安全运行的同时,实现节能减排。经计算,机组加装脱硝系统后,锅炉系统烟气侧阻力将增加 1000 Pa,加之合并改造后脱硫烟道阻力为 2000 Pa,引风机总全压升必须达到 5167 Pa 以上,而现有引风机最大全压升为 3830 Pa 无法达到锅炉带负荷能力的要求,故需对引风机进行增容改造。

1 风机选型比较

引风机输送介质为具有含尘且温度较高的烟气。选用引风机的因素除考虑风机体积、重量、效率和调节性能外,还要求耐磨、对灰尘的适应性好,以保证在规定的检修周期内能安全运行。目前,电站锅炉引风机一般采用动叶可调轴流式、静叶可调轴流式、和静叶可调轴流式加变频调节 3 种方式^[2],采用哪一种方式需科学的论证。

1.1 动叶可调轴流式引风机

动叶可调风机轴承箱为整体式结构,整体式轴承箱及其固定方式在多次拆装后,叶轮总能保证与机壳同心,不需重新调心。叶轮轮毂采用低碳合金钢焊接结构,重量轻、强度高、离心力小。叶片采用低碳合金钢经数控加工中心铣切并压制成型,表面喷焊硬质合金耐磨层。运行经验表明,采用该技术可从根本上解决动叶可调轴流式引风机叶片的抗磨损问题。叶轮内部设置平衡配重,克服叶片回复力矩,液压调节装置操纵力矩仅为 30~50 Nm,采用 100 Nm 电动执行器即可调节。

1.2 静叶可调式轴流式

静叶可调引风机受其特性限制,风机装置效率不会超过 87%,比动叶可调试轴流风机低,且高效率区比轴流式风机小,适用于压力系数介于离心风机和动叶可调轴流式风机之间。另外,会使风机在小流量运行或启动后调节静叶至运行工况的小流量阶段,进入喘振区。因此对于大型调峰机组不宜选用静叶可调式轴流式风机。

静叶可调轴流式风机主轴两端各由 2 个轴承座支持。叶轮与主轴用高强度螺栓直接连接。叶轮检修拆后,需要重新调心。叶片为由钢板制成的扭曲叶片,与轮毂焊接,所以不能进行耐磨处理。叶片磨损后只能割掉,在轮毂其他位置焊上新叶片,经热处理后方能使用。更换 2 至 3 次叶片后,需更换整个叶轮。

1.3 静叶可调轴流式+变频组合方式

1.3.1 静叶可调轴流式+变频驱动优点

无论在怎样的设定转速下,风机都有其特定的内特性。在不同转速下,风机所提供流量和压力的能力随转速变化。采用变频驱动后,风机在设计点的效率不变,风机运行在低于设计工况的其他工况点具有较高效率^[3]。

1.3.2 静叶可调轴流式+变频驱动缺点

(1) 转子横向振动。转子支承系统的刚性在垂直方向与水平方向不同,通常垂直刚度要大于水平刚度,转子的不平衡载荷会在一倍工作转速和二倍的工作转速产生激振作用。在恒速驱动下,转子的计算要简单得多,只考虑主轴的一阶模态就可以了,转子的设计计算需要保证临界转速远离工作转速并有一定的裕量,同时转子的各个模态的自然频率要避开一倍工作转速和二倍工作转速下的谐振频率。在变频驱动下,需计算各转速下的自然频率与一倍工作转速、二倍工作转速的关系,确保转子安全。所以转子转速设定必须确保避开主轴的各个模态与一倍工作转速和二倍工作转速产生谐振的频率点,并有一定裕量。因此变频驱动条件下转子的设计计算非常复杂。

(2) 转子扭振。除了转子的横向振动,还要考虑转

子的扭转振动。通常情况下风机采用变频驱动时会使用挠性联轴器,联轴器的刚性会随着转速的改变而变化,使整个轴系的扭转频率也随之变化,所以转速的设定必须使轴系的扭转频率避开一倍工作转速和二倍工作转速的谐振频率点,避免转子产生扭转共振。

(3) 叶轮振动。采用变频驱动,必须先计算确定叶轮各模态下的自然频率。在转速设定时必须避开这些振型的自然频率的共振频率点,一旦产生共振,叶轮会发生毁坏。

(4) 风机采用变频驱动时,由于风机转速的变化特别是大范围频繁调节转速,转子在这个过程中承受了交变载荷,如果改变转速从 100% 至 30%,将会产生超过叶轮最大应力 90% 的疲劳应力,转子的疲劳是逐渐积累的,如果转子承受过大的疲劳载荷,将会损伤其疲劳寿命,严重时会导致疲劳破坏。

1.4 技术比较

1.4.1 引风机动叶可调和静叶可调工艺比较

(1) 系统中使用的联合风机,要求风机提供大流量的同时,还要满足较高的压力要求。无论是动叶可调轴流风机还是静叶可调轴流风机,在气动性能上都可以满足要求,只是动叶可调轴流风机通常为双级设计,转速高、尺寸小、功耗低。

(2) 动叶可调轴流风机和静叶可调轴流风机在不同工况下的性能比较如表 1 所示。表 1 的比较表明动叶可调轴流风机与静叶可调轴流风机相比,具有变工况性能好,效率高的优点。

表 1 动叶可调轴流风机与静叶可调轴流风机气动性能比较

项目	动叶可调	静叶可调
变工况调节方式	直接改变动叶角度,调节效率高	变频电机调速调节
叶轮外壳	整体焊接,内表面机加工,平整光滑,尺寸公差要求高	尺寸公差要求相对较低
顶部间隙	叶片顶部间隙要求高,效率可提高 0.5%~1%	顶部间隙要求不高,顶部间隙比调大 70% 以上
叶型	配有中压、高压、超高压叶型,满足不同性能需求	只有不超过两种基本叶型
轮毂和叶片根部结构	轮毂表面和叶片根部表面均为机加工球面,平整过渡,效率可提高 1%	叶片和轮毂为焊接结构

1.4.2 引风机动叶可调和引风机变频改造路线比较

(1) 对于引风机动叶可调路线,电气改动量相对较少,而引风机变频调节则需考虑配套改造控制环节,该改动工作量大。

(2) 在引风机变频改造中,需增加变频装置、动力电缆、控制电缆及一些辅助设备,其电气改造总费用较

引风机动叶可调改造增加约 538.3 万元。

1.4.3 经济性比较

(1) 据估算,采用动叶可调风机投资(含电机)约 500 万元,采用静叶可调风机投资(含电机)约 360 万元。

(2) 在风机改造中,除考虑初投资外,还应该考虑风机的运行经济性。通常,发电机组并不总是在额定负荷工作,为满足电网调峰需求,多数电厂在 40%~100% 额定负荷范围运行。这种情况下,如果只以额定负荷工况下的风机功率来评估其运行经济性,显然与真实情况相差甚远。因此更为实际、客观的方法是选择机组在年平均负荷工况下的风机功率消耗和运行时间作比较。以年平均负荷为 80%,对 2 种风机的实际功耗进行的比较如表 2 所示。按上网电价 0.3 元/(kW·h),年平均 5500 h 计算,2 台动叶可调轴流风机年运行节省电费 87 万元。

表 2 动叶可调轴流风机与静叶可调轴流风机功耗比较

负荷		80% ECR
单台动叶 可调轴流风机	效率 / %	88
	轴功率 / kW	3574
单台静叶 可调轴流风机	效率 / %	82.3
	轴功率 / kW	3828
轴功率差 / kW		254
电机效率差 / %		0.96
2 台风机功耗差 / kW		529

(3) 综合以上分析,一台机组进行动叶可调轴流风机和静叶可调轴流风机+变频改造综合经济技术比较如表 3 所示。

表 3 动叶可调轴流风机和静叶可调轴流风机+变频改造综合经济技术比较 万元

项目	动叶可调	静叶可调+变频
引风机	500	360
变频器	0	538.3
土建	15	285(含变频器室)
空调通风设备	0	76
合计	515	1 259.3
价差	-744.3	基准
运行费用	1228	1315
节约费用	-87	基准

从表 3 看出,一台机组动调方案初投资较静调+变频方案节约 744.3 万元,机组按年运行 5500 h,平均负荷率 80% 计,一台机组动调方案运行电费比静调+变频方案节约 87 万元。可见在增压风机、引风机二合一改造中,选用动叶可调轴流式风机方案较为经济。

1.4.4 选型结论

通过对动叶可调轴流引风机和静叶可调轴流引风机配变频器调速风机的经济性比较发现,采用大功率

高压变频器的初投资成本非常高，其所带来的风机节电效果在短期内不足以弥补初投资差距。即使未来上网电价提高，考虑到银行利息、长期维护成本等因素，采用变频器方案也是不经济的。

通过上述分析，对于 600 MW 及以上容量燃煤锅炉，应用动叶可调轴流风机无论在技术、运行可靠性和经济性等方面都具有明显优势。

2 改造实例

在某电厂 2 号炉增压风机与引风机二合一技改中，风机改造为上海鼓风机厂生产的动叶可调轴流引风机，风机运行稳定，节电效果明显。改造前的原引风机的主要性能数据如表 4 所示。改造前的原增压风机的主要性能数据如表 5 所示。改造后的动叶可调风机的主要性能数据如表 6 所示。

表 4 改造前的原引风机的主要性能数据

煤种项目	设计煤种
工况	B-MCR
风机全压升 /Pa	3830
风机全压效率 /%	86.3
风机轴功率 /kW	2900
风机转速 /(r·min ⁻¹)	597

表 5 改造前的原增压风机的主要性能数据

煤种项目	设计煤种
工况	B-MCR
风机全压升 /Pa	3430
风机全压效率 /%	83.1
风机轴功率 /kW	2500
风机转速 /(r·min ⁻¹)	497

2 号炉引风机最终改造设备费用 565 万元，改造施工费用 410 万元，共 975 万元，与预算较为接近。

2.1 引风机实际运行工况节电分析

改造前 2 号炉增压风机与引风机能量消耗占总发电量比率为 1.098%，改造后二合一风机能量消耗占总发电量比率为 0.920%。按单机年发电 42×108 kW·h 计，改造后引风机年节电为 750×104 kW·h，年节省 225 万元。

表 6 改造后的动叶可调风机的主要性能数据

煤种项目	设计煤种
工况	B-MCR
风机入口体积流量 /(m ³ ·s ⁻¹)	430.55
风机入口质量流量 /(kg·s ⁻¹)	389.4
风机入口静压 /Pa	-4688
风机出口静压 /Pa	2312
风机全压升 /Pa	7000
风机全压效率 /%	87.1
风机轴功率 /kW	3378
风机转速 /(r·min ⁻¹)	990

2.2 假设无脱硝装置工况下引风机节电分析

脱硝改造后，引风机入口负压增加约 800 Pa，这部分阻力为脱硝改造新增的阻力，将增大改造后的引风机实测能耗，故假设无脱硝装置，引风机的节电效果将更加明显。即扣除脱硝阻力后，引风机电流估算将比目前的电流下降约 140 A，这部分可另外节约电费达到 473 万元。综合上述 2 项分析结果，如假设本次改造无脱硝装置的话，总计可节能 698 万元。

3 结束语

通过对比分析静叶可调轴流引风机和动叶可调轴流引风机的设备特点、初投资、运行和节能效果，在机组脱硝改造配套引风机增容过程中，应选用动叶可调轴流引风机。改造结果表明，采用动叶可调轴流引风机不仅投资少，运行安全稳定，且节能效果明显。

参考文献：

[1] 刘家钰,王宝华,岳佳全,等. 1000 MW 机组引风机与脱硫增压风机合并改造研究[J]. 热力发电,2010,39(8):45-50.
[2] 许桂琴. 600 MW 燃煤机组吸风机选型的探讨[J]. 黑龙江电力,2003,24(1):31-36.
[3] 付龙龙,雷兆团,文景辉,等. 引风机三种驱动方式分析[J]. 电站系统工程,2012(1):12-14.

作者简介：

于 泳(1972),男,内蒙古自治区牙克石人,工程师,从事电厂运行、检修管理工作;
马月明(1970),男,江苏苏州人,工程师,从事发电厂锅炉检修管理工作。

600 MW Unit FGD Booster Fan and Induced Draft Fan Co-retrofit For Energy-saving

YU Yong, MA Yueming

(China Resource (Changshu) Power Co.Ltd., Changshu 215536, China)

Abstract: For the co-retrofit project of FGD booster fan and induced draft fan in coal-fired power plants, the axial-flow fans capable of adjusting the stationary and the dynamic blades are respectively analyzed and compared in this work from the aspects of device, initial investment, operation, and energy-saving. The results show that the fan capable of adjusting the dynamic blades should be adopted. The retrofit examples in one power plant demonstrate that the use of axial-flow fan capable of adjusting the dynamic blades cannot only reduce the cost, but also achieve safe and stable operation. Besides, energy-saving effect is also significant.

Key words: adjustment of the dynamic blade; adjustment of the stationary blade; axial-flow fan; energy-saving

火力发电厂电气设备状态检修

孙成林

(江苏射阳港发电有限责任公司,江苏 盐城 224346)

摘要:分析了火力发电企业电气设备定期计划检修存在的问题,阐明了火力发电企业开展电气设备状态检修的必要性,提出火力发电企业实施电气设备状态检修工作的基本规则、方法、要求,指出了实施过程中的难点,并对电气设备实施状态检修的一些相关问题进行了探讨。

关键词:火电厂;电气设备;状态检修

中图分类号:T

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)04-0081-04q

随着电力工业的发展和电力市场化的推进,电网容量不断增大,发电设备也向着大机组、高效率、自动化方向发展,系统更加复杂,电气设备检修管理的重要性日益突出。长期以来,我国对电气设备实行定期检修模式,即检修类别、项目、周期均按规程规定执行。随着电气设备质量及技术管理水平的提高,定期检修制已经不适应时代的要求,现已有一些先进的电力企业在结合设备检修实际,对部分电气设备实行了状态检修,并取得了明显的效果。所以,如何更科学地管理好设备,提高设备利用率,降低检修费用,已成为摆在发电企业面前不容回避的问题。

1 电气设备定期计划检修存在的问题

1.1 不注重技术管理,缺乏创新精神

发电企业电气设备定期计划检修安排的重要依据是检修周期,《发电厂检修规程》中明确规定,机组大修3年至5年1次,小修1年1次,在这种传统的定期检修制度下,到期必修,按部就班,在很大程度上导致了技术管理人员不思进取,僵化了技术人员的思维方式,管理工作在原地打圈圈,淡化了设备管理人员的责任,技术管理工作进展不大。

1.2 不利于延长电气设备的运行寿命

在定期计划检修制度下,会导致如下的现象:

(1) 检修项目抓不住重点,分不清主次。

(2) 计划检修虽然对运行状态不佳的电气设备进行了必要的维修,但对运行情况良好的电气设备按部就班地检修,这样势必造成有些发电机组越修运行工况越差或良好设备修后故障率增加的现象。

(3) 计划检修致使有些运行状况较好的电气设备到期必须检修,不仅增加设备检修费用,同时又加速了电气设备的磨损,甚至缩短了使用寿命,降低了设备利用率。

(4) 少数运行状况不好的电气设备因为检修周

期未到而得不到及时的检修,降低了设备运行的安全可靠,甚至出现异常情况或事故后才抢修,扩大了经济损失。

1.3 不利于提高发电企业的经济效益

由于计划性检修针对性不强,盲目检修过多,降低了设备利用率,浪费了大量的人力,还增加了大量检修费用的无效支出,影响了发电企业的整体经济效益。

2 开展电气设备状态检修的必要性

发电企业电气设备状态检修就是采用先进的电气设备监测技术,结合全员生产管理,电气设备综合管理,全面质量管理,通过计算机管理系统,对电气设备进行全方位状态监督,对电气设备运行状态、影响安全经济、可靠运行的因素进行综合分析,寻找引发故障的根本原因,全面掌握电气设备的健康状况,在电气设备发生故障前及时进行检修,消除故障发生的可能,并对设备进行前景预测,根据结果再拟定检修内容和确定检修时间,真正做到“应修必修,修必修好”。

实施电气设备状态检修的目的就是科学保养电气设备,在保障电气设备安全、经济、可靠的前提下,最大限度地提高设备的利用率,降低检修人、财、物的浪费,提高企业经济效益。

3 基本规则及要点

3.1 合理安排检修

发电企业电气设备的检修维护一般要求设备退出运行,不论是全面的预防性试验,或是拆装性的检修。考虑到各类电气设备的维护是相互联系和相互影响的,为了尽可能地保证电气设备的可用性和减少设备停电时间,必须综合安排电气设备的检修工作。如果把电气设备检修的周期及项目上升为一种管理策略,就必须将各类电气设备综合考虑。

3.2 建立起量化的电气设备状态评价体系

发电企业应该建立起完善的、符合实际的、量化的

电气设备状态评价指标体系,科学地对电气设备状态评分,从需立即退出运行到设备最优状态分成0到100分。电气设备状态的评分依据于电气设备状态相关的信息,包括各个电气设备试验项目、历史缺陷事故记录、不良运行工况记录等^[1]。

3.3 建立技术档案

发电企业建立起完善的电气设备技术档案(数据库),含各类电气设备出厂资料和技术参数,运输、安装记录,安装试验报告,各类检测报告,油的色谱分析报告,预防性试验报告,运行后的各种试验报告,历年或历次检修记录等。为电气设备提供了可靠的原始数据,可准确掌握电气设备状态,并进行分析比较,以判断电气设备是否需要检修。

3.4 加强技术监督

发电企业加强技术监督,就是基于科学的标准和技术规程,采用先进的测量手段,以现代化的状态数据监测为基础对发供电电气设备健康水平与安全经济运行方面的重要参数与指标进行监督、检查、调整,以确保发供电电气设备在良好状态下或允许范围内运行,是开展电气设备状态检修工作的基础。

3.5 加强图纸资料管理

图纸是电气工程施工的语言,施工图与工程现状不完全吻合是不可避免的事实。为此,必须加强竣工图管理,实行竣工图管理制度,这可以为今后的技术改造及电气设备大修工程项目提供准确的技术依据。

3.6 加强电气运行监视管理

发电企业加强电气设备的运行监视,是分析判断电气设备状态的重要手段。电气设备密封是否良好,内部是否有异常的声音,压力是否正常,开关机构是否正常等都可以通过电气运行人员巡视检查情况分析,从而判断电气设备能否安全运行、是否需要立即进行检修和处理。对影响正常运行的要立即停电处理,对不影响运行的(如主变外壳渗油等)可以结合停电机会进行处理。运行监视是直观的判断电气设备运行状态的有效方法之一。

3.7 应用先进的在线监测技术手段

反映电气设备的状态信息应来自在线监测获取的信息,各项试验获取信息(含现行预防性试验),电气设备历史缺陷事故记录信息,不良运行工况记录信息。这是一个综合的信息来源,各项信息是对电气设备状态的准确反映。

在线监测技术是实行状态检修的基础。发电企业应用先进的在线监测技术,主要是通过在线的方式监测各系统、设备各项主要运行参数,通过分析判断其运行状态,检测内部缺陷,监测缺陷的发展趋向。在线监测技术可提高发电企业电气设备运行的安全性、可靠

性,提供电气设备运行的暂态过程信息,诊断电气设备早期缺陷的事故隐患,控制突发性设备事故,是实现电气设备向状态检修制度过渡的必要条件。

3.8 加强电气设备的常规试验手段

发电企业实施电气设备状态检修,常规试验手段不能削弱,而应当加强。所谓加强,就是要根据电气设备的原始状态和历年来的状态变化趋势,并参考同类可比设备的状态统计分析来制订符合维修实际的试验方案。对大多数原始情况良好、运行情况比较稳定的电气设备,适当延长试验周期;对少数状态欠佳的电气设备,适度增加试验次数;对个别有明显缺陷的电气设备,应进行跟踪检测,及时处理,及时分析。

3.9 采用先进的数字化管理体系及数理统计方法

发电企业电气设备状态检修主要包括电气设备信息获取、综合诊断、检修管理。采用先进的数字化管理体系才能引入智能综合诊断和检修管理系统,才能适应于未来发展的需要,量化的设备状态评价体系是在为建立数字化管理体系而奠定基础,实际上,建立数字化管理体系就是建立数字化综合诊断,数字化检修管理系统^[2]。

数理统计是以概率论为理论基础的,比人的经验更具科学性,可以在更广泛的范围内帮助我们掌握电气设备状态,由此制定的检修周期和检修项目更接近实际,因此数理统计是实行电气设备状态检修的强有力的工具。通过对电气设备出厂试验、历次试验、检修和故障记录以及运行情况等历史资料的统计分析,以对某类或某台电气设备的状态做出评估,对其状态的变化趋势或规律做出预测,据此制定出电气设备检修的周期和项目。

3.10 加强电气设备的事故分析和判断

发电企业电气设备状态检修的任务是通过各种有效途径,及时发现设备的故障前兆并予消除,以减少事故的发生。但发生事故,应采用先进的诊断方法,及时确定故障性质及部位,尽快恢复供电以减少故障造成的损失。事故分析要从可靠性和系统工程出发,将事故分析与设备运行中的状态监测和故障诊断相结合,有利于更好地掌握检修工作的重点。加强事故分析不能局限于仅仅分析本单位所发生的事故,应同时包括同行业单位发生的事故。

3.11 制定严谨的作业标准

发电企业电气设备状态检修必须严格实行标准化作业,将人为因素造成的不确定因素降到最低,检修质量是保证设备安全运行的关键,也是电气设备状态检修的关键。

电气设备状态检修把好电气设备运行质量关和检修质量关,这二者都是保证电气设备安全的关键,电气

设备运行时不严格按照运行规程执行,必然使电气设备状态检修失败,在电气设备检修时要严格按照全面质量管理标准作业,也就是事先将作业内容进行分解,每个小环节都有作业标准、安装工艺技术要求、顺序要求、安全要求,这样才能在作业中避免人为随意性,从而避免造成失误或遗漏,继而避免事故,保证检修质量,真正达到修必修好,发挥状态检修的优越性。

4 发电企业实施电气设备状态检修的要求

4.1 实施电气设备状态检修需要改变观念

发电企业电气设备定期计划检修是在计划经济管理模式下针对我国的国情而实施的一种设备检修管理模式。固定的检修周期并不随现场设备的运行条件、环境和设备的换型、运行可靠性的提高而变化。因此形成了电气设备到期就必修,不论其健康状况如何均来一个大拆、大卸、大组装。

电气设备状态检修能够有效避免周期性计划检修带来的弊端,它是基于可靠性和预测性为中心的维修技术,根据对潜伏性故障进行在线监测和离线测量的结果,结合巡视数据、检修记录、历史数据及可靠性管理和人工智能专家系统等,对电气设备进行状态评估,并以此来指导安排电气设备的维修,从而有效降低检修成本,提高设备可用性,形成符合电气设备状态检修要求的管理体制,可以提高火电厂电气检修、运行的基础管理水平,在发电企业中营造科学决策、改革创新的良好氛围。

4.2 实施电气设备状态检修需要循序渐进

发电企业分步实施电气设备状态检修与电气设备定期计划检修并不是完全矛盾和对立的,推进电气设备状态检修并非一下子全盘否定电气设备定期计划检修。电气设备状态检修是对电气设备在受控状态下进行的有计划的检修。

一方面从定期检修转变到状态检修要有一个循序渐进的过程,另一方面对那些在现有条件下无法准确预知设备状态或者要付出巨大代价的项目,一般仍宜采用传统的定期计划检修和故障检修方式。取消指令性的计划检修,改为指导性的计划检修,将预防检修、状态检修和故障检修有机结合,逐步过渡到以状态检修为主的主动检修模式。

4.3 制订完善的状态检修管理制度和技术标准

发电企业需要制定完善的电气设备检修管理标准、电气设备状态检修实施细则、电气设备状态诊断管理制度等一系列的管理制度和技术标准,使状态管理和技术管理建立在科学的基础之上。通过规范、完善电气设备检修基础管理,来强化电气设备检修质量管理,提高电气设备健康水平,同时也可以从思想上、制度

上、人员上、技术上为全面实施设备状态检修奠定良好的基础。

5 发电企业实施电气设备状态检修的难点

5.1 检修时间及检修范围的确定难度大

电气设备状态检修不是以电气设备运行时间来确定是否检修,而是以电气设备运行状态来确定是否需要检修,所以摸清电气设备健康状态,是电气设备状态检修的关键。因此要通过各种方式来准确的定性,科学的分析,使电气设备状态在发生质变之前进行检修。

考虑到发电企业电气设备状态检修技术管理工作的复杂性,如何确定电气设备是否需要检修或在什么时候检修以及检修什么项目,这都依赖于电气设备管理技术人员的业务技术水平是否过硬和全面;依赖于采集的电气设备状态信息是否真实、可靠;依赖于是否有行之有效的管理制度和技术标准等。因而,判断何时检修,有一定的难度。

5.2 电气设备状态检修的推广难度大

(1) 受制于对电气设备进行事故分析时,往往把对电气规程的严格执行或定期检修与否作为责任追究的重要判据,限制了电气设备状态检修的发展。

(2) 发电企业电气设备在线监测技术手段的不完善,在一定程度上也阻碍了发电企业电气设备状态检修的发展。

6 实施电气设备状态检修的其他问题探讨

(1) 体制创新。发电企业电气设备定期计划检修制度及方法一般都是通过相关规程、规定得以体现的。而实施电气设备状态检修首先要在剖析现行电气专业规程的基础上,结合电气设备现状制定出一个可靠、有效、客观的指导性文件,使之有利于电气设备状态检修的试行和逐步发展,并在实践中积累经验,完善制度。

(2) 加强管理。发电企业实施电气设备状态检修工作领导要重视,在科学管理的基础上,要建立起负责、策划、组织、协调并指导电气设备状态检修工作的领导小组,以协调电气运行、电气检修、继保、高压试验及其他相关专业部门的分工、配合、衔接、实施等各项具体工作。

(3) 提高人员素质。发电企业电气设备状态检修涉及变压器、互感器、开关、避雷器、电缆、高压试验、油务试验等多个专业工种,需要各类专业人员协同工作。特别是大型发电厂电气设备检修、预试,均需要大量专业人员的参与。同时,随着大型发电电气设备的增多、状态检修的推行等,对人员素质提出了更高的要求。因此,迫切需要加强对专职人员的技术培训、素质培训,努力提高专职人员的综合素质和专业技术水平。

7 结束语

综上所述,发电企业电气设备状态检修对电气设备的技术管理要求高,要有多年的电气设备运行、检修及试验资料的积累,要有较成熟的在线监测装置,要有一套完整的综合分析诊断的方法。虽然目前实施电气设备状态检修制度还有一定的困难,但是同电气设备定期计划检修制度相比,电气设备状态检修制度有无可比拟的优势,它不仅有利于进一步提高电气专业技术人员的业务水平,提高电气设备运行的稳定性,而且可以降低检修费用,提升发电企业的经济效益,相信在

不久的将来,随着电气设备的增加、电气设备质量的提高,发电企业实施电气设备状态检修必然会成为一种趋势。

参考文献:

- [1] 陈三运,谭洪恩,江志刚. 输变电设备的状态检修[M]. 北京:中国电力出版社,2004:13-57.
- [2] 屠颖,岳彬. 电气设备状态检修技术分析[J]. 中国高新技术企业,2010(22):122-123.

作者简介:

孙成林(1966),男,江苏盐城人,工程师,从事发电厂电气检修、运行管理工作。

The Condition-based Maintenance of Coal-fired Power Plant Electrical Equipment

SUN Chenglin

(Jiangsu Sheyanggang Power Generation Co.Ltd., Yancheng 224346, China)

Abstract: A brief introduction is given to the existing problems of the regular scheduled maintenance of electrical equipment in Coal-fired power plant. The necessities of electrical equipment status detection and maintenance for Coal-fired power enterprises are illustrated. Based on these introductions, the basic rules, methods and requirements of condition-based maintenance for electrical equipment in Coal-fired power plant are presented, and some issues related to the implementation of condition-based maintenance are discussed.

Key words: coal-fired power plant; electrical equipment; condition-based maintenance

(上接第 74 页)

作者简介:

薛祥(1962),男,江苏江都人,高级工程师,从事电力设备物资质量管理管控工作;
张丹丹(1968),女,重庆人,副教授,从事高电压与绝缘技术工作;

周志强(1987),男,湖北武汉人,博士研究生,从事高电压与绝缘技术工作;

刘亚青(1990),男,安徽桐城人,博士研究生,从事高电压与绝缘技术工作。

Research on Evaluation System for the Manufacturing Capacity of Distribution Transformer Suppliers

XUE Xiang¹, ZHANG Dandan², ZHOU Zhiqiang², LIU Yaqing²

(1.Jiangsu Electric Power Company Material Supply Company, Nanjing 210036, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Distribution transformers are very important for the safe operation of power grid. Therefore, there is a need to evaluate the manufacturing capacity of transformers suppliers. In this paper, the analytic hierarchy process (AHP) is applied in evaluating the manufacturing capacity of distribution transformer suppliers. In the evaluation process, all key aspects related to manufacturing process of distribution transformer are taken into account. With the proposed evaluation system, the supplier can be regulated and the users can supervise the quality of products.

Key words: distribution transformer; supplier; AHP; evaluation system

欢迎投稿 欢迎订阅