

★四川省一级期刊

• 万方数据数字化期刊群入网期刊

• 《中国学术期刊(光盘版)》入编期刊

• 《中国期刊全文数据库》收录期刊

• 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊

• 北极星 中华期刊网入网期刊

• 中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊

• 中国农村电气化信息网

• 重庆维普中文科技期刊数据库

• 《超星数字图书馆》入网期刊

• 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录

四川電力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954



四川省电机工程学会 四川电力科学研究院

Vol.36
2013
No.2



四川省电力公司遂宁公司



◆ 公司领导集体



◆ 总经理陈强督察变电站工程建设



◆ 党委书记骆国富视察110 kV花溪变电站



◆ 公司办公大楼

四川省电力公司遂宁公司（以下简称遂宁公司）成立于2005年8月，是以管理县级控股供电公司为主的输变电管理公司，负责遂宁电网的统一规划、建设和调度，负责四川省电力公司在遂宁投入资产的运营管理，以及管理明珠、蓬溪、大英三个县级控股供电公司。

遂宁公司以向明珠、蓬溪、大英三家控股公司和明星电力公司趸售电力为主。遂宁电网现有500 kV变电站1座，主变容量1500 MVA；220 kV变电站3座，主变压器容量900 MVA；110 kV变电站15座，变电容量910 MVA。

遂宁公司成立以来，在省公司和市委、市政府的正确领导下，先后荣获华中公司“安全生产先进单位”、“四川省五一劳动奖状”、“省级最佳文明单位”、“省级劳动关系和谐企业”、“遂宁市工业发展先进单位”、“遂宁市思想政治工作先进单位”、“市级文明行业”等荣誉称号。



◆ 抢修变压器



◆ 服务秋收

《四川电力技术》 编辑委员会名单

主任委员 王 平

副主任委员 张 伟

刘俊勇

委 员

(按姓氏笔画为序)

方文弟 王 卓 白家棣

刘 勇 朱白桦 朱国俊

朱 康 邓亚军 鄢小端

李兴源 李建明 严 平

胡 灿 徐 波 唐茂林

韩晓言 谢 舫 甄 威

秘 书 李世平

吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978 年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN1003-6954

CN51-1315/TM

2013 年第 36 卷第 2 期(总 224 期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主 编:胡 灿

副 主 编:吴小冬 谢 舫

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力科学研究院情报室

地 址:成都市青华路 24 号

邮政编码:610072 电话:(028) 87082037

传 真:(028) 87082036

E-mail:cdsclj@163.com

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册 6.00 元

[期刊基本参数] CN51-1315/TM* 1978*

b* A4* 94* zh* P* ¥6.00* 4300* 22*

2013-04

目 次

• 四川省电机工程学会优秀论文专栏 •

基于改进差异进化算法的地区电网无功/电压实时优化控制研究

..... 潘家和 廖丹妮(1)

纯电容补偿面临的谐波影响及其解决方法 田 园(6)

模拟小信号电能表的应用及其检测技术 艾 兵 江 波 杨华云 等(11)

输电线路直流融冰时间的计算和试验验证 范松海 刘 馨 聂鸿宇 等(15)

基于混合法的复杂配电系统的可靠性评估 陈嵩峰 宋明玉(18)

• 电网技术 •

750 ~ 220 kV 系统短路电流影响因素分析与限制措施

..... 胡立锦 常喜强 周 茂 等(21)

基于 GPRS 通信的配电网无功补偿系统研究 冷 怡 陈晓东 鲍云浮(27)

基于奇异点检测的行波单端测距方法研究 孟凡铮 王喜疆(32)

考虑相角特征的无死区新型触/漏电保护技术

..... 陈义刚 李 浩 范康林 等(35)

小波变换在暂态电能质量检测和识别中的应用 潘从茂 李凤婷(40)

成都电网自动电压控制系统的建设与运行 刘 建 胡启元 林瑞星 等(43)

配网自动化条件下的 FTU 优化配置 徐 飞(48)

偏远地区微网结构探讨 周惟婧 朱 鑫 刘俊勇 等(54)

• 高电压技术 •

用于高电压环境下的光学电压电场传感器 冯 运 陈洪波 白 欢 等(59)

复合绝缘子憎水性检测技术研究进展 贺含峰 陈洪波 白 欢 等(63)

国网典型设计变电站高低构架出线的防雷保护 张 磊 任德顺 刘成立(69)

分散式风电接入对地区电网运行影响的研究

..... 孙立成 赵志强 王新刚 等(73)

• 发电技术 •

300 MW 机组脱硫系统增容改造 邓启福 朱彬志(77)

吸收塔浆液密度高对脱硫系统的影响及控制措施 兰 江(80)

进口亚临界锅炉饱和蒸汽含钠量超标的原因研究与应用 彭卫红(84)

计及电网负荷的发电机自励磁动态过程及相关问题

..... 滕予非 丁理杰 张 华 等(87)

进口亚临界机组锅炉然烧器改造 黄国恩(92)

CONTENTS

Research on Real - Time Var/Voltage Optimization Control of Regional Power Grid Based on Modified Differential Evolution	Pan Jiahe Liao Danni (1)
Harmonic Influence Faced by Pure Capacitance Compensation and Its Solutions	Tian Yuan (6)
Application and Testing Technology of Analog Small - signal Power Meter	Ai Bing Jiang Bo Yang Huayun et al (11)
Calculation and Experimental Investigation of Ice - Melting Time by DC on Transmission Line	Fan Songhai Liu Xin Nie Hongyu et al (15)
Reliability Evaluation of Complex Distribution System Based on Hybrid Method	Chen Songfeng Song Mingyu (18)
Influence Factors Analysis on Short - Circuit Current under 750 ~ 220kV System and Its Restrictive Measures	Hu Lijin Chang Xiqiang Zhou Mao et al (21)
Research of Reactive Compensation System for Distribution Network Based on GPRS Communication	Leng Yi Chen Xiaodong Bao Yunfu (27)
Research on Single Terminal Method of Traveling Wave Fault Location Based on Singular Point Detection	Meng Fanzheng Wang Xijiang (32)
Touch/Leakage Current Protection Technology without Dead Zone Based on Phase Characteristic	Chen Yigang Li Hao FanKangLin et al (35)
Application of Wavelet Transform to Detection and Identification of Transient Power Quality	Pan Congmao Li Fengting (40)
Construction and Operation of Automatic Voltage Control System in Chengdu Power Grid	Liu Jian Hu Qiyuan Lin Ruixing et al (43)
Optimal FTU Configuration under Distribution Automation	Xu Fei (48)
Research on Microgrid Structure in Remote Areas	Zhou Weijing Zhu Xin Liu Junyong et al (54)
Optical Voltage and Electric Field Sensor Used in High Voltage Environment	Feng Yun Chen Hongbo Bai Huan et al (59)
Research Progress of Testing Technology for Hydrophobic Nature of Composite Insulator	He Hanfeng Chen Hongbo Bai Huan et al (63)
Protection against Lightning of Outgoing Line from High - Low Framework in Substation of State Grid with Typical Design	Zhang Lei Ren Deshun Liu Chengli (69)
Research on Influence of Distributed Wind Power Integration on Regional Power Grid Operation	Sun Licheng Zhao Zhiqiang Wang Xingang et al (73)
Reformation of Capacity Expansion for Desulfurization System of 300 MW Unit	Deng Qifu Zhu Binzhi (77)
Influence and Control of High Slurry Density for Absorption Tower on Desulfurization System	Lan Jiang (80)
Cause Research of Sodium Content Exceeding Standard in Saturation Steam of Imported Subcritical Boiler and Its Application	Peng Weihong (84)
Dynamic Process for Generator Self - excitation Considering the Load of Power Grid and Its Related Issues	Teng Yufei Ding Lijie Zhang Hua et al (87)
Transformation for Boiler Burner of Imported Subcritical Units	Huang Guoen (92)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2013 Vol. 36 No. 2

(Ser. No. 224)

Bimonthly, Started in 1978

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

Postcode: 610072

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Electric Power Research Institute

Editor in chief: Hu Can

Editor & Publisher:

Editorial Department of Sichuan Electric Power Technology

基于改进差异进化算法的地区电网 无功/电压实时优化控制研究

潘家和, 廖丹妮

(宜宾电业局, 四川 宜宾 644000)

摘要: 结合无功/电压实时优化控制模型提出了一种基于改进差异进化算法的地区电网无功/电压实时优化控制实现方法。该方法将差异进化算法与无功/电压控制特点相结合以改善初始种群质量、缩小寻优空间、进行“约束指导”与分群寻优提高算法的计算速度和效率。以某一实际地区电网为例进行无功/电压实时优化仿真计算,结果表明,所提算法和策略是可行、有效和实用的。

关键词: 地区电网; 无功/电压; 改进差异进化算法; 优化控制

Abstract: An approach for regional real-time var/voltage optimization control based on modified differential evolution algorithm is presented according to the real-time optimization model. Differential evolution and the characteristics of var/voltage control are combined in order to improve the quality of the initialized population, to decrease the optimization space and to improve the speed and efficiency of calculation with guide of some constraints and sub-swarm search for optimization. The proposed approach is evaluated in an actual regional power grid, and the simulation results show the feasibility and availability of the proposed algorithm and strategy.

Key words: regional power grid; voltage and reactive power; modified differential evolution; optimization control

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0001-05

0 引言

地区电网无功/电压实时优化控制作为智能调度的重要部分正日益受到重视。实时优化中变压器档位和电容器以整数表示,而发电机端电压以实数表示,是一个典型非线性混合整数优化问题。处理此类问题通常有两类方法:一为解析法,包括梯度法、内点法等,这些算法原理简单、求解速度快,但因其主要依靠问题的凸性寻找优化解,当系统本身不存在可行解时不能保证算法收敛,同时离散变量很难直接处理,因此对于非线性与非凸的无功/电压优化控制问题这些算法不能保证找到全局最优或次优解;二为进化算法,包括遗传算法、粒子群算法等,其克服了解析法的上述缺点,但求解时间过长和易于早熟^[1]。由 Storn R 和 Price K 于 1995 年提出的差异进化算法(differential evolution, DE)与其他进化算法相比,更为简单,计算量更小,鲁棒性更好,已被证明对实数值、多目标函数优化问题等具有很好的寻优效果^[2],为无功/电压优化问题的解决提供了

新的方法^[3-6]。

在对母线预测负荷动态分段和根据启动增量控制优化程序启停的基础上,结合地区电网无功/电压控制特点改进基本差异进化算法,运用其快速随机搜索能力进行“约束指导”与分群寻优,以期快速给出在满足运行约束条件下实现无功/电压实时控制的优化解,一天中控制设备的动作次数得到有效控制和合理分配,更适合工程应用。仿真分析某一实际地区电网,证明所提方法的可行性、有效性和实用性。

1 无功/电压实时控制模型

1.1 无功/电压实时控制数学模型

地区电网无功/电压实时控制的目标函数为

$$\min F = P_{\text{loss}}(V_G, T, Q_C) \quad (1)$$

式中 P_{loss} 为电网有功损耗; V_G 为机端电压; T 为变压器档位; Q_C 为电容器容量。约束条件为潮流约束和以下不等式约束。

$$\begin{cases} T_{j\min} \leq T_{jt} \leq T_{j\max}, j \in N_T \\ Q_{Ck\min} \leq Q_{Ckt} \leq Q_{Ck\max}, Q_{Ck} = M_{Ck} D_{Ck}, k \in N_C \\ V_{i\min} \leq V_{it} \leq V_{i\max}, i \in N \\ Q_{Gr\min} \leq Q_{Grt} \leq Q_{Gr\max}, r \in N_G \\ S_{lw} \leq S_{lwt}, w \in N_l \end{cases} \quad (2)$$

式中 N_T 、 N_C 、 N 、 N_G 、 N_l 分别为变压器总台数、可投切电容器数、系统节点数、发电机数和输电线路数; T_{jt} 、 Q_{Ckt} 、 M_{Ck} 、 V_{it} 、 Q_{Grt} 、 S_{lwt} 分别为 t 时刻变压器 j 的档位、电容器 k 的投入容量、投入组数、节点 i 的电压幅值、发电机 r 的无功出力、输电线路 w 的视在功率。

根据无功分层分区平衡原则,地区电网与上级电网间的无功交换要受约束,因此还应加入以下不等式约束。

$$\cos\varphi_{s\min} \leq \cos\varphi_{st} \leq \cos\varphi_{s\max} \quad (3)$$

式中 $\cos\varphi_{st}$ 、 $\cos\varphi_{s\max}$ 、 $\cos\varphi_{s\min}$ 分别为 t 时刻的关口功率因数、关口功率因数上下限值。

离散型控制设备由于受制造工艺等因素限制在一天中的动作次数受到约束,而地区电网实时无功/电压优化控制存在的问题之一就在于离散型控制设备动作过于频繁。但这一约束并不严格,因此建议“有限动作次数”作为约束条件即一天中动作次数需满足如下“软约束”条件。

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{N_S} |M_{kt} - M_{k,t-1}| \leq M_{Ck} \\ \sum_{t=1}^{N_S} |T_{kt} - T_{k,t-1}| \leq T_{Tk} \end{cases} \quad (4)$$

式中 N_S 为当日无功/电压实时控制的启动次数; M_{kt} 为 t 时刻电容器 k 投入的电容器组数; M_{Ck} 为电容器 k 在一天中允许投切的总次数; T_{kt} 为变压器 k 第 t 时刻变压器档位, T_{Tk} 为变压器 k 在一天中允许调节的总次数。“软约束”使无功/电压实时优化控制问题变得更为复杂,成为一个具有时间与空间复杂性的非线性优化问题。

1.2 增量启动策略

无功节点集为电容器所在节点和通过变压器与其直接相连的各节点的集合,如图1中电容器 C 的无功节点集为{5,3}。电压节点集为变压器所控制的节点和与这些节点经非变压器支路相连节点的集合,如变压器 T 的电压节点集为{5}。增量启动策略即为通过对各无功节点集负荷的动态融合分段求

出反应控制设备动作次数分配和各母线负荷情况的启动增量,根据各自的启动增量控制优化程序的启停。当无功节点集的无功负荷变化超过启动增量时,优化程序启动。

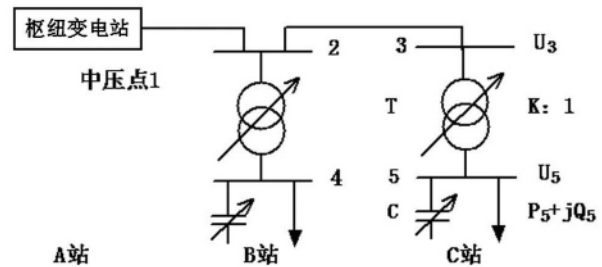


图1 电网示意图

1.3 模糊控制成本

综合考虑优化时刻所处负荷水平、控制设备动作占分配动作次数的比例、动作出现振荡的程度等因素,通过模糊推理使控制成本模糊化,更加合理地限制和分配设备的动作次数。采用以总负荷水平、动作比例和反应动作振荡程度的限振系数为输入量,而以模糊控制成本为输出量的模糊逻辑控制器,如图2所示。将单位模糊控制成本与动作次数相乘加入到目标函数中可以合理限制和分配控制设备在各控制点与各控制时段的动作次数。

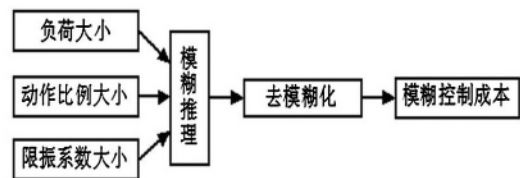


图2 模糊逻辑控制器

2 改进差异进化算法

2.1 标准 DE 算法模型

DE 算法是一种通过模拟生物进化现象(选择、杂交、变异)来表现复杂现象的概率搜索方法。Price K 推荐的首选方法为将杂交和变异直接结合起来,形成一种简洁的完整 DE 形式,如式(5)所示。

$$\begin{aligned} u'_{ij}[k] &= u_{ij}[k] + K(u_{r_3j}[k] - u_{ij}[k]) \\ &+ F(u_{r_1j}[k] - u_{r_2j}[k]) \end{aligned} \quad (5)$$

该繁衍规则虽然简单,但其为 DE 算法赋予了自适应调整并保持旋转不变性的能力。采用一种从上式的基础上衍生出来的更为简单的 DE 算法,其第 k 代繁衍规则为

$$u'_{ij}[k] = u_{ij}[k] + K(u_{bestj}[k] - u_{ij}[k]) + F(u_{r_1j}[k] - u_{r_2j}[k]) \quad (6)$$

式中 r_1, r_2 为互不相等且不等于 i 的整数, 从 $1 \sim N$ 中随机选取; K 和 F 为杂交系数和缩放系数, 通常在 $[0, 1]$ 间取值; $u_{bestj}[k]$ 标记到当前为止的最佳个体的第 j 维分量。式(6)可以认为是式(5)的“贪婪”版, 因为它引入当前最佳个体的信息来产生新个体, 指导后续搜索。虽然 $K(u_{bestj}[k] - u_{ij}[k])$ 产生的“收缩效应”可能使进化过程早熟, 但此效应也可由 $F(u_{r_1j}[k] - u_{r_2j}[k])$ 项提供的“发散效应”来平衡, 故整体上仍能保持全局搜索能力。

2.2 适应度函数

DE 算法中个体的好坏由适应度来评价, 因此适应度函数的选取至关重要。DE 在解空间是一种无约束搜索, 控制变量通过解的限制而自动满足, 等式约束则通过潮流方程得到满足。母线电压、关口功率因数等作为状态变量, 通过在目标函数中增加二次罚函数来实现。根据地区电网无功/电压实时优化控制要求, 在优化网损等的同时也应使一天中控制设备动作次数满足“软约束”要求。因此, 将表征控制设备动作代价的模糊控制成本加入目标函数, 新目标函数为

$$\begin{aligned} \min F = & P_{\text{loss}} + \lambda_1 \sum_{i=1}^N (U_{it} - U_{\text{lim}t})^2 \\ & + \lambda_2 \sum_{i=1}^{N_C} (Q_{it} - Q_{\text{lim}t})^2 + \lambda_3 \sum_{i=1}^{N_I} (S_{it} - S_{\text{lim}t})^2 \\ & + \lambda_4 (\cos \varphi_{st} - \cos \varphi_{\text{lim}t})^2 + \sum_{i=1}^{N_T} F_{cc_{it}} (T_{it} - T_{i,t-1})^2 \\ & + \sum_{i=1}^{N_C} F_{cc_{it}} (M_{it} - M_{i,t-1})^2 \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 分别为母线电压、发电机无功输出、线路潮流和关口功率因数越限罚系数; $F_{cc_{it}}$ 为 t 时刻控制设备的模糊控制成本; 式(7)中 $x_{\text{lim}t}$ 由以下表达式定义。

$$x_{\text{lim}t} = \begin{cases} x_{it}^{\max} & \text{if } x_{it} > x_{it}^{\max} \\ x_{it}^{\min} & \text{if } x_{it} < x_{it}^{\min} \end{cases} \quad (8)$$

在 DE 求解中, DE 搜索具有最大适应度的解, 因此, 将最小目标函数转换成一个最大适应度函数。

$$f = K/F \quad (9)$$

式中 K 为一很大常数, 用来放大通常很小的 $1/F$ 使得个体的适应度值在一个较大范围内。

2.3 种群选取

2.3.1 定制初始种群

DE 算法初始化种群采用完全随机的方法。采

用混合编码, 将控制设备的动作量作为个体分量, 此时刻的任何动作都是在上一时段的基础上发生的, 相当于记忆了上一时段控制设备状态。因此 0 作为一个初始个体可以使 DE 记忆上一时段控制设备的优良信息。为加快 DE 算法的收敛速度, 基于无功就地平衡思想, 将无功节点集的无功负荷前后时段之差分别赋值给个体中电容器分量得到 N_C 个初始个体。地区电网无功/电压控制中要求变压器档位一次调档一般不超过 3 档, 同时希望动作次数不宜过多, 故采用分别赋值给个体中变压器分量得到个初始个体。剩余个体采用 DE 方法随机初始化。

2.3.2 个体评价

地区电网属于中高压配电网, 一般不满足的条件, 故不适于高压输电网的有功无功解耦算法; 其也不完全满足辐射电网等低压配电网特征, 低压配电网的前推后代等算法也不适于地区电网的潮流计算, 故推荐使用牛顿法进行潮流计算。潮流计算时间占了智能算法时间的大半, 为提高算法效率对每一个体进行简要评价, 若合格则进入下步运算, 否则根据公式重新生成。

(1) 根据无功分层分区要求, 关口不允许向上级电网大量倒送无功, 合格个体应满足关口功率因数约束, 即满足式(10)。

$$Q_{\text{slack min}} \leq \sum_{k=1}^{N_C} Q_{Ck} \leq Q_{\text{slack}} \quad (10)$$

式中 $Q_{\text{slack min}}$ 为满足关口功率因数下限值必须提供的无功补偿量; Q_{Ck} 为电容器 k 投入的容量; Q_{slack} 为关口无功功率。

(2) 根据控制设备动作后对本地影响最大的经验对母线电压做出预估计。

如图 1 所示, 若变电站 C 的进线无功为 Q_3 , 设电容器的补偿容量为 ΔQ , V_3 近似保持不变, 忽略变压器励磁回路, 则补偿前后 V'_5 和 V_5 如式(11)和(12)所示。

$$V_5 = (V_3 - \frac{P_5 R_{T3} + Q_5 X_{T3}}{V_3}) / K_3 \quad (11)$$

$$V'_5 = (V_3 - \frac{P_5 R_{T3} + (Q_5 - \Delta Q_C) X_{T3}}{V_3}) / K'_3 \quad (12)$$

式中 R_{T3} 和 X_{T3} 为变压器支路的电阻和电抗; K'_3 为变压器调节后的变比; V'_5 为调节后的低压母线估计值。一个合格个体应满足

$$V_{i \min} - \varepsilon < V'_i < V_{i \max} + \varepsilon \quad (13)$$

式中 ε 为考虑到电压估计值误差而适当放宽电压

限值的裕度。

(3) 假设电容器 i 的单组容量为 D_C , 上时刻动作为 $x_{i,t-1}$, 无功节点集此时刻的无功负荷为 $Q_{L,t}$, 下一时刻预测负荷为 $Q_{L,t+1}$, 一般无功负荷增量主要由本地补偿, 因此下个时刻的补偿组数估计值为

$$\Delta Q_{C,t+1} = (Q_{L,t+1} - Q_{L,t}) / D_C \quad (14)$$

如果式(15)成立, 则表明电容器动作存在较大振荡, 从而认定该个体不合格。

$$\text{sgn}(x_{i,t-1}) \times \text{sgn}(x_{i,t}) = -1 \quad \text{and}$$

$$\text{sgn}(x_{i,t}) \times \text{sgn}(\Delta Q_{C,t+1}) = -1 \quad (15)$$

(4) DE 进化中后期个体差异性变小, 当个体出现在相同位置或者差异度小于 ε_x 时, 利用具有遍历与随机性的混沌算子直接初始化个体。

2.4 “约束指导”寻优

由于 DE 进化前期大量个体的随机分布使不少个体处于非可行解位置, 为了避免个体过多的在无效空间搜索, 对于造成状态变量越限的个体在式(6)中引入一个“约束指导”分量如式(16)所示。如无功节点集中的节点电压过高, 则按照就地控制原则切除一组电容器, 电压节点集中的节点电压过高则降低一档变压器档位, 反之亦然。约束指导分量快速把个体拉回到可行解空间内, 加快了 DE 的收敛。

$$u'_{ij}[k] = u_{ij}[k] + \text{round}(\text{rand}) \times \text{sgn}(dx_j) \quad (16)$$

式中 round 为四舍五入函数; rand 为 $[0, 1]$ 内的随机数; sgn 为符号函数; dx 为“约束指导”分量。

2.5 分群寻优

为更好地解决算法的收敛性以及真正做到在各种情况下给出确定解, 这里设计了分级约束分群求解的方法, 即将约束条件分为3级, 分别为严格约束级、约束级和松弛级, 如节点电压在 $1 \sim 1.05$ p.u. 为严格约束级, 在此基础上扩大 0.02 p.u. 的电压值为约束级, 在约束级范围外即为松弛级, 如图3所示。

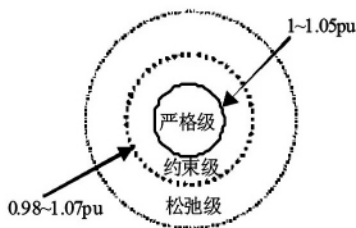


图3 分群示意图

根据不同的群体采用不同的策略以减少潮流计算量。对严格约束级, 采用高精度的潮流计算如计算误差到 10^{-5} ; 对于约束级, 则考虑低精度的潮流

计算如误差 0.5×10^{-3} ; 而对于松弛级则采用灵敏度算法^[7]。考虑到灵敏度计算为线性近似计算, 可能在某些节点出现较大的电压偏差, 故对其输出的节点电压结果利用式(12)进行简单评估, 取它们靠近约束级的电压值。通过对属于松弛级群体的个体运用灵敏度计算减少了大量的潮流计算, 提高了算法求解无功/电压优化问题的速度。

从 DE 繁衍规则可以看出, 差异项是由当前种群中随机选取的两个个体之间的差异构成的, 每一个体的变异方向是有限的, 故 DE 在繁衍中缺乏真正的随机变异操作。通过将松弛级群体中的最差个体, 直接运用混沌函数进行重新初始化操作, 利用混沌的遍历性和无规律性向群体中引入新的个体, 带来新的“差异”, 克服 DE 算法变异方向的有限性问题。

3 算例及其分析

为验证所提方法的可行性与有效性, 将某地区电网作测试, 该电网有一个 220 kV 枢纽变电站和 7 个 110 kV 变电站, 其控制范围从变电站 220 kV 进线端到 10 kV 出线端, 母线电压的上下限值分别为 1.07 和 0.97 p.u., 基准值为 100 MVA, 控制设备配置情况见表1。用 VB 语言编写程序, 在奔腾 3 G、 512 M 内存的计算机上进行仿真。优化控制前系统有功网损为 28.04 MW。应用 DE 算法和所提出的 MDE 算法进行无功/电压实时优化控制计算。由于 DE 固有的随机搜索特性导致各次计算结果可能有所不同, 因此在连续运行 20 次后给出下面的典型运行结果, 如表2所示。

表1 控制设备配置情况

变电站名称	电容器 /组	每组容量 /p.u.	抽头档 位范围
古城站	8	0.096	$8 \times \pm 1.5\%$
三星堆站	4	0.03	$8 \times \pm 1.25\%$
向阳站	2	0.033	$8 \times \pm 1.25\%$
雒城站	2	0.024	$8 \times \pm 1.25\%$
大塘站	2	0.024	$8 \times \pm 1.25\%$
广汉站	2	0.042	$8 \times \pm 1.25\%$
炳灵宫站	2	0.036	$3 \times \pm 2.5\%$
连山站	2	0.024	$8 \times \pm 1.25\%$

从表2可以看出所提出的 MDE 算法比 DE 算法网损下降率高 3.94% , 其平均计算时间不到 20 s, 基本可以满足实时运行控制的需要。一天中电容器和变压器档位动作次数从上百次减少到十多次, 有效控制了设备的动作。另外, 设备动作次数的减少相应缩

表2 优化结果比较

方 法	优化前	DE	MDE
电压越限次数 (次·天 ⁻¹)	28	0	0
功率因数越限次数 (次·天 ⁻¹)	1	0	0
网损下降率/%	—	12.48	16.42
电容器最大动作次数 (次·天 ⁻¹)	0	34	4
电容器总动作次数 (次·天 ⁻¹)	0	172	17
变压器最大动作次数 (次·天 ⁻¹)	0	78	4
电容器总动作次数 (次·天 ⁻¹)	0	405	15
计算时间/s	—	28.40	15.33

短了实时控制中的执行时间,从而部分补偿由于采用群体智能算法而多耗费的时间。图4列出了某一电容器24时刻的投切情况,从中可以看到动作次数明显减少。图5显示了某一变压器档位调节曲线,从中也可以看到动作次数得到了有效限制。从图6可以看出MDE求出的网损曲线更低,效果更好。

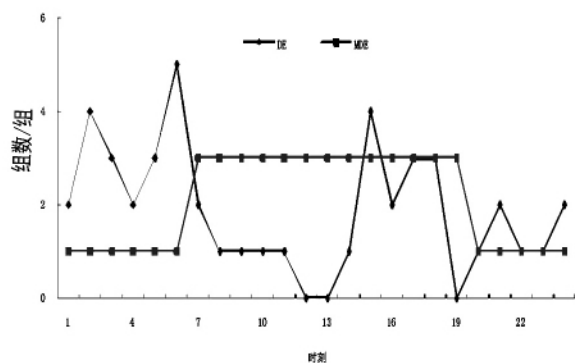


图4 电容器投入组数

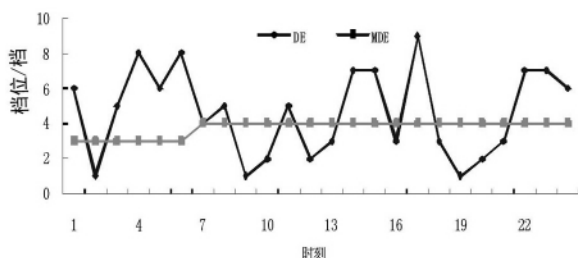


图5 变压器分接头档位动作曲线

4 结 语

(1) 将DE算法与地区电网无功/电压控制特点紧密结合进行“约束指导”和分群寻优,能加快计算

速度,提高收敛效率,合理约束控制设备动作次数。

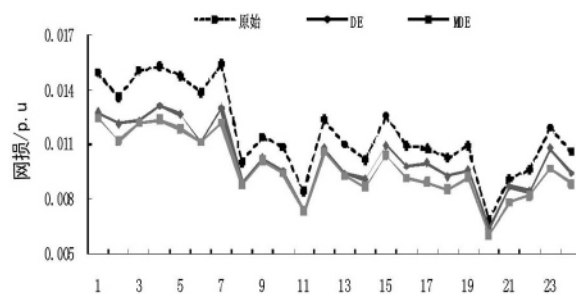


图6 网损曲线

(2) 以一天24时段负荷为例进行计算,所提方法可以轻易推广到目前电力企业所广泛采用的96甚至更多时段中。如何进一步挖掘历史和预测数据进行优化计算以进一步缩短算法时间和有效分配控制设备动作次数将是无功/电压实时优化控制今后研究的方向之一。

参考文献

- [1] 许文超,郭伟.电力系统无功优化的模型及算法综述[J].电力系统及其自动化学报,2003,15(3):100-104.
- [2] Vesterstrom J, Thomsen R. A Comparative Study of Differential Evolution, Particle Swarm Optimization, and Evolutionary Algorithms on Numerical Benchmark Problems [C]. Congress on Evolutionary Computation, Portland, USA 2004: 1980-1987.
- [3] Alireza A, Iman T, Seyed H H. Optimal Reactive Power Dispatch in Electricity Markets Using a Multi-agent Based Differential Evolution Algorithm [C]. IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Setubal, Portugal 2007: 249-254.
- [4] 张丰田,宋家骅,李鉴,等.基于混合差异进化优化算法的电力系统无功优化[J].电网技术,2007,31(9):33-37.
- [5] Bakare G A, Krost G, Venayagamoorthy G. K, et al. Differential Evolution Approach for Reactive Power Optimization of Nigerian Grid System [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, USA 2007: 1-6.
- [6] 苏盛,段献忠,梁才浩,等.基于差异进化算法的并行容错无功优化[J].电力系统自动化,2007,31(21):15-19.
- [7] 刘明波,陈学军,程劲晖.三种无功优化线性规划建模方法的比较[J].电力系统及其自动化学报,1999,11(2):31-36.

作者简介:

潘家和(1982),男,工学硕士,工程师,主要从事电网安全稳定管理工作;

廖丹妮(1985),女,工学学士,助理工程师,主要从事电网调度工作。

(收稿日期:2012-12-19)

纯电容补偿面临的谐波影响及其解决方法

田 园

(南充电业局检修公司, 四川 南充 637007)

摘 要: 目前通过在负荷端并联电容器的无功补偿, 基本能满足低压配电系统的无功需求。但由于谐波的存在, 无功补偿的电容可能导致谐波电流变大, 补偿设备容易被过多的谐波电流损坏。谐波可以通过安装具有适当电抗率的反应器得到有效抑制, 由电容影响扩大的谐波电流也将被减小, 补偿电路就能保证正常工作。同时, 部分谐波可以通过滤波器, 使谐波含量在正常范围内, 确保设备的正常运行。

关键词: 补偿; 谐波; 电容电抗器

Abstract: The current reactive power compensation can basically meet reactive demand in low-voltage distribution system by shunting capacitors at the load side. However, because of a certain amount of harmonics in distribution system, the reactive compensation using pure capacitance could cause the enlargement of harmonic current, the compensation devices are damaged by excessive harmonic current. Harmonics can be effectively suppressed by mounting reactors with suitable reactance rate, and the amplification of harmonic current caused by capacitor will be decreased, so the normal operation of compensation circuit is ensured. Meanwhile, the partial harmonics can be filtered by active filters and passive ones to make harmonic content within normal limits so as to guarantee the normal operation of devices.

Key words: compensation; harmonics; capacitor reactor

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0006-05

偿所用的电容、电感等器件造成了极大影响。

0 引 言

在低压配电系统中的阻感性用电设备得到广泛的应用, 造成电网的功率因数偏低, 给用电设备以及电网造成比较大的危害。无功补偿成为现在低压配电系统中不可缺少的部分, 常用方式是在电力负荷侧并联电力电容器。这种补偿方式可以提高供电系统功率因数, 稳定受电端电压水平, 从而提高电网供电质量。但采用纯电容器进行无功补偿时会有大量谐波产生的情况, 电容器的补偿支路经常容易故障, 造成电容器、投切开关与保护设备损坏。

1 低压配电系统中谐波的产生

工业中常用的各种相控装置、直流电机包含的整流设备、为了实现异步电动机的平缓启动、调速与节能而广泛使用的变频器、低压中频炉、逆变器、荧光灯甚至计算机电源等大量的非线性设备的使用, 使得现在的低压配电系统中存在着大量的谐波, 这对无功补

2 纯电容器补偿面临的问题

2.1 低压配电系统中电容器容易出现的问题

并联于电网运行的电容器是配电系统中最容易损坏的元件, 一般选用 400 V 的额定电压。而实际运行的低压母线, 电压一般会超过电容器额定电压的 3%, 同时低压母线上常会产生的过电压、过电流, 常会造成电容器触点烧结、电容器膜被击穿、电容器鼓包等情况^[1]。

低压负荷中的非线性设备产生大量谐波, 经实测发现谐波电压含量一般能达到国家的标准, 影响不大, 但谐波电流的影响却不容忽视^[4]。现场测试到纯电容器补偿支路与系统侧的谐波电流都被放大, 放大的谐波电流叠加于电容器的两端, 致使补偿支路的电流过大。

所以电网中谐波电流已经成为补偿支路不能正常运行和电容器的使用寿命减少的主要原因。

2.2 电容器对谐波电流的影响

电力系统中的元件大多为系统阻抗呈感性的感性元件,并且在不同的频率下,呈现不同的阻抗性质和数值,影响系统的正常运行。

2.2.1 电容器对谐波电流的放大

电力系统的谐波源主要是可以认为是恒流源的谐波电流源,即输入阻抗变化时其谐波并无多大的变化^[2]。图1是现在低压补偿系统的简化图。

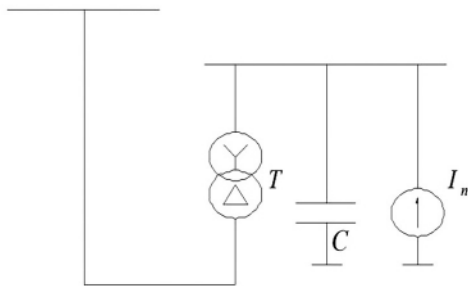


图1 系统简化接线图

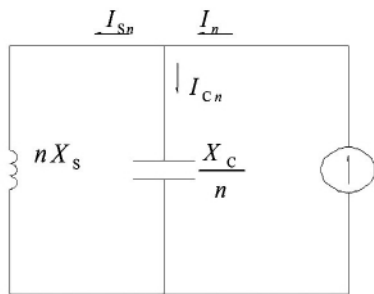


图2 等值电路图

低压母线上并联的补偿电容器,其谐波阻抗为 X_{Cn} 。略去电阻影响,系统的等效电路为图2;谐波源的谐波电流为 I_n ,得到注入系统中的谐波电流 I_{Sn} 与电容器支路的谐波电流 I_{Cn} 分别为

$$I_{Sn} = \frac{-X_c/n}{nX_s - X_c/n} \cdot I_n \quad (1)$$

$$I_{Cn} = \frac{nX_s}{nX_s - X_c/n} \cdot I_n \quad (2)$$

由于基波参数不变,故支路电流为 I_{Cn} 和 I_{Sn} 是频率的函数。令电容器串电抗器支路的谐波阻抗与系统谐波阻抗之比为

$$\alpha = f(n) = \frac{-X_c/n}{nX_s} \quad (3)$$

α 就是谐波次数 n 的函数,并随 n 而变化,系统侧谐波 I_{Sn} 与负载产生谐波 I_n 之比、电容器支路的谐波 I_{Cn} 与设备产生谐波 I_{Sn} 之比可分别表述为

$$\frac{I_{Sn}}{I_n} = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \quad \frac{I_{Cn}}{I_n} = \frac{1}{1 + \alpha} \quad [3]$$

根据并联纯电容器后的谐波电流放大曲线图可以看出,只要投入纯电容器进行补偿就会发生谐波电流的放大。在 $-0.5 < \alpha < 0$ 时,系统的谐波电流比没有补偿时有所下降;但随着纯电容投入数量增多 α 会减小,情况会更加严重。在 $-1 < \alpha < -0.5$ 时,谐波电流被严重放大,电容侧的谐波电流被放大2倍以上,电容器很容易发生击穿。在 $\alpha = -1$ 的时候发生并联谐振,系统谐波阻抗 X_{Sn} 与电容阻抗 X_{Cn} 相等;在较小的谐波电流作用下也会在并联阻抗的两端产生无限大的谐波电压,电容器支路的电压会远超过其额定电压,很容易造成电容器的膜被击穿,发生鼓包、漏油。

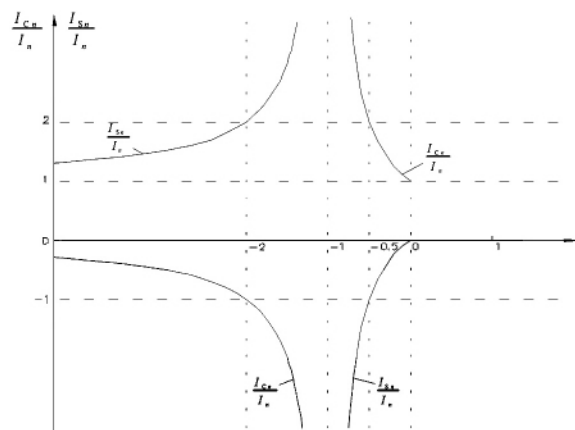


图3 并联纯电容器的谐波电流放大曲线

2.2.2 纯电容在谐波环境下的工作情况

表1是在某厂实测到并联电网的电容器实际的工作情况^[4],该电容器的额定容量为30 kvar,额定电流为43.3 A。电容器侧主要含有5次谐波,同时存在少量的3次谐波。

表1 纯电容器补偿支路的实测情况

名称	L ₁	L ₂	L ₃	合计
单相电压/V	227.8	228.3	227.3	
单相电流/A	50.91	49.41	51.21	
视在功率/kVA	11.6	11.3	11.6	34.5
有功功率/kW	0.4	0.4	0.3	1.1
无功功率/kvar	-11.6	-11.3	-11.6	-34.5
电流总谐波畸变率/%	57.7	54.0	60.1	
电压总谐波畸变率/%	2.8	2.8	3.0	
基波电流/A	43.6	43.0	43.3	
3次谐波电流/A	4.9	5.5	6.0	
5次谐波电流/A	24.5	23.8	25.0	

3 低压配电系统中纯电容器补偿的改进

通过改变用电设备,使用不产生谐波的用电设备;加装无源滤波器或者有源滤波器,滤除部分谐波;改变电容器支路设备,加装电抗器抑制谐波,降低电容器支路的谐波电流等等方法来保证用电设备与补偿支路的正常工作。

3.1 改变用电设备

非线性的用电设备是主要的谐波产生源,在选择用电设备的时候,最好选择容性的或者电阻性的设备,不用进行无功补偿。

但现在想要改变用电设备来减少谐波的含量是不可能实现的。用电设备的前期投入的资金很高,要想再改变是不可能的,而且产生谐波的设备往往是辅助设备,是不能缺少的,因此想通过改变用电设备这种方式来解决纯电容器补偿对谐波电流的放大是不能实现的^[5]。

3.2 补偿支路加装无源滤波器

用电设备产生的谐波已经对电网产生比较严重的影响,通过加装电抗器的电容器支路,虽然能够抑制谐波,但由于谐波的基数过大,造成谐波的抑制效果不明显。此时为了滤除某次谐波就可以利用无源滤波器来解决滤波要求不是很高的工况^[6]。

无源滤波器主要由滤波电容器、滤波电抗器等组成 LCR 滤波装置,针对某次谐波来进行滤除。现在应用上来看,一般无源滤波器只能滤除部分谐波,滤波的效果不是很好。无源滤波器作为吸收谐波的设备,主要分为有单调谐滤波器和高通滤波器两种基本型式。

单调谐滤波器由 L、C、R 元件串联组成,高通滤波器主要产用 L、C、R 元件经串、并联组成。无源滤波需要针对不同次数的谐波做多个的滤波回路,设备的总回路数量很大,设备的体积比较大,并且对电容器与电抗器运行的准确性与承受谐波过电流的要求很高。现在无源滤波器只是在针对某次谐波电流含量过高,并且要求谐波必须滤除的工厂里少量使用。

3.3 补偿回路加装有源滤波器

有源滤波器是一种用于动态滤除谐波、补偿无功的新型电力电子装置,它可对大小和频率都变化的谐波以及变化的无功进行补偿,其应用可克服 LC

滤波器等传统的谐波抑制和无功补偿方法的缺点。

有源滤波器是以时域分析为基础对畸变波实时“跟踪”补偿,检测补偿对象电流中的谐波和无功等电流表分量。检测结果经指令电流运算电路计算出补偿电流的指令信号,该信号经补偿电流发生电路放大,得出补偿电流,补偿电流与负载电流中要补偿的谐波及无功等电流抵消,最终得到期望的电源电流。这样可使任意频率、任意幅值和相位的谐波都能清除,并使无功功率得到完全的补偿^[7]。

有源滤波器要做到完全的波形补偿,就需要很好的信号跟踪系统,同时要做出快速判断,还要性能稳定的电源作为补偿的元件。现有技术还不能进行大范围推广,只在装设对谐波很敏感的精密仪器的工厂少量使用。

3.4 改变电容器支路

通过改变电容器支路的设备是最好的方法,也是最节约成本的方式,可以在电容器支路侧加装串联电抗器来实现谐波的抑制。加装电抗器后必须使电容器支路在高次谐波频率下呈感性,起到抵制谐波电流的效果,基波频率下呈容性,进行无功补偿。

可以通过加装电抗器后的情况进行分析,图4为系统的简化图,可以等效出电网的等值电路为图5。

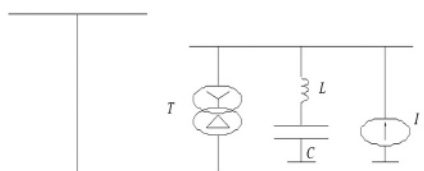


图4 系统简化接线图

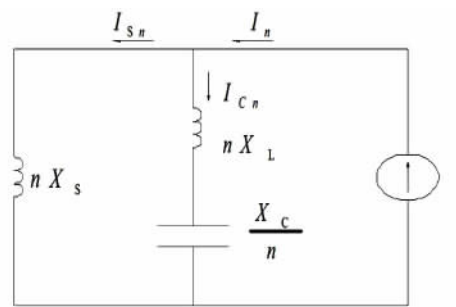


图5 等值电路图

在某次谐波电流的情况下,电容器支路的阻抗值为 $nX_L - X_c/n$ 。

经分析可以得到系统侧谐波电流为

$$I_{Sn} = \frac{nX_L - X_c/n}{nX_s + (nX_L - X_c/n)} \cdot I_n \quad (4)$$

电容器支路的谐波电流为

$$I_{Cn} = \frac{nX_L - X_C/n}{nX_S + (nX_L - X_C/n)} \cdot I_n \quad (5)$$

由于基波参数不变,故支路电流 I_{Cn} 和 I_{Sn} 是频率的函数。令电容器串电抗器支路的谐波电抗与系统谐波电抗之比为

$$\alpha = f(n) = \frac{nX_L - X_C/n}{nX_S} \quad (6)$$

在系统情况给定时, X_S 、 X_L 和 X_C 的值给定, α 就是谐波次数 n 的函数,并随 n 而变化,得出系统侧谐波电流 I_{Sn} 与谐波源的谐波电流 I_n 之比、电容器支路的谐波电流 I_{Cn} 与谐波源的谐波电流 I_n 之比分别为

$$\frac{I_{On}}{I_n} = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \quad \frac{I_{On}}{I_n} = \frac{1}{1 + \alpha}$$

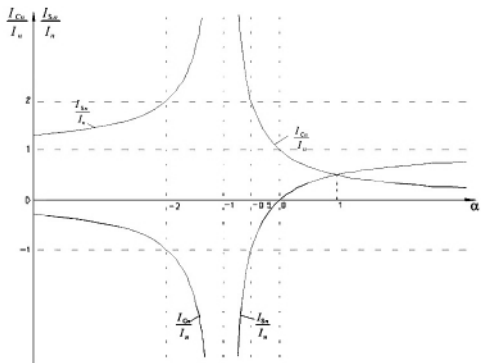


图6 谐波电流放大曲线

图6为加装电抗器后的谐波电流的放大曲线图形,可以看出在电容器串联电抗器后的系统谐波电流、电容器支路谐波电流对谐波源的谐波电流的关系^[8]。在 $-0.5 < \alpha < 0$ 时,电容器侧为容性,谐波电流被放大为 n 次谐波电流的2倍以下,可以实现滤波的作用。此时有较高的谐波电流,设备容易击穿。

在 $\alpha = 0$ 时,在 n 次谐波阻抗为零,构成 n 次谐波电流的通道,可以完全滤除谐波。在 $0 < \alpha < 1$ 时,电容器支路呈感性,系统谐波电流 I_{Sn} 与电容器侧谐波电流 I_{Cn} 都大于0,有效保护电容器。当出现 $\alpha > 1$ 时,电容器侧谐波电流 $I_{Cn} >$ 系统谐波电流 I_{Sn} ,大部分谐波电流倒送电网,会对电网产生不良影响。少量的谐波电流进入电容器支路,保证进行无功补偿。串联电抗器进行谐波抑制必须要求达到 $\alpha > 0$,才不会发生谐波电流放大。

3.4.1 选择合适的电抗率

选择合适的电抗率是谐波抑制的关键问题,由于电抗率是电抗器的感抗与电容器的容抗的比值,

$A = X_L - X_C$ 。电容器支路的谐波电流为

$$I_{Cn} = \frac{nX_L - X_C/n}{nX_S + (nX_L - X_C/n)} \cdot I_n = \frac{(An^2 - 1)X_C}{nX_S + (An^2 - 1)X_C} \cdot I_n \quad (7)$$

要求 I_{Cn} 必须大于0才能保证谐波电流不会被放大,电容器支路的谐波电流、系统侧谐波电流都小于谐波源的谐波电流。

针对3次谐波时, $A > 11.11$,一般选用12%的电抗率,同时在5、7次谐波时电容器支路的谐波电流较小,工况特殊的时候(3次谐波电流含量超过50%)建议使用13%、14.8%的电抗率。

针对5、7次谐波时, $A > 4$,一般选用4.5%的电抗率,同时在7次谐波时电容器支路的谐波电流较小,在抑制5、7次谐波时采用6%及以上的电抗率。实际设计中为保护电容器运行时,都建议采用7%的电抗率,减少流入电容器的谐波电流的比例^[9]。

加装串联电抗器是最简单易行的方式,并且投资资金比较少,但这种方式只能让电容器支路与系统分流谐波电流。实际设计时为保护电容器支路的正常运行,往往通过加大电抗率来提高电容器支路的谐波阻抗,保证电容器支路承受少量的谐波电流,总电流在其额定电流以下,同时让多数的谐波电流反馈电网。

3.4.2 电容器电压的选择

在串有电抗器的电容器支路,电抗器呈感性,电容器呈容性,电容器两端的电压为 $U_C = U_S + U_L$,同时 $A = X_L/X_C$,即 $U_C = U_S/(1 - A)$ 。电容器在加装电抗器后会升压,电容器的额定电压要根据电抗率与母线电压进行选择。

表2 加装13%电抗器的补偿支路的实测情况

名称	L_1	L_2	L_3	合计
单相电压/V	234.5	234.8	236.1	
单相电流/A	118.0	116.4	117.4	
视在功率/kVA	27.7	27.3	27.7	82.7
有功功率/kW	0.8	1.3	1.2	3.4
无功功率/kvar	-27.7	-27.3	-27.7	-82.7
电压总谐波畸变率/%	2.5	2.4	2.2	
电流总谐波畸变率/%	4.1	3.8	3.9	
基波电流/A	117.9	116.3	117.3	
3次谐波电流/A	1.4	1.1	0.8	
5次谐波电流/A	4.5	4.2	4.4	

表 3 加装电抗器的系统侧补偿前后的实测情况

名 称	补偿前系统侧的情况				补偿后系统侧的情况			
	L ₁	L ₂	L ₃	合计	L ₁	L ₂	L ₃	合计
电压 /V	231	232	233		237	238	239	
电流 /A	584	554	542		350	337	346	
视在功率 /kVA	135	129	127		82.8	80	82.7	246
有功 /kW	71.3	64	63.0		77.8	74	77.6	230
无功 /kvar	114	112	110	336	28.4	30	28.4	86.8
电压总谐波畸变率 /%	2.7	2.8	2.5		2.3	2.4	2.1	
电流总谐波畸变率 /%	12.0	13	13.7		18.1	20	19.3	
基波电流 /A	580	549	536		345	330	340	
3 次谐波电流 /A	7.9	8.5	8.2		4.5	4.6	3.9	
5 次谐波电流 /A	66.0	70	69.5		58.8	63	61.8	

在针对 3 次谐波 ,采用 12% 的电抗率时 ,并联与电压为 400 V 的母线上时 ,电容器两端的电压为 454.6 V ,则必须选择电容器的额定电压为 480 V 或 500 V。针对 5、7 次谐波 ,采用 7% 的电抗率时 ,并联于电压为 400 V 的母线上时 ,电容器两端的电压为 430.1 V ,则最低选择电容器的额定电压为 450 V。

3.4.3 电容器的容量的选择

现在选择补偿总容量主要根据设备的有功功率与功率因数来计算单个设备所需要的无功容量 ,再使用利用率相乘 ,得到无功补偿的总容量 ,这样的计算结果有比较高的精度。

选择电容器分组时 ,现在主要采用等容量的方式 ,一般采用 8~10 组比较好 ,每次投入的时候可以投入较小的容量 ,产生较小的涌流 ,电容器分组可以根据现在情况合理地选择。

3.4.4 电容器支路开关的选择

电容器补偿柜的一次回路的控制开关主要有切换电容接触器、智能复合开关、可控硅开关等。可控硅开关是未来发展的一个方向 ,其投入时没有涌流 ,切除时涌流较小 ,动作速度快的特点已经得到重视^[11]。

开关设备的额定电流可以根据电容器的额定参数进行选择 ,在电网含有谐波的时候可以按电容器额定参数的 1.5~2.0 来选择设备。

3.5 采用加装电抗器的改造实例

表 2 是对改造后电容器补偿支路的测试情况^[4] ,表 3 是在系统的低压母线处测试情况 ,两次测试分别是没有无功补偿与电容器串联电抗率为

13% 的电抗器后的情况。

经过项目改造前后实测的补偿支路的电能质量的分析 ,可以看出加装电抗器后补偿支路的电流谐波的畸变率由 60% 下降到 4% ,5 次谐波电流有明显的下降 ,同时总电流下降到允许的范围 ,谐波电流抑制效果非常明显。

根据系统的低压母线处测试补偿前后的情况 ,系统的谐波电流以 5 次谐波为主 ,含有部分的 3 次谐波。此时无功功率得到补偿 ,变压器的利用率得到提高。无功补偿后总电流下降近 40% ,谐波总电流的下降近 15%。

4 结 语

无功功率补偿、谐波治理是当前乃至今后相当长的时期内的低压配电系统面临的重要问题。如今纯电容器的补偿柜在谐波含有量很少的工业和民用得到广泛的应用。面对大量产生谐波的用电设备 ,低压配电系统已经对电容器补偿支路提出了更高的要求 ,抑制谐波、滤除谐波的时代已经来临。补偿支路加装电抗器进行谐波抵制是当前最经济而实用的方法 ,选择合适的电抗率还是有很大的困难 ,必须经过现场的测试与设备的分析来选择。现在串联电抗器进行谐波抑制还是首选方案 ,基于电力电子技术的有源滤波器应用将会对未来建设干净电网发挥重要的作用。

(下转第 47 页)

电网损耗,变压器档位和电容器的调节量较大,AVC系统省时省力省资源的优势明显。

目前成都电网AVC系统已与省调AVC主站系统的通讯、控制策略和优化模式联调成功。省调主站实时下发220 kV变电站母线电压参考值和关口力率,地调AVC主站系统接收后,作为优化计算的约束条件,进而得到优化控制策略,最后根据优化控制策略结果调控220 kV变电站。

7 结 语

对成都电网自动电压控制AVC系统的建设、实现和运行情况进行了介绍。成都电网AVC系统将完善地调AVC系统和县调AVC系统的协调控制。自从成都电网区域闭环控制稳定后,全网在电能质量、功率因素都有全面提高,增加了无功补偿设备的利用率,实现无功功率分层就地平衡,对降低系统网损,减小运行人员工作强度起到重要作用。今后可以进一步优化地调AVC系统,完善省、地、县调AVC系统的联合协调闭环控制,使无功电压控制方式更趋合理高效。

参考文献

- [1] 余涛,周斌. 电力系统无功/电压控制策略研究综述[J]. 继电器, 2008, 36(6): 79-83.
- [2] 郭庆来,吴越,等. 地区电网无功优化实时控制系统的研究与开发[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(13): 67-69.
- [3] 李端超,陈实,等. 安徽电网自动电压控制(AVC)系统设计及实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 20-22.
- [4] 郭庆来,孙宏斌,张伯明,等. 江苏电网AVC主站系统的研究和实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 83-87.
- [5] 唐寅生,李碧君. 电力系统OPF全网最优无功的经济压差算法及应用[J]. 中国电力, 2000, 33(9): 42-44.

作者简介:

刘建(1984),男,助理工程师,主要从事电力调控运行工作;

胡启元(1972),男,工程师,主要从事电力调控运行及相关研究工作。

(收稿日期:2012-12-03)

(上接第10页)

参考文献

- [1] 宋文南. 电力系统谐波分析[M]. 天津: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 孙成宝,李广泽. 配电网实用技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [3] 吴兑昌,孙树勤,宋文南,等. 电力系统谐波[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [4] 李冰,淳森林. 现场测试报告[R]. 成都胜业电器设备有限公司, 2009.
- [5] 于永源,杨绮雯. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [6] 姚为正. 三相串联型电力滤波控制方式及其补偿特征的研究[M]. 西安: 交通大学, 1999.
- [7] 周训伟. 串联有源电力滤波器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [8] 苏文成. 无功功率补偿与电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [9] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [10] T. J. E 米勒主编. 电力系统无功功率控制[M]. 北京:

水利电力出版社, 1990.

- [11] 航空工业部第四规划设计研究等编. 工厂配电设计手册[S]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [12] 汪穗峰,张勇军,任倩,等. 配电网可靠性定量分析综述[J]. 继电器, 2008, 36(3): 79-83.
- [13] 刘进军,卓放. 电容滤波型整流电路网侧谐波分析[J]. 电力电子技术, 1995(4): 14-19.
- [14] GB/T 14549-93, 电能质量 公用电网谐波[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [15] 王汝文,张杭. 电力电子技术应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [16] Dobinson A D. Closer Accord on Harmonics[J]. IEEE Electron Power, 1997(5): 567.
- [17] Sakui M, Fujita H, Shioya M. A Method for Calculating Harmonic Currents of Three-Phase Bridge Uncontrolled Rectifier with DC Filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1989, 36(3): 434-440.

作者简介:

田园(1979),男,工程师,主要从事电力系统规划、设计和施工。

(收稿日期:2013-02-04)

模拟小信号电能表的应用及其检测技术

艾 兵 江 波 杨华云 梁祖权 杨勇波
(四川电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘 要: 为适应智能变电站计量技术的发展,在新的技术条件基础上需有一套符合智能变电站特点的计量系统。结合电子式互感器输出信号特点及计量有关标准,着重讨论符合 IEC 60044-7/8 标准输入的模拟小信号电能表工作原理、性能特点和实际应用,论述了模拟小信号电能表检测系统和溯源方案,提出了一套模拟小信号电能表的现场考核系统。由于模拟小信号电能计量暂无国家标准和行业标准,随着智能变电站的大量投运,相关一系列建标工作即将开展。

关键词: 模拟小信号电能表; 电能计量; 检测; 考核系统

Abstract: In order to adapt to the development of metering technology in smart substation, it requires a set of measurement system which is consistent with the features of smart substation on the basis of new technical conditions. Combined with the characteristics of output signal of electronic transformer and the relevant standards of measurement, the working principle, performance characteristics and practical applications of the analog small-signal power meter are discussed in line with IEC 60044-7/8. The testing system and traceability program of analog small-signal power meter are also discussed, and a set of on-site assessment system for the analog small-signal power meter is proposed. Since there are no national standards and industry standards for the analog small-signal power metering, establishing the relevant standards will be carried out along with smart substation being put into operation.

Key words: analog small-signal power meter; energy metering; detection; assessment system

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0011-04

随着数字化智能技术不断发展,传统的变电站自动化系统已无法满足智能化电网的要求,智能变电站将是电力系统变电站建设的一次革新,将来新建变电站将全部为智能变电站^[1-4]。数字化技术的推广,引发了电能计量技术的变革,包括新型电子式互感器的运用、一次侧到二次侧电参量传输的介质改变、电参量传输的信号模式改变、表计计量采用专用芯片与自用算法的数字信号处理、表计的容错处理和表计的检验与溯源等^[5-8]。智能变电站电能计量同样是通过互感器及二次回路联合电能表按照规定的接线方式进行组合构成在线电能计量系统来实现的。由于电子式互感器的应用,电能计量输入信号为数字量和模拟小信号量,例如全国首座智能变电站北川永昌 110 kV 变电站高压侧采用的是全数字式电能计量,10 kV 侧则是符合 IEC 60044-7/8 标准输出的电子式互感器的计量特点,采用的为模拟小信号量输入的电能计量方式^[9-14]。在电力市场条件下,为保证公开、公平、公正地为电能生产者和使用者提供优质服务,有必要在新的技术条件的

基础上有一套符合现代化智能变电站特点的计量和检测系统。但是智能变电站电能计量暂无国家标准和行业标准,只有通过已有智能变电站的实际运用情况和参照地方标准和行业标准进行。随着数字电路的发展,电路的可靠性和精度得到了提高,必定会推动了智能变电站电能计量快速发展^[15,16]。

1 模拟小信号电能表的现场应用

模拟小信号电能表是一款符合 IEC 60044-7/8 标准的模拟信号接口规范的多功能电能表。其主要特点是计量电压电流信号输入采用模拟小信号输入、电源设计采用交直流外接电源供电。适用于基于 IEC 60044-7/8 标准的电子式互感器模拟小信号输出的计量方式。根据 IEC 60044-7/8 标准规定,输出的模拟小信号全部为电压模拟信号,对于三相三线系统为 1.625 V、2 V、3.25 V、4 V、6.5 V,三相四线系统为 $1.625/\sqrt{3}$ V、 $2/\sqrt{3}$ V、 $3.25/\sqrt{3}$ V、 $4/\sqrt{3}$ V、 $6.5/\sqrt{3}$ V。但是对于特殊要求用户,模拟量也可

以设计成非标准大小,如北川永昌 110 kV 智能变电站就设计成 1.5 V,主要是配合应用于保护测控。模拟小信号电能表的实际应用接线如图 1 所示。

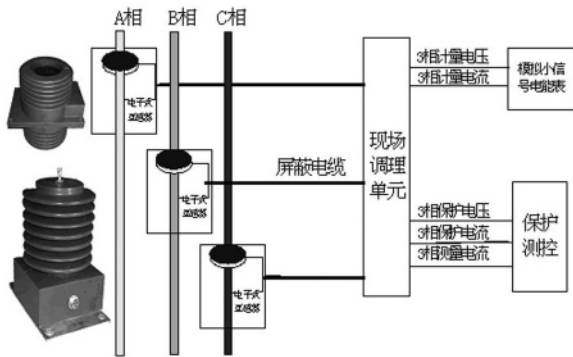


图 1 模拟小信号电能表的应用

2 工作原理及实现功能

模拟小信号电能表由电压、电流分压电路、计量芯片、微处理器、温补实时时钟、数据接口设备和人机接口设备组成。计量芯片将来自电压、电流分压电路的模拟信号转换为数字信号,并对其进行数字积分运算,从而精确地获得有功电量和无功电量,微处理器依据相应费率和需量等要求对数据进行处理。其结果保存在数据存储器中,并随时向外部接口提供信息和进行数据交换。其原理框图如图 2 所示,外形接线示意图如图 3 所示。

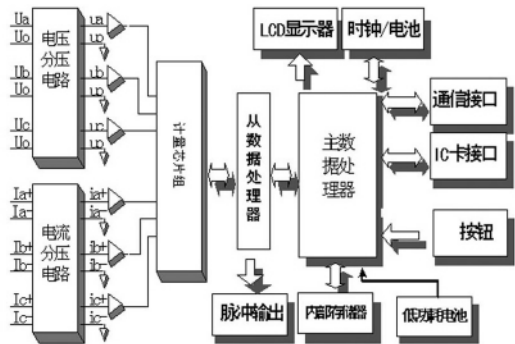


图 2 工作原理(三相四线表)

电能表须符合 GB/T 17215-2002、GB/T 17882-1999、GB/T 17883-1999 和 DL/T 614-1997 等电能表有关标准,采用 DL/T 645-1997 通信规约(有扩展)。

三相三(四)线模拟小信号电能表与传统的电子式电能表结构上差别为:用电压、电流的分压电路取代了原电子式电能表的电流互感器和电压互感器,其输出为规定的电压信号。所以对于模拟小信号电能表的性能要求可以依据传统的电子式电能表

检定所依据的 GB/T 17215.322-2008,电能表基本参数一般设置如表 1。

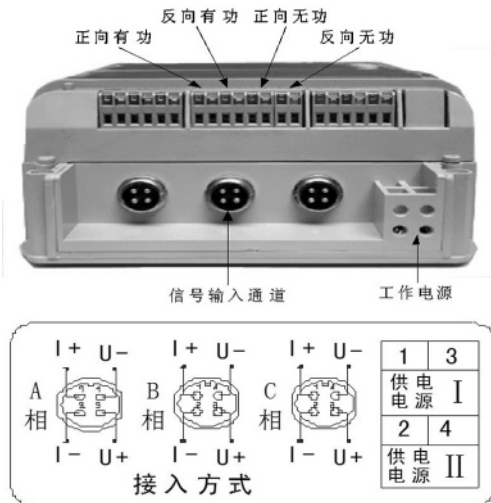


图 3 模拟小信号电能表外形示意图

表 1 电能表基本参数

项 目	技术要求
工作电压范围	AC: 85 V ~ 265 V; DC: 220 V $\pm$ 20% V
量程电压/输入	$3 \times 3.25 / \sqrt{3}$ V (3×57.7 V)
量程电流/输入	3×1 V 3×5 (6) A
准确度等级	有功 0.2S 级、0.5S 级、无功 1 级
工作温度	-25 $^{\circ}$ C ~ +55 $^{\circ}$ C
极限工作温度	-35 $^{\circ}$ C ~ +65 $^{\circ}$ C
相对湿度	$\leq 95\%$ (无凝露)
频率范围	(50 $\pm$ 2.5) Hz
启动电流	1%In(0.5S 级) 2%In(1 级)
功耗	< 2 W, 10 VA
MTBF	$\geq 6 \times 10^4$ h

模拟小信号电能表在实现功能方面与传统电子式电能表一致,可以实现分时计量,可计量总及分相元件的正、反向有功,四象限无功及感、容性无功电能。月电量统计及实时测量总及三相电压、电流、功率、功率因数、频率。可记录失压、失流、断相、数据无效、装置失电、电压电流合格率记录及自检功能。最大需量可计量有、无功最大需量及出现时间,最大需量的积分周期和滑差步进时间。另外可以实现电量冻结、结算数据记录、负荷曲线记录可保存最近 2 个月或者更长时间的日负荷曲线,且负荷曲线保存的时刻与电表时钟同步,以及可以实现其他事件记录等主要功能。模拟小信号电能表面板上装设有两个红色 LED 指示灯指示是否有有功、无功电量脉冲输出,辅助端子配置正、反向有功输入无功、输出无功光耦空接点脉冲输出,可用于仪表误差检验,也可接 RTU 等终端设备。

3 电能计量检测系统

电子式互感器的电流电压信号在传输到二次设备和二次设备处理的过程中均会产生附加误差,降低计量的精度。在二次回路上有功率传输,就有二次压降和功率损耗,传统的二次电压降测试工作需要进行现场测试和实验室测试的结果,当输入信号在10%额定以下时,受到的干扰较为严重,特别在变电站干扰复杂的环境下,波形出现了畸变和漂移,谐波含量丰富。故对模拟小信号电能表的检测,检测系统需要融合现代数字信号处理、计算机通信、最新电能计量理论和软件工程思想于一体的高技术,具有对在线运行被检表的接入影响极低、计量精度高、校验参数灵活设置、适用复杂现场环境等特点。按照上述电能检测系统的要求和原则,该系统的检测原理如图4所示。此检测系统关键为标准表,该表必须通过最高计量单位的溯源论证,方可应用到本系统。

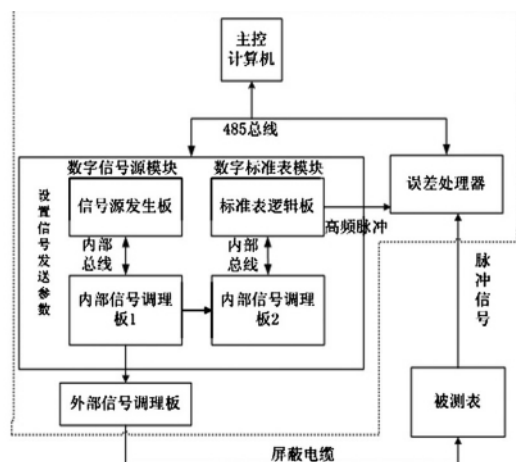


图4 检测系统原理示意图

检测系统主要由功率源、标准表、误差处理设备以及控制计算机组成。信号分别从相互独立高输入阻抗模拟信号输入通道 U_a 、 U_b 、 U_c 、 I_a 、 I_b 、 I_c 接入,如图5所示,经阻抗匹配、信号滤波等处理后输入各通道对应的相互隔离的ADC模数转换电路,并对输入的信号做同步采样量化,经FPGA读出并传送给DSP和管理工控机。ADC数据传输至数字信号处理DSP时对采样的数据进行实时处理计算出电参量、频率、功率信息等,控制计算机通过RS485总线与功率源以及误差处理设备相连,由控制计算机来统一控制功率源和误差处理设备。主台软件通过设置信号源参数使信号源工作在参数控制工作的模式

下,输出符合参数要求的IEC 60044-7/8标准电压信号。在测试过程中通过调节运行参数,模拟各种测试条件,对被测表做各项测试。

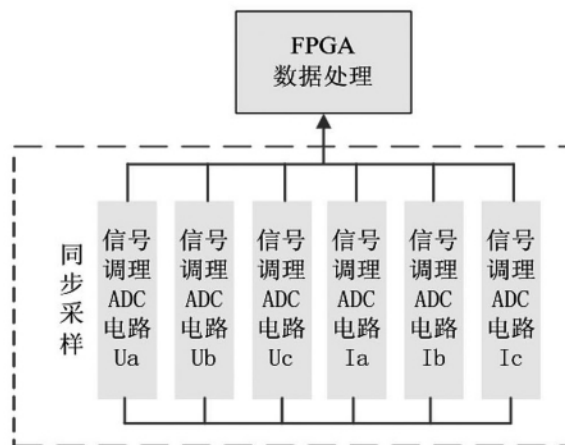


图5 信号调理处理方式

模拟小信号电能表可以根据现有标准GB/T 17882-1999《2级和3级静止式交流无功电能表》、GB/T 17883-1999《0.2S级和0.5S级静止式交流有功电能表》、DL/T 614-2007《多功能电能表》、DL/T 645-1997《多功能电能表通信规约》、GB/T 17215.322-2008等,实现电能表的功能测试,如基本误差、分时、需量、事件记录、负荷曲线等测试项目。一般现场试验检测项目如表2如下。

表2 试验项目

序号	试验项目
1	通用要求测试
2	功率要求试验
3	电流改变量引起的误差极限
4	其他影响量引起的误差极限
5	仪表常数
6	起动和潜动试验

对于初始起动,在参比电压加到仪表接线端后,5s内仪表应达到全部功能状态。在功率因数为1.0和0.001 I_n 下,表计能起动并连续计量。对于潜动试验当施加电压而电流线路无电流时,仪表的测试输出不应多于一个脉冲。试验时,电流线路应开路,电压线路所加电压为参比电压的115%。最短时间 Δt 为

$$\Delta t \geq \frac{900 \times 10^6}{km U_n I_{\max}} \text{min} \quad (1)$$

式中 k 为每千瓦小时脉冲常数,imp/kWh; m 为测量单元数; U_n 为参比电压,V; $I_{\max}$ 最大电流,A。

4 电能计量性能考核系统

为了适应智能变电站电能计量技术的发展,为保证公开、公平、公正计量,现阶段部分新建智能变电站的计量仍采用对侧传统电子式电能表计量的方式,故模拟小信号电能计量方式的可信度大打折扣,为了提供参考可对比的数据,这里构思了一套电能计量性能现场考核系统如图 6 所示,在同一个母线下装设传统互感器和电子式多功能电能表的计量系统和模拟小信号电能表的计量系统,测量数据上传至电能分析系统,实时对数据进行分析比较。

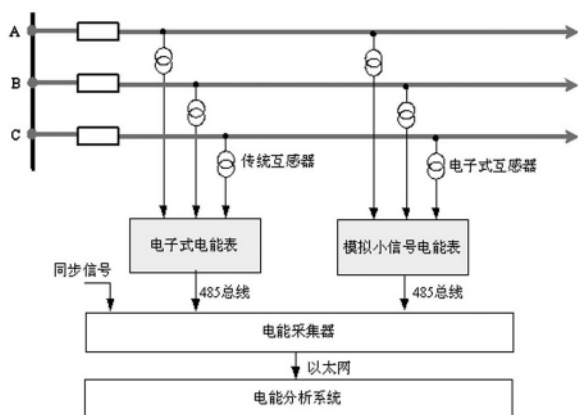


图 6 电量采集分析系统图

该系统应用先进的信息和通信技术,采用分层、分布、开放型结构构造理念兼平台一体化设计思想,可实现电能量信息的自动采集和管理。系统具备电能量信息比对、电能有功、无功分析及对时等功能。系统以数据采集为基础,以电量统计为核心,以用电量数据流为导向的并具备一个完整的数据流监控、统一接口、数据集中、服务于多个接口外部系统。系统可实现信息高度共享,使业务实现流程化、规范化管理,加速内部沟通,提高处理效率,从客户用电信息的源头提供数据支持。通过电量采集分析系统图可以看出,该系统充分结合实用、先进、可靠、经济几方面因素,在工程技术上实现起来比较简单。该系统可以长期实时监控模拟小信号电能表计量系统性能,可提供给广大用户真实的数据,对评估模拟小信号电能表计量准确度奠定技术基础。

5 结 语

结合电子式互感器输出信号的特点及计量相关标准,着重讨论符合 IEC 60044-7/8 标准输入的模拟小信号电能表的工作原理、性能和实际应用,重点

论述了模拟小信号电能表电能计量检测系统和溯源方法,可供有关工程技术人员对智能变电站调试参考。确定了一套模拟小信号电能表的现场考核系统,该系统充分结合应用实际以实现公正计量为目标,在工程技术上实现可行。随着对智能变电站电能计量和检测新技术进行积极的研究探讨,在逐步积累运行经验基础上,电能表的标准体系将逐渐完备,计量技术相关试验及检测标准即将形成规范。

参考文献

- [1] 高翔. 数字化变电站应用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 包红旗. HGIS 与数字化变电站 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [3] 郑尧, 李兆华, 等. 电能计量技术手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [4] 李来伟, 李书全, 孙晓莉. 面向 21 世纪的电能计量装置——浅谈电能计量装置的发展与未来 [J]. 电力设备, 2004(4): 1-4.
- [5] 李静, 杨以涵, 于文斌, 等. 电能计量系统发展综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 130-134.
- [6] IEC. IEC 60044-7 Instrument Transformers part 7 Electronic Voltage Transformers [S]. [S. l.]: IEC, 1999.
- [7] IEC. IEC 60044-7 Instrument Transformers part 8 Electronic Current Transformers [S]. [S. l.]: IEC, 2002.
- [8] IEC. IEC 61850 Communication Networks and Systems in Substations [S]. [S. l.]: IEC, 2003.
- [9] 艾兵, 江波. 数字电能计量及其电能表检测技术 [J]. 四川电力技术, 2011, 34(2): 10-13.
- [10] DL/T 448-2000, 电能计量装置技术管理规程 [S].
- [11] 蔡钢, 何朴, 刘曦. 北川 110 kV 智能变电站调试浅析 [J]. 四川电力技术, 2011, 34(2): 1-3.
- [12] 刘贤锴. 电能计量芯片 CS5460A 的应用研究 [J]. 电测与仪表, 2007, 44(1): 62-64.
- [13] 余春雨, 李红斌, 叶国雄, 等. 电子式互感器数字输出特性与通讯技术 [J]. 高压技术, 2003(6): 7-8, 11.
- [14] 费占军, 刘瑞峰. 单相功率电能芯片 CS5460A 的原理与应用 [J]. 电测与仪表, 2001(2): 42-45.
- [15] BOHNERT K. Fiber-optic Voltage Sensor for SF₆ Gas-insulated High-voltage Switchgear [J]. Applied Optics, 1999, 38(10): 1926-1932.
- [16] KOJOVIC L. Rogowski Coils Suit Relay Protection and Measurement of Power System [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1997, 10(3): 47-52.

作者简介:

艾兵(1985),男,硕士研究生,主要从事数字电能计量和互感器相关的研究;

江波(1953),男,高级工程师,长期从事互感器和数字电能计量的研究。(收稿日期:2013-01-09)

输电线路直流融冰时间的计算和试验验证

范松海, 刘 馨, 聂鸿宇, 刘 睿
(四川电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘要: 根据导线融冰的物理过程, 提出了椭圆形气隙-冰层界面移动融冰模型, 分析了融冰过程中冰层在重力作用下逐步下移过程, 并在人工气候室中对模型的计算结果进行了试验验证。结果表明, 在融冰过程中, 随着冰层的融化, 融冰水从空隙流失, 冰和导线之间将形成椭圆形的气隙; 融冰时间主要受电流密度、风速、环境温度以及冰厚等因素的影响。

关键词: 冰灾; 输电线路; 融冰电流密度; 融冰时间

Abstract: An ice-melting model of moving elliptic air-gap and ice-face is put forward. The stepwise moving-down process of the ice layer due to gravity during the ice-melting is analyzed. The simulation results are testified in the artificial climate chamber. The results show that an elliptic air-gap is formed and widened gradually along with the ice melting and the ice-melting water dropping out. The influencing factors for ice-melting time include current density, wind velocity, ambient temperature and ice thickness etc.

Key words: ice storm; transmission line; ice melting current density; ice-melting time

中图分类号: TM773 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0015-03

自上个世纪50年代电网冰灾频发以来, 很多专家、学者以及公司对输电线路融冰进行了专门研究, 建立了许多融冰时间的计算模型。归纳起来, 融冰模型可以大致分为两大类: 一是融冰静态模型。此类模型没有考虑到融冰过程中状态的不断改变对融冰的影响, 把融冰过程等效成一个静止不变的过程, 以此为基础建立融冰模型^[1]。但是, 目前已有的融冰模型均没有考虑到融冰过程中热量动态交换过程, 因而计算结果与实际情况误差较大。

吸收了文献[1-5]的一些合理因素, 把融冰问题看成是一个移动界面问题(Stefan问题), 同时摒弃了文献[1-5]中与实际情况不符的一些假设条件, 因而得到了不同于文献[1-5]的融冰过程。例如, 文献[1-5]认为, 在融冰过程中, 逐渐扩大的冰层内表面始终是与导线外表面同心的圆。因为考虑了冰层因重力作用下移这一物理过程, 冰层内表面随冰层一起下移, 使其呈椭圆形状不断扩大。模型的计算结果与人工气候室中直流融冰试验的结果基本相符。

1 导线融冰模型及其计算过程

1.1 焦耳热融冰的物理数学模型

由于冰层重力矩的作用, 导线在覆冰过程中会发生扭转, 从而使冰层呈均匀的圆柱状。在融冰过程中, 融冰水经冰层空隙流失, 冰和导线之间形成气隙。大量试验结果表明, 当导线上的冰层呈均匀的圆柱形且厚度小于导线直径时, 气隙(包括导线)的截面形状接近于椭圆形, 如图1(a)所示。当导线足够长且覆冰均匀时, 导线沿轴向的传热可以忽略不计。因而, 通电导线的融冰模型可以简化为截面上的二维传热模型, 如图1(b)所示。利用焦耳热融冰的传热过程发生在以下5个区域: Θ_1 为导线钢芯; Θ_2 为导线铝层; Θ_3 为气隙; Θ_4 为冰层; Θ_5 为环境。5个区域由4个界面分开: 导线钢芯-导线铝层($\Theta_1-\Theta_2$)、导线-气隙($\Theta_2-\Theta_3$)、气隙-冰层($\Theta_3-\Theta_4$)、冰层-环境($\Theta_4-\Theta_5$)。

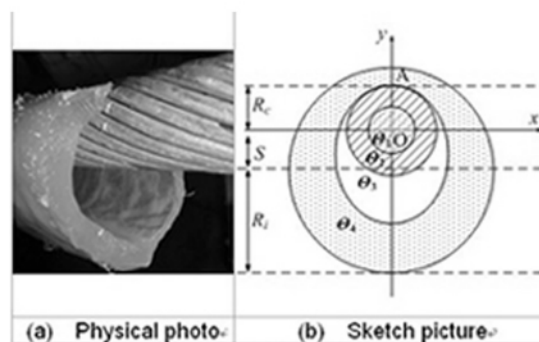


图1 融冰导线的横截面

热量由导线铝层(Θ2)经气隙(Θ3)传递至冰层(Θ4),冰层(Θ4)自内表面开始融化,融冰水经冰层空隙流失,在导线和冰层之间形成气隙(Θ3)。

短路融冰时间一般较短(0.5~3 h),电流焦耳热效应远大于阳光照射,可以忽略阳光照射的影响。融冰过程中,电流产生的焦耳热消耗于:①冰层外表面因对流和辐射产生的热损失;②冰融化需要吸收的潜热;③加热导线、冰层和空气间隙。

$$I^2 r_T - \pi(D_c + 2D_i)h(T_{io} - T_e) = \rho_i L_F \frac{dV_m}{dt} + \sum_{k=1}^4 \rho_{\Theta k} V_{\Theta k} C_{\Theta k} \frac{dT_{\Theta k}}{dt} \quad (1)$$

式中 r_T 为导线电阻率 Ω/m ; R_i 为冰层外表面圆半径 m ; h 为冰层外表面与环境热交换系数(包括对流传热和辐射散热)^[6], $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; V_m 为冰融化的载面积(单位长体积) m ; $V_{\Theta k}$ 表示区域 Θ_k 的截面积(或单位长体积) m^2 ; $\rho_{\Theta k}$ 表示区域 Θ_k 的密度 kg/m^3 ; $C_{\Theta k}$ 表示区域 Θ_k 的比热容 $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; $T_{\Theta k}$ 表示区域 Θ_k 的温度 $^\circ\text{C}$; T_{io} 为冰层外表面温度 $^\circ\text{C}$ 。

在融冰过程中, $T_{\Theta k}$ ($k=1, 2, 3, 4$) 是不断变化的,为时间和空间的函数,即 $T_{\Theta k} = T_{\Theta k}(x, y, t)$ 。根据式(1),融冰时间的计算模型可以表示为

$$t = \frac{\int_{V_m} \rho_i L_F dV + \sum_{k=1}^4 \int_{\Theta k} \rho_{\Theta k} C_{\Theta k} T_{\Theta k}(x, y, t) dt dv}{I^2 r_T - \pi(D_c + 2D_i)h(T_{io} - T_e)} \quad (2)$$

对于式(2),如果假设融冰的体积 V_m 已知,且忽略导线、气隙、冰层因升温吸收的热量,即 $\sum_{k=1}^4 \int_{\Theta k} \rho_{\Theta k} C_{\Theta k} T_{\Theta k}(x, y, t) dt dv = 0$,则式(2)便为静态融冰模型。所以,由式(2)可知,静态模型是动态模型的简化。由于温度分布函数 $T_{\Theta k}(x, y, t)$ 随着融冰过程中冰层的向下位移、气隙厚度等状态参量的变化而变化,使得融冰动态模型很难像静态模型那样求得解析解。

1.2 融冰时间的计算

在融冰过程中,导线融冰的动态传热方程为^[3]

$$D_{T(x,y)} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{I^2 r_T}{\pi R_c^2} - \rho C_p \frac{dT}{dt} = 0 \quad (3)$$

式中 λ 为覆冰导线热传导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ 为密度 kg/m^3 ; C_p 为比热容 $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

采用加权余量法对式(3)进行变分^[6]得

$$\frac{\partial J^D}{\partial T_l} = \iint_D \left[\lambda \left(\frac{\partial W_l}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W_l}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - q_v W_l + \rho C_p W_l \frac{\partial T}{\partial t} \right] dx dy - \oint_{\Gamma} W_l \lambda \frac{\partial T}{\partial n} ds \quad (l=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中 W_l 为对应节点 l ($l=1, 2, \dots, n$) 的权函数,取三角形单位的线性形函数; $-\lambda \partial T / \partial n$ 表示法线方向上的热流密度, W/m^2 。对式(4)积分,同时代入 Galerkin 差分格式得^[6]

$$\begin{cases} \{T\}_{p+1} = \frac{\Delta t}{3} \{ [E] + \frac{2\Delta t}{3} [N]^{-1} [K] \}^{-1} \\ \times [N]^{-1} (2\{P\}_{p+1} + \{P\}_p) \\ + \{ [E] + \frac{2\Delta t}{3} [N]^{-1} [K] \}^{-1} \\ \times \{ [E] - \frac{\Delta t}{3} [N]^{-1} [K] \}^{-1} \{T\}_p \end{cases} \quad (5)$$

式中, $[E]$ 为单位矩阵 $n \times n$; $[K]$ 为温度系数矩阵, $n \times n$; $[N]$ 为升温系数矩阵 $n \times n$; $\{P\}_p$ 为常数项向量 $n \times 1$,与热源和边界条件有关; $\{T\}_p = (T_1, T_2, \dots, T_n)$ 为 p 时刻节点温度向量 $n \times 1$ 。

1.3 仿真分析

根据式(5),采用商业软件 COMSOL3.4 进行计算,可得导线融冰过程中截面温度分布如图2所示。

①由图2(a)可知,当导线表面温度 $< 0^\circ\text{C}$ 时,冰层不会融化。这段时间产生的焦耳热主要用于使导线和冰层升温。②导线温度随着融冰时间的增加而增加。由于冰层的不断融化,冰层在重力作用下移,导线两侧和下侧出现气隙。由于气隙的热阻很大,使有气隙的地方冰层融化变慢。导线上侧和冰层接触紧密,所以,导线上侧的融冰速度不会变慢。所以,气隙-冰层(Gap-Ice)呈椭圆形发展,直至冰层脱落时刻。

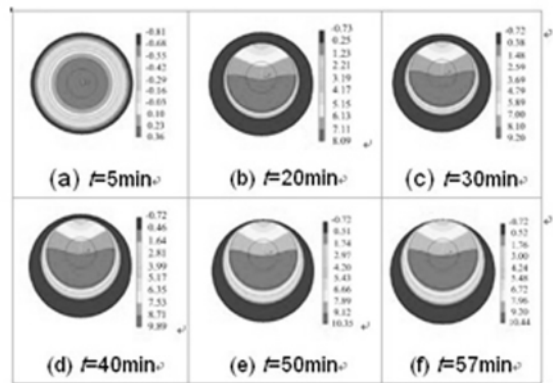


图2 融冰过程的仿真

2 试验验证

在人工气候室对以上分析计算进行了试验验证。按照图2的融冰条件,在人工气候室中进行融冰试验,得到如图3所示的融冰过程。图4则绘出了气隙增长的计算值和试验值的比较。

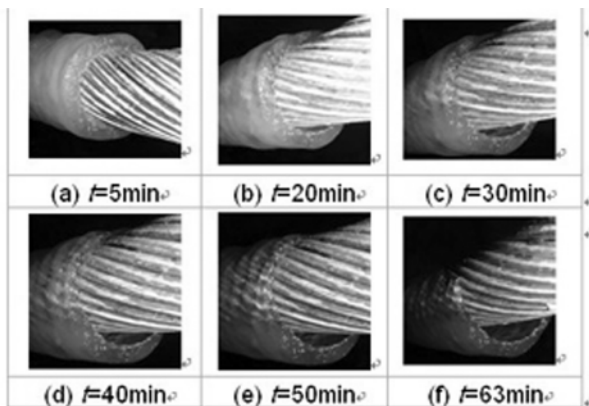


图3 覆冰导线融冰过程中

(1) 图3的试验结果和图2的仿真结果基本相符。

(2) 椭圆形气隙短轴和长轴的增长的试验值与仿真结果基本一致。由图4可知,随着融冰时间的增加,椭圆形气隙短轴 a 的增加逐步趋于饱和,增长速度随着融冰时间的增加逐步变慢,而长轴 b 的增速随着融冰时间的增加反而有增大的趋势。

3 结论

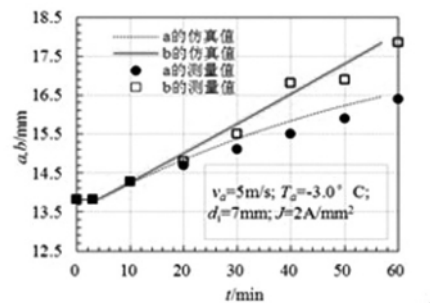
(1) 导线融冰过程中,随着冰层的融化,冰和导线之间将形成逐步增大的椭圆形气隙,气隙的高热阻使融冰过程中导线表面温度高于 0°C 。

(2) 在风速、环境温度以及冰厚一定时,导线融冰时间由电流密度决定。融冰电流密度必须大于临界融冰电流密度,冰层才会融化。融冰电流密度越大,融冰时间越小。

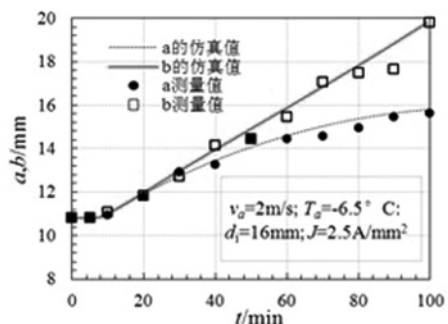
(3) 电流密度、冰厚和环境温度一定时,风速对融冰时间有明显的影响,风速越大,融冰时间越长。当风速大于临界风速时,冰层将不会融化。不同电流密度所对应的临界风速不同,电流密度越大,临界风速也越大。

(4) 电流密度、冰厚和风速一定时,环境温度对融冰时间有明显的影响,环境温度越低,融冰时间越长。当环境温度低于临界环境温度时,冰层将不会融化。不同的电流密度对应的临界环境温度不同,电流密度越大,临界环境温度越低。

(5) 导线上覆冰的厚度越厚,融冰时间越长。



(a) LGJ-400/35 导线



(b) LGJ-240/30 导线

图4 空气间隙增长过程

参考文献

- [1] 刘和云. 架空导线覆冰与脱冰机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.
- [2] Z. PETER. Modeling and Simulation of the Ice Melting Process on a Current - Carrying Conductor [D]. Universitédu Québec, 2006.
- [3] S. Y. Sadv, P. N. Shivakumar, D. Firsov, S. H. Lui, R. Thulasiram. Mathematical Model of Ice Melting on Transmission Lines[J]. J Math Model Algor, 2007, 6(1): 273 - 286.
- [4] M. Huneault, C. Langheit, R. S. Arnaud, J. Benny, J. Audet, J. C. Richard. A Dynamic programming Methodology to Develop De - icing Strategies during Ice Storms by Channeling Load Currents in Transmission Networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1604 - 1610.
- [5] M. Huneault, C. Langheit, J. Caron. Combined Models for Glaze Ice Accretion and De - icing of Current - carrying Electrical Conductors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1611 - 1616.
- [6] 秦妍, 李维仲. 利用移动网格技术模拟冰融化过程中的传热问题[J]. 热科学与技术, 2005, 4(3): 213 - 218.
- [7] J. V. C. Vargas, A. Bejan, A. Dobrovicescu. The Melting of an Ice Shell on a Heated Horizontal Cylinder [J]. Transactions of the ASME. Journal of Heat Transfer, 1994, 116(3): 702 - 708.

(收稿日期: 2013 - 02 - 10)

基于混合法的复杂配电系统的可靠性评估

陈嵩峰 宋明玉

(乐山电业局, 四川 乐山 614000)

摘要: 通过对供电网可靠性的研究, 在网络等值法的基础上, 先对复杂供电网进行等值化简, 然后以故障模式后果分析法为基本原理, 对供电网拓扑进行分析, 建立故障关联矩阵, 然后根据故障关联矩阵的计算得出各个负荷点的可靠性指标, 继而综合各负荷点可靠性指标, 得出整个供电系统的可靠性。通过对一个实际的算例进行计算分析, 比较了不同接线方式下系统的可靠性。

关键词: 供电系统; 可靠性; 网络等值法; 故障模式后果分析法

Abstract: Through the researches for the reliability of power supply system, the complex supply network is simplified based on network equivalent method, and the topology of supply network is analyzed and the fault incident matrix is established taking the failure mode and effect analysis (FMEA) as the basic principle. Then, the reliability index of each load point is obtained according to the calculation results of fault incident matrix. After summing up the reliability index of each load point, the reliability of overall power supply system is obtained. Through analyzing a practical example, the system reliability under different connection modes is compared.

Key words: power supply system; reliability; network equivalent method; failure mode and effect analysis (FMEA)

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0018-03

0 引言

供电网是电力系统中联系电源与用户的一个重要环节, 其供电可靠性水平与电力用户有着直接的关系。分析系统可靠性的方法有多种, 总的说来这些方法可分为两大类: 解析法和模拟法。模拟法通常指蒙特卡洛模拟法^[1-3], 模拟运行的实际问题, 通过状态选择, 用统计方法得到可靠性指标。解析法^[4-5]适合于网络规模较小而网络结构较强的系统。此外, 还有其他许多方法: 如故障树分析、逻辑图法。

在总结已取得的成果和经验的基础上, 结合供电网络的实际特点和现状, 提出一种网络等值法与改进故障树分析法相结合的供电网络可靠性分析方法, 并对供电系统可靠性统计与分析进行了研究, 并通过实例计算, 验证了该方法的正确性。

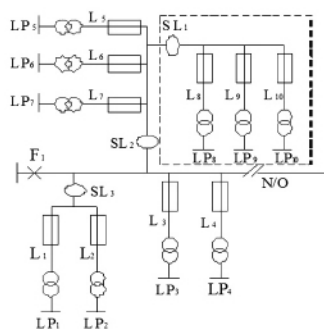
1 供电系统可靠性评估方法

1.1 网络等值法原理

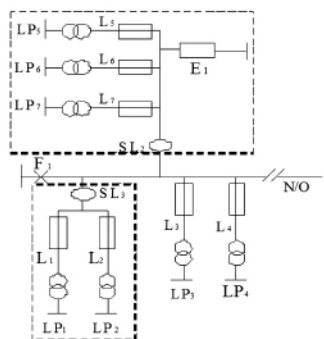
实际的供电网主要由主馈线和分支馈线构成。对于这种复杂的供电网, 可以利用向上等效或向下等效^[6]的方法将复杂的供电网络等值为一个简单的放射形供电网, 从而简化供电网网络结构和减少计算量。采用向上等效的方法, 将分支馈线对上级馈线的影响用一个串在上级馈线中的等效节点元件来表示, 等效元件对上级线路的影响可以由等效元件的故障率 λ_e 、等效元件的年故障停电时间 U_e 、等效元件的故障修复时间 R_e 来等效。具体过程如图1所示。

在初始网络结构图中, 馈线1及其所连接的元件为最末层, 包括分支线、熔断器及馈线上的主干线, 它们发生故障会影响到本层负荷点的可靠性指标以及上层负荷点的可靠性。这种影响与馈线2上串联一个元件类似, 所以可以用一个等效元件 E_1 来等效馈线1上所有元件故障的影响, 即将方框内的所有元件等效为元件 E_1 , 如图1(b)所示。同理, 逐层向上等效, 馈线2上的所有元件等效为元件 E_2 , 馈线3上的所有元件等效为元件 E_1 , 从而得到一个简化了的馈线网络, 如图1(c)所示。等效元件对上级线路的影响可以由等效元件的故障率 λ_e 、等效元

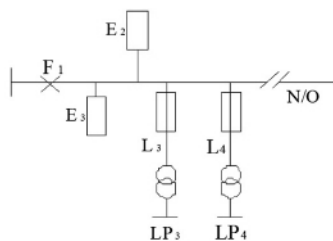
件的年故障停电时间 U_e 、等效元件的故障修复时间 R_e 来等效。



(a)



(b)



(c)

图1 复杂供电系统的可靠性等值示意图

1.2 网络等值法等效参数的计算^[7]

对负荷支路节点,由于它通常由变压器、负荷支路线及熔断器(可有可无)组成,它的等效故障率的求取必定会受到各元件的影响,因此有必要作适当的分析处理。如果分支线路带有熔断器,设此熔断器可靠工作的概率为 P_r ,如果负荷支路发生故障,影响到上级线路停电的概率为 $1 - P_r$,则此负荷支路对应的等效元件的故障率为 $\lambda'_j = (1 - P_r)(\lambda_{jl} + \lambda_{ji})$,该负荷支路对应的等效元件的平均停电持续时间为 $r'_j = U_j / \lambda'_j$ 。

在网络等值过程中,分支馈线上的每个元件出现故障时,如果分支馈线的首端设有断路器,设断路器的可靠断开率为 P_d ,则这条分支馈线上的每一个节点故障导致上一级馈线故障的概率为 $1 - P_d$,那

么,该分支馈线对上级线路影响的等效故障率为该分支馈线上所有线路及其所连元件的故障率之和乘以 $1 - P_d$,由于断路器配套有隔离开关,分支线路上的任一元件故障,隔离开关断开,因此等效该级馈线的等效元件的故障修复时间为隔离开关的动作时间;如果分支馈线首端未设有断路器,则分支馈线上的任一元件故障都会导致上级线路停运,那么,该分支馈线对上级线路影响的等效故障率为该分支馈线上所有线路及其所连接元件的故障率之和,其故障停运时间根据分支馈线结构而定。

2 改进的 FMEA

2.1 故障模式后果分析法原理

故障模式后果分析法(failure mode and effect analysis, FMEA)是供电网可靠性分析的基础方法,其基本思想是,首先假定系统的故障元件,然后对该元件故障引起的系统状态改变进行分析,进而找出受影响的线路及停电的负荷点。重复此过程直至枚举完所有的系统元件,按因果关系归纳成表。对影响同一负荷点的各元件故障率和修复时间,根据逻辑关系进行计算叠加,可得负荷点指标并进而求得系统的可靠性指标^[8]。

数学描述:分析一次故障事件。馈线上可能有用户变压器、开关、线路三类元件故障,考虑一段上所有可能出现的故障事件,结合元件可靠性数据,得到一段上(假设为第 k 段)所有故障事件引起的用户停电持续时间(时户数)。

$$CID_k = \sum_{n=1}^3 [M_n \times \lambda_n \times (C_1 \times t_a + C_x \times t_n + C_2 \times t_b)] \quad (1)$$

式中 M_n 为段上第 n 类元件的台数(线路取平均分段长度,用户变压器取台数,开关一般为1个); λ_n 为第 n 类元件的故障率; t_n 为第 n 类元件故障排除时间; t_a 为出线开关、分段开关操作时间; t_b 为联络开关操作时间; C_1 为故障段之前能由母线恢复供电的所有用户数之和; C_2 为故障段之后能由联络线恢复供电的所有用户数之和; C_x 为故障期间不能恢复供电的所有用户数之和。

以此逐一计算馈线中各段的停电时户数,得到一整条馈线的停电时户数,进而得到变电站及整个供电网的停电时户数。

2.2 改进的故障模式后果分析法

由于故障模式后果分析法运算量大,运算时间长,不利于用在大型的供电网系统。部分学者以故障模式后果分析法为基本原理,对供电网拓扑进行分析,建立故障关联矩阵,根据故障关联矩阵的计算得出各个负荷点的可靠性指标,最后总和各负荷点可靠性指标,得出整个供电系统的可靠性。这个方法与FMEA法比较,由于只通过了矩阵运算,减少了运算量和预算时间,矩阵的加入使得计算过程更加简单明了,同时具有良好的扩展性和实用性。但是随着系统的扩大,矩阵的维数也会随着增加,计算量同时增加。因此,先通过网络等值,将复杂的供电网系统简化成简单的主馈线系统,然后再利用改进了的故障模式后果分析法计算。

3 计算实例

3.1 原始数据

算例结构参考IEEE RBTS母线6的主馈线4^[6],该馈线包括30条线路、23个负荷点、23个熔断器、23个供电变压器、4个断路器及1个分段开关。设熔断器为100%的可靠熔断;线路的故障率取为0.05次/年·km,每段线路修复时间均取为4h;断路器故障率取0.002次/年,修复时间取4h;变压器故障率取为0.015次/年,修复时间取为200h,切换到备用变压器的时间为1h;分段开关的操作时间为20min;联络开关的倒闸时间为1h。

3.2 计算结果

在计算供电网可靠性指标时,认为发电系统、输电系统都是可靠的,发电系统总能满足负荷的要求。假设系统各元件都是独立的,串联元件可以合并成一个等效的元件。下面分几种情况来求各负荷点的可靠性指标。

- 1) 供电变压器不设备用,断路器的可靠动作率为80%,设隔离开关;
- 2) 供电变压器不设备用,断路器的可靠动作率为100%,设隔离开关;
- 3) 供电变压器设备用,断路器的可靠动作率为80%,不设隔离开关;
- 4) 供电变压器不设备用,断路器的可靠动作率为80%,不设隔离开关;

在以上4种情况下,计算分支线路向上等效的过程中,等效元件的故障率 λ 、年故障时间 U 以及故障修复时间 r 是相同的,因为熔断器是100%可靠工作的。

对该系统进行网络等值,得到的等效元件可靠

性参数于表1。

表1 分支馈线等效元件可靠性参数

系统类型	子馈线	故障率/(次·年 ⁻¹)	平均停电时间/(小时·次 ⁻¹)	年停电时间/(小时·年 ⁻¹)
第1种情况	F5	0.133	0.333	0.044
	F6	0.085	0.333	0.028
	F7	0.129	0.333	0.043
第2种情况	F5	对上级馈线无影响	0.333	0
	F6	对上级馈线无影响	0.333	0
	F7	对上级馈线无影响	0.333	0
第3种情况	F5	0.133	0.333	0.044
	F6	0.085	0.333	0.028
	F7	0.129	0.333	0.043
第4种情况	F5	0.133	0.333	0.044
	F6	0.085	0.333	0.028
	F7	0.129	0.333 3	0.043

表2 部分负荷点可靠性参数

系统类型	子馈线	故障率/(次·年 ⁻¹)	平均停电时间/(小时·次 ⁻¹)	年停电时间/(小时·年 ⁻¹)
第1种情况	LP4	1.487	3.739	5.560
	LP6	1.507	4.313	6.500
	LP8	1.635	4.216	6.893
	LP15	2.509	2.476	6.213
	LP21	2.493	2.869	7.152
第2种情况	LP4	1.145	4.583	5.248
	LP6	1.165	4.421	6.000
	LP8	1.293	4.775	6.174
	LP15	2.257	2.645	5.970
	LP21	2.204	3.169	6.985
第3种情况	LP4	1.487	2.027	3.015
	LP6	1.507	2.301	3.468
	LP8	1.635	2.227	3.641
	LP15	2.509	1.424	3.574
	LP21	2.493	1.947	4.854
第4种情况	LP4	1.487	4.340	6.453
	LP6	1.507	4.484	6.758
	LP8	1.635	4.504	7.364
	LP15	2.509	2.579	6.471
	LP21	2.493	3.801	9.476

4 可靠性分析

由求得的系统可靠性指标可以看出,第4种情况:供电变不设备用,断路器的可靠动作率为80%,
(下转第62页)

- [5] 徐其迎,李日隆. 110 kV 合成绝缘子沿面电场分布的研究[J]. 绝缘材料 2003(4):48-50.
- [6] 袁小嫻,陈俊武,周志成,等. 330 kV 线路复合绝缘子电位和电场分布的有限元计算[J]. 电瓷避雷器 2006(4):9-12.
- [7] 卢明,阎东,杨庆. 均压环安装错误对电场分布的影响[J]. 电瓷避雷器 2010(2):1-3.
- [8] 毛凤麟,王雪松,雒峰. 合成绝缘子沿面场强及电位分布试验研究[J]. 西北电力技术 2000(1):6-8.
- [9] 武坤,司马文霞,杨庆,等. 分域迭代法计算特高压线路绝缘子电场分布[J]. 高电压技术 2009,35(6):1279-1283.
- [10] 汪金刚,何为,陈涛,等. 绝缘子表面电场与紫外脉冲关系以及在劣化绝缘子检测中的应用[J]. 电工技术学报 2008,23(6):137-142.
- [11] 张占龙,黄丹梅,魏昱,等. 劣质绝缘子电场正问题优化算法分析[J]. 重庆大学学报 2009,32(11):1296

- 1299.
- [12] 陈涛. 基于非接触式的劣化绝缘子检测方法的研究[D]. 重庆:重庆大学 2006.
- [13] 王黎明,廖永力,关志成. 紧凑型输电线路复合绝缘子轴向电场分布分析[J]. 高电压技术 2009,35(8):1862-1868.
- [14] 栗福珩,贾逸梅,王青霞,等. 陡波试验寻找合成绝缘子内部缺陷有效性的检验[J]. 电网技术 2003,27(1):41-43.
- [15] 孙豹,陈福深. 用于测量工频强电场的集成光学电场传感器[J]. 半导体光电 2010(2):202-204.
- [16] 肖悦娱. 光学电压互感器的电场分布对测量的影响[J]. 高电压技术 2007,33(5):37-40.
- [17] 霍成文,李伟,李进,等. 光电探测微弱信号放大器设计[J]. 浙江理工大学学报 2005,22(3):259-262.

(收稿日期:2012-12-28)

(上接第20页)

不设隔离开关,这种情况下,系统可靠性最差,用户断电时间长;在第3种情况,增加了供电网变压器备用,缩小了由于变压器检修而产生的停电时间,用户停电持续时间大大降低;第1种情况在第四种的情况下增设了隔离开关,因此缩小了停电范围;第2种情况考虑了断路器的可靠操作率,可以看出,在断路器能够100%动作的情况下系统的可靠性更高。

表3 系统可靠性指标

可靠性指标	第1种情况	第2种情况	第3种情况	第4种情况
SAIFI	1.827	1.746	1.827	1.827
SAIDI	5.348	5.031	4.332	7.317
CAIDI	3.416	3.396	2.371	4.003
ASAI	0.995	0.995	0.994	0.998

因此,可以看出,对于同一网络,不同的接线方式下,其系统可靠性指标有很大的不同。对可靠性较差的网络,可以采取一定的增强措施,如加装主馈线隔离开关、加分支线保护、备用供电变压器、增加备用电源等方式来增加其运行灵活性,从而提高其可靠性指标。

参考文献

- [1] 徐纪法. 供电可靠性综述[J]. 大众用电 2003(9):36

- 37.
- [2] L. G. Monte Carlo Simulation Based Reliability Studies of a Distribution Test system[J]. Electric Power Systems Research 2000,54(1):55-65.
- [3] 别朝红,王锡凡. 蒙特卡洛法在评估电力系统可靠性的应用[J]. 电力系统自动化 1997,21(6):68-75.
- [4] 霍利民,朱永利,张在玲,等. 贝叶斯网络在供电系统可靠性评估中的应用[J]. 电工技术学报 2004,19(8):113-118.
- [5] 卢锦玲,栗然,刘艳,等. 基于状态空间法的地区环式供电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化 2003(11):21-27.
- [6] 万国成,任震,田翔. 供电网可靠性评估的网络等值法模型研究[J]. 中国电机工程学报 2003,23(5):48-52.
- [7] 周云海,曹小伟,危雪. 基于网络等值法的配电网可靠性研究[J]. 电气开关 2008(2):20-24.
- [8] 汪穗峰. 供电网可靠性定量分析研究综述[J]. 继电器 2008,36(3):78-83.

作者简介:

陈嵩峰(1985),男,工学学士,从事业扩及供用电合同管理工作;

宋明玉(1985),女,硕士研究生,四川省电力公司乐山电业局客户服务中心用电信息采集技术专责。

(收稿日期:2012-12-05)

750 ~ 220 kV 系统短路电流影响因素分析与限制措施

胡立锦^{1,2}, 常喜强³, 周茂¹, 夏时宇¹, 张新燕², 姚秀萍³

(1. 重庆电力公司建设分公司, 重庆 410021; 2. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;
3. 新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 随着电网规模和容量的明显提升, 电网短路电流水平不断提高, 高一级电压等级出现后, 次一级电网短路电流又会明显增大, 这对电网规划提出了更高的技术和经济要求。在分析电网负荷、接地支路和变压器变比等不同元件以及不同调压方式等因素对短路电流影响程度的基础上, 针对某地区实际 750 kV 电网布局, 考虑不同因素对短路电流的影响程度, 提出基于运行方式调整和故障电流限制器等不同手段相结合的短路电流抑制措施, 并通过仿真计算来检验措施的正确性和有效性。仿真结果表明, 影响短路电流水平的因素较多, 限制短路电流的措施需综合考虑, 不能片面考虑。

关键词: 短路电流; 负荷; 非标准变比; 仿真计算; 电网规划

Abstract: With the significant improvement of the scale and capacity of power grid, the level of short-circuit current improves continuously. The lower grid would have a much larger short-circuit current after a higher voltage level occurs, so it sets a higher technical and economic requirement to the planning of power grid. The different elements such as grid load, grounding branches and transformation ratio etc. are analyzed as well as the influence of different voltage-regulating modes on short-circuit current. On this basis, aiming at the overall arrangement of an actual 750 kV grid and considering the influences of different factors on short-circuit current, the measures against short-circuit current are proposed based on the combination of operation mode adjustment and fault current limiter, whose validity and availability are verified by the simulation and calculation. The simulation results show that the influence factors of short-circuit current level must be considered comprehensively.

Key words: short-circuit current; load; non-standard transformation ratio; simulation and calculation; power grid planning

中图分类号: TM713 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0021-06

0 引言

近几年, 随着用电负荷的大幅度增长以及发电机组容量的增加, 电网规模和容量得到明显提升。随着电网规模和容量的不断增大, 母线短路电流也将不断上升, 同时又随着 750 kV 网架建设, 电网网架结构得到加强, 网内电气等值距离进一步缩短, 短路电流水平又明显加大, 部分短路电流超标, 更换大容量断路器将造成大量断路器更换, 运行设备更换将带来众多问题, 如何避免短路电流水平提高, 同时避免短路电流带来的技术或者经济上的麻烦, 给电网规划和运行提出了新的要求。

文献[3-5]研究了上海、西北等地电网短路电流控制的现状, 并针对不同电压等级电网给出相应

的改进措施。文献[1-2]研究了负荷结构、优化策略等对电网短路电流的影响程度, 并提出基于模糊理论等新算法的模型建立方法、优化策略选择及评价方式。文献[5-9]对不同电压等级电网的分区方式、电磁开环方案、网架结构调整等因素对短路电流的影响, 并提出相应的优化算法及调整方案, 对实际电网运行有较高的参考价值。文献[12-16]考虑了故障电流限制器等对短路电流的影响, 研究了变压器中性点加装小电抗接地等对短路电流的限制效果, 并通过电力系统仿真软件进行了建模仿真计算, 针对仿真结果和实际经验给出了较合理的在电网不同元件位置加装故障电流限制器的方法及注意事项。国内外针对短路电流的研究大多采取针对某一因素而忽略其他无关因素的方式, 结论措施也均基于特定研究条件下单方面考虑, 而就不同因素融

基金项目: 国家自然科学基金项目(50767003, 50867004)

入同一电网,同时考虑不同因素对短路电流影响程度,最终基于这些影响因素将多种调整手段相结合,从而找到更有效更贴近实际运行的限流措施的研究较少。

以某区域实际 750 ~ 220 kV 超高压电网结构为研究对象,计算分析了短路电流水平,通过考虑不同电力系统元件、变压器非标准变比、不同电网运行方式、故障电流限制器等因素对短路电流的影响,通过分析不同因素的短路电流贡献度找到短路电流最为敏感的因素。在此基础上,提出基于运行方式调整和短路电流限制器等多种手段相结合的故障电流综合限制措施。最后,将设计方案运用到研究电网中进行仿真计算,结果证明考虑不同因素对短路电流的影响并针对其采取多种调整手段相结合限流效果较理想,并就电网规划等方面提出建设性意见。

1 短路电流计算理论分析

复杂电力系统中短路电流计算在满足工程准确等级要求的前提下,可以采用一些必要的假设条件,简化短路电流计算。假设条件一般如下。

(1) 短路前三相交流系统在对称状况下运行。

(2) 三相交流系统短路电流计算指的是在短路发生后的第一个周期内的短路电流周期分量的有效值,即次暂态短路电流的计算。

(3) 发电机的转子是对称的,即转子无论转到什么位置发电机的参数都保持不变。在此情况下, $X''_d = X''_q$,可将同步发电机等值为一个含有内电抗为 X''_d 的简单电压源。

(4) 电气设备的参数不随电流大小的变化发生变化。

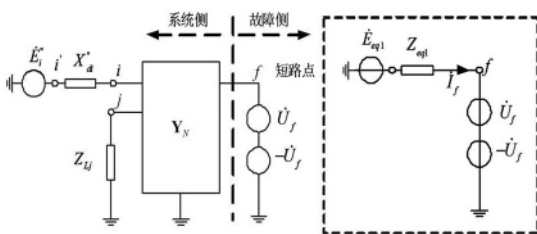


图1 发电机和负荷接入系统的等值电路图

三相短路的系统等值电路,如图1所示,其中系统中各发电机均可采用由次暂态电动势 $\dot{E}''_i$ 以及次暂态电抗 X''_{di} 组成的戴维南等值电路来表示。从故障点 f 向系统侧看的等值电路图可以等值简化为

如图1虚线框中所示,其中 $\dot{E}_{eq1}$ 为短路故障点系统等值电动势 Z_{eq1} 为短路故障点系统等值正序阻抗。

因为短路故障点等值电动势就是短路前的节点实际电压,即 $\dot{E}_{eq1} = \dot{U}_f$,所以故障点 f 处的对称三相短路电流可以表示为

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{U}_f}{Z_{eq1}} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,系统故障前各节点电压一定,那么故障电流大小实际由故障等值阻抗决定,即将系统中发电机阻抗(包括不经变压器直接和电网相连的发电机、经变压器同电网相连的发电机)、变压器阻抗(包括发电机侧变压器、网络中串联变压器)、线路阻抗等归算至故障点处。在实际的归算过程中,由于计算准确性的需要,通常要按照不同的设备及设备位置按照有关标准规定对设备阻抗进行修正,其中发电机不经变压器直接与电网相连,在计算三相对称短路电流时,应按式(2)计算发电机的正序阻抗为

$$Z_{GK} = K_G Z_G = K_G (R_G + jX''_d) \quad (2)$$

K_G 为校正系数。

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{G_{\max}}{1 + X''_d \sin \varphi_{rG}} \quad (3)$$

式中 $G_{\max}$ 为电压系数; U_n 为系统标称电压; U_{rG} 为发电机额定电压; Z_{GK} 为发电机校正阻抗; Z_G 为发电机阻抗 ($Z_G = R_G + jX''_d$); X''_d 为发电机超瞬态电抗; φ_{rG} 为发电机额定电流 I_{rG} 与额定电压 $U_{rG}/\sqrt{3}$ 间的相角。

带有有载调压变压器的发电机变压器组的阻抗按照式(4)修正为

$$Z_S = K_S (t_r^2 Z_G + Z_{THV}) \quad (4)$$

修正系数 K_S 为

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{C_{\max}}{1 + |x''_d - x_T| \sin \varphi_{rG}} \quad (5)$$

式中 Z_S 为发电机变压器组的校正阻抗; Z_G 为无修正的发电机超瞬态阻抗 ($Z_G = R_G + jX''_d$); Z_{THV} 为无修正的归算到高压侧的变压器短路阻抗; U_{nQ} 为高压侧额定电压; x_T 为变压器电抗(标么值); $t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$ 为变压器额定变比。

与发电机变压器组中的变压器是不同的,网络中串联变压器其短路阻抗需要按照下面的经验公式进行修正。

$$Z_{T \cdot PSU} = K_T Z_T \quad (6)$$

其中修正系数 K_T 为

$$K_T = 0.95 \frac{C_{\max}}{1 + 0.6X_T} \quad (7)$$

式中 $Z_{T \cdot PSU}$ 为修正后变压器短路阻抗; Z_T 为修正前变压器短路阻抗; K_T 为串联变压器的修正系数; X_T 为短路电抗。

2 短路电流计算方法的边界条件分析

某系统一次接线图如图2所示,其中母线1、2、3、4号电压等级为750 kV,其余5~16号母线电压等级为220 kV,通过在不同的条件下计算图中各母线处的短路电流来研究不同因素对短路电流的影响程度,从而寻找到能有效反映实际运行中短路电流变化情况的边界计算条件。

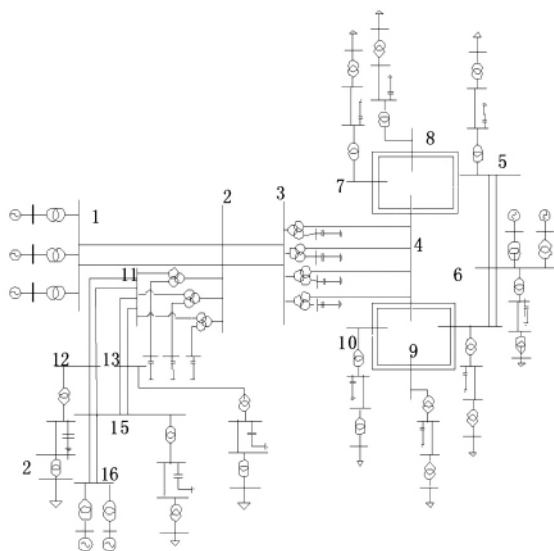


图2 某系统一次接线图

2.1 负荷、对地之路等对短路电流的影响

采用基于潮流的精确短路电流计算方法,按不同的方式计算所有220 kV及以上厂站的短路电流及短路阻抗:①考虑负荷;②忽略负荷;③考虑负荷接入等值上移至110 kV系统;④考虑负荷接入等值上移至220 kV系统;⑤忽略对地之路及并联补偿;⑥同时忽略负荷和对地之路及并联补偿,各母线节点短路电流变化曲线如图3所示。

由图3及计算结果可以看出,与基于潮流的精确短路电流方法相比,单一不考虑负荷或高抗时,各母线短路阻抗偏大,短路电流偏小,短路电流偏差值最大达到20%以上;负荷接入不同电压等级对短路

电流计算值影响不大;单一不考虑对地支路(高抗除外)时短路阻抗计算值偏小,短路电流偏大,短路电流最大偏差值达到14%。同时不考虑负荷与对地支路时短路电流计算结果既可能偏大,也可能偏小,但与精确短路电流计算结果很接近,最大偏差值仅为-4%。由此可见,计算短路电流时不能单一忽略某一电力元件,若要忽略建议同时忽略负荷、对地支路以及并联补偿对短路电流计算结果的影响。

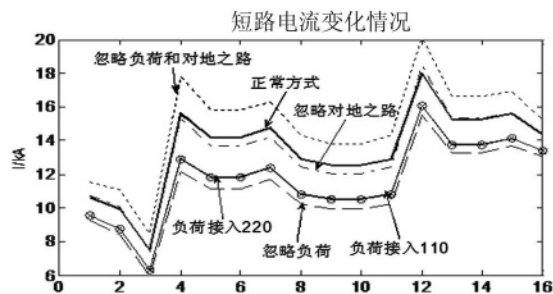


图3 忽略不同元件下的各点短路电流变化曲线

2.2 变压器非标准变比对短路电流的影响

图4为系统3号母线4台联络变压器高压侧不同非标准变比与标准变比下系统各母线节点短路电流变化曲线。

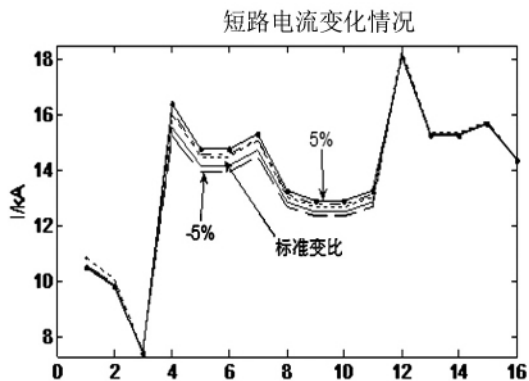


图4 非标准变比时短路电流变化曲线

不考虑联变非标准变比时,联络变压器750 kV侧与220 kV侧短路电流偏差方向不一致,而考虑变压器非标准变比时,由于变压器抽头变化时系统电压变化的作用,非标准变比不同引起系统短路电流的变化幅度要小于短路阻抗的变化幅度,且有时会出现短路电流与短路阻抗相同的变化趋势,故实际计算时可以忽略变压器非标准变比对计算的影响。

2.3 不同调压方式对短路电流的影响

计算不同电网调压方式下的各母线节点短路电流如图5所示:方式1为多投低容升高系统电压;方式2为提高机端电压升高系统电压;方式3为少投低容降低系统电压;方式4为降低机端电压降低系

统电压。

由于系统运行电压变化时系统阻抗同时在变,导致短路电流的变化趋势并不一定与系统运行电压变化趋势完全一致,且电网运行电压变化引起的系统短路电流变化幅度较小。

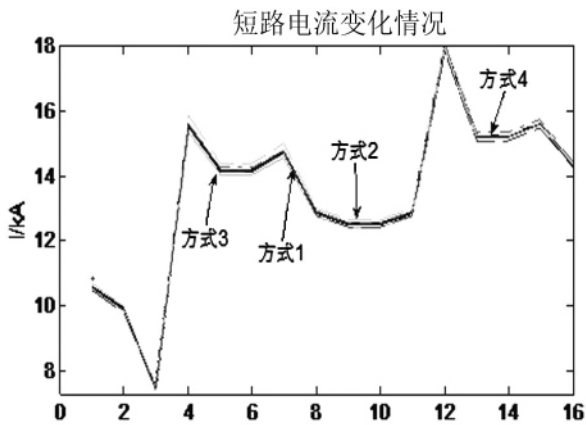


图5 不同运行方式时短路电流变化曲线

从上面的分析可得知:短路电流计算需认真搭建网架结构,深入分析短路电流的水平影响因素,特别是对于负荷等值,负荷中感应电动机的比例,对地支路中性点接地方式等等,以避免得出错误结果、错误判断。

通过研究短路电流计算时的边界条件发现,电网负荷的分布在一定程度上影响电网的短路电流,改善负荷结构或布局可以优化短路电流;对地支路对短路电流的影响较大,而变压器非标准变比和单纯的系统调压对短路电流的影响均较小,且趋势随多种因素改变。

3 基于运行方式调整和故障电流限制器的短路电流控制措施讨论

部分短路电流超标,更换大容量断路器将造成大量断路器更换,运行设备更换将带来众多问题。因此,为了更好地抑制短路电流,在上述研究的基础上提出基于运行方式调整和故障电流限制器的短路电流抑制措施,并通过实际电网仿真计算进行说明。

图6为某地区750~220 kV电网地理结构图,当750 kV变电站全部投运时,原有网架短路电流水平全线升高,部分节点超出或接近额定开断电流,为降低短路电流,考虑按以下两种方式进行调整。

(1) 系统网架结构1

①750 kV 乌北变电站母联分列,220 kV 乌米

线、乌研线、乌博(格达)双线以及乌彩双回降压运行线路接在乌北变电站220 kV I母,将220 kV 乌化双线、乌岗双线、乌康(康园)双线以及乌北2号主变压器连接在220 kV II母上。

②将乌鲁木齐城网转由凤凰主变压器接带,乌米线、八研线、二化线断开。

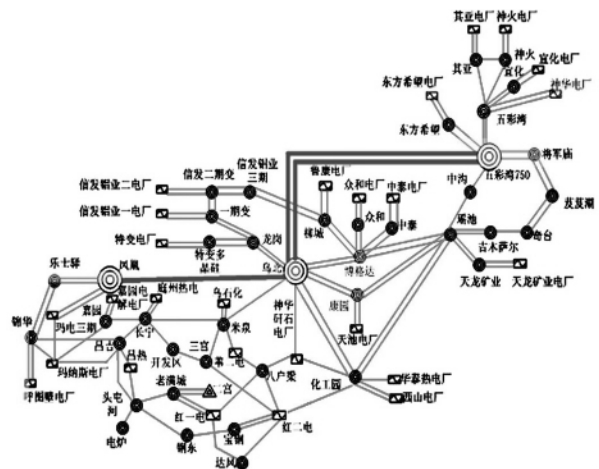


图6 某地区750 kV电网地理接线图

③乌北220 kV母联加装限流电抗器。

④乌北主变压器增加中性点小电抗。

按上述方案对电网进行仿真计算,得到短路电流变化曲线如图7所示,其中横坐标1~8分别表示母线节点:乌北变电站I号母、乌北变电站II号母、米泉、化工园I号母、化工园II号母、龙岗、博格达、五彩湾。

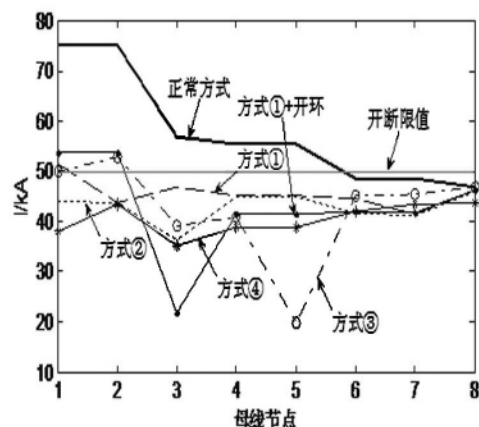


图7 网架1不同运行方式时短路电流变化曲线

对图7所示结果进行分析发现,750 kV变电站投运全线不调整时系统短路电流严重超标,220 kV 乌北、米泉、化工园分别达到额定开断电流的149.78%、141.95%、110.88%。若按①调整运行方式,各母线节点短路电流降至40 kA左右,降流效果较好,若开环研化线,乌北220 kV母线短路电流超标而米泉短

路电流则大幅降低。若继续按②所述将主要负荷转接,可以大幅降低乌北米泉地区的短路电流。若按③所述乌北母联加装限流电抗器,能大幅降低乌北、化工园地区的短路电流,但需要重新调整母线接线方式使得双回共用一根母线,降低了供电可靠性。通过合理调整运行方式,各母线节点短路电流均降至开断限值范围内,按④所述乌北主变压器增设 $10\ \Omega$ 中性点小电抗后,乌北附近地区单相短路电流继续下降明显。由此可见,结合上述方案调整大幅降低了各母线节点的短路电流水平。

(2) 系统网架结构 2

乌北—五彩湾升压运行。

① 750 kV 乌北变电站母联分列, 220 kV 乌米线、乌矸线、乌博(格达) 双线接在乌北变电站 220 kV I 母, 750 kV 乌彩双线、220 kV 乌化双线、乌岗双线、乌康(康园) 双线以及乌北主变压器连接在 220 kV II 母。

② 将乌昌城网转由凤凰主变压器接带, 乌米线、八矸线、二化线断开。

③ 乌北 220 kV 母联加装限流电抗器。

④ 乌北主变压器增加中性点小电抗。

按上述方案对电网进行仿真计算, 得到短路电流变化曲线如图 8 所示, 其中横坐标 1~8 分别表示母线节点: 乌北变电站 I 号母、乌北变 II 号母、米泉、化工园 I 号母、化工园 II 号母、龙岗、博格达、五彩湾。

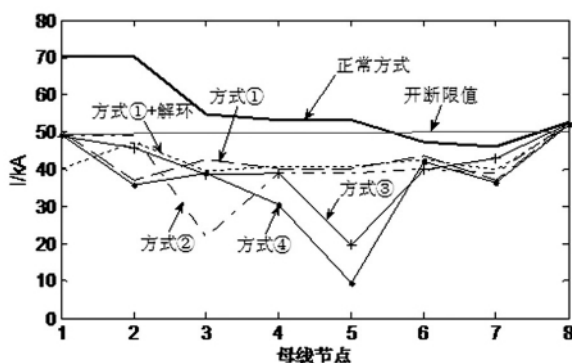


图8 网架2不同运行方式时短路电流变化曲线

上述方案可使乌北、米泉、化工园 220 kV 母线三相短路电流均满足要求, 化工园、龙岗等地短路电流降幅最大, 最低降至 10 kA。其中, 部分措施还需在乌北变电站中性点加装限流电抗器后方可将短路电流降至 50 kA 以下。乌北—五彩湾升压运行(乌彩 750/220 kV 电磁环网解环运行), 由于大量电源接至五彩湾变电站 220 kV 侧, 五彩湾变电站 220 kV

母线短路电流升高 5 kA 左右, 超过其 220 kV 断路器额定开断电流, 上述方案都无法解决五彩湾变电站 220 kV 侧短路电流超标问题。

为降低五彩湾变电站 220 kV 侧短路电流, 经计算: 乌北—五彩湾升压运行(乌彩 750/220 kV 电磁环网解环运行)后, 在接入五彩湾变电站的电厂(神火电厂、宜化电厂、东方希望电厂) 升压变压器高压侧加装 $10\ \Omega$ 电抗后五彩湾变电站 220 kV 侧三相短路电流下降约 4 kA, 单相短路电流下降约 5 kA。或者采取高阻抗变压器, 提高升压变压器阻值可以降低短路电流水平, 但对系统稳定性有一定的影响。同时在该地区电源直接升压接入 750 kV 电压等级后, 系统短路电流又有所降低, 相应地附加限流电抗器等随着网架结构的变化, 对短路电流水平的限制作用减小。

通过上述分析可知, 在限制短路电流水平时需远近结合, 既要考虑对电网建设过渡方式, 又要考虑最终方式, 不能片面地依赖于电网运行方式的调整, (运行方式调整后降低了系统的稳定性, 在一定程度上限制了输电能力, 同时检修方式安排也存在一定的难度, 不灵活等), 也不能片面地加装限流电抗器, 以避免在电网中增加过多的辅助设备如保护、计量等, 导致在后期网架结构变化时限流作用降低, 影响系统的稳定性, 出现设备浪费。同时, 对于电源接入审查时亦需综合分析。

4 结 论

电网结构加强的同时, 电网布局、运行方式等的改变造成电网短路电流水平大幅提高, 严重威胁到电网的安全稳定运行。部分短路电流超标, 更换大容量断路器将造成大量断路器更换, 运行设备更换会带来众多影响电网安全的问题。在研究短路电流理论的基础上, 首先通过仿真分析研究了电网不同原件及电压控制方式等对短路电流的影响程度, 然后结合某地区实际 750~220 kV 电网结构, 提出了短路电流水平计算中应注意和综合考虑的事项, 在正确评估短路电流水平后, 通过统筹考虑运行方式调整和故障电流限制器的综合措施来抑制短路电流, 并得出以下结论。

(1) 电网结构加强网架密集、新增电源增多, 为了降低短路电流需要对电源接入的方式进行优化,

对于电厂采用高阻抗变压器、限流电抗器需综合考虑限制短路电流水平、电源送电能力、系统稳定水平、远近网架结合、过渡网架和最终网架统筹兼顾。

(2) 对于 750 kV 变电站升压运行后相配套的运行接线形式需综合考虑,除限制短路电流水平外,需考虑电网稳定性、输电能力,综合考虑配合措施。

(3) 限流电抗器对附近变电站母线短路电流降低效果十分显著,但单一依靠限流电抗器仍无法解决近区短路电流超标的问题,还需运行方式调整配合降流,同时与过渡方式、最终方式相结合。

(4) 通过对网架合理的分层、分区,适当解环运行可以有效地控制短路电流。

同时提出以下措施。

(1) 建议规划设计阶段,重点分析过渡年份短路电流水平,变电站的建设要考虑预留将来进行限制短路电流技术措施的空间。对枢纽变电站考虑双母线双分段方式,以便灵活调整运行方式,合理分配各母线出线。

(2) 避免在较小地区范围集中建设厂、站,对短路电流水平已经较高的地区,避免形成密集型小环网,必须形成的要对环网的短路电流水平做出评估,并对环网内部的短路阻抗作出一定的补偿提高,以降低短路电流升高的风险。

(3) 对于电源接入密集区,需综合考虑,既要保证送出能力,简化网架,同时也要满足短路电流水平,同时也需远期网架近期网架结合,加装限流设备也需综合评估。

十二五期间,西部地区将大量外送电力,形成大型电源接地电厂串珠接入系统,需综合考虑短路电流水平、电网输电能力、电网运行方式。需认真考虑发电厂的主接线形式、重要枢纽站的主接线形式、电厂升压变压器参数、电网网架结构。既要保证网架结构下限制短路电流水平的运行方式调整灵活、不降低供电可靠性和送电能力,又要满足短路电流水平。

参考文献

- [1] 王佳明,刘文颖,李群炬,等.基于多层次模糊综合评价模型的短路电流限制措施优化配置[J].电网技术,2011,35(11):125-129.
- [2] 刘楠,唐晓骏,马世英,等.负荷模型对电力系统短路电流计算的影响[J].电网技术,2011,35(8):145-149.

- [3] 阮前途.上海电网短路电流控制的现状与对策[J].电网技术,1996,20(9):29-31.
- [4] 袁娟,刘文颖,董明齐.西北电网短路电流的限制措施[J].电网技术,2007,31(10):42-45.
- [5] 陈丽莉,黄民翔,张弘,等.电网限流措施的优化配置[J].电力系统自动化,2009,33(11):38-42.
- [6] Sarmiento H G, Castellanos R, Pampin G, et al. An Example in Controlling Short Circuit Levels in a Large Metropolitan Area [C]. Proceedings of 2003 Power Engineering Society General Meeting, Toronto, Canada, 2003: 589-594.
- [7] 杨冬,刘玉田,牛新生.分区电网限流运行方式的综合决策方法[J].电力系统自动化,2010,34(12):34-38.
- [8] 张永康,蔡泽祥,李爱民,等.限制 500 kV 电网短路电流的网架调整优化算法[J].电力系统自动化,2009,33(22):34-39.
- [9] 叶华,刘玉田,牛新生.500~220 kV 电磁环网开环方案模糊综合评价[J].电力自动化设备,2006,26(7):1-5.
- [10] 吴际舜.电力系统静态安全分析[M].上海:上海交通大学出版社,1985:17-35.
- [11] 夏道止.电力系统分析[M].北京:中国电力出版社,1995:3-8.
- [12] 武守远,荆平,戴朝波,等.故障电流限制技术及其新进展[J].电网技术,2008,32(24):23-32.
- [13] 金雪芬,戴朝波,武守远,等.故障电流限制器对继电保护的影响[J].电网技术,2010,34(6):98-105.
- [14] 孙树敏,刘洪顺,李庆民,等.电力系统故障限流器研究综述[J].电网技术,2008,32(21):75-79.
- [15] 杨雄平,李力,李扬絮,等.限制广东 500 kV 电网短路电流运行方案[J].电力系统自动化,2009,33(7):104-107.
- [16] 朱天游.500 kV 自耦变压器中性点经小电抗接地方式在电力系统中的应用[J].电网技术,1999,23(4):15-18.

作者简介:

胡立锦(1986),男,硕士,主要从事电力系统安全控制分析方面的研究;

常喜强(1978),男,高级工程师,主要从事电力系统安全稳定分析工作;

周茂(1977),男,高级工程师,研究方向为输变电规划与设计;

夏时宇(1978),男,高级工程师,研究方向为输变电规划与设计;

张新燕(1964),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为风力机控制、电气系统优化设计。

(收稿日期:2012-12-03)

基于 GPRS 通信的配电网无功补偿系统研究

冷 怡 陈晓东 鲍云浮

(泸州电业局 四川 泸州 646000)

摘 要: 随着用电规模的不断扩大和用电结构的不断变化,以及变压器和电动机等大量感性负载设备的广泛使用,使得用电设备对无功的需求大幅上升,导致电网中无功功率的不平衡。通过分析配电网无功补偿的原理和 GPRS 无线通信网络的组成和特点,设计出一套以 GPRS 无线通信为数据通道的无功补偿方案,以此来解决中低压配电网网损过高等缺点,极大地提高供电质量,实现电能传输的经济效益。

关键词: 无功补偿; GPRS 通信; 配电网

Abstract: With the continuous expansion of daily power consumption and the continuous change of power consumption structure, as well as the wide application of transformers, electric motors and other inductive load equipment, there is a significant increase in reactive power demand by utilization equipment which leads to an imbalance of reactive power in power grid. The theory of reactive compensation in distribution network and the composition and characteristics of GPRS wireless communication network are analyzed. A set of reactive compensation scheme is designed taking GPRS wireless communication as the data channel so as to solve the excessive network losses of medium-low voltage distribution network and other shortcomings, which has greatly improved the quality of power supply and achieved the economic benefits of electric energy transmission.

Key words: reactive compensation; GPRS communication; distribution network

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0027-05

0 引 言

近年来,随着国民经济的快速发展以及建设社会主义新农村的高速推进,电力用户对电力负荷的需求以及供电可靠性、电压质量等,都提出了更高的要求。随着各地招商引资工作的大力发展及“家电下乡”等一系列政策的扶持,农村及城镇居民用电负荷不断增长,负荷的峰谷差也越来越大,供配电系统的调压问题变得越来越困难,电压过高或过低的问题时有发生,无功负荷在电网上的传输越来越大,如何合理地调整电压,提高电网的电压质量,降低线损促使电网安全、经济运行,是摆在面前的一项重要任务。

电力系统的无功补偿^[1-3],可以改善电压质量,降低线路损耗,使电网能安全、稳定、经济地运行,对保证工农业的正常生产、提高产品质量和改善人民生活都具有重大的意义。配电网主要由 10 kV 中压配电线路和 10/0.4 kV 配电变压器组成,这两部分也是电网中线路最长,所占比重最高的部分,如何

对低压配电台区和中压配电线路进行无功补偿是节能降耗的关键所在。通过合理分配无功来进行电压调节,从而降低线损,获得显著的经济效益和社会效益。各地电力部门在加大对配电网建设投资的同时,对现有配电网络进行无功补偿及对配电网运行情况进行实时在线监测显得日益重要。

GPRS(general packet radio service,通用分组无线业务)^[4]是以数字公用陆地移动通信网 GSM 网络为载体,为 GSM 移动网络用户专门提供的高速分组数据业务的一种新型网络^[5,6]。它是充分利用现有的无线网络资源,为 GSM 移动用户提供诸如 Internet 等数据通信网络服务的一种无线接入方案,是 GSM 阶段 Phase 2+ 定义出来的一种新业务。由于当前 GSM 移动电话用户已经占到了全球 4.5 亿移动电话用户的 40% 以上,因此,GPRS 在未来的移动数据资源市场中占有一定的优势。GPRS 是 GSM 移动电话系统向第三代移动通信迈出的一个重要步骤,做为叠加在数字公用陆地移动通信网络 GSM 网络之上,GPRS 网络是为 GSM 网络用户提供高速分组数据业务的一种新型网络。

通过分析配电网无功补偿以及 GPRS 通信网络的基本原理,设计出一套以 GPRS 无线通信为数据通道的无功补偿方案,建立 GPRS 通信的软件和硬件平台,并对 GPRS 在配电网无功补偿系统中的应用优势进行了分析。

1 配电网无功补偿理论

1.1 无功补偿的基本原理

电网传输的功率包括两部分,一是有功功率,二是无功功率。直接消耗掉电能,把电能转化为机械能、热能、化学能或声能,利用这些能作功,这部分功率称为有功功率;不消耗电能,只是把电能转换为另一种形式的能,并且,这种能是在电网中与电能进行周期性转换,这部分功率称为无功功率。无功补偿的具体实现方式:把拥有容性功率负荷的装置和拥有感性功率负荷的装置并联接在同一电路上,能量会在两种负荷之间相互交换。这样,感性负荷所需的无功功率就可由容性负荷输出的无功功率补偿。

1.2 无功补偿容量的确定

功率因数的提高与线路损耗的下降不是线性关系,功率因数愈高,无功补偿的经济效益就越差。当功率因数 $\cos\phi$ 由 0.6 提高到 0.7 时,线路损失下降近 50%;而由 0.7 提高到 0.8 时,线路损失只下降了 20%;当由 0.8 提升到 0.9 时,线路损耗仅下降 10%,功率因数愈高,效果愈差,因此不要认为功率因数提高得越高越好。并联补偿电容器安装容量的选择,可根据使用目的的不同,按提高功率因数、提高运行电压和降低损失等因素来确定。

1.3 无功补偿遵循的原则

无功补偿应遵循“全面规划,合理布局,分级补偿,就地平衡”的原则。无功补偿的实质就是尽可能减少无功在电力网络中的传送,进而减少无功电流经过变压器、线路传送导致的损耗。

(1) 总体平衡与局部平衡相结合,以局部平衡为主

首先要满足整个地区电网的无功电力平衡,其次要满足变电所、配电线路的无功电力平衡。在规划过程中,要在总平衡基础上,研究各个局部的补偿方案,求得最优化组合,才能达到最佳的补偿效果。

(2) 电力部门补偿与用户补偿相结合,以用户补偿为主

在配电网中,用户消耗的无功功率约占 50%~60%,其余的无功功率消耗在配电网中。因此,为了减少无功功率在网络中的输送,要尽可能地实现就地补偿,就地平衡,所以必须由电力部门和用户共同进行无功补偿。

(3) 分散补偿和集中补偿相结合,并以分散补偿为主

集中补偿,主要是补偿主变压器本身的无功损耗,以及减少变电所以上输电线路的无功电力,从而降低供电网络的无功损耗,但不能降低配电网的无功损耗。因此,中、低压配电网应以分散补偿为主。

(4) 降损与调压相结合,以降损为主

利用并联电容器进行无功补偿,其主要目的是为了达到无功电力就地平衡,减小网络中的无功损耗,以降低线损。与此同时,也可以利用电容器的分组投切,对电压进行适当的调整,这是补偿的辅助目的。在一般情况下,以降损为主,调压为辅。

2 GPRS 无线通信的基本原理

2.1 GPRS 的主要特点

GPRS 网络引入了分组交换与分组传输概念,促使 GSM 网络对数据业务的支持在网络体系上得到了提高。

GPRS 网络的优势如下。

(1) 永远在线

GPRS 所用的是分组交换技术,不需要像 Modem 那样拨号连接,只有用户在发送或者接收数据时才占用资源。

(2) 按传输数据量计费

GPRS 按传输数据量计费,并不是以传送的时间计费,所以就算遇上网络堵塞,也不会白白花钱,对消费者来说更为合理。

(3) 无线高速数据通讯

GPRS 成为人们对无线高速数据通讯所要求的产物,提供了一种无缝、直接与 Internet 网连接。GPRS 的应用,将用户带入了移动信息的高速公路,充分满足了广大用户对数据业务不断增长的各种需求^[7-8]。

2.2 监控中心与 GPRS 网络的接入方式

监控中心有多种方式接入,根据 GPRS 承载网

络的特点以及 GPRS 应用领域的具体要求,一般有下列组网方案来适应各种不同的应用形式。GPRS 无线通信传输系统的网络框架直接影响系统的工作方式以及性能,所以选择一种比较合适的网络构架,将对整个系统的设计、调试以及运行都将有重要的意义^[9]。组网形式的选择主要是由业务数据流、时延、可靠性要求、数据保密性、网络状况来决定。

(1) 采用 GPRS 终端接入

监控中心采取 GPRS 终端接入来获得动态 IP,并使用 Internet 上的注册服务器帮助监控中心和数据采集端 MS 形成通信。所有数据收集端的 MS 也使用动态 IP,必须在拨号上网后才会获得动态 IP 并向注册服务器的软件注册,监控中心可以从注册服务器上获得数据收集端 MS 的 IP 地址,来实现监控中心到数据收集端 MS 的下行通信;数据收集端接收到监控中心发来的 IP 包后,从 IP 的头中获取监控中心的 IP 地址,以此来实现上行通信。注册服务器使用公用网络固定 IP 或者公用网络动态 IP + DNS 解析服务,用来帮助通信双方搭成连接,若中途 MS 因不明原因掉线重拨导致 IP 地址的改变,则可以在注册服务器的协助下重新建立通信。

该方法除了建立下行通信阶段外,其他的数据传送都在 GPRS 网络内进行,安全性很高,并且时延小。本方案采取在公网上的注册服务器帮助建立通信,所需费用低,从投入方面有利于 GPRS 无线数据传输系统的大力推广。但因为监控中心采用 GPRS 终端拨号上网,网络的带宽较小,致使本方案更加适合于 Polling 方式的少量数据传输^[10]。

(2) 采用 APN 专网接入

这种方案需向移动公司申请 APN 专网的业务。移动公司分配专用的 APN,并且用于 GPRS 专网的 SIM 卡才可以使用该 APN。同时在获得 APN 后,给监控中心与所有数据收集端 MS 分配固定 GPRS 网络 IP。因为可以申请到固定 IP,所以该方案不需要注册服务器来协助建立连接,减少了中间环节,所以稳定性得到加强;所有的数据都将在 GPRS 的 APN 内网中传输,不需要通过公网,数据的安全性增强;而且该方案不需要负担专门月租费。与方案 1 相同,因为监控中心采用 GPRS 无线通信接入,带宽有限,并且 APN 的费用显然比方案 1 要高。但从总体上来说,本方案性价比较高,如果在条件允许的情况下可以使用本方案,因为在性能上要比方案 1 好很多。

(3) 宽带接入 Internet

监控中心的宽带接入 Internet 公网,并且使用公网的固定 IP 或者公网的动态 IP + DNS 解析服务。首先由数据收集端 MS 向监控中心发出连接信号(如果监控中心采取公网动态 IP + DNS 解析,则在此之前 MS 从 DNS 服务器获得监控中心动态 IP),此时 GGSN 将会分配给该 MS 一个公用网络的 IP 和端口,GGSN 上的 NAT 表单中会添加上这个通信链路的 IP 端口的对照项,将 MS 的 GPRS 网内部 IP 和分配的公网端口相互对应。随后监控中心发向 MS 的包只需要发向该公网 IP 以及端口,GGSN 将会顺利地转发到数据收集端 MS,整个通信通道就能顺利传输数据了。该方案因为监控中心宽带接入,所以比前两个方案的带宽大,系统能够发展较多的数据收集端 MS,提高 GPRS 系统的容量。但数据传送需要经过 GPRS 网络以及公用网络,数据的传送质量受到公网拥挤情况的影响,并且延时可能会加大,并且公网上的数据安全性明显较差。因此本方案适合数据节点比较多,对安全性和实时性要求不是十分高,而资金投入又有限的数据采集系统。

3 基于 GPRS 的配电网无功补偿系统

3.1 GPRS 通信硬件/软件平台

在县级电力公司建立电能质量管理体系,由配电网线路无功补偿测控装置、配电变压器无功补偿测控装置、专用变压器用户无功补偿测控装置、GPRS 模块、GSM 公用网络、数据通信前置机、电能质量数据库、通信服务器、应用服务器以及工程师工作站组成。

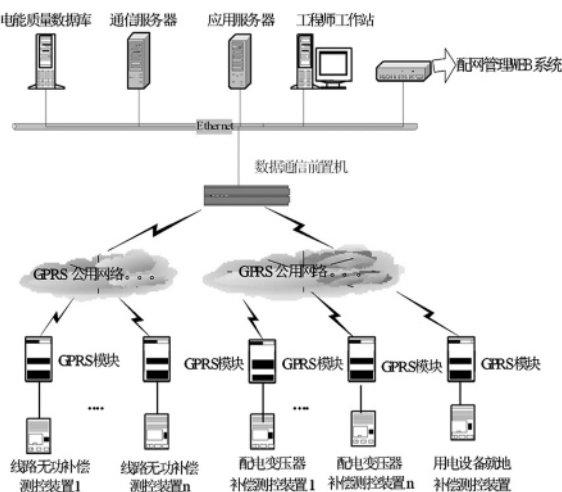


图1 基于 GPRS 网络的配电网无功补偿硬件平台

将线路无功补偿测控装置、配电变压器无功补偿测控装置以及用户专用变压器无功补偿的运行数据通过 GPRS 网络传输至监控中心服务器,并将监控中心下发的定值命令准确地传送到远方终端,反映远方设备运行情况的数据信息收集到监控中心(见图 1)。

后台搭建由实时数据库模块、实时数据管理模块、用户管理模块、历史告警服务模块、历史数据库模块、综合统计模块、报表管理模块、图形监控模块、遥控模块、通信接口模块、优化控制服务模块组成(见图 2)。

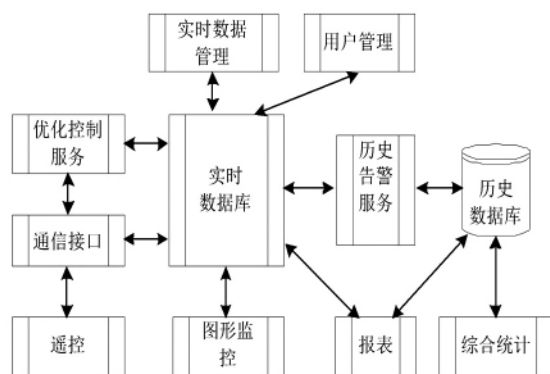


图 2 基于 GPRS 网络的配电网无功补偿软件平台各模块功能介绍如下。

实时数据库模块主要将电能质量服务器中采集到的最新数据进行实时更新,考虑到数据传输流量问题,系统每间隔 10 min 向各个测控装置采集一次实时数据,并更新到显示界面。用户每次查询实时数据时,系统自动召唤当前的实时数据并更新于显示界面。

实时数据库管理模块将数据进行显示并根据补偿测控装置的设定参数进行比对,如果实测数据超出设定的参数定值,则以红色字符报警显示。提示用户关注测量值越限情况。

用户管理模块对用户进行权限管理,系统管理员可根据需要增减用户以及用户权限设置。

历史告警服务模块将服务器定时采集上来的告警数据进行存储,以便需要时查询,数据至少保存 5 年以上为以后的无功优化及线路调整提供决策参考。

历史数据库模块将服务器定时采集上来的历史数据进行存储,以便需要时查询,数据至少要保存 5 年以上为以后的无功优化提供决策参考。

综合统计模块将历史数据中的数据进行统计分

析,对异常数据进行提示。

报表管理模块对报表进行管理,可以按条件筛选数据,数据可以打印并输出 excel 表格。

图形监控模块将配电网补偿系统绘制成拓扑接线图,配电网补偿系统结构图一目了然,对出现故障的补偿装置提示运行人员及时排查。

遥控模块通过后台软件可对补偿装置电容器进行远程操作控制,进行控制参数查询和修改。

通信接口模块实现控制终端与后台程序的接口,按照设定间隔召唤实时数据。

优化控制服务模块通过对历史数据的分析,提供电压无功优化方案供运行人员参考。

3.2 GPRS 在配电网无功优化系统应用中的可靠性

GPRS 通信网络负责传送系统中遥测、遥信、遥控以及相关管理信息,传输数据需要得到充分的安全保障,同时要保障信息的可靠性。

配电网的监测无功补偿装置的通信系统大部分都安装在户外,变化的气候条件以及较强的电磁干扰环境 EMI(electromagnetic interference) 都是通信网络可靠性严重影响因素。目前的 GPRS 通信技术相对成熟,坚固耐用,并且在网络核心设备的管理与维护都是由移动公司专门负责,使用 GPRS 通信网络的供电公司只需承担 GPRS 终端设备的一些常规的维护工作。在传输中,GPRS 结合了高斯最小移频键控 GMSK(Gaussian minimum shift keying) 调制方式、自动重传请求 ARQ(automatic request for retransmission) 等技术,确保了数据传输的可靠性。同时在信道前向纠错 FEC(forward error correction) 编码上,卷积编码是 GPRS 采用特殊编码,包括 CS-1 ~ CS-4 这 4 种编码方式,通过采用 4 种不同的纠错比特数,使 GPRS 适应 4 种不同传输信道质量要求。与传统的传输方式相比,采用 GPRS 的配电网通信网络受环境和气候因素影响小,并且抗干扰能力强,有十分强的传输纠错机制,只需平常一些必要的维护就可以有效地保证通信的可靠运行。

在配电网无功补偿优化系统对数据通信的速率要求不是很高,数据量并不是很大,GPRS 的最高值为 172.1 kbit/s, GPRS 完全可以传输各种数据。在实际应用中,数据的传输速度受网络编码方式以及终端支持等客观因素的影响,接入速度只会在 30 ~ 40 kbit/s 之间,但有了数据加速系统后,传输速率

可以达到 60 ~ 80 kbit/s 以上。网络数据传输处理模式可采用终端数据主动上报、主站端发出处理各台终端的数据。因为主站可分组同时发送处理多台终端上传上来的数据,极大地加快了通信数据传输的实时性。

依靠 GPRS 的通信网络组网方式十分灵活,满足当代电压无功优化对通信可靠性、实时性的要求。此外,GPRS 通信还能够提供点到点的服务质量 QOS(quality of service),保障供电企业可以根据实际情况,灵活地选择不同的 QOS 等级,对 GPRS 网络时延参数、优先级、吞吐量、可靠性等参数作出相应的设定,以此来实现数据资源的动态分配。

3.3 GPRS 的应用优势

把对配电网上的线路无功补偿装置、台区配电变压器测控装置等进行远方实时监控、协调及控制的集成系统构成配电网无功补偿平台,其运行参数是整个配电网基础参数的重要组成部分。配电网无功补偿平台将及时监测到的数据发送到控制中心,如果采用传统的通信办法,在经济性和可扩充性上都不能满足配电网的特点。借助 GPRS 通信的高速通道来实现数据的传输和永远在线,将各无功补偿装置通过 GPRS 网络与 Internet 相互联接起来,同时供电企业配电网的电能质量管理体系也通过本身的路由器与 Internet 建立联接,使其实现配电网电能质量管理体系的相互交换。利用 GPRS 网络来传输配电网电能质量管理体系信息是 GPRS 在电力系统中的一个重大应用,不但可以节约大量的网络建设费用,而且只需在原有设备基础上增加无线智能监控终端设备,使因配电网设备众多以及分布地域广泛而使局部区域难以实现通信的难题得到了解决。

4 结 论

在配电系统中广泛存在大量的感性负荷,会消耗大量的无功功率,降低系统的功率因数,造成线路电压损失加大和有功损耗增加,使电网的供电质量恶化。而解决问题的有效方法就是进行无功功率补偿。配电网的无功补偿对于配电网的稳定、经济运

行具有重要的作用。

基于 GPRS 通信的无功补偿系统能够及时分析电网中的无功容量,并且迅速分析出是否需要进行无功补偿,该系统受环境和气候因素的影响很小,并且抗干扰能力强,具有较强的传输纠错机制,通信时只需通过对移动终端进行一些基本维护就能够有效保证电力部门的可靠运行。

参考文献

- [1] 姚耐秀. 浅谈低压电网无功补偿[J]. 中国电力教育, 2011(18): 113-114.
- [2] 石春让. 国内外无功补偿技术水平及现状[J]. 电工技术, 1994(10): 354-359.
- [3] 侯岗. 电力系统无功补偿技术的应用[J]. 机电信息, 2011(21): 45-47.
- [4] 刘道玉,迟毅林. 基于 PC 的虚拟仪器及其技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2004(4): 22-25.
- [5] 周封,王晨光. 基于 GPRS 的电网调度自动化系统的通信方式[J]. 电力系统通信, 2008, 29(6): 34-35.
- [6] 黎水平,贺建军. 基于 GPRS 的配电变压器在线监控系统研究[J]. 自动化仪表, 2008, 29(9): 33-35.
- [7] H. Zeng. The Principle and Realization of the GPRS Network System[J]. Mobile Communications, 2002(12): 40-42.
- [8] 王向臣. 电网无功补偿实用技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [9] T. Acermann, V. Knyazin. Interaction Between Distributed Generation and the Distribution: Operation Aspects[J]. IEEE/PES, Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002, 2(10): 1357-1362.
- [10] 程浩忠,吴浩. 电力系统无功与电压稳定性[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

作者简介:

冷 怡(1981),女,工程师,主要从事电压无功管理、工程项目管理等工作;

陈晓东(1976),男,高级工程师,主要从事电网规划设计、工程建设管理等工作。

鲍云浮(1961),男,工程师,主要从事企业管理、电网规划设计、工程建设管理等工作。

(收稿日期:2012-12-06)

基于奇异点检测的行波单端测距方法研究

孟凡铮¹, 王喜疆²

(1. 新疆电力公司检修公司 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 新疆新能物资有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 单端法是行波测距研究的热点问题, 讨论了输电线路故障时暂态行波的产生及在线路上的传输过程, 在此基础上通过检测突变点模极大值的方法确定故障发生的时间点。并通过 matlab 仿真表明此理论和测距方法在不同线路模型故障测距的正确性和有效性。

关键词: 输电线路; 故障测距; 反向行波; 奇异点模极大值

Abstract: The single terminal method is the hot issue in the research of traveling wave fault location. The occurring of transient traveling wave when there is a fault in transmission line is discussed as well as its transmission process on the line. On this basis, the occurring time of fault can be determined through detecting the mutation point modulus maximum. The Matlab simulation shows that the validity and availability of the proposed theory and method in fault location of different line models.

Key words: transmission line; fault location; reverse traveling wave; singular point modulus maximum

中图分类号: TM935 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0032-03

0 引言

传统故障测距是基于工频电气量, 其中工频阻抗法是广泛应用的方法。它以线路集中参数模型为基础, 测距精度受故障点的过渡电阻、系统运行阻抗、负荷电流等因素的影响, 误差较大, 测距精度无法保证^[1]。但基于行波法的故障定位, 在理论上不受线路类型及过渡电阻的影响^[2]。原理简单, 也不受系统通信技术条件的限制。相比单端测距, 双端测距可靠性高, 但对通信精度要求高, 大大增加了成本。因此, 单端测距成为研究的一个热点^[3]。在简要介绍故障行波基本概念的基础上, 利用单端测距, 基于奇异点模极大值检测的方法分析暂态过程中的电气量, 对故障定位进行了探讨。

1 故障暂态行波在输电线路的传输

当线路上某一点发生故障时, 可用叠加原理将其分解为正常负荷分量和故障分量二者的叠加。故障分量相当于在系统电势为零时在故障点加一个与正常负荷大小相等、方向相反的电压, 在这一电压下, 将会产生由故障点向线路两端传播的波形。如图1所示, F点故障时, 将由故障点向两端传播行波。

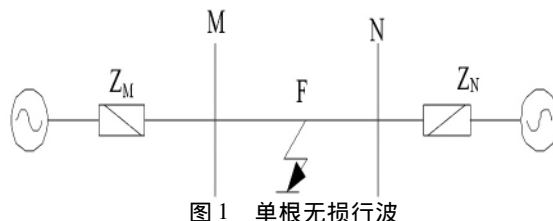


图1 单根无损行波

如果将单根无损的分布参数线路上的电压 u 和电流 i 用在线路上的位置 x 和时间 t 为变数的偏微分方程来表示, 则

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t} \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = C \frac{\partial u}{\partial t}$$

其中 L 、 C 为线路单位长度的电感和电容。

将其分别对 x 和 t 微分, 经变换可得到波动方程

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2}$$

则其达朗贝尔解为

$$u = u_1 \left(t - \frac{x}{v} \right) + u_2 \left(t + \frac{x}{v} \right) \quad (1)$$

$$i = \frac{1}{Z_c} \left[u_1 \left(t - \frac{x}{v} \right) + u_2 \left(t + \frac{x}{v} \right) \right] \quad (2)$$

式中 $u_1 \left(t - \frac{x}{v} \right)$ 为 x 正方向行波; $u_2 \left(t + \frac{x}{v} \right)$ 为 x 反

方向行波; $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 是波速; $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$ 是波阻抗。

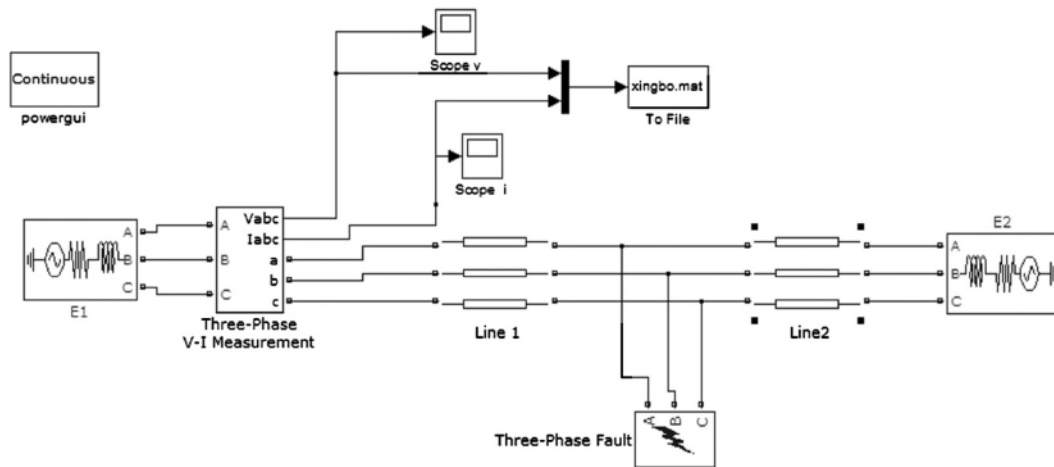


图 2 仿真模型

2 输电线路故障行波的提取

对模型进行故障仿真后,提取三相电压和电流的暂态量,由于各相之间存在耦合,每相包含的行波分量并不孤立,所以要把互不独立的相分量转换成独立的模分量。利用模量行波实现相应功能,相模变换通过 Clarke 变换则有

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 u_a, u_b, u_c 为三相电压行波分量; u_α, u_β, u_0 分别为电压行波的 $\alpha, \beta, 0$ 模分量; i 为相应的电流分量。

因此,方向行波的模量可表示为

$$\begin{cases} S_{1\alpha} = u_\alpha + i_\alpha Z_\alpha \\ S_{1\beta} = u_\beta + i_\beta Z_\beta \\ S_{10} = u_0 + i_0 Z_0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} S_{2\alpha} = u_\alpha - i_\alpha Z_\alpha \\ S_{2\beta} = u_\beta - i_\beta Z_\beta \\ S_{20} = u_0 - i_0 Z_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 $S_{1\alpha}, S_{1\beta}, S_{10}$ 为正向行波的 $\alpha, \beta, 0$ 模分量; $S_{2\alpha}, S_{2\beta}, S_{20}$ 为反向行波分量; Z_α, Z_β, Z_0 为相应的波阻抗。

3 小波变换及模极大值

对提取的行波信号进行多尺度分析,在信号

出现突变时,其小波变换后的系数具有模极大值,因而可以通过对模极大值点的检测来确定故障发生的时间点。首先给出小波变换模极大值的定义。设 $W_s f(x)$ ($s = 2^j$) 是函数 $f(x)$ 的小波变换,在尺度 s 下,在 x_0 的某一邻域 δ ,对一切 x 有: $W_s f(x) \leq W_s f(x_0)$, 则称 x_0 为小波变换的模极大值点, $W_s f(x_0)$ 为小波变换的模极大值。小波变换的模极大值点与信号的突变点是一一对应的。若函数 $f(x)$ ($f(x) \in R$) 在某处间断或某阶导数不连续,则称该函数在此处有奇异性;若函数 $f(x)$ 在其定义域有无限次导数,则称 $f(x)$ 是光滑的或没有奇异性。一个突变的信号在其突变点必然是奇异的,因而可以通过对奇异的点的检测来确定故障发生的时间点。

4 建模与仿真

4.1 仿真模型

基于以上数学理论在 Matlab 中搭建仿真模型如图 2 所示,设置仿真时间为 $0.0 \sim 0.10$ s,采用步长 Ode23tb 算法,设置 A 相短路,故障点距离测量点 80 km,短路时间为 $[0.035 \ 0.100]$ 。

4.2 仿真结果

算例仿真后,三相电压电流波形如图 3、4 所示。

通过检测点的三相电流和电压的波形可以看出,仿真后的电压、电流波形符合线路发生 A 相短路故障的特征,从而说明了仿真模型的正确性。

4.3 故障点行波提取

在 Matlab 中用语言将算法写成程序,利用式 (3)、式 (4) 把电流电压的暂态量进行 Clarke 变换得

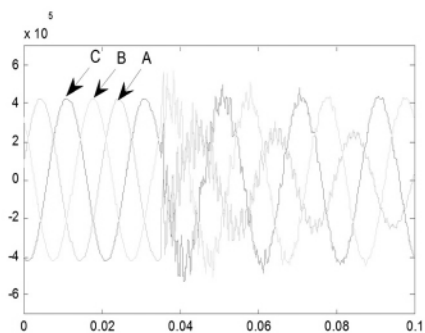


图3 检测点三相电压波形

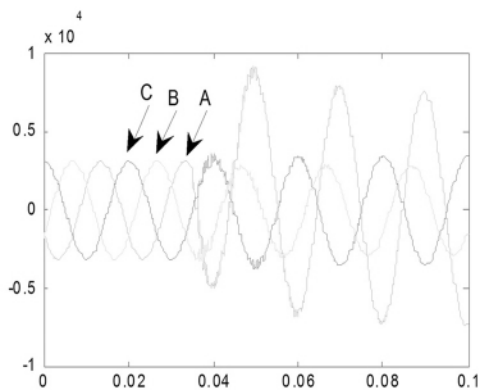


图4 检测点三相电流波形

到相应的模分量,再利用式(5)、式(6)计算正向、反向行波的模分量,如图5所示。

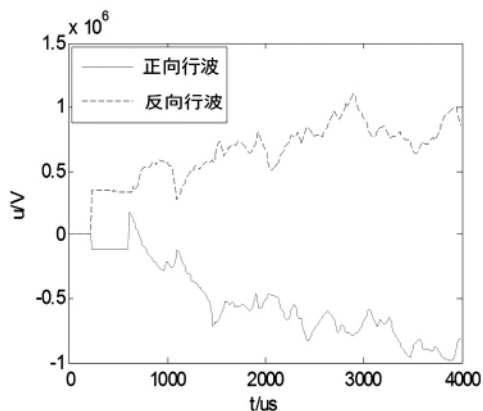


图5 电压 α 模正向和反向行波

故障后行波第一个波头突变都比较明显,以后进入母线、变压器后经过折反射后出现明显的畸变和衰减。利用电压行波较电流行波有一定的优势:系统阻抗较大时,电压行波幅值相对电流行波较大,易于测量;电压行波较电流行波灵敏度高^[4]。这也是选择以电压行波为测量对象的原因。

4.4 基于奇异点模极大值的小波变换

在 Matlab 中编程,用小波对信号进行6层分解,如图6、图7所示。由于反向行波进行检测可有效屏蔽由非故障线路折射过来的波头,所以选取反向电压行波为原始信号,对信号进行多尺度分析,在

信号突变时其小波变换后的系数具有模极大值,因而可以通过模极大值点的检测来确定故障发生的时间点,从图6经过小波分解后的第1个波头的时间点为28 ms,故障点第2个反射波时间点为83 ms,通过单端测距公式求得故障距离测量点80.46 km。

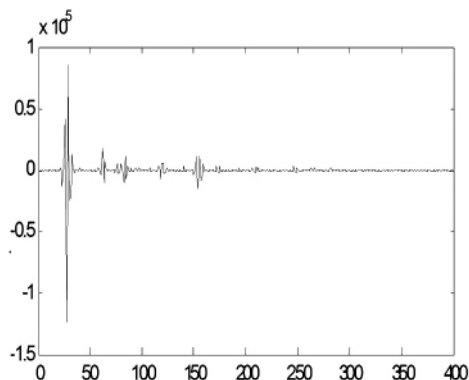


图6 反向行波的小波变换

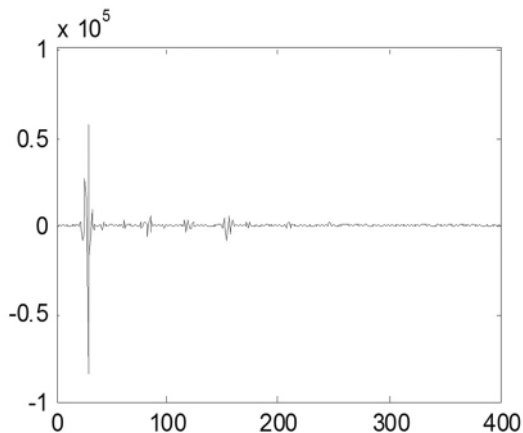


图7 接地电阻为100 Ω 反向行波的小波变换

当存在接地电阻时,对测距精度影响不大,测距结果均为80.46 km。但与金属性接地故障相比信号微弱,比较图6与图7可明显看出当接地电阻为100 Ω 时,经变换后的行波模极大值远小于金属性接地故障,而对故障发生的时间点无任何影响。

4.5 不同母线类型的验证

母线连接的方式主要有两种:一种是母线上除了故障线路外没有其他出线,另一种是有其他出线,这两种母线的主要差别是暂态行波反射系数不同。故选取3个双电源模型系统,验证故障发生与不同位置、不同短路故障类型的定位效果。第1个模型如图7所示,其中MN=100 km;第2个模型如图8所示,其中MN=100 km, RM=50 km;第3个模型如图5~8所示,其中RM=50 km, MN=100 km, NS=30 km。电压等级为500 kV,两端电压夹角30°。

(下转第53页)

- [14] 谢开贵,刘柏私,赵渊,等. 配电网开关优化配置的动态规划算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 29-34.
- [15] 王峻峰,谢开贵,周家启. 配电网开关优化配置的改进遗传算法[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 27-32.
- [16] 史燕琨,王东,孙辉等. 基于综合费用最低的配电网开关优化配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 136-141.
- [17] 王东,史燕琨,丛吉远,等. 灾变遗传算法在配电网开关优化配置中的应用[J]. 高压电器, 2004, 40(3): 180-182.
- [18] 王艳松,赵智,陈国明,等. 应用禁忌搜索方法优化配

- 网的开关配置[J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 74-76.
- [19] 许丹,唐巍. 多目标分阶段中压配电线路开关优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 47-52.
- [20] 曹伟,姚建刚. 配电网主馈线分段开关优化配置的新方法[J]. 微计算机信息, 2009(24): 1-2.
- [21] 葛少云,李建芳,张宝贵. 基于二分法的配电网分段开关优化配置[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 44-49.

作者简介:

徐 飞(1987),男,主要从事配网自动化及计算机信息处理方面的设计工作。

(收稿日期:2012-12-13)

(上接第 34 页)

表 1 不同模型的测距结果

故障点	模型 1			模型 2			模型 3		
	单相接地	两相接地	三相接地	单相接地	两相接地	三相接地	单相接地	两相接地	三相接地
80 km	0.1 Ω 100 Ω	0.1 Ω 100 Ω	0.1 Ω 100 Ω	0.1 Ω 100 Ω	0.1 Ω 100 Ω	0.1 Ω 100 Ω	0.1 Ω 100 Ω	0.1 Ω 100 Ω	0.1 Ω 100 Ω
50 km	80.46	80.46	80.46	80.46	80.46	80.46	80.46	80.46	80.46
30 km	81.95	81.95	81.95	81.95	81.95	81.95	81.95	81.95	81.95

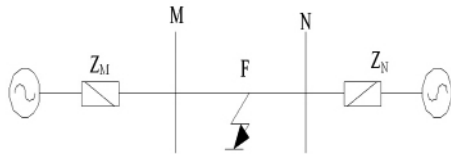


图 8 仿真模型 1

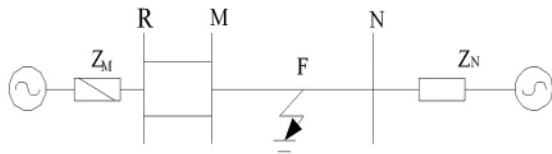


图 9 仿真模型 2

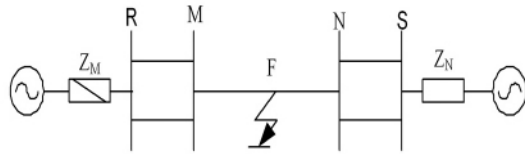


图 10 仿真模型 3

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术(第二版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [2] 李幼仪,董新洲,孙元章. 基于电流行波的输电线路横差保护[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 6-10.
- [3] 康小宁,索南加乐. 基于参数识别的单端电气量频域法的故障测距原理[J]. 中国电机工程学报, 2005, 32(1): 22-27.
- [4] 王志华. 超高压输电线路故障行波定位及高压变频技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [5] 高淑萍,索南加乐. 基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 75-79.
- [6] 徐青山,陈锦根,唐国庆. 考虑母 线分布电容影响的单端行波测距法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 70-73.
- [7] 王志华. 超高压输电线路故障行波定位及高压变频技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [8] 施慎行,董新洲,周双喜. 单相接地故障行波分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 29-32, 53.

作者简介:

孟凡铮(1988),男,工程师,主要从事 750 kV 电网设备维护;

王喜疆(1985),男,工程师,主要从事电力设备采购供应工作。

(收稿日期:2012-12-22)

5 结 论

为了验证算法的有效性,建立了 3 种仿真模型,表 1 给出了接地故障发生在不同位置、不同接地电阻的定位效果。3 种测距结果显示,这种方法能够实现精确定位,最大误差为 2.4%,能够满足单端测距的要求。大量仿真表明行波测距精度受过渡电阻影响不大,过渡电阻只改变其幅值,对精度的影响有限。

考虑相角特征的无死区新型触/漏电保护技术

陈义刚¹ 李 浩² 范康林³ 罗明才³

(1. 四川省电力公司 四川 成都 610041; 2. 四川大学电气信息学院 四川 成都 610065;

3. 自贡电业局 四川 自贡 643000)

摘 要: 针对现有基于剩余电流保护技术的漏电保护器存在保护死区的不足, 基于正常剩余电流与触/漏电故障电流之间的相位关系, 提出电流分离技术, 将触/漏电电流从总剩余电流中分离出来。提出了一种新型无死区漏电保护原理, 基于 DSP 对其实施方案进行了研究, 并通过数字仿真证明了该方法的正确性和可行性。与现有基于剩余电流幅值和幅值变化量的漏电保护技术进行的对比结果证明, 能有效消除保护死区, 极大地提高保护装置动作的可靠性。

关键词: 剩余电流; 漏电保护; 保护死区; 电流分离技术; DSP

Abstract: The residual current protective technique and its major deficiencies are investigated. It is pointed out that the touch/leakage current could be extracted from the total residual current by using current separation technology based on the phase relationship between normal residual current and touch/leakage current. A novel leakage current protection principle without protection dead-zone is proposed. The implementation program based on DSP is investigated. The proposed method proves to be accurate and feasible in digital simulations. Compared to the existing techniques either based on residual current amplitude or its variation, the proposed method can effectively eliminate protection dead-zone and drastically improve the reliability of protection devices.

Key words: residual current; leakage current protection; protection dead-zone; current separation technology; DSP

中图分类号: TM772 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0035-05

电流动作型剩余电流保护装置(residual current devices, RCDs), 俗称漏电保护器, 是广泛应用于低压农村电网的剩余电流保护装置之一, 是防止人身触电伤亡事故和因漏电事故引起的电气火灾等最基本、最重要的保护手段^[1-3]。1928年, 德国人提出的剩余电流动作型触/漏电分断保护方法奠定了剩余电流动作型漏电保护器的理论基础^[4]。随着技术发展, 在最初的电流动作型基础上, 相继出现了电流脉冲动作型、电流鉴相动作型等剩余电流保护装置, 并取得了一定的应用成果。但现有漏电保护器通常是依据总剩余电流的幅值或幅值变化量大于某个规定值而动作。就动作特性而言, 现有剩余电流保护装置大多对触/漏电故障电流信号的选择性不强, 均存在一定的保护死区。因此, 结合触/漏电故障电流的固有属性和特征, 研究无保护死区的新型技术难题^[1], 具有重要理论价值和现实意义。

漏电保护装置, 是当前工程实践中面临的理论和针对对漏电保护装置的选择性和动作可靠性问题, 国内外开展了大量研究。学者李奎等分析了触/

漏电故障电流与剩余电流之间的相角关系, 提出了各相剩余电流及其变化量的计算公式, 提出用剩余电流及其变化量作为判据, 进行触/漏电故障保护的方法^[7-8]。学者李春兰等在人体触电电流信号检测方法上开展了研究, 提出了基于小波变换、混沌理论和 BP 神经网络检测算法^[9, 10]。学者蔡志远提出基于剩余电流和漏电阻抗保护方案, 在理论上可避免负荷投切对保护的影响^[11]。文献[12]通过在线监测泄漏电流和环境因素变化, 自动调整保护装置的动作阈值, 提高保护装置的动作可靠性。文献[13]用 MSP430 单片机实现了数字式漏电保护器。这些研究在算法、特征量和硬件实现等方面取得一些进展, 但保护可靠性、选择性等方面问题仍需深入研究。

剩余电流是指流过剩余电流保护装置主回路的电流瞬时值的矢量和(用有效值表示)^[5]。因电网与设备的绝缘水平不可能绝对理想, 均存在对地绝缘电阻和分布电容, 因此必然存在一定的泄漏电流。当三相泄漏电流不平衡时, 就存在自然剩余电流 I_0 。当发生触/漏电故障时, 故障电流 I_r 汇入正常自然剩余电流, 形成总剩余电流 $I_h = I_0 + I_r$, 该电流即为

基金项目: 四川省科技支撑计划(2010GZ0256); 四川省电力公司资助项目

装置检测到的电流。可见,现有装置检测到的剩余电流与触/漏电故障电流是两个不同物理量的总和。因三相线路绝缘水平、所接设备、漏电状态可能不同,自然剩余电流的相角是任意的,触/漏电事故又可能发生在任意一相,因此,触/漏电流与自然剩余电流之间的相位差是任意的。触/漏电流与自然剩余电流间的相位关系具有不确定性,导致检测到的总剩余电流并不一定必然增大。因此,仅检测剩余电流幅值或其变化量难以确保保护装置正确动作,必须考虑相位关系。

以上分析可见,如果能在检测到的总剩余电流中将触/漏电故障电流与自然剩余电流有效地分离开来,就可能提高保护的可靠性和选择性。在研究现有剩余电流保护技术的基础上,通过分析剩余电流幅值与相位的关系,提出了触/漏电故障电流的分离方法和有效值计算公式,以及基于DSP技术的新型触/漏电保护装置的实现方法,仿真证明,该方法可有效地提高漏电保护装置的动作可靠性和选择性。

1 剩余电流保护原理与保护死区

图1为中国低压供电系统采用的三相四线制中性点直接接地系统中的电流动作型剩余电流保护原理图^[1]。当无触/漏电故障时,电流互感器TA一次侧电流矢量和为零。当任意一相有触/漏电故障发生时,有

$$I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} + I_N = I \neq 0 \quad (1)$$

式中 I 为剩余电流,即保护装置检测到的电流。

从原理上看,剩余电流保护装置实际检测到的电流并非触/漏电故障电流本身,而是包含自然漏电流在内的总剩余电流。如果 I_m 为保护装置动作整定电流值, I_{rp} 为驱动装置动作的故障电流临界值, φ 为 I_r 与 I_0 的相位差,则装置动作临界条件为

$$I_m = \sqrt{I_0^2 + I_{rp}^2 + 2I_0I_{rp}\cos\varphi} \quad (2)$$

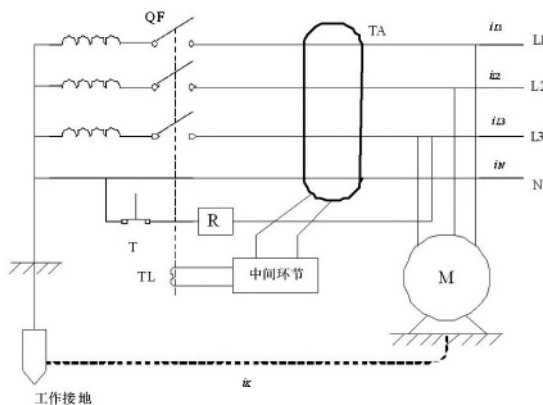


图1 电流动作型保护器原理

根据式(2)可作出电流动作型保护装置运行特性曲线,如图2。由图可见,存在保护死区,且存在欠灵敏易拒动区(II区)和过灵敏易误动区(III区),仅在很小范围内满足保护特性(I区)^[6]。

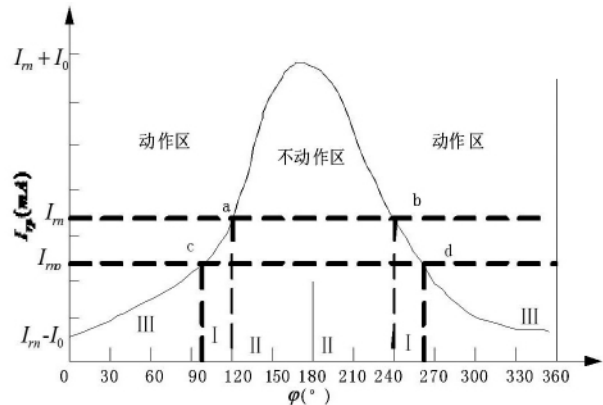


图2 电流动作型保护运行特性曲线

电流脉冲动作型保护装置根据触/漏电故障电流为突变信号的特点,用剩余电流变化量 $\Delta I = |I_h| - |I_0|$ 作为动作判据,其临界动作条件为

$$I_m = \sqrt{I_0^2 + I_{rp}^2 + 2I_0I_{rp}\cos\varphi} - I_0 \quad (3)$$

由此可作出电流脉冲动作型的运行特性曲线,如图3。与电流动作型相比,脉冲动作型装置增加了一个第2动作区,减小了但未完全消除保护死区^[4]。

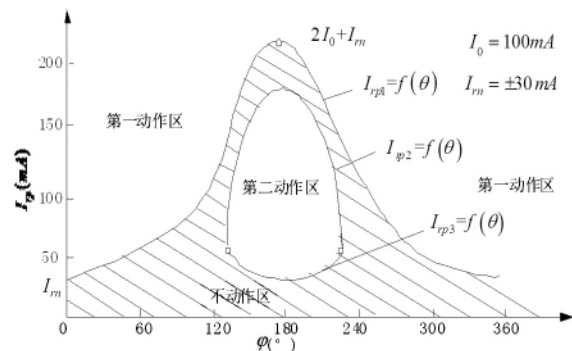


图3 电流脉冲动作型保护运行特性曲线

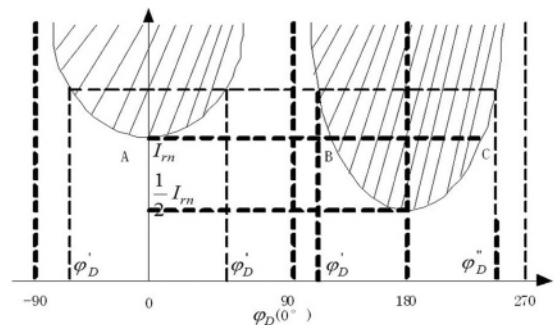


图4 电流鉴相型保护运行特性曲线

电流鉴相型保护装置通过鉴别触电电流对剩余电流相位的改变来获取信号,在一定条件下提高了运行特性。但该方法假设人体阻抗为纯阻性,触电电流与触电相电压同相位^[6]。如果偏离该条件,

运行特性非理想,如图4, φ_D 为触电电流与标准电压间的相位差。当 φ_D 在 $\pm 90^\circ$ 左右时,触电动作电流非常大,保护器往往拒动。

2 触/漏电流分离技术

电流分离型保护装置利用触/漏电流与自然剩余电流的不同特征,将触电电流从总剩余电流中提取出来,提取出的信号仅与触电电流有关,从而具有较好的选择性和更高的可靠性^[1]。

如图5,在工频下,设故障前后剩余电流间的相角差为 θ ,由余弦定理可得电流幅值间的关系为

$$I_r^2 = I_0^2 + I_h^2 - 2I_0I_h\cos\theta \quad (4)$$

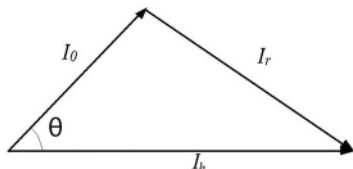


图5 合成剩余电流矢量图

现有保护装置不能直接测量触/漏电流 I_r ,而故障前后的剩余电流 I_0 、 I_h 可直接通过零序电流互感器测量。由式(4)可知,如果能确定等式右边第三项,就可求得 I_r 的幅值。设故障前剩余电流为

$$i_0 = \sqrt{2}I_0\cos(\omega t) \quad (5)$$

故障后剩余电流为

$$i_h = \sqrt{2}I_h\cos(\omega t + \theta) \quad (6)$$

将两者相乘可得

$$\begin{aligned} i_0i_h &= \sqrt{2}I_0\cos(\omega t)\sqrt{2}I_h\cos(\omega t + \theta) \\ &= I_0I_h\cos\theta + I_0I_h\cos(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (7)$$

对式(7)的结果进行平均,有

$$\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\sqrt{2}I_0\cos(\omega t)\sqrt{2}I_h\cos(\omega t + \theta)d(\omega t) = I_0I_h\cos\theta \quad (8)$$

在数字式保护装置中,对离散信号进行数字处理,积分运算可由式(9)实现。设检测到的剩余电流为 i 在发生触/漏电故障以前 i 为自然剩余电流 i_0 ,故障后 i 变为含触/漏电流的总剩余电流 i_h 。因此有

$$I_0I_h\cos\theta = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N-1}i(M-N+n)i(M+n) \quad (9)$$

其中, M 为触/漏电故障起始点; N 为一个周期的采样点数。有效值平方 I_0^2 和 I_h^2 为

$$I_0^2 = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}i^2(M-N+n) \quad (10)$$

$$I_h^2 = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}i^2(M+n) \quad (11)$$

将式(9)~(11)的计算结果代入式(3),可得触/漏电流有效值为

$$I_r = \sqrt{I_0^2 + I_h^2 - 2I_0I_h\cos\theta} \quad (12)$$

3 无死区漏电保护器技术方案

基于上述原理的新型保护装置原理如图6,由检测元件、中间环节、执行机构和试验装置构成。检测元件为零序电流互感器,将剩余电流转换为中间环节可以接收的电压或功率信号。中间环节对信号进行采样和A/D转换。DSP芯片读取数据并进行处理。执行机构受中间环节的指令控制,用以切断主回路电源。试验装置用以检验保护器能否正常动作。核心部分是中间环节,关键在于对采样信号的数字处理。为进行如式(9)的乘法运算,以某采样时刻前一周期数据与后一周数据相乘。采用滑动窗口计算,每次滑动步长设为 H 。 H 设置为大于DSP芯片单次计算触/漏电流有效值的时间(主要由DSP芯片的计算速度决定)。

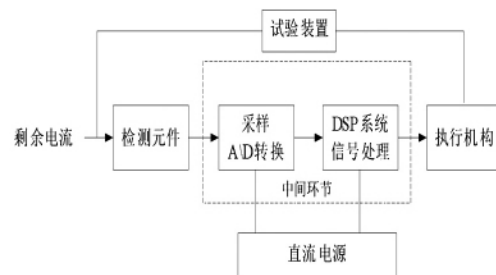


图6 漏电保护装置组成框图

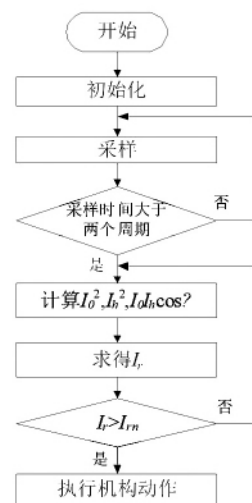


图7 漏电保护装置工作流程图

图7为保护装置工作流程图,步骤如下。

①对保护装置进行初始化设置,包括额定动作值 I_{rm} 、单次相乘周期数、滑动步长 H 等;②采集剩余

表 1 仿真结果及误差

样本	触电电流 I_r		触电前正常剩余电流 I_0		触电后总剩余电流 I_h		检测结果	误差 /%
	幅值 /mA	相位 /°	幅值 /mA	相位 /°	幅值 /mA	相位 /°	I_{rms} /mA	
1	109.98	-112.21			101.61	59.48	109.78	-0.1819
2	109.92	-125.15	11.84	111.05	121.29	-55.62	117.81	7.1779
3	109.97	5.4			107.84	-168.99	117.96	7.2656
4	43.97	-119.36			24.36	-1.16	43.75	-0.5003
5	43.92	122.83	38.99	96.57	80.69	-68.37	43.79	-0.2960
6	43.92	0.46			56.92	-135.19	43.81	-0.2505

表 2 对比结果

样本	I_0/mA	I_h/mA	I_r/mA	$\varphi/^\circ$	$\theta/^\circ$	$\varphi_D/^\circ$	所提方法		电流动作型		电流脉冲型		电流鉴相型	
							I_{rms}/mA	$e/\%$	I_1/mA	$e/\%$	I_2/mA	$e/\%$	I_3/mA	$e/\%$
7	20	31.3	12.3	29.2	11.1	149.2	12.3	0.0	<u>31.3</u>	154.5	11.3	-8.1	21.1	71.5
8	20	20.0	20.9	121.4	62.9	118.6	20.8	-0.5	20.0	-4.3	0.0	-100.0	20	-4.3
9	20	16.6	34.8	163.7	143.9	76.3	34.6	-0.6	<u>16.6*</u>	-52.3	3.4*	-90.2	8.2*	-76.4
10	100	113.7	24.5	61.7	10.9	178.3	24.5	0.0			13.7	-44.1	<u>48.9</u>	99.6
11	100	80.7	80.2	128.2	51.3	111.8	79.8	-0.5	无法投运		0.5*	-99.4	59.6	-25.7
12	100	73.2	137.9	149.1	104.5	90.9	137.4	-0.4			26.8*	-80.6	4.3*	-96.9

注: 额定动作值 30 mA; 带下划并加粗表示此时保护装置误动; 后跟* 号表示此时保护装置拒动; φ 为 I_r 与 I_0 间的夹角; φ_D 为 I_r 与标准电压间的夹角; I_1 、 I_2 、 I_3 分别为电流动作型、电流脉冲型、电流鉴相型方法检测到的触电电流有效值; e 为百分误差; 其他参数意义同前。

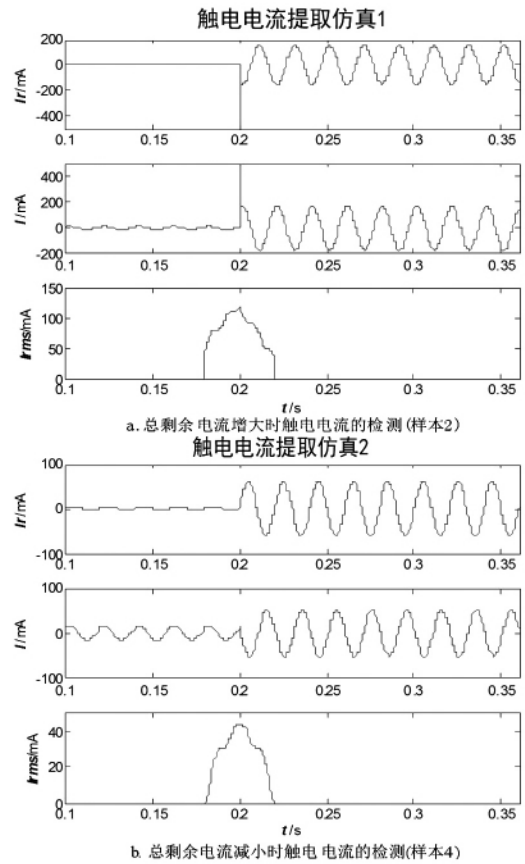


图 8 触电电流的检测

电流波形,通过 A/D 转换将所采集的波形转化成数字信号并送入缓存器暂时存储;③当采集到的数据长度大于 2 倍单相周期数时开始计算,若计算结果大于额定动作值,发保护动作信号;否则,进入步骤 4);④以相同计算窗口长度延后步长 H 继续计算。

4 仿真验证

4.1 检测精度

在通用 PSCAD/EMTDC 中进行低压电网人体触电仿真,得数据样本,然后在 Matlab 提取人体触电电流有效值。仿真中采用 IEC 60990 推荐模型^[14];采样频率为 5 kHz,即每周期采样 $N=100$ 点;前后相乘周期数取为 1;滑动步长 H 取 0.2 ms,即一个采样间隔。

图 8 给出了两个触电电流检测算例。图 8(a)、(b)中,第一图为触电电流 I_r ,第二图为剩余电流 I_h ,第三图为所提方法检测出的触电电流有效值 I_{rms} 变化波形。当有触电发生时, I_{rms} 开始上升,经一个前

后相乘周期数达到最大值(检测结果)。 I_r 越大 I_{rms} 上升越快,越早达到额定动作值,具有反时限特性。仿真结果如表1,表中以C相电压相位为参考相位。可见,无论自然剩余电流、触电电流、触电后总剩余电流三者之间相位关系如何,所提方法均能准确检测触电电流,相对误差不超过10%。样本2和3误差较大主要是由于该样本触电电流的尖峰较大,加入适当的滤波环节消除高频分量或增大前后相乘周期数平均电流尖峰的影响,可进一步减小误差。

4.2 与现有技术对比

假设某低压配电网中自然剩余电流为 I_0 ,如图9(a)。若A相人体触电,触电电流为 I_r , α 为 I_r 与触电相电压间的相角差,则此时总剩余电流 I_h 幅值增大,如图9(b)。如果发生B相或C相人体触电,此时 I_r 与 I_0 夹角较大,如果两者幅值又相差不大, I_h 很可能在幅值上变化不大甚至无变化,如图9(c);也可能 I_h 不仅不增大,反而减小,如图9(d)。这里针对这几种可能分别进行仿真,用所提方法和现有方法进行检测并比较。

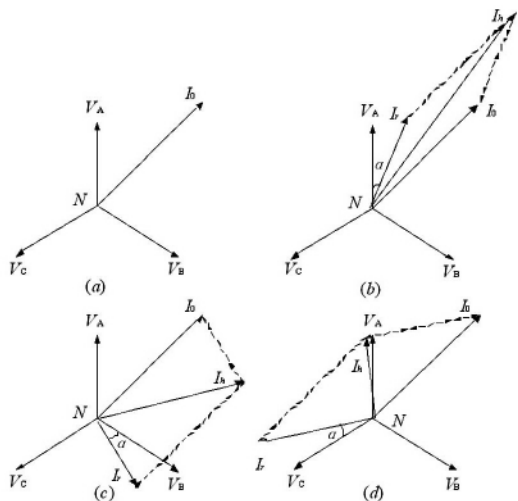


图9 I_0 、 I_r 、 I_h 可能分布情况向量图

仿真与比较结果如表2。可见,现有方法的误差较大,且均存在误动和(或)拒动现象。电流动作型,当 I_0 超过额定动作值时,无法投入运行;当 I_r 与 I_0 夹角较小时,即使 I_r 幅值未达到动作值, I_h 可能已经超过动作值,可能误动,如样本7;当 I_r 与 I_0 夹角较大时,即使 I_r 已经超过动作值, I_h 可能小于动作值,导致拒动,如样本9。脉冲动作型,当触电事故前后剩余电流幅值不变或变化不大时,检测失效;如果此时实际触电电流 I_r 超过动作值,可能拒动,如样本9和11。电流鉴相型,当 I_r 与标准电压的相

角差为 $\pm 90^\circ$ 左右时,即使 I_r 幅值很大,检测结果也很小,易拒动,如样本12;而当 I_r 与 I_0 夹角为 180° 左右时,易发生误动,如样本10。比较可见,所提方法检测精度高,误差小于1%,无论自然剩余电流大小、相位关系、总剩余电流幅值变化大小,均能准确检测出触电电流有效值,可避免拒动、误动,无保护死区,保护选择性和可靠性好。

5 结 论

1) 揭示了自然剩余电流与触/漏电故障电流间存在的相位关系是导致保护装置存在保护死区的重要原因之一。为此提出了基于触/漏电流分离方法进行保护的思想,具有先进性和可行性。

2) 提出的基于相角关系的触/漏电流分离技术和基于DSP的触/漏电流有效值提取方法,无论触/漏电流与自然剩余电流间的相角关系如何,也无论故障后总剩余电流幅值增大还是减小,所提方法均能准确检测出触/漏电流,消除了保护死区,可避免误动或拒动问题。

3) 仿真表明,所提方法对触/漏电故障电流的检测精度高,算法简单,可更好地满足实际漏电保护器要求。

结合工程应用的实际需要,利用所提方法开发新型漏电保护装置是下一步的研究内容。

参考文献

- [1] 夏越,杜松怀,李春兰,等.中国剩余电流保护技术与装置的发展趋势[J].农业工程学报,2010,26(S2):151-155.
- [2] Fabio Freschi. High-frequency Behavior of Residual Current Devices [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1629-1635.
- [3] Xiang Luo, Y. Du, X. H. Wang, et al. Tripping Characteristics of Residual Current Devices under Nonsinusoidal Currents [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1515-1521.
- [4] 杨东,张应龙,林丛,等.触/漏电保护器[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [5] 全国低压电器标准化技术委员会. GB 16916.1-2003/XG1-2010 家用和类似用途的不带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCCB)第1部分:一般规则[S].北京:中国标准出版社,2010.

(下转第72页)

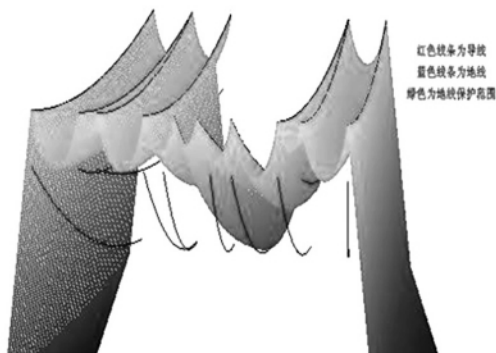


图 10 高低构架地线保护图

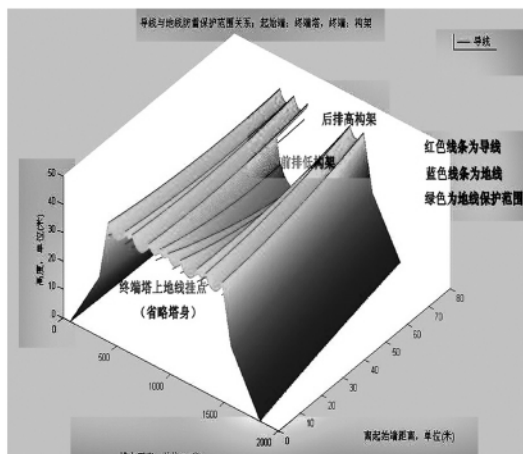


图 11 高低构架地线保护图

5 结 语

国网公司的变电站典型设计符合“资源节约型、环境友好型、工业化”的设计要求,具有良好的经济效益和社会效益。其高低构架出线的地线保护范围

与常规设计不同,传统计算方法复杂且误差较大。

公司在 Matlab 平台下利用其强大的数值计算能力,开发计算绘图软件,完成架空地线架设的理论计算,并能直观方便进行设计调整,满足防雷安全。

在公司设计的多个变电站高低构架出线配合中,使用该软件进行计算验证,取得了较好的效果。

参考文献

- [1] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程典型设计 [M]. 北京: 中国电力出版社 2005.
- [2] 肖继峰. 现代新型变电站—浅谈 500 kV 圣泉变电站的设计 [J]. 华中电力 2011, 1(24): 11-13.
- [3] DL/T 620-1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合 [S].
- [4] GB 50057-1994 建筑物防雷设计规范 [S].
- [5] 张志涌. 精通 MATLAB 6.5 版 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社 2003.
- [6] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册 (第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社 2003.
- [7] 孙宇新, 王纪俊. 基于 MATLAB 的避雷针保护范围的计算机辅助分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(6): 63-66.

作者简介:

张 磊 (1977), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为输变电;

任德顺 (1964), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为输变电;

刘成立 (1982), 男, 本科, 工程师, 研究方向为输变电。

(收稿日期: 2012-12-13)

(上接第 39 页)

- [6] 滕松林, 杨校生. 触电漏电保护器及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [7] 武一, 李奎, 岳大为, 等. 消除剩余电流保护动作死区的理论与方法 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 44-49.
- [8] 李奎, 陆俭国, 武一. 消除漏电电流保护死区的新技术及其试验方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(20): 28-32.
- [9] 李春兰, 杜松怀, 苏娟, 等. 一种新的基于小波变换和混沌理论的触电信号检测方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 47-52, 154.
- [10] 李春兰, 苏娟, 杜松怀, 等. 基于小波分析和 BP 神经网络的触电信号检测模型 [J]. 农业工程学报, 2010,

26(S2): 130-134.

- [11] 蔡志远, 庞佳, 陈廷辉. 基于剩余电流和漏电阻抗的漏电保护方法的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 61-64.
- [12] 李奎, 陆俭国, 武一, 等. 自适应漏电保护技术及其应用 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(10): 53-57.
- [13] 李开成, 刘建锋, 黄海煜, 等. 基于 MSP430 单片机的数字式漏电保护器的研制 [J]. 继电器, 2008, 36(8): 64-67.
- [14] IEC 60990-1999, Methods of Measurements of Touch Currents and Protective Conductor Current [S].

(收稿日期: 2012-12-19)

小波变换在暂态电能质量检测 and 识别中的应用

潘从茂 李凤婷

(新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 间歇性能源的接入电网,使电力系统的运行特性和电能质量受到影响,特别是暂态电能质量。重点研究了暂态电能质量扰动的小波检测方法,详细介绍了暂态电能扰动小波检测的基本原理和实现方法,并进行了仿真研究。理论分析和仿真结果表明该方法能够实现对电压暂态电能质量扰动快速、准确的检测,并能够根据能量函数识别出扰动类型。研究思路可为检测识别含间歇性能源接入系统的电能质量提供一种有效、可行的方法。

关键词: 暂态电能质量; 小波变换; 多分辨率分析; 能量函数

Abstract: With the intermittent energy connected to the grid, the operating characteristics of power system and the power quality are affected, especially the transient power quality. The focuses of the research are on the wavelet detection method of transient power quality disturbances, its basic principle and realization method are also introduced in detail, and the simulation is carried out. The theoretical analysis and the simulation results show that the proposed method can achieve a fast and accurate detection for transient power quality disturbances of voltage, and be able to identify the disturbance type according to the energy function. The research ideas can provide an effective and feasible method to detect and identify the power quality with the integration of intermittent energy.

Key words: transient power quality; wavelet transform; multiresolution analysis; energy function

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0040-03

究领域中成为了一种有力的工具^[5-6]。

0 引言

由于常规能源蕴藏量的日益减少和生产过程中产生的污染,使多种间歇性能源(风能、太阳能、潮汐能等)的发展得到了各国政府的大力支持。然而由于这些能源存在很大的波动性、间歇性和随机性以及变流装置的广泛使用,大规模的并网,会对电力系统带来很多电能质量的问题,尤其是暂态电能质量问题^[1-3]。

目前在电能质量分析领域中,傅里叶变换适用于分析平稳信号,而对多是非平稳的暂态电能质量扰动检测则无能为力。由于小波变换具有多分辨率分析的能力,可以对信号在不同尺度上进行分解,利用这一特性,小波变换能将采集到的含扰动的信号变换投影到不同的尺度上,提取出电力信号的各次谐波,根据各尺度上的小波系数,可以辨识出扰动发生时刻和扰动的类型,具有 Fourier 变换、STFT 所无法比拟的优点^[4],使小波变换在暂态电能质量的研

1 暂态电能质量小波检测的原理

1.1 小波变换

小波变换是一种分析信号时频特性的强有力的工具,其窗口大小可以根据信号的频率进行调整。小波变换的实质就是利用小波函数和小波变换系数来表达一个信号函数。设时域信号为 $f(t)$, $f(t) \in L^2(R)$ 的小波变换 WT(wavelet transformation) 定义为

$$f(x) = \sum a_{i,j} \psi_{i,j}(x) \quad (1)$$

其中 i, j 为整数,分别为伸缩因子、平移因子; $a_{i,j}$ 为离散小波变换系数; $\psi_{i,j}(x)$ 为小波函数。

离散小波变换系数可以通过式(2)得到

$$a_{i,j} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{i,j}(x) dx \quad (2)$$

小波函数的 $\psi_{i,j}(x)$ 可以通过小波母函数 $\psi(x)$ 经过平移和伸缩变换得到

$$\psi_{i,j}(x) = 2^{-i/2} \psi(2^{-i}x - j) \quad (3)$$

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2012211A002)

1.2 小波变换的 Mallat 算法

小波变换能够在工程上得到很大的应用,应该要归功于小波变换多分辨分析的诞生。Mallat 算法的基本思想可以归纳如下:假设已经算出函数或是信号 $f(t) \in L^2(R)$ 在分辨率 $2^{-j} (j \in Z)$ 下的离散逼近 $A_j f(t)$, 则 $f(t)$ 在分辨率 $2^{-(j+1)}$ 的离散逼近 $A_{j+1} f(t)$ 可以通过离散低通滤波器对 $A_j f(t)$ 得到^[7]。

设尺度函数为 $\varphi(t)$, 对应的小波函数为 $\psi(t)$, 由多分辨分析, 则有

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_k c_k^j \varphi_{j,k}(t) \\ &= \sum_k c_k^{j-1} \varphi_{j-1,k}(t) + \sum_k d_k^{j-1} \psi_{j-1,k}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

两边同时对 $\varphi_{j,k}(t)$ 做内积, 并利用 φ, ψ 及其二进伸缩和平移的正交特性, 可得到

$$\begin{aligned} c_k^j &= \sum_n c_n^{j-1} \langle \varphi_{j,k}(t), \varphi_{j-1,n}(t) \rangle + \sum_n d_n^{j-1} \langle \psi_{j-1,n}(t), \varphi_{j,k}(t) \rangle \\ &= \sum_n c_n^{j-1} h_{k-2n} + \sum_n d_n^{j-1} g_{k-2n} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\{h_k\}_{k \in Z}$ 是正交尺度函数的两尺度方程所对应的滤波器系数序列, 可被看做是低通滤波器; $\{g_k\}_{k \in Z}$ 可看做是高通滤波器。由此可以得到, 一维情况下离散小波变换的 Mallat 算法。其卷积表达式形式为

$$\begin{cases} c^{j-1} = D(c^j * \overline{h^*}) \\ d^{j-1} = D(c^j * \overline{g^*}) \\ c^j = (Uc^{j-1}) * h + (Ud^{j-1}) * g \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\overline{h^*}$ 为滤波器 h 的共轭反转; $c^j * \overline{h^*}$ 表示 c^j 与 $\overline{h^*}$ 的卷积; $D(c^j * \overline{h^*})$ 表示对卷积 $c^j * \overline{h^*}$ 的二元下取样; Uc^{j-1} 表示对序列 c^j 的二元上取样; U, D 为二元上、下取样算子。小波分解与重构的迭代过程如图 1 所示, 相应的二通道滤波组表示如图 2 所示。

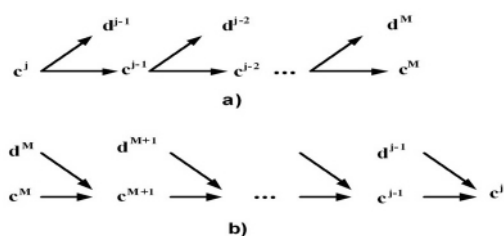


图 1 一维信号小波分解与重构的迭代过程示意图

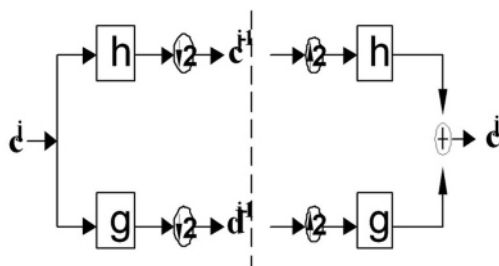


图 2 一维信号小波分解与重构的二通道滤波器组表示

2 基于小波变换暂态电能质量的检测和识别过程

暂态电能质量小波分析检测方法, 具体的步骤如图 3 所示。

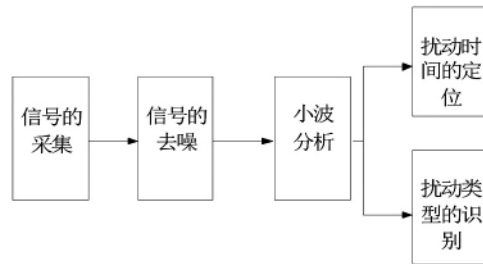


图 3 暂态电能质量小波分析过程

1) 信号的消噪

对信号去噪实质上就是抑制信号中无用的部分, 增强信号有用部分的过程。一维信号去噪过程可分为以下的 3 个过程。

步骤 1: 一维信号的小波分解。选择一个小波并确定分解的层次, 然后进行分解计算。

步骤 2: 小波分解高频系数的阈值量化。对各个分解尺度下的高频系数选择一个合适的阈值进行软阈值量化处理。

步骤 3: 一维小波重构。根据小波分解的最低层低频系数和各层高频系数进行一维重构。

这 3 个步骤中, 最关键的是如何选一个合适的阈值以及进行阈值量化。在某种程度上, 它影响到信号去噪的质量。

2) 扰动的时间定位

小波变换具有良好的局部化特征, 这使得小波变换在暂态电能质量的检测中有良好的理论基础。电压暂态变化的信号处除了扰动发生点和终止点各段时间信号都是连续的。因此, 在小波的高频尺度上, 只有在突变点才有信息。利用这一特性可以容易地识别出扰动的发生时间和终止时间。

3) 扰动类型的判断

通过对获得的暂态电能质量扰动信号进行小波变换多分辨分析, 得到的各个尺度的小波系数具有该扰动信号的有效特征, 因此对这些系数进行某种操作, 可以识别出该扰动。可以通过能量函数来表达扰动信号的每一种特征量^[8-10]。

假设对获得电能质量扰动信号进行 J 层分解, 得到的小波变换的细节系数和逼近系数分别为 d_j

(n) 和 a_j 其中 $j=1, 2, \dots, J$, n 为采样点数。小波变换的能量分布如下。

$$\begin{aligned} Ed_j &= \sum_n (d_j(n))^2 \\ Da_j &= \sum_n (a_j(n))^2 \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $j=1, 2, \dots, J$ 。这样经过 J 层小波分解,可以得到 $J+1$ 个特征量,将各特征量构成一个向量,有

$$E_{sig} = [E_{d1}, E_{d2}, \dots, E_{dJ}, E_{aJ}] \quad (8)$$

由于在计算的时候都取的是正值,所以,各种扰动的能量函数差距不是很大。取一个参考信号,该参考信号就是与获取的电能质量扰动信号同步且长度一致的理想信号,对该参考信号进行上述能量函数的计算。

$$E_{ref} = [E_{nd1}, E_{nd2}, \dots, E_{ndJ}, E_{naJ}] \quad (9)$$

然后将采集信号的能量的函数做差

$$\Delta E = E_{sig} - E_{ref} = [\Delta E_{d1}, \dots, \Delta E_{dJ}, \Delta E_{aJ}] \quad (10)$$

ΔE 可以反映出各种暂态扰动的特性,可以识别出各种扰动。

3 算例仿真及其结果分析

为了验证:小波变换在暂态电能质量检测 and 识别中的应用,所采用的仿真软件为 Matlab,信号源采用文献[4]中所提供的几种信号,获得能量函数时采用 db4 小波对信号进行 12 层分解和重构,采用基波频率为 50 Hz,每一个周期采样 128 个点,一共取 1 200 个采样点。

3.1 扰动时刻定位的仿真

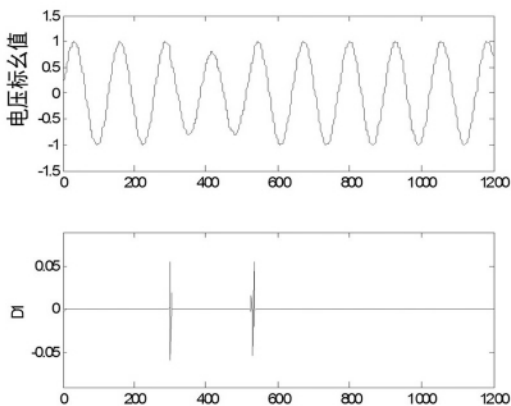


图4 电压暂降情况下扰动时刻定位

其中 $D1$ 是小波重构后最高频率小波的系数,数值大小反映了在该时刻高频含量的大小。从图4~7中 $D1$ 的仿真图形可以看出,小波检测方法可以

准确检测出各种暂态信号扰动的发生时刻。

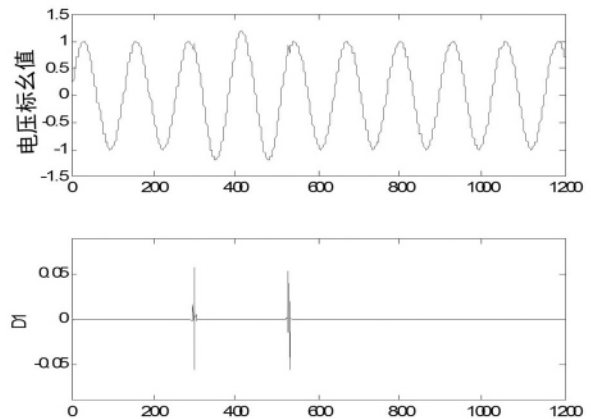


图5 电压暂升情况下扰动时刻定位

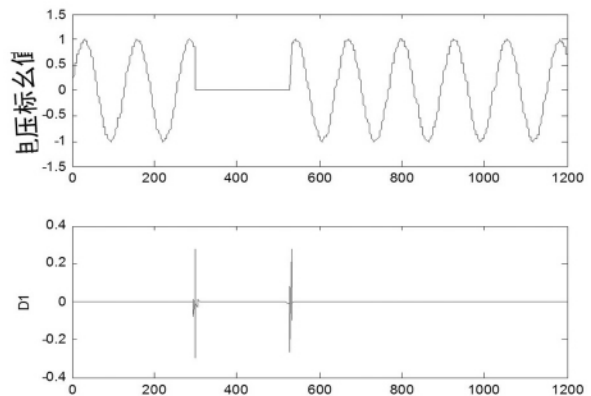


图6 电压中断情况下扰动时刻定位

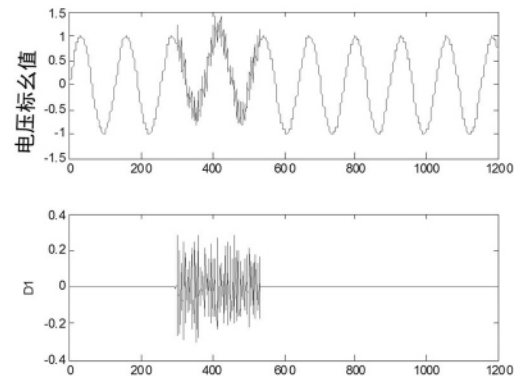


图7 电压畸变情况下扰动时刻定位

3.2 扰动类型识别的仿真

在信号扰动的辨识领域中,很多文献采用式(8)中的能量函数 E 来分辨扰动的类型,能量函数 E 仿真结果见图8。

从图8的仿真结果可以看出,各种扰动信号能量函数 E 的形状是相似的,区别只是数值大小不一样。由于在计算的时候取的都是正值,所以导致它们的特征差异很小,造成扰动分类困难。

在信号扰动分类上,采用能量差函数式(10)。仿真结果见图9。

(下转第83页)

收塔密度高造成脱硫超标排放 6 次,脱硫被迫停运 5 次,吸收塔密度最高达到 $1\,350\text{ kg/m}^3$ 。通过一系列的改进、控制措施后,未发生因吸收塔密度高原因停运脱硫系统的情况,吸收塔浆液密度控制在 $1\,200\text{ kg/m}^3$ 以下,脱硫系统投运率由之前的 82.5% 提高至 98.48%,取得良好的效果。虽然通过改进控制

措施达到了预期的效果,但目前仍存在废水系统旋流子堵塞频繁、脱水机滤布冲洗水质差、双机运行脱水机无备用等影响脱硫系统正常运行的因素,有待今后做进一步改进,以确保脱硫系统安全稳定运行和达标排放。

(收稿日期:2012-12-22)

(上接第 42 页)

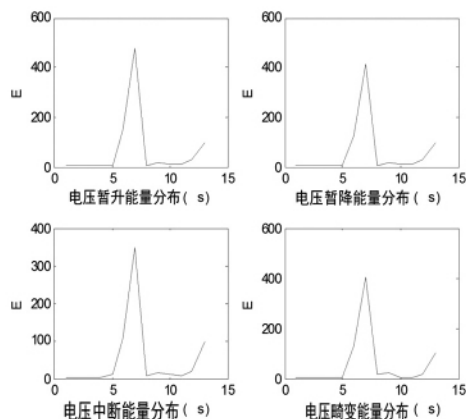


图 8 暂态电能扰动信号能量 E 分布

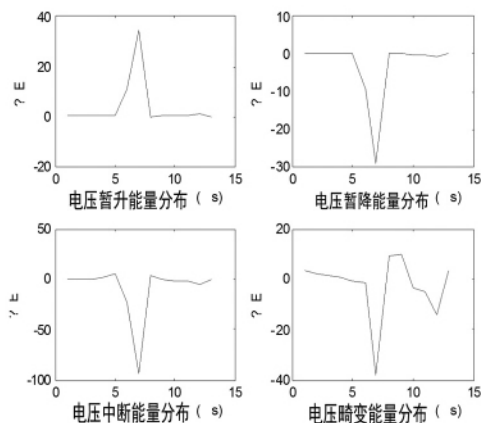


图 9 暂态扰动信号能量差分布

从图中可以明显看出,在暂态电能质量扰动辨识中采用能量差 ΔE 函数,可以明显地识别出各种暂态扰动。通过图 8 和图 9 的仿真结果对比,可以看出,在扰动识别分类中,采用能量差函数 ΔE 可以快速有效地分辨出暂态扰动的类型。

4 结 语

分析了间歇性电源接入系统后,容易引起的几种暂态电能质量问题,重点研究了基于小波变换的暂态电能质量分析。首先详细介绍了暂态电能质量扰动小波检测的基本原理,然后给出能够识别暂态扰动的能量函数,并给出仿真算例验证理论的正确

性。理论分析和仿真结果表明,该方法在暂态电能质量扰动的分析上具有很好效果,能够实现对暂态电能质量扰动快速、准确的检测,为研究间歇性电源接入系统暂态电能质量扰动问题提供了有效、可行的检测方法。

参考文献

- [1] 李渝,范高峰,李庆,等.达坂城风电接入系统对新疆电网电能质量的影响[J].电网技术,2007,31(6):88-92.
- [2] 迟永宁,刘燕华,工伟胜,等.风电接入对电力系统的影响[J].电网技术,2007(3):77-81.
- [3] 席晶,李海燕,孔庆东.风电场投切对地区电网电压的影响[J].电网技术,2008(10):58-62.
- [4] HE Haibo, STARZYK J A. A Self-organizing Learning Array System for Power Quality Classification Based on Wavelet Transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1):286-295.
- [5] 赵凤展,杨仁刚.基于时域、小波变换和 FFT 的电能质量扰动识别[J].继电器,2006,34(8):50-55.
- [6] 储珺,马建伟.基于小波变换的电能质量扰动信号的检测[J].电力系统保护与控制,2009,37(5):34-37.
- [7] 刘桂英,栗时平.风电接入系统暂态电能质量扰动小波检测方法[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(1):22-27.
- [8] 秦英林,田立军,常学飞.基于小波变换能量分布和神经网络的电能质量扰动分类[J].电力自动化设备,2009,29(7):64-66.
- [9] 周龙华,付青,余世杰,等.基于小波变换的谐波检测技术[J].电力系统及其自动化学报,2010,22(1):80-85.
- [10] 林涛,樊正伟.利用小波变换及人工神经网络识别电能扰动[J].高电压技术,2007,33(7):151-153.

作者简介:

潘从茂(1987),男,硕士研究生,研究方向为洁净能源发电及其并网技术;

李凤婷(1965),女,教授,工学博士,硕士生导师,研究方向为风电并网技术与电力系统继电保护。

(收稿日期:2012-12-15)

成都电网自动电压控制系统的建设与运行

刘 建¹ 胡启元¹ 林瑞星² 蒲 维²

(1. 成都电业局 四川 成都 610017; 2. 四川电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘 要: 地区电网的自动电压控制(AVC)系统是现代电网无功电压控制的重要手段。介绍了成都电网 AVC 系统的建设、运行现状,重点阐述了成都电网 AVC 系统的功能、控制策略和控制流程。最后,结合目前成都电网 AVC 系统的运行情况给出了 AVC 系统的发展建议。

关键词: 自动电压控制; 电压无功; 控制流程; 控制策略

Abstract: Automatic voltage control (AVC) of regional power grid is an important means for reactive power and voltage control of modern power grid. The construction and operation of AVC system in Chengdu Power Grid are introduced, and the focuses are on the functions, control strategies and control flow of AVC system in Chengdu Power Grid. At last, combined with the actual operation of AVC system in Chengdu Power Grid, the suggestions for its development are given.

Key words: automatic voltage control; voltage and reactive power; control flow; control strategy

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0043-05

0 引 言

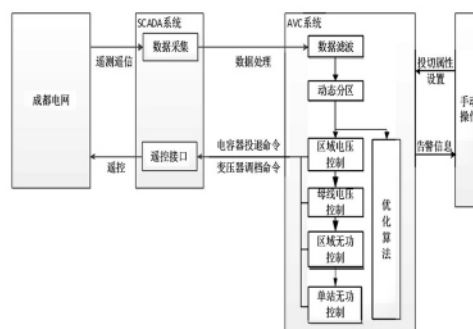
自动电压控制 AVC 系统对全网无功电压状态进行集中监视和分析计算,从全局的角度对广域分散的电网无功装置进行协调优化控制,是保持系统电压稳定、提升电网电压品质和整个系统经济运行水平、提高无功电压管理水平的重要技术手段^[1,2]。近年来,基于地区电网的自动电压控制 AVC 系统已在全国各地的供电公司投入运行^[3,4]。大部分地区电网的 AVC 系统都采用与调度自动化平台一体化设计模式,通过调度的监控与数据采集系统 SCADA 采集各节点遥测、遥信实时数据,然后进行在线分析和计算,对电网内各变电所的有载调压装置和无功补偿设备进行集中监视、统一管理和在线控制,实现全网无功电压优化控制闭环运行。

成都电网共有 500 kV 变电站 5 座,变电容量 9 750 MVA。220 kV 变电站 40 座,变电容量 140 0.60 MVA。110 kV 变电站 169 座,变电容量 150 8.90 MVA。成都电业局设置了 1 个地调和 14 个县调。成都电业局于 2009 年对地调调度自动化系统进行了扩建改造,基于南瑞 OPEN-3000 调度自动化系统平台一体化设计建设并完善了 AVC 系统功能。将对成都电网的 AVC 系统的建设和运行情况进行介绍。

1 地调 AVC 系统功能特点

成都电网属于地区电网,其 AVC 系统包括:地调 AVC 系统、县调 AVC 系统。地调 AVC 系统可实时接收省调对 220 kV 变电站高压侧关口功率因数命令,驱动地区电网无功控制满足省网的要求。成都电网地调 AVC 主站系统数据和控制流程图如图 1 所示。

成都电网地调 AVC 主站系统功能主要包含以下几点:①动态分区;②电压合格;③关口力率合格;④事故报警和安全闭锁;⑤统计和评估;⑥上下级 AVC 主站系统协调。



1 成都电网地调 AVC 主站系统数据和控制流程

1.1 动态分区

AVC 系统的动态分区是根据无功平衡的局域

性和分散性,AVC对地区电网电压无功分层分区控制,使自动控制在空间上解耦。在AVC系统计算时无功优化是以区域进行划分的,其中区域是动态指定,最小为一个厂站,最大为整个电网。区域划分可以嵌套也可以和空间中的地理分区不一样,尽量满足在小区域范围内无功平衡。如果该区域无功不能就地平衡,则把和该区域电气耦合度最高的相邻厂站包括进来,在这个扩大的区域内就地平衡,以此实现最小范围内的无功平衡。在AVC系统数据库中定义了厂站、母线电压监测点、控制设备等记录。运行时AVC根据SCADA遥信信息,实时跟踪电网运行方式的变化,以220 kV枢纽变电站为中心,将全网分成彼此间无功电压电气耦合度小的区域电网。

1.2 电压合格

成都电网地调AVC系统能实时矫正母线电压,当母线电压接近和越限时,可根据实时灵敏度分析,采用区域电压控制和电压校正控制方法,控制主变压器分接头调整或启动厂站内无功设备调节消除电压越限,使系统各节点电压合格,提高系统节点电压合格率。

1.3 关口力率合格

成都电网地调AVC系统可在电压都合格的情况下对系统各关口力率进行实时计算,启动厂站内或所属区域变电站的无功设备调节,使系统各关口力率合格,降低系统网损。

1.4 事故报警和安全闭锁

成都电网地调AVC系统设置了诸多情况下的告警功能。如,通过设置关联SCADA保护信号,AVC可检测到设备的保护动作并自动闭锁对该设备的控制,同时发告警信号;如果对某个设备的控制连续两次均无响应,则闭锁对该设备的控制,并发出设备拒动的告警信号;在220 kV主网电压过低的情况下,系统自动闭锁上调220 kV主变压器分接开关,防止造成主网电压崩溃;出现主变压器滑档情况时,系统自动闭锁对主变压器分接头的控制,并发滑档告警;系统自动计算电容器和主变压器分接头的动作次数,当达到该时段动作次数限值后,启动闭锁该设备,并发设备动作次数越限的告警信号;在AVC没有下发指令时,如果检测到有电容器开关遥信变位或主变压器档位调整的情况,则判为手工操作,AVC闭锁对该设备的控制,并发手工操作的告警信号。此外,AVC系统还设置了自动解锁和人工

解锁功能,自动解锁是当检测到触发某类告警或保护闭锁的信号复归时,将自动解除对相关设备的闭锁;对于某些告警信号,还可设置为在告警信号复归后,延时一段时间解锁。人工解锁是通过人工确认方式解除闭锁的功能。

1.5 统计和评估

地调AVC系统和调度自动化系统一体化平台设计,可共享EMS平台支撑软件,具备丰富完善的历史报表功能,实现了记录历史控制命令及控制前后电压无功相关信息,并提供方便的查询手段,可分类、分时段统计和查询系统、厂站、设备动作次数、正确动作次数、拒动次数。比如,AVC系统可结合EMS提供的报表工具和统计计算,可逐日统计各变电所10 kV母线电压合格率并存储到EMS历史库,在月末统计当月合格率并存储到EMS历史库,提供按日、月查询功能和界面;可将每次计算的全网网损的情况列表分析统计,使调节控制的网损与计算值分别对应,清晰表述计算值和实际调节值以及差值。针对AVC系统的调节情况对其进行评价。

1.6 上下级AVC主站系统协调

成都电网地调AVC主站具备本地和远方两种控制模式。在本地模式下,地调AVC系统按当地功率因数考核指标运行。在远方模式下,地调AVC系统接收省调各关口实时功率因数限值,即为220 kV主变压器高压侧无功指令限值,驱动地区电网控制满足省网要求。省调实时在线下发给地调各关口功率因数目标值,地调AVC系统在远方模式下以此为目标,给出电容/电抗器投切,主变压器分接头调整等协调控制策略。地调能够对省调AVC系统下发数据进行校核;地调能够统计每个区域内可控电容器投/切电容器容量和可接受的电压上下调节范围,并将此数据通过SCADA上传省调。

2 AVC系统的控制方式和运行模式

成都电网地调AVC主站系统对控制对象的控制方式分为“开环”、“闭环”、“监视”。其中“开环”是表示AVC系统对被控对象进行分析计算,提示操作人员操作;“闭环”是指AVC系统对被控对象进行分析计算并对其直接进行发命令控制。“监视”表示AVC系统只对被控对象进行分析计算,不对其进行直接发命令控制。AVC系统运行模式分为“本

地”和“远方”两种,“本地”是指以本地设定的目标进行优化计算,“远方”是指以接收到的省调下发约束与目标值进行优化计算,在省地通讯中断时,AVC系统能自动切换至“本地”模式。

3 AVC系统的控制算法

地调AVC系统的实现算法有“默认算法”、“控制算法”和“优化算法”3种。

成都电网地调AVC系统的“控制算法”主要结合成都电网网络结构基本上呈辐射型树状分布的特点,以一个辐射网络作为一个控制区域,把整个电网划分成若干在空间上彼此解耦的控制区域。

3.1 全网电压优化调节

AVC根据电网电压无功分布空间分布状态自动选择控制模式并使各种控制模式自适应协调配合,实现全网优化电压调节。

3.1.1 区域电压控制

区域群体电压水平受区域枢纽厂站无功设备控制影响,是区域整体无功平衡的结果。结合实时灵敏度分析和自适应区域嵌套划分确定区域枢纽厂站。当区域内无功分布合理,但区域内电压普遍偏高(低)时,调节枢纽厂站无功设备,以尽可能少的控制设备调节次数,使最大范围内电压合格或提高群体电压水平,同时避免区域内多主变压器同时调节所引起的振荡,实现区域电压控制的优化。

3.1.2 电压校正控制

由实时灵敏度分析可知,就地无功设备控制能够最快、最有效校正当地电压,消除电压越限。当某厂站电压越限时,启动该厂站内无功设备调节。该厂站内变压器和电容器按九区图基本规则分时段协调配合,实现电压无功综合优化:电压偏低时,优先投入电容器然后上调有载主变压器分头;电压偏高时,首先降低有载主变压器分头,如达不到要求,再切除电容器。

3.1.3 电压控制协调

根据电网电压无功空间分布状态自动选择控制模式,控制模式优先顺序为“区域电压控制”>“电压校正控制”。区域电压偏低(高)时采用“区域电压控制”,仅个别厂站母线越限时采用“电压校正控制”,自适应给出合理的全网电压优化调节措施。

3.2 区域无功控制

AVC控制仅仅使电网无功在关口满足功率因数要求、达到平衡是远远不够的。为实现全网无功优化控制,必须在尽可能小区域范围内使无功就地平衡。当电网电压合格并处于较高运行水平后,按无功分层分区甚至就地平衡的优化原则检查线路无功传输是否合理,通过实时潮流灵敏度分析计算决定投切无功补偿装置、尽量减少线路上无功流动、降低线损并调节有关电压目标值,使各电压等级网络之间无功分层平衡、提高受电功率因数,在各电压等级网络内部无功在尽量小的区域范围内就地平衡,减少线路无功传输、降低网损。

区域无功不足(欠补)时,根据实时灵敏度分析从补偿降损效益最佳厂站开始寻找可投入无功设备,具体而言即不但可以决定同电压等级厂站电容器谁优先投入,而且可以决定同一厂站电容器组谁优先投入;区域无功过补(富余),使区域无功倒流时,如果该区域不允许无功倒流,根据实时潮流灵敏度分析,从该区域校正无功越限最灵敏厂站开始寻找可切除无功设备,消除无功越限。

同一厂站无功设备循环投切,均匀分配动作次数。电容器等无功补偿装置的无功出力是非连续变化的,由于无功负荷变化及电容器容量配置等原因,实际运行中无功不可能完全满足就地或分层分区平衡,在保证区域关口无功不倒流的前提下,区域内电网各厂站之间无功可以倒送,使无功在尽可能小区域内平衡,优化网损。投入或切除无功设备可能使电压越限时,考虑控制组合动作,如投入电容器时预先调整主变压器分头,使控制后电压仍然在合格范围内,但减少了线路无功传输。

3.3 关口功率控制

AVC保证地区电网关口功率因数合格,按分时段功率因数考核标准进行控制,功率因数考核标准可根据要求自行设置。参考标准:0~7时、11~13时和22~24时低谷负荷功率因数控制在0.9和0.95之间,7~11时和13~22时高峰负荷功率因数控制在0.95以上。严格控制不向关口倒送无功。

3.4 自动协调控制

3.4.1 空间协调

AVC根据电网电压无功空间分布状态自动选择控制模式,优先顺序是“区域电压控制”>“电压校正控制”>“区域无功控制”。

3.4.2 时间协调

AVC 设计混杂控制结构,使闭环控制随时间跟踪电压无功状态自动协调有序进行。例如,若 AVC 检测到电压越限,则形成离散事件并驱动控制,从而形成控制指令交给遥控接口执行,遥控命令作用于连续运行的电网,电网执行命令形成新的稳态潮流分布后可消除越限。此时全网电压合格,启动区域无功控制,无功设备调节采用序列投切,即每周期内只允许一次投切动作,保证离散控制指令作用于电网后,电网有时间来形成新的稳态分布潮流。在下一周期,AVC 根据新的潮流状态自动判断选择控制模式,从而逐步逼近优化运行状态并且能够避免控制过调。

3.5 优化动作次数

每天调压设备(主变压器分级开关和电容器开关)动作次数是有限制的,根据历史负荷曲线优化分配各时段动作次数,并且考虑负荷动态特性,在负荷上坡段、下坡段采取动态控制策略,使 AVC 控制具有一定预见性,尽量减少设备动作次数。

4 AVC 系统的优化算法

地调 AVC 系统的实现算法有“优化算法”,是采用无功优化的方法进行计算,核心算法为枚举法,即将系统中可调控的无功补偿设备和变压器分接头档位调节变量按照枚举法的方式进行逐一模拟,对最优策略进行预设,实现最终无功电压控制。

5 AVC 系统的算法实现流程

AVC 系统可根据电网电压无功空间分布状态手动选择算法模式,“默认算法”模式是系统优先采用“优化算法”进行计算,在潮流计算不收敛或计算结果不合格时,自动切换至“控制算法”进行计算。“控制算法”模式的控制策略设置的优先顺序是“区域电压控制”>“电压校正控制”>“区域无功控制”。例如区域电压偏低时采用“区域电压控制”,快速提高群体电压水平;越限状态下采用“电压校正控制”,保证节点电压合格;全网电压合格时则考虑经济运行,采用“区域无功控制”。AVC 系统算法的实现流程如下图 2 所示。

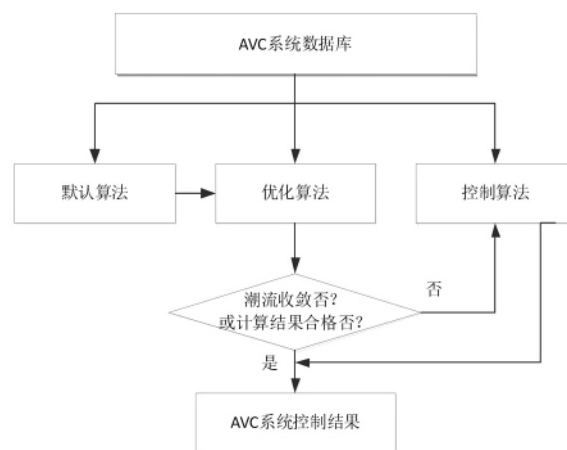


图 2 地调 AVC 系统的算法实现流程

6 AVC 系统运行效益分析

目前,成都地调 AVC 系统运行情况良好。此前,电压调整主要依靠人工调节和基于变电站的电压无功控制装置 VQC。人工调压费时费力,VQC 只能保证单个变电站的无功平衡及电压稳定,投切动作频繁,产生的波动对电网影响大。而 AVC 系统优化动作次数、减少电网波动、延长电气设备使用寿命的功效。AVC 的区域控制在相当程度上减少线路上的无功传输,有效降低网损,成都电网应用的 AVC 系统定能带来可观的经济效益。表 1 列出了 2012 年成都地调 AVC 系统变压器档位和电容器的动作次数(截止到 11 月)。

表 1 2012 年成都地调 AVC 系统变压器档位和电容器的动作次数(截止到 11 月)

月 份	变压器档位	电容器
1	12 579	9 334
2	13 644	12 418
3	20 024	9 684
4	17 841	10 650
5	18 319	9 870
6	17 467	9 359
7	27 435	10 907
8	25 167	11 840
9	27 841	8 244
10	21 104	7 016
11	22 308	10 867

由表 1 可见,为满足电压合格及无功要求,降低

电网损耗,变压器档位和电容器的调节量较大,AVC系统省时省力省资源的优势明显。

目前成都电网AVC系统已与省调AVC主站系统的通讯、控制策略和优化模式联调成功。省调主站实时下发220 kV变电站母线电压参考值和关口力率,地调AVC主站系统接收后,作为优化计算的约束条件,进而得到优化控制策略,最后根据优化控制策略结果调控220 kV变电站。

7 结 语

对成都电网自动电压控制AVC系统的建设、实现和运行情况进行了介绍。成都电网AVC系统将完善地调AVC系统和县调AVC系统的协调控制。自从成都电网区域闭环控制稳定后,全网在电能质量、功率因素都有全面提高,增加了无功补偿设备的利用率,实现无功功率分层就地平衡,对降低系统网损,减小运行人员工作强度起到重要作用。今后可以进一步优化地调AVC系统,完善省、地、县调AVC系统的联合协调闭环控制,使无功电压控制方式更趋合理高效。

参考文献

- [1] 余涛,周斌. 电力系统无功/电压控制策略研究综述[J]. 继电器, 2008, 36(6): 79-83.
- [2] 郭庆来,吴越,等. 地区电网无功优化实时控制系统的研究与开发[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(13): 67-69.
- [3] 李端超,陈实,等. 安徽电网自动电压控制(AVC)系统设计及实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 20-22.
- [4] 郭庆来,孙宏斌,张伯明,等. 江苏电网AVC主站系统的研究和实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 83-87.
- [5] 唐寅生,李碧君. 电力系统OPF全网最优无功的经济压差算法及应用[J]. 中国电力, 2000, 33(9): 42-44.

作者简介:

刘建(1984),男,助理工程师,主要从事电力调控运行工作;

胡启元(1972),男,工程师,主要从事电力调控运行及相关研究工作。

(收稿日期:2012-12-03)

(上接第10页)

参考文献

- [1] 宋文南. 电力系统谐波分析[M]. 天津: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 孙成宝,李广泽. 配电网实用技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [3] 吴兑昌,孙树勤,宋文南,等. 电力系统谐波[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [4] 李冰,淳森林. 现场测试报告[R]. 成都胜业电器设备有限公司, 2009.
- [5] 于永源,杨绮雯. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [6] 姚为正. 三相串联型电力滤波控制方式及其补偿特征的研究[M]. 西安: 交通大学, 1999.
- [7] 周训伟. 串联有源电力滤波器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [8] 苏文成. 无功功率补偿与电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [9] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [10] T. J. E 米勒主编. 电力系统无功功率控制[M]. 北京:

水利电力出版社, 1990.

- [11] 航空工业部第四规划设计研究等编. 工厂配电设计手册[S]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [12] 汪穗峰,张勇军,任倩,等. 配电网可靠性定量分析综述[J]. 继电器, 2008, 36(3): 79-83.
- [13] 刘进军,卓放. 电容滤波型整流电路网侧谐波分析[J]. 电力电子技术, 1995(4): 14-19.
- [14] GB/T 14549-93, 电能质量 公用电网谐波[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [15] 王汝文,张杭. 电力电子技术应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [16] Dobinson A D. Closer Accord on Harmonics[J]. IEEE Electron Power, 1997(5): 567.
- [17] Sakui M, Fujita H, Shioya M. A Method for Calculating Harmonic Currents of Three-Phase Bridge Uncontrolled Rectifier with DC Filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1989, 36(3): 434-440.

作者简介:

田园(1979),男,工程师,主要从事电力系统规划、设计和施工。

(收稿日期:2013-02-04)

配网自动化条件下的 FTU 优化配置

徐 飞

(广东省电力设计研究院, 广东 广州 510663)

摘 要: 目前, 配电网一次网架的优化开关配置研究较多, 提出了很多的算法来进行一次开关的优化配置。然而, 很少从建设配电网自动化之后, 在远程遥控这个层面对配电网的可靠性和经济性进行研究。重点分析了一次网架、可靠性和经济性三个方面对配电网自动化规划中终端配置方案的影响; 考虑配电网自动化的建设给配电网的可靠性和经济性带来的影响, 在可靠性和经济性双重约束条件下优化终端的配置, 使在可靠性满足要求的基础上, 经济上达到最优; 建立数学模型, 并将数学模型代入一个实际网络中, 进行了详细计算, 证明了该模型的实用性。

关键词: 配电网; 配电网自动化规划; 可靠性; 经济性; 优化模型

Abstract: There are already many researches of switch configuration optimization in distribution network and also lots of algorithms which could optimize the allocation, but there is almost no research in the reliability and economy as viewed from the remote control after establishing the distribution automation. The influences of the network construction, the reliability and the economy on the terminal configuration program in distribution automation planning are analyzed. Considering the impact of distribution automation construction on the reliability and economy of distribution network, the terminal configuration is optimized under the constraints of reliability and economy, which could achieve the optimal economy when the reliability meets the requirements. The mathematical models are established and put into an actual distribution network, then a detailed calculation is carried out which proves the practicability of the proposed model.

Key words: distribution network; distribution automation planning; reliability; economy; optimization model

中图分类号: TM769 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0048-06

国内逐步形成电力市场, 要求越来越高的电能质量、经济性和供电可靠性来满足用户需要; 这就使得电力运营商一定要考虑在满足系统运行安全性的前提下, 提高系统运行的经济性。配电网位于电力系统的末尾, 与电力用户直接相连, 因此配电网的经济、安全运行被提高到一个非常重要的层面^[1]。

目前, 配电网一次网架的优化开关配置研究较多, 提出了很多的算法来进行一次开关的优化配置^[2~7]。配电网开关优化就是制定出配电线路上各种开关的最优位置 and 对应的开关数量, 达到提高电网可靠性和降低电量损失的目的, 使得网架经济、安全运行^[8]。然而, 很少从建设配电网自动化之后, 在远程遥控这个层面对配电网的可靠性和经济性进行研究。

文献[1]提出了综合费用的目标函数, 并且在一定的供电可靠性的约束条件下建立数学模型; 文献[8]运用了等年值法建立了配置开关的模型, 考虑了开关投资费用、运行维修费用和停电损失对开

关配置的影响, 在此基础上利用了免疫算法来求解。文献[12]在馈线自动化的基础上, 提出了一种规划模型, 同样采用遗传算法来求解; 文献[16]把含有复杂分支线的配电网简化成为等效的配电网, 并在此基础上进行了可靠性的计算, 建立了环网开关优化配置模型; 文献[19]针对中国农村电网和城市电网提出了一种多目标混合数学模型; 文献[20]考虑到了利用投资来修改辖区指数区间, 从而计算需要新建多少分段开关, 在此基础上将供缺电量当作评价指标; 文献[21]给出了双层优化配置方案, 确定最优分段开关数量和最恰当的安装位置。这几篇文献主要从配置方案的模型入手, 提出比较多的优化模型, 完善开关配置的约束条件。

在原有模型的基础上, 以下几篇文献主要针对算法进行的改进。文献[15]提出了一种改进遗传算法在配电网开关优化配置中的应用, 并且具体分析了改进措施; 文献[14]主要对优化模型的算法进行改进, 提出了动态规划算法; 文献[17]提出了运

用灾变遗传算法来求解优化模型;文献[20]提出用枚举法进行计算开关的优化配置;文献[21]提出了两层优化方法,外层采用二分法,内层利用缺供电量来进行评价。

以上都是对一次开关优化配置的研究,没有针对目前大量建设的配电网自动化后的配电网的终端进行的优化分析,而文献[18]考虑到了在配电网自动化条件下,不同网络结构和不同的开关类型,可靠性和经济性等的差别,但是没有详细分析不同典型接线的具体数据。

1 可靠性分析

在配电网自动化改造的初期,重点针对配电网中典型接线方式进行配套自动化改造,然而不同的接线模式,其平均倒闸操作时间、平均故障定位时间和平均转供电时间等参数不同,对可靠性的影响也不同。

(1) 单电源辐射接线模式。该接线模式,在一个负荷点发生故障时,故障点及其后的负荷点均被切断,供电可靠性较低,配电网自动化建设主要影响平均倒闸操作时间 T_1 和平均故障定位时间 T_2 。

(2) 多电源的联络接线方式,包括手拉手接线、“3-1”接线方式和多分段多联络接线方式等,在对这些接线模式进行可靠性评估时,需要考虑负荷转移的情况,以准确判断出每次故障或检修时受停电影响的户数。这种接线方式下,配电网自动化的建设影响平均倒闸操作时间 T_1 、平均故障定位时间 T_2 和平均转供电时间 T_3 。

除去平均倒闸操作时间 T_1 、平均故障定位时间 T_2 和平均转供电时间 T_3 ,造成系统停电的还有其它因素,比如计划停电、拉闸限电、系统维护检修和故障修复时间等,这里将这些时间总和记为 T_Δ 。

系统平均停电持续时间指标 SAIDI(小时/户·年),记作 γ_{SAIDI} ;平均供电可靠率指标 RS(%),记作 γ_{RS} ;

综上所述,配电网自动化建设后,在整个网络的供电可靠性计算公式如下。

$$\gamma_{SAIDI} = \frac{\sum_{i=1}^m [\sum_{j=1}^{N_i} (T_{ij} \cdot \lambda_{ij} / N_i)]}{\sum_{i=1}^m N_i} \quad (1)$$

$$\gamma_{RS} = (1 - \gamma_{SAIDI} / 8760) \times 100\% \quad (2)$$

式中, N_i 为馈线 i 的负荷点数量; T_{ij} 为馈线 i 上因负荷点 j 故障导致的停电时间; λ_{ij} 为 i 馈线上负荷点 j 的故障(次/年);

以手拉手接线方式(如图1所示)说明,馈线 i 上因负荷点 j 故障导致的停电时间 T_{ij} 的推导过程。

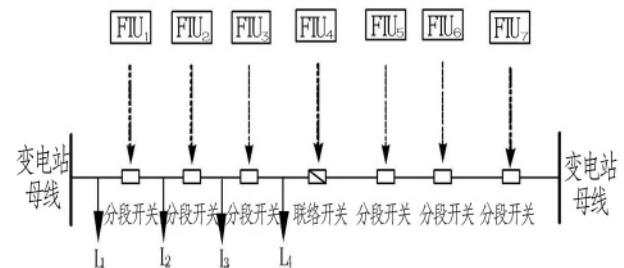


图1 手拉手接线方式

如图1所示,终端 $FTU_1 \sim FTU_4$ 和负荷点 $L_1 \sim L_4$ 组成了一回 10 kV 线路,与另一回线路联络,形成手拉手典型接线方式,其中 $FTU_1 \sim FTU_3$ 为分段开关, FTU_4 为联络开关。

针对左边一回 10 kV 线路来说,将 FTU_1 、 FTU_3 和 FTU_4 配置为三遥终端,那么:

(1) 当负荷点 L_1 发生故障时,远程遥控断开三遥终端 FTU_1 配合出线断路器切断负荷点 L_1 的故障,然后遥控闭合三遥终端 FTU_4 ,将负荷点 $L_2 \sim L_4$ 转由联络线路供电;

(2) 当负荷点 L_2 发生故障时,远程遥控断开三遥终端 FTU_1 和 FTU_3 切断负荷点 L_2 的故障,同时也切断了负荷点 L_3 ,负荷点 L_1 不受影响,然后遥控闭合三遥终端 FTU_4 ,将负荷点 L_4 转由联络线路供电;

(3) 当负荷点 L_3 发生故障时,远程遥控断开三遥终端 FTU_1 和 FTU_3 切断负荷点 L_3 的故障,同时也切断了负荷点 L_2 ,负荷点 L_1 不受影响,然后遥控闭合三遥终端 FTU_4 ,将负荷点 L_4 转由联络线路供电;

(4) 当负荷点 L_4 发生故障时,远程遥控断开三遥终端 FTU_3 配合常开联络开关 FTU_4 切断负荷点 L_4 的故障,负荷点 $L_1 \sim L_3$ 不受影响;

其他配置方案同理可推。

综上所述,设配电线路上 2 个三遥终端之间为 1 个独立段,加上出线断路器,则一回配电线路有 F_{mi} (馈线 i 上三遥终端的个数) 个独立段。一个负荷点故障后,配电线路上所有负荷点的停电时间可以分为 3 类:①故障负荷点所在独立段之前的负荷点;②故障负荷点所在独立段中间的负荷点;③故障负荷点所在独立段之后的负荷点。

配电线路上所有的负荷点的停电时间满足如下公式。

$$\Delta T \begin{cases} 0 & \text{故障段之前的负荷点} \\ T_2 + T_1 + T_4 & \text{故障段中间的负荷点} \\ T_2 + T_3 & \text{故障段之后的负荷点} \end{cases}$$

在配电网网架中, m 条馈线上因负荷点故障导致的停电时间 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{N_i} T_{ij}$, 计算流程如图2所示。

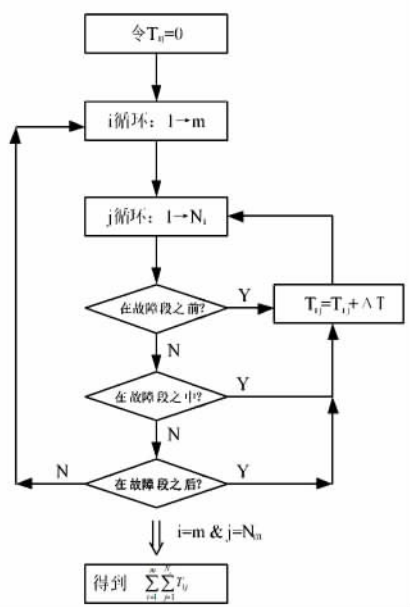


图2 T_{ij} 求解流程图

(1) 令 T_{ij} 为 0, 馈线 i 从 1 到 m 循环, 分别对配电网中的馈线进行计算;

(2) 在馈线 i 循环中, 一条馈线中对所有负荷点 j 进行从 1 到 N_i 循环;

(3) 判断该负荷点在故障段之前、之中还是之后, 对 T_{ij} 进行累加;

(4) 当 $i = m$ 并且 $j = N_m$, 也就是说两层循环完成后, 得到 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{N_i} T_{ij}$ 。

2 经济性分析

配电网自动化一方面给配电网运行管理带来了全方位的效益, 另一方面其自身的建设涉及范围广, 投资大, 实施时间长, 运行维护成本也不容忽视。因此在配电网自动化规划与建设中必须在投资与效益间取得合理的平衡。

总体来说配电网自动化系统带来的直接经济效益主要包括提高供电可靠率多售电量和自动化条件下

节省的人工设备费用。但由于新增大量配电自动化设备, 同时需增加维护人员及维护费用。

(1) 电量损耗造成的费用 S_1

随着配电网自动化的建设和投入使用, 提高了配电网的可靠性, 减少了因故障停电而损失的电量。以规划年度的售电量为基数, 配电自动化系统提高供电可靠率, 电量损耗造成的费用 S_1 为

$$S_1 = (1 - \gamma_{RSnew}) \times E \times C_1 \quad (4)$$

式中 γ_{RSnew} 为建设配电网自动化后的可靠性; E 为预测售电量; C_1 为综合电价。

(2) 自动化系统故障处理检修费用 S_2

除了提高供电可靠率外, 配电自动化系统还能够直接减少配电网故障处理、运行维护工作量和工器具使用费用。通过自动化系统, 在线路发生故障时, 能够自动定位, 减少运行维护人员监测故障的时间和行程。

$$S_2 = C_2 \times (F_{III}\% + F_{II}\%) \times S_g \quad (5)$$

式中 C_2 为线路跳闸次数; $F_{III}\%$ 为三遥终端覆盖率; $F_{II}\%$ 为二遥终端覆盖率; S_g 为自动化条件下 1 次故障查找和隔离的费用。

(3) 减少开关操作人员

由于实现了部分开关的遥控操作, 可以减少一次开关设备操作人员, 从而减少了费用 S_3 。

$$S_3 = C_3 \times S_c \quad (6)$$

式中 C_3 为一次开关设备操作人员数量; S_c 为操作人员费用;

(4) 自动化系统增加的自动化维护费用 S_4

自动化系统一方面使配电网运行维护高效、安全可靠, 另一方面也需要耗费一定的人力物力对自动化系统进行维护。

$$S_4 = C_{III4} \times S_{IIIw} + C_{II4} \times S_{IIw} \quad (7)$$

式中 C_{III4} 为三遥配电终端维护人员数量; S_{IIIw} 为三遥终端维护人员费用; C_{II4} 为二遥配电终端维护人员数量; S_{IIw} 为二遥终端维护人员费用。

(5) 配电网自动化建设费用 S_5

配电网自动化建设包括: 配电网自动化系统的建设、配电终端的建设和通信设备建设等, 建设总费用 S_5 为

$$S_5 = S_{\Delta} + C_{III} \times F_i \times F_{III}\% + C_{II} \times F_i \times F_{II}\% + C_I \times F_i \times (1 - F_{III}\% - F_{II}\%) \quad (8)$$

式中 S_{Δ} 为除终端外的投资, 设为常量; C_{III} 为三遥终

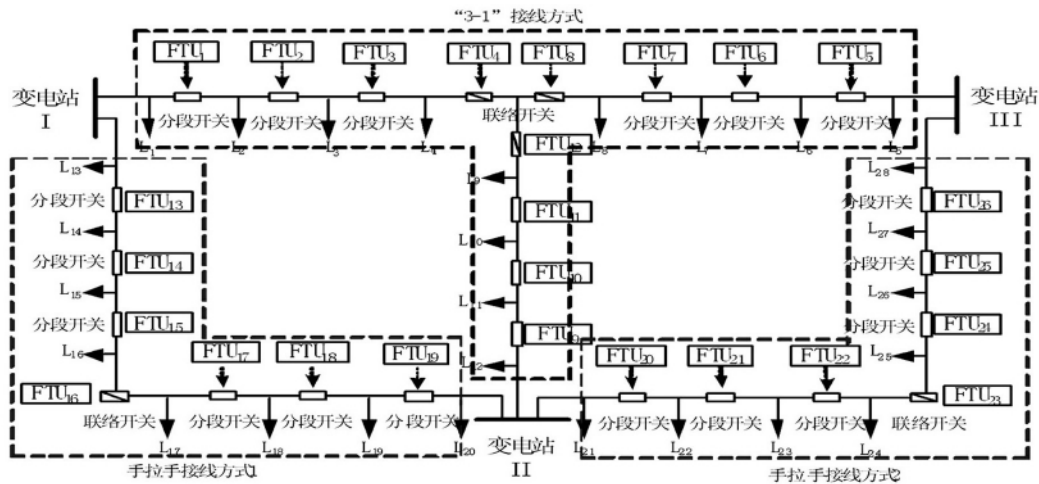


图 3 实际网架图

端单价; C_{II} 为二遥终端单价; C_I 为一遥终端单价;
 $F_{III}\%$ 为三遥终端覆盖率; $F_{II}\%$ 为二遥终端覆盖率。

综上所述,建设配电网自动化之后的总投资 S 为

$$S = S_5 + S_1 - S_2 - S_3 + S_4 \quad (9)$$

3 模型建立

根据约束条件的分析,可以建立数学模型如下。

目标函数为

$$\min(S = S_5 + S_1 - S_2 - S_3 + S_4) \quad (10)$$

约束条件为

(1) 可靠性约束

$$\gamma_{RS} \geq \gamma_{RS0} \quad (11)$$

式中 γ_{RS} 为一种终端配置模式下系统可靠性指标;
 γ_{RS0} 为给出的系统最低可靠性指标。

(2) 经济性约束

在实际建设中,一个地区的配电网自动化规划往往有一定的投资要求,即

$$S_5 \leq S_0 \quad (12)$$

式中 S_5 为配电网自动化建设费用; S_0 为给定的配电网自动化最大建设费用。

4 算例分析

南方电网某城市的配电网规划中,重点对某片区进行的一次网架规划,建设完成后由 2 个手拉手接线方式和 1 个“3-1”接线方式组成,具体如图 3 所示。

变电站 I、变电站 II 和变电站 III 形成“3-1”接

线方式,变电站 I 和变电站 II 形成手拉手接线方式 1,变电站 II 和变电站 III 形成手拉手接线方式 2。实际运行中,该片区网络运行灵活可靠,在配套建设配电网自动化后可靠性会进一步提高。

(1) 可靠性计算

去除相同配置,该片区的配置方案有 823 543 个,分别进行可靠性计算,计算结果如图 4 所示。

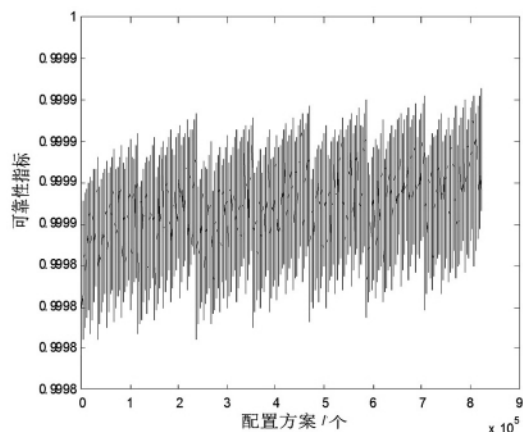


图 4 实际网架的可靠率图

(2) 经济性计算

根据经济性分析,假设三遥终端综合单价 20 万元,二遥终端综合单价 5 万元,售电量预测值为 20 GWh(根据当地情况定),一次开关操作人员费用 10 万元/人,三遥终端维护费用 10 万元/人,二遥终端维护费用 5 万元/人。

为去除地区差异性,对计算出的经济指标 S 取标么值,具体数据如图 5 所示。

综上,在给定可靠性指标要求下,可以选出经济指标最低的配置方案。假设该地区可靠性指标要求大于 99.989%,则经济指标最小为 0.787 843,即可选出 114 种配置方案,考虑当地的负荷特性情况和每

条线路上负荷点的重要性,选出最佳配置方案,根据该片区的实际情况,选出最佳配置方案如表1所示。

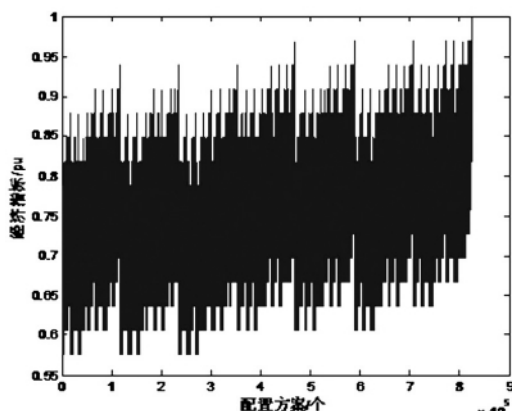


图5 实际网架的经济指标图

表1 最佳配置方案表

FTU ₁	FTU ₂	FTU ₃	FTU ₄	FTU ₅	FTU ₆	FTU ₇
0	1	0	1	1	1	0
FTU ₈	FTU ₉	FTU ₁₀	FTU ₁₁	FTU ₁₂	FTU ₁₃	FTU ₁₄
1	1	0	1	1	1	0
FTU ₁₅	FTU ₁₆	FTU ₁₇	FTU ₁₈	FTU ₁₉	FTU ₂₀	FTU ₂₁
1	1	1	1	0	0	1
FTU ₂₂	FTU ₂₃	FTU ₂₄	FTU ₂₅	FTU ₂₆	可靠率 S 标么化	
1	1	1	1	1	99.989%	0.787 843

表1中,“1”代表安装三遥终端,“0”代表安装二遥终端(说明,在实际工程中,二遥终端和一遥终端功能类似,此处没有安排一遥终端的建设)。

实际网架中,通过以上分析,可以找出终端的最佳配置方案,对配电网自动化规划起到很好的指导作用。

5 结 论

目前,配电网一次网架的优化开关配置研究较多,提出了很多的算法来进行一次开关的优化配置。然而,很少从建设配电网自动化之后,在远程遥控这个层面对配电网的可靠性和经济性进行研究。

配电网自动化规划中遇到的影响因素很多,特别是在配电网自动化的终端配置过程中,需要考虑多方面的因素,具体从一次网架、可靠性和经济性4个方面进行分析,找到优化终端配置方案的途径。

在原有研究的基础上,进一步细化和改进,所做工作如下。

(1) 重点分析了可靠性和经济性对配电网自动化规划中终端配置方案的影响;

(2) 考虑配电网自动化的建设给配电网的可靠性和经济性带来的影响,在可靠性和经济性双重约束条件下优化终端的配置,使在可靠性满足要求的基础上,经济上达到最优;

(3) 建立数学模型,并将数学模型代入实际网架中,进行了详细计算,并且对某地区实际网架进行了最佳终端配置方案的选择,证明了该模型的实用性。

参考文献

- [1] 陈发堂,吕新慧,鄢学锋. 配电网开关优化配置智能化算法与应用的研究[J]. 华东电力, 2009(10): 1744 - 1747.
- [2] He Y, Andersson G, Allan R N. Determining Optimum Location and Number of Automatic Switching Device in Distribution Systems[C]. In: IEEE Power Tech'99 Conference. Hungary: 1999.
- [3] Levitin G, Mazal - Tov S, Elmakis D. Optimal Allocation of Sectionalizer in Radial Distribution Networks[C]. In: Proceeding of the 1995 Stockholm Power Tech Conference. Stockholm: 761 - 764.
- [4] Celli G, Pilo F. Optimal Sectionalizing Switches Allocation in Distribution Networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 1167 - 1172.
- [5] Levitin G, Mazal - tov S, Elmakis D. Optimal Sectionalizer Allocation in Electric Distribution Systems by Genetic Algorithm[J]. Electrical Power System Research, 1994, 31(2): 97 - 102.
- [6] Wang P, Billinton R. Demand - side Optimal Selection of Switching Device In Radial Distribution System Planing[C]. IEE Proceeding - C, 1998, 145(4): 409 - 414.
- [7] Billinton R, Jonnavithula S. Optimal Switching Device Placement in Radial Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1646 - 1651.
- [8] 谢开贵,周家启. 基于免疫算法的配电网开关优化配置模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(15): 35 - 39.
- [9] Soudi F, Tomsovie K. Optimized Distribution Protection Using Binary Programming[J]. IEEE Transon Power Delivery, 1998, 13(1): 218 - 224.
- [10] Brown R E, Gupta S, Christie R D, et al. Automated Primary Distribution System Design: Reliability and Cost Optimization[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(2): 1017 - 1022.
- [11] 林功平. 配电网馈线自动化技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(4): 64 - 68.
- [12] 王天华,王平洋,范明天. 馈线自动化规划中环网开关配置的优化算法研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(15): 15 - 17, 47.
- [13] 陈泉. 中小城市配电网自动化系统的研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.

- [14] 谢开贵,刘柏私,赵渊,等. 配电网开关优化配置的动态规划算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 29-34.
- [15] 王峻峰,谢开贵,周家启. 配电网开关优化配置的改进遗传算法[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 27-32.
- [16] 史燕琨,王东,孙辉等. 基于综合费用最低的配电网开关优化配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 136-141.
- [17] 王东,史燕琨,丛吉远,等. 灾变遗传算法在配电网开关优化配置中的应用[J]. 高压电器, 2004, 40(3): 180-182.
- [18] 王艳松,赵智,陈国明,等. 应用禁忌搜索方法优化配

- 网的开关配置[J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 74-76.
- [19] 许丹,唐巍. 多目标分阶段中压配电线路开关优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 47-52.
- [20] 曹伟,姚建刚. 配电网主馈线分段开关优化配置的新方法[J]. 微计算机信息, 2009(24): 1-2.
- [21] 葛少云,李建芳,张宝贵. 基于二分法的配电网分段开关优化配置[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 44-49.

作者简介:

徐飞(1987),男,主要从事配网自动化及计算机信息处理方面的设计工作。

(收稿日期:2012-12-13)

(上接第34页)

表1 不同模型的测距结果

故障点	模型1			模型2			模型3		
	单相接地	两相接地	三相接地	单相接地	两相接地	三相接地	单相接地	两相接地	三相接地
80 km	0.1 Ω 100 Ω	0.1 Ω 100 Ω	0.1 Ω 100 Ω	0.1 Ω 100 Ω	0.1 Ω 100 Ω	0.1 Ω 100 Ω	0.1 Ω 100 Ω	0.1 Ω 100 Ω	0.1 Ω 100 Ω
50 km	80.46 80.46	80.46 80.46	80.46 80.46	81.95 81.95	80.46 80.46	80.46 80.46	81.95 81.95	78.97 78.97	78.97 78.97
30 km	49.17 49.17	50.66 50.66	50.66 50.66	50.66 50.66	50.66 50.66	50.66 50.66	50.66 50.66	50.66 50.66	50.66 50.66
	29.8 29.8	29.8 29.8	29.8 29.8	29.8 29.8	29.8 29.8	29.8 29.8	29.8 29.8	29.8 29.8	29.8 29.8

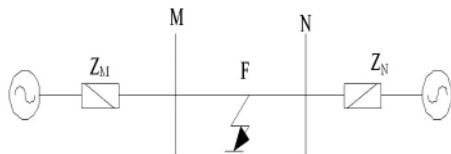


图8 仿真模型1

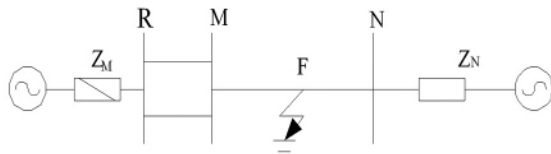


图9 仿真模型2

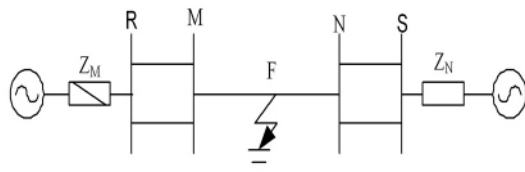


图10 仿真模型3

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术(第二版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [2] 李幼仪,董新洲,孙元章. 基于电流行波的输电线路横差保护[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 6-10.
- [3] 康小宁,索南加乐. 基于参数识别的单端电气量频域法的故障测距原理[J]. 中国电机工程学报, 2005, 32(1): 22-27.
- [4] 王志华. 超高压输电线路故障行波定位及高压变频技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [5] 高淑萍,索南加乐. 基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 75-79.
- [6] 徐青山,陈锦根,唐国庆. 考虑母 线分布电容影响的单端行波测距法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 70-73.
- [7] 王志华. 超高压输电线路故障行波定位及高压变频技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [8] 施慎行,董新洲,周双喜. 单相接地故障行波分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 29-32, 53.

作者简介:

孟凡铮(1988),男,工程师,主要从事750 kV电网设备维护;

王喜疆(1985),男,工程师,主要从事电力设备采购供应工作。

(收稿日期:2012-12-22)

5 结 论

为了验证算法的有效性,建立了3种仿真模型,表1给出了接地故障发生在不同位置、不同接地电阻的定位效果。3种测距结果显示,这种方法能够实现精确定位,最大误差为2.4%,能够满足单端测距的要求。大量仿真表明行波测距精度受过渡电阻影响不大,过渡电阻只改变其幅值,对精度的影响有限。

偏远地区微网结构探讨

周惟婧¹ 朱 鑫² 刘俊勇² 向 月² 闫占新² 张文涛¹

(1. 四川省电力公司电力经济技术研究院 四川 成都 610065;

2. 四川大学电气信息学院 四川 成都 610065)

摘 要: 典型微网网架结构是微网能量管理、控制、保护与稳定的基础。结合普通电网结构特点,参考当前国内外微网结构特点及其发展方向,依据典型偏远地区地理特点,将偏远地区的微网结构根据其人口分布的特点设计为人口极为稀疏的单户结构和偏远村落的多户结构,并对其运行的控制过程进行了说明。其中,重点介绍了在多户微网中采用的 Agent 控制方式。

关键词: 微网; 单户; 多户; 结构设计; Agent

Abstract: The typical framework of micro-grid is the basis of energy management, control, protection and stability of the micro-grid. Combining with the characteristics of the common grid structure and consulting the characteristics and development direction of the current micro-grid structure at home and abroad, the single-family structure in extremely sparse populated areas and the multi-family structures in remote villages are proposed according to the characteristics of its population distribution in the remote region. Besides, the control procedure is introduced, especially the Agent control mode used in multi-family micro-grid.

Key words: micro-grid; single-family; multi-family; structural design; Agent

中图分类号: TM715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0054-05

0 电网结构概述

电网结构是电力系统安全稳定运行的基础,从某种程度上看,世界上发生的大电网恶性事故其根本原因是电网结构不合理造成的,因此,电网结构是否合理对电网的安全有着及其重要的影响。随着技术的进步和人们生活水平的提高,在电网的规划和建设过程中对供电的可靠性、经济性以及环境保护等有了更高的要求。目前,中国电网迫切需要解决的问题有:资源配置不合理,电网网架结构薄弱以至于抵御事故风险的能力低;配电网建设滞后与当前用户对电能质量和安全可靠性的要求不断提高的矛盾日渐突出;用户多样化的用电需求使得配电网建设与节能降耗的压力巨大;农村负荷分布广、密度低、距离远,使得对远距离农村供电投资巨大且运行损耗大^[1]。

分布式发电及微网的出现为解决偏远地区的用电提供了一种较为经济的供电方式。微网在电力系统末端的分散负荷处引入微电源^[2],不仅有利于解

决用户的供电问题或者提高用户端的电能质量和供电可靠性,而且可以降低配电网电力损耗,节约电能,缓解电力紧张局面。但是微网的出现也使得输配电网络的规划面临更大的不确定性,如负荷预测和变电站建设方案等,大大增加了规划的难度,必须充分考虑投资主体、微网容量、安装地点及接入时间等诸多因素的影响,提出具有高适应度的网架规划方案。

微网既可以看作是一个小型的电力系统,也可以看作是配电网中虚拟的一个延伸分支。总体而言,微网与配电网结构有一定相似性,配电网线路的结构多具有多分段、多连接的特点,而微网系统结构则相对灵活。在微网的设计过程中应该根据其地域特征、经济性等方面因素则设计不同结构。

1 常规配电网结构

配电网络的网架结构是由无数条线路组成,可分成干线和分支线,或者经线、纬线和分支线。在干线中,为了能够适应负荷的发展和线路的分割,减少

故障时停电用户的数量,必须对并联或串联连接的线路进行必要的分段。对公用架空配电网进行分段和连接,可灵活运行配电线路,减少停电用户数,并使在线路工作或线路故障时受影响的用户最少。结合配电线路分段连接理论的成熟过程,配电线路已经从初期只是对配电线路进行环网,即两条 10 kV 线路连接,任意一条线路故障时由另外一条接带全部负荷,发展到当前配电线路发多分段、多连接的形式^[3]。

2 微网

微网是分散的、独立且较小规模电力系统,它采用大量的现代电力技术,将风电、光伏发电、燃气轮机、储能设备等一些分布式电源通过一定的电气连接方式并在一起,在用户侧直接接入。相对传统配电网而言,微网可以被看作为电网中的一个可控的补充单元。在需要时,它可以快速启动,满足外部输配电网络的需求^[4]。

相对电力系统而言,微网类似于一个独立的控制单元,其中每一个微电源都具有尖端的即拔即插功能。在并网运行模式下,微网与主网部分或全部连接,能与主网之间实现功率的双向流通。当主网有任何的扰动异常时,微网都能及时切换到孤岛运行模式,并能继续对优先负荷供电。为了防止微网与配电网解列时对微网内负荷的冲击,有些微网的配电结构需重新设计,将不重要的负荷接在同一条馈线上,重要或敏感的负荷接在另外馈线上。

典型的微网一般通过固态开关公共连接点与外部电网连接,按照规定的接口标准,一般连接在低压配网侧。通过断路器的开合实现整个微网与主网的断开或连接。各条馈线的通断可以分别通过操作断路器完成。微电源可包含多种形式,如光伏发电、风力发电等可再生能源,微型燃气轮机、燃料电池等高效能源。必要时应配备储能等电能质量调节装置满足重要负荷的需要。

目前,国内外根据自身发展需求的不同,微网结构也存在较大差异。

2.1 美国

美国电气可靠性技术解决方案联合会(CERTS)的微网设计理念是不采用快速电气控制、单点并网不上网、提供多样化的电能质量与供电可

靠性、随时可接入的 DG 等^[5]。CERTS 微网研究主要集中在对 DG 的设计和鲁棒控制;GE 微网则更多地关注在外部监控回路的研发上,以及对能量利用和运行成本的优化上。从美国电网现代化角度来看,微网发展的重点主要集中于提高重要负荷的供电可靠性、满足用户对多种电能质量的需求、降低成本、实现智能化等方面^[6]。

2.2 欧洲

在典型的欧盟微网结构中,小型风力发电机可以直接连接到微网,而光伏电源、燃料电池和微型燃气轮机则需要通过电力电子接口连接到微网,中心储能单元被安装在交流母线侧。微网系统采用分层控制策略,并且允许微网作为电网中分布式电源的一部分向大电网供电^[7]。欧洲电网具备灵活性、可接入性、可靠性、经济性等特点。基于此特点,欧洲提出要充分利用分布式能源、智能技术、先进电力电子等技术,实现集中供电与分布式发电的高效紧密结合,共同推进电网发展。欧洲微网的发展方向主要绕着可靠性、可接入性和灵活性 3 个方面来考虑。而电网的智能化、能量利用的多元化、环保性等将是欧洲未来电网的重要特点。

2.3 日本

日本将传统供电的独立电力系统也归入微网的研究范畴,扩展了对微网的定义。日本微网研究方向主要定位于负荷跟踪能力、电能质量监控、电力供需平衡、经济调度以及管道稳定运行等问题,利用灵活可靠性和智能能量供给系统以及 FACTS 控制器快速、灵活的性能,实现对配电网能源结构的优化以满足用户的需求,为小型配电系统及基于传统电源的较大规模独立系统提供了广阔的发展空间^[8]。

2.4 中国

中国对微网的研究起步比较晚,还没有形成对微网的统一定义,只在分布式发电和分布式储能上开展了相关的研究。在微网的容量方面需要根据中国国情进一步研究和实验,并了解微网的运行和暂态特性以及微网与电力系统的相互作用与影响,将有助于微网建立和相关标准的制定。国家已将“分布式供能技术”列入了 2006—2020 年中长期科学和技术发展规划纲要,并且已有 863 和 973 计划支持微网领域的研究项目^[8]。

综上所述,各国微网的定义以及发展侧重点是根据自身发展需求而决定的,具体对比如表 1。

表 1 各国微网研究对比

国家或区域	重点研究方向	影响因素及特点
美国	提高重要负荷的供电可靠性、满足用户定制、降低成本、实现智能化等。	电能质量和供电可靠性。
欧洲	可再生微型发电系统的控制策略和微网的规划、多微网管理运行优化工具的研发和技术、商业化规范的制定、示范性微网测试平台的推广、电力系统运行性能的综合评估等。	希望通过优化从电源到用户的价值链来推广分布式电源,以使用户、电力系统及环境受益。
日本	强调控制与电储能、能源供给多样化、减少污染、满足用户的个性化电力需求,强调控制、电储能、分布式电源的多样化。	日本本土资源匮乏、灾害频发。
中国	提高微网的包容性、灵活性、定制性、经济型、自治性。	中国电网结构相对薄弱,灾害抵抗能力有待提高。

3 偏远地区典型微网结构设计

目前中国在微网的设计上仍处于探索阶段,并无微网结构设计的固定模式,由于中国微网供电主要强调其灵活性、定制性、经济型、自治性,以及根据不同地区复杂的地理环境设计可靠性高、经济性好、能够适应典型地区居民需要的微网^[9,10]。

3.1 偏远地区特点

国内各省市偏远地区的具体情况不同,但造成部分地区无电的原因主要集中以下几个方面。

- 1) 地理位置的偏远造成电力建设的造价相对较大,而单位投资获得的效益不明显;
- 2) 运行维护困难,无电地区地理位置偏僻,地形地质条件复杂,交通极其不便,造成输电线路、电源等设备运行维护成本高;
- 3) 体制机制性障碍未完全消除,偏远地区电力建设投入机制、运营机制、激励机制有待进一步建立和完善。

以四川省甘孜偏远无电地区为例,该地区地域辽阔、人口稀少、交通不便、气候恶劣。无电居民分布也主要分为离主网较近无电地区、单户游牧家庭、牧民聚集点、单户村民和偏远村落 5 种类型。因此,该地区地理特点及居民分布特点使得在该地区单一依靠大电网建设往往投资巨大且施工环境异常恶劣。

值得注意的是,甘孜地区水能、太阳能、风能和生物质能资源十分丰富,其中,太阳能资源丰富,太阳能资源总量和密度大,属全国高光能地区之一,具有发展生态能源产业十分优越的资源条件,因而可以考虑对该地区采用微网供电模式,直接有效利用

当地资源。

根据居民聚居的稀疏程度可在该地区的微网规划过程将人口分布极为稀疏的地区的电网设计为简单的单户结构,而将具有一定居民聚居的村落的电网设计成较为复杂的多户结构。

3.2 单 户

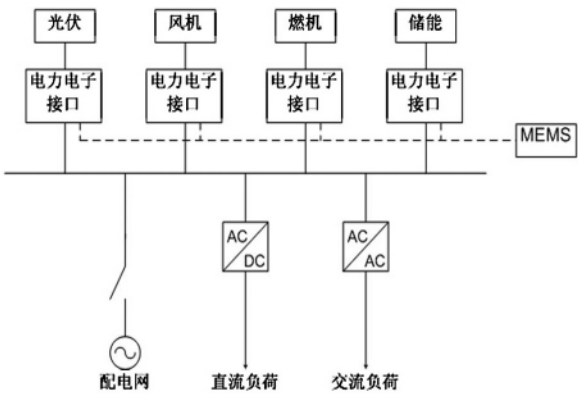


图 1 单户微网结构

如图 1 所示,考虑到甘孜地区风能较为充沛,也有具有可利用价值的太阳能,同时,单用户用电量较低且负荷种类较为单一,故在单户的微网设计中装设风能发电机组和太阳能发电机组^[11]。为了保证供电的可靠性,可增装燃机发电机组和储能装置,各种微源通过电力电子设备接口与配电网保留可能相连的交流母线连接,同时,微网能量管理系统(MEMS)根据负荷情况通过电力电子接口对各微源进行协调控制^[12]。

偏远单户微网结构简单、投资较小,也适用于其他偏远山区、海岛等地区供电。但由于缺少外电网的支撑,电能质量不高。在不具备一定容量旋转电源的地区,不直接接入对电能质量要求高的负荷。

3.3 多 户

综合各种基本结构,对于多用户,诸如村落形式

的等含多种 DG 和储能装置构成的微网,其典型结构如图 2 所示。

从图 2^[13]可以看出,该微网是由分布式电源和各种储能装置组成,主要展示是村落这一级的网络结构。各种村落级的微网包含各种以可再生能源为基础和燃机为辅助的分布式电源。所有的村落不一定具备各种可再生能源形式的分布式电源。储能装置被放置在指定的村落里以保证满足不同等级负荷的需求。如此的微网结构最适合农村社区的能源需求,以及未来扩展与主电网的连接运用各种可再生能源如风能、光能、小水电、微型燃气轮机的小型分布式电源机组和当地的各种储能单元以及当地负荷组成基础单一微网结构。

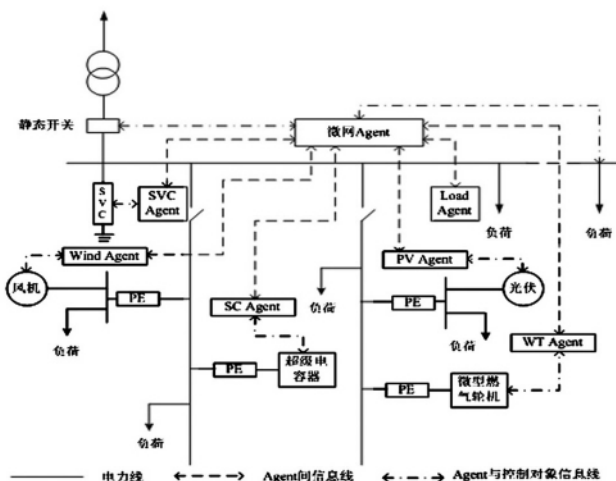


图2 多户微网典型结构

微网监控系统^[8]的控制方式根据控制器不同的决策方式可以划分为集中式控制和分散式控制^[14]。其中微网的集中式控制与常规电力系统中分层控制的思想近似,实现过程也相对较为简单,因此当前的很多研究是通过该思想进行的。在集中式控制方式中,由微网中央控制器进行优化管理,协调控制各个层次控制系统,主要实现系统的经济性、安全性等,以通过优化各微源的发电量及其与主网间的功率交换使微网得到最大化利用为目标。此外,从多用户微网系统控制的角度考虑,采用统一集中调度方式由于本身的分布式特性及海量控制数据等原因难以实现灵活有效控制,需要将控制权分散到各元件上实现控制、通信、协作。分散式的控制思想是想要最大程度地实现微网内分布式发电单元和负荷的自治,但实现较为复杂。其中,Agent 技术具有分布、自治和快速处理复杂问题的能力,在微网控制

中得到应用^[15]。在嵌入了 Agent 的微网电压控制系统后,微网被分成微网层(由微网 Agent 控制)和元件层(由执行级 Agent 控制)。其工作过程如下所述^[16]。

(1) 微网 Agent 一方面接收上层网络命令开断静态开关以确定微网处于并网或孤网运行状态,另一方面接收各微源 Agent 返回的信息,通过测量微网内部电气参数,把握全局信息,协调控制。

(2) 一般意义上的微网可以实现并网和孤网运行。在并网运行时,微网可以看作是主网的一条低压配线,此时微网的频率、电压由主网控制。而微网孤网运行时需要结合各 Agent 间配合、分层协调实现系统的安全稳定运行。以电压调节过程为例。

微网 Agent 定期对系统内电压整定,整定后将此电压值发送给此系统内各微源 Agent。微源 Agent 在接收到微网 Agent 发送的整定值后对该值进行评估,判定执行该电压整定值是否会对本控制区域造成危害。若不会,微源 Agent 会将该电压整定值发送给相应的微源,微源会调节无功输出使其控制区域的电压维持在该整定值。在一个整定周期内,微源 Agent 会根据本控制区域内负荷的变化对电压整定值进行微调,以优化本区域内的电压质量;若评估表明执行该整定值会对本区域造成危害,则微源 Agent 拒绝执行该调压命令,此时微源实行自治。

当馈线输出的无功不能满足负荷需求时,PV Agent 向微网 Agent 发出的协调调压请求,由于超级电容器启动快但容量有限,而 SVC 的启动速度较慢但却能提供连续的无功,微网 Agent 将选定 SC Agent 和 SVC Agent 进行协调调压。即首先由超级电容器为馈线提供短时无功功率,以延缓电压继续下降,然后由 SVC 为馈线提供持续的无功以维持电压稳定。

若馈线内发生故障,则该条线路上的断路器断开。此时,该馈线实际上形成一个更小的微网,微源 Agent 将起到原微网 Agent 的作用,它将根据控制区域内负荷变化自动计算电压整定值,之后微源依据该电压整定值调整无功输出,是本馈线内的电压维持稳定。若微源输出小于所需的电压值,微源将向 SC Agent 发出调压请求。但是超级电容器只能提供短时无功支持,若无功负荷持续增加,则必须切掉一部分负荷以保持稳定的电压。

5 结 语

微网具有节约能源、提高电能质量、供电可靠性、优化电网性能、降低发电成本等优点,为达到引入微网的预期目的,在微网的设计过程中要依据该地区地域特征、经济性、负荷特性、DG特性等基本元素对微网结构进行设计和选择^[17]。在微网的运行过程中应注意保持微网内能量守恒,即在并网运行时微网内各微源容量和配电网提供能量之和应与微网内总负荷相等,而在微网孤岛运行时,微网内微源容量能满足负荷的需求。

前面介绍了当前国内外微网的发展概况及各个国家未来发展的方向。根据中国在微网设计上的侧重点,对甘孜偏远地区微网的设计过程中根据人口的疏密程度将该地区的供电网络分为单户结构和多户结构,并对其控制方式进行了说明。伴随着人们对能源的需求和节能意识的提高,微网不仅将适用于解决偏远地区的用电问题也将向城镇居民提供多样化的电能需求。未来微网的结构设计应以其需求用途为基础,考虑基本元素对其结构的影响,并兼顾运行的经济性、可扩展性、安全性以及易维护性对微网进行结构的“定制”设计。

参考文献

- [1] 梅生伟,王莹莹. 输电网-配电网-微电网三级电网规划的若干基础问题[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(2): 3-10.
- [2] 王成山,李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
- [3] 孙赛,杨瑞丽. 城市配电网结构分析[J]. 内蒙古电力技术, 2006, 24(1): 54-57.
- [4] 曲峰. 基于B/S模式的微电网能量管理软件的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [5] Geert Deconinck, Tom Rigole, Hakem Beitollahi, et al. Robust Overlay Networks for Microgrid Control Systems [EB/OL]. 2007. http://www.esat.kuleuven.be/electa/publications/fulltexts/pub_1678.pdf.
- [6] Chris Marnay Owen C. Bailey. The CERTS Microgrid

and the Future of the Macrogrid [EB/OL]. 2004. <http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBNL-55281>.

- [7] 荣延泽. 分布式电源建模与微电网控制及保护[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012.
- [8] 李鹏,张玲,王伟,等. 微网技术应用与分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 109-114.
- [9] 康龙云,郭红霞,吴捷,等. 分布式电源及其接入电力系统时若干研究课题综述[J]. 电网技术, 2011, 34(11): 43-47.
- [10] 刘学平,刘天琪,李兴源. 混合独立发电系统功率协调策略与仿真[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 202-205.
- [11] Zhang Haiyang Li Shande. Research on Micro-grid [C]//2011The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, 2011: 595-598.
- [12] Balazs Rakos, Peter Stumpf, Istvan Nagy. Energy from Biogas, Renewables for Supplying Telecommunications in Remote, Rural Areas [C]//Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2011 IEEE 33rd International, 2011: 1-7.
- [13] Tewodros Tesfaye Erbato, Thomas Hartkopf. Smarter Micro Grid for Energy Solution to Rural Ethiopia [C]// Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES: 1-7.
- [14] 张颖媛. 微网系统的运行优化与能量管理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011.
- [15] Zhang Jian, Ai Qian, Jiang Chuanwen, et al. The Application of Multi Agent System in Microgrid Coordination Control [C]. Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN, International Conference on, 2009: 1-6.
- [16] 谢清华. 基于Multi-Agent的微网电压控制技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [17] 汪少勇. 基于分布式电源的微网的设计与运行[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 120-123.

作者简介:

周惟婧(1982),女,工程师,研究方向为电力系统稳定分析;

朱鑫(1989),男,硕士研究生,研究方向为分布式发电与微电网运行控制。

(收稿日期:2012-12-03)

欢迎订阅《四川电力技术》

用于高压环境下的光学电压电场传感器

冯 运¹ 陈洪波¹ 白 欢¹ 王 靖² 马剑辉²

(1. 四川电力科学研究所, 四川 成都 610072; 2. 武汉康普常青软件技术有限公司, 湖北 武汉市 430071)

摘 要: 复杂电磁环境下电量信号的采集一直是国内外研究的热点。基于 BGO 晶体的光电效应原理, 提出了一种绝缘子串电场强度的测试方法, 并开发出新型光学传感器, 其具有抗干扰能力强、尺寸小、绝缘性能好等优点, 具有广阔的应用前景。

关键词: 光学; 电压; 电场; 传感器

Abstract: It is a hot spot of the researches on the acquirement of the electric signal in complex electromagnetic environment both at home and abroad. Based on photoelectric effect of BGO crystal, a testing method to get the electric field intensity of insulator strings is presented, and a new type of optical sensor is developed with the strong interference rejection, small size and good insulation ability, which has a broad application prospects.

Key words: optics; voltage; electric field; sensor

中图分类号: TM835 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2013)02-0059-04

0 引 言

自 1970 年半导体激光器在室温连续工作和低损耗光纤实现之后, 随着两者的飞速发展, 光纤通信和光纤传感技术的应用领域显著扩大。近年来, 为适应大规模、大容量电力系统的需要, 尤其是遥控、遥测和人工智能等开发研究中的特殊需要, 针对光纤传感技术的研究蓬勃发展, 利用光纤的无感性、绝缘性、细径性、柔软性、耐热性、耐腐蚀以及低损耗传输等电气物理特性研制成的原理新颖、种类繁多的光纤传感器, 应用领域涉及电磁噪声下的检测、雷电检测、安全检测、狭小空间的检测、移动体内部检测以及在高温、化学气氛、水下和空间的检测。检测参数包括电场、磁场、温度、压力、位置、移动和转动等。下面将对最新研制成功的利用铋酸锆电光效应的光纤电压传感器和电场传感器的原理结构和基本特性进行探讨。

1 电光效应测量电压电场原理

光纤电压电场传感的结构主要由传感头、信号传输光纤及测量系统组成, 以工作波长为 1 550 nm

的 LED 作为光源; PIN 光电二极管(或光电倍增管)光电接收组件作为光探测器, 用单模光纤传输光信号; 传感头由起偏器、BGO 晶片、1/4 波长片、检偏器和短程透镜构成。LED 光源发出的光经透镜准直, 由起偏器变成线偏振光, 1/4 波长片将线偏振光再变成圆偏振光, 之后穿过处于电压或电场中的 BGO 晶体, 由于加在 BGO 上的电压或电场的作用, 这个圆偏振光转换成椭圆偏振光。经检偏器检偏后的光信号其调制度相当于交流电压和电场, 光电平的相对大小则对应着直流电压或电场。因而, 加在 BGO 上的电信号就可通过检测光信号来测量。

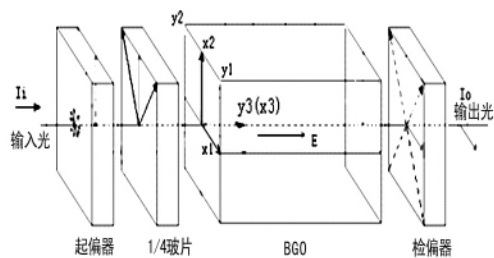


图 1 电场对偏振光的调制示意图

在没有外电场及干扰双折射时, BGO 晶体是光学各向同性体, 其逆电光张量为

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_0 = 1/\epsilon_0, \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 0$$

在外加电场 E 的作用下, BGO 晶体的折射率椭球方程为

$$(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)/n_0^2 + 2\gamma_{41}(E_{1x_2}x_3 + E_{2x_1}x_3 + x_1x_2) = 1$$

当通光方向和外加电场方向平行时,电场作用下的光轴方向为 $y_1y_2y_3$,调制偏振光振动方向为 y_1y_2 如图1所示。

折射率椭球方程为

$$(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)/n_0^2 + 2\gamma_{41}(E_1x_2x_3 + E_2x_1x_3 + E_3x_1x_2) = 1$$

由于在 $x_1x_2x_3$ 坐标系和 $y_1y_2y_3$ 中 x_3y_3 重合,因此令 $x_3 = 0$ 等效于 $y_1y_2y_3$ 坐标系令 $y_3 = 0$ 。因此令 $x_3 = 0$,可求得偏振光振动面上椭圆方程为

$$(x_1^2 + x_2^2)/n_0^2 + 2\gamma_{41}E_3x_1x_2 = 1$$

上式表明 E_1 、 E_2 并不影响偏振光的振动方向和折射率。对椭球方程主轴化为

$$x = Qy, \quad Q = (e_1 \ e_2)^T$$

其中 $e_1 = [\cos\pi/4, \sin\pi/4]$, $e_2 = [\cos\pi/4, \sin(-\pi/4)]$ 。

$$(\beta_0 + \gamma_{41}E)y_1^2 + (\beta_0 - \gamma_{41}E)y_2^2 + \beta_0y_3^2 = 1$$

新坐标系的两个坐标轴方向是原坐标轴绕电场方向 y_3 旋转 45° 而成,且与电场无关(坐标变换矩阵 Q 是一个与 E 无关的量)。主轴化后的椭圆方程直观地表示了振动平面上的两个主轴方向的双折射率。

$$n_1 = n_0 - (1/2)n_0^3\gamma_{41}E$$

$$n_2 = n_0 + (1/2)n_0^3\gamma_{41}E$$

$$\Delta n = n_0^3\gamma_{41}E$$

两个偏振方向光程差 $\Delta n^*l = n_0^3\gamma_{41}El$ 相位差 $\delta = (2\pi/\lambda)n_0^3\gamma_{41}El$ 。

由上式看出,相位差仅 δ 和电场强度一个变量相关,且关系为线性,其他均为 BGO 晶体的材料常数,该相位差通过偏光干涉的方法转变为光强度信号 P 。

包含相位信息的光强度信号耦合入单模光纤的光线经过 BGO 传感头,在被测电压或电场的调制下到达 PIN 二极管,经过光电接收组件(由前置跨阻放大器,AGC 放大电路组成)。滤波电路将其分离成直流和交流两部分,探测到的光功率交流分量 P_{AC} 和直流分量 P_{DC} 的比值 P_{AC}/P_{DC} 和被测交流电场线性相关。

当施加到 BGO 上的电场信号较弱时,输出光信号的强度调制为

$$P = 1/2P_0(1 + K^*E_0\sin\omega t)$$

其中 P_0 为入射到 $1/4$ 波长片表面的光强; K 为和

BGO 尺寸和封装外壳材料形状相关的常数; E_0 为电场强度,于是 $P_{AC}/P_{DC} = K^*E_0^*\sin\omega t$ 。

因此,来自光源、光探测器的能量涨落以及系统中光纤连接、耦合的变化均可以得到消除。

在这个 BGO 光学电场传感器测量系统中,LED 耦合到单模光纤中的能量非常微弱,约为 $1 \sim 2 \mu W$,由于起偏器、检偏器和 $1/4$ 玻片的存在,传感器的插入损耗在 $8 \sim 10$ dB 之间,因此光电探测器实际上能接收到的光能量仅为 100 nW 级。因此对光电探测组件的要求需要能够测量 nW 量级光功率。

对于电场分布的测量,BGO 电场传感器体积需要做得尽可能小,所有的光学元件需要用环氧树脂粘接和包封以满足电气性能和机械强度的要求。因为传感头本身对空间电场在一定距离内会略微使得电场强度畸变,减小封装材料的介电常数可以减少这种影响。此外,BGO 传感头与光纤耦合应采用有机和无机绝缘材料做成的连接器,以保证高绝缘性和无感性。

2 基本特性试验

以大型平板电极作为高电位,试验台面为地,分别以不同高度的绝缘柱做支撑,使平板电极和桌面平行。平板电极 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$,厚度 2 mm ,不锈钢材料。桌面不锈钢材料,长方形,尺寸略大于上极板。晶体通光方向长度 $d = 5\text{ cm}$,折射率 $n_0 = 2$,介电常数 $\varepsilon = 16$,有效电光系数记为 γ 约 1 pm/V 。

试验的2种方式调制为:(1)直接放在地极板表面,极板间隔 23 cm ;(2)横向放置于塑料杯顶部,高度约为 23 cm ,极板间隔 43 cm ,如图2所示。试验结果如表1所示。



图2 试验布置图

表1 传感器调制试验结果

编号	极板间距 /m	加载电压 /kV	电场强度 /(kV·m ⁻¹)	感应电压 /mV
1	0.23	45.1	196	944
2	0.43	50.0	116	413

由电光效应导致的偏振态附加相位差的测量值 $\Delta\delta_{\text{测}} = U/U_0$, $\Delta\delta_1 = 0.050$, $\Delta\delta_2 = 0.022$ 。

由于相位差 $\delta = (2\pi/\lambda) n_0^3 \gamma_{41} E l$, 即电场强度测量值 $\Delta\delta_1 = (2\pi/\lambda) n_0^3 \gamma_{41} E_1 d = (2\pi/1.55 \mu\text{m}) \times 2^3 \gamma_{41} E_1 \times 5 \text{ cm}$, 计算可得 $E_1 = 30.8 \text{ kV/m}$; $\Delta\delta_2 = (2\pi/\lambda) n_0^3 \gamma_{41} E_2 d = (2\pi/1.55 \mu\text{m}) \times 2^3 \gamma_{41} E_2 \times 5 \text{ cm}$, 计算可得 $E_2 = 13.6 \text{ kV/m}$ 。

由于晶体本身介电常数为16, 理想情况下, 如果晶体和空气之间界面为无限大, 则其感应电场应为临近空气中电场的 $1/16 = 0.0625$, 但实际上, 晶体本身的尺寸是有限的, 而且其形状也会影响附近的电场分布, 研究表明, 晶体尺寸越小, 其内电场感应强度越接近于空气中的实际电场。

同时从试验结果可以看出: (1) 晶体悬空和晶体贴地电极的感应电场灵敏度有较大区别, 原因是由于平板电极形成的空间电场在靠近上下极板的位置有较大的畸变, 因此需要以悬空测量的数据作为标定量; (2) 由于条件限制, 传感头虽然有很小的介电常数, 但在高电压环境下, 表面的感应电荷也会对测量结果造成影响。

3 应用

在各类输、变电气产品的研究、设计、试验和制作过程中, 最为突出的是电气绝缘设施和电场防护等问题, 需要检测不同部位的电压和电场分布。现有的典型检测手段(静电电压表)除体积大、精度低和操作频繁外, 其抗干扰能力差, 同时本身会严重影响环境本身电场分布, 因此往往不能反映真实情况。光学电场互感器除占用空间小、响应速度快、抗干扰能力强以外, 最突出的优点就是传感头和信号传输通道都不含有任何金属, 且由介电常数低的材料组成, 对电场分布影响基本可以忽略, 特别是在高电压场合, 极佳的绝缘性能保障了操作人员的安全, 是目前理想电场检测手段。

由于BGO晶体不仅是优良的电光晶体, 而且还有优良的电气物理性能。因此, 其灵敏度高, 测量范

围广, 输入阻抗高, 抗干扰能力强, 几乎不受温度影响, 目前正在许多领域获得应用。

(1) 电压测量

由于BGO传感器是无感和高输入阻抗的, 所以可以对高压输电配电系统电气设备进行无感、安全快速和遥控测量。例如对多级串联超高压绝缘子分压的测量, 可以得知每一个绝缘子承担的电压值。

(2) 电场测量

不适合狭小空间和表面电场分布的测量。例如, 高压架空线绝缘子周围电场分布测量, 通过电场分布判断绝缘子运行状况。

(3) 高频冲击波的监测

BGO传感器的输入阻抗高、测量频带宽、响应速度快, 适合于输电网高频电压波动的分析及冲击试验和雷电冲击波形的观测与监视。

4 结 语

从电光效应基本原理出发, 探讨了BGO晶体光学电压电场传感器的原理、结构、基本特性及其应用。提出并通过试验验证了传感头本身对电场分布造成的影响, 同时与传感头内感应电场强度和传感头放置位置以及方向相关, 说明了传感头尺寸以及封装材料对电场测量是至关重要的, 应选用小介电常数的非金属材料制成小尺寸表面光滑的封装外壳。

光学电场电压传感器是因其绝缘强度高、抗干扰能力态范围大、体积小、频带宽、绝缘性能好和无爆炸危险等优点使其在电力系统中发挥越来越重要的作用, 势必成为新一代电力监测技术的主流。

参考文献

- [1] 夏强峰. 瓷质悬式绝缘子劣化非接触式检测方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [2] 蒋兴良, 夏强峰, 胡琴, 等. 劣化绝缘子对悬垂串电场分布特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 118-124.
- [3] 李洪杰, 王颖. 绝缘子串周围静电场的数值计算及其结果在故障绝缘子检测方面的应用[J]. 电瓷避雷器, 1997(4): 8-10.
- [4] Birlasekaran S, Li H J. Detection of Faulty Insulators on Power Transmission Line[C]. Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore, 2000.

[5] 徐其迎,李日隆. 110 kV 合成绝缘子沿面电场分布的研究[J]. 绝缘材料 2003(4):48-50.

[6] 袁小嫻,陈俊武,周志成,等. 330 kV 线路复合绝缘子电位和电场分布的有限元计算[J]. 电瓷避雷器 2006(4):9-12.

[7] 卢明,阎东,杨庆. 均压环安装错误对电场分布的影响[J]. 电瓷避雷器 2010(2):1-3.

[8] 毛凤麟,王雪松,雒峰. 合成绝缘子沿面场强及电位分布试验研究[J]. 西北电力技术 2000(1):6-8.

[9] 武坤,司马文霞,杨庆,等. 分域迭代法计算特高压线路绝缘子电场分布[J]. 高电压技术 2009,35(6):1279-1283.

[10] 汪金刚,何为,陈涛,等. 绝缘子表面电场与紫外脉冲关系以及在劣化绝缘子检测中的应用[J]. 电工技术学报 2008,23(6):137-142.

[11] 张占龙,黄丹梅,魏昱,等. 劣质绝缘子电场正问题优化算法分析[J]. 重庆大学学报 2009,32(11):1296

-1299.

[12] 陈涛. 基于非接触式的劣化绝缘子检测方法的研究[D]. 重庆:重庆大学 2006.

[13] 王黎明,廖永力,关志成. 紧凑型输电线路复合绝缘子轴向电场分布分析[J]. 高电压技术 2009,35(8):1862-1868.

[14] 栗福珩,贾逸梅,王青霞,等. 陡波试验寻找合成绝缘子内部缺陷有效性的检验[J]. 电网技术 2003,27(1):41-43.

[15] 孙豹,陈福深. 用于测量工频强电场的集成光学电场传感器[J]. 半导体光电 2010(2):202-204.

[16] 肖悦娱. 光学电压互感器的电场分布对测量的影响[J]. 高电压技术 2007,33(5):37-40.

[17] 霍成文,李伟,李进,等. 光电探测微弱信号放大器设计[J]. 浙江理工大学学报 2005,22(3):259-262.

(收稿日期:2012-12-28)

(上接第20页)

不设隔离开关,这种情况下,系统可靠性最差,用户断电时间长;在第3种情况,增加了供电网变压器备用,缩小了由于变压器检修而产生的停电时间,用户停电持续时间大大降低;第1种情况在第四种的情况下增设了隔离开关,因此缩小了停电范围;第2种情况考虑了断路器的可靠操作率,可以看出,在断路器能够100%动作的情况下系统的可靠性更高。

表3 系统可靠性指标

可靠性指标	第1种情况	第2种情况	第3种情况	第4种情况
SAIFI	1.827	1.746	1.827	1.827
SAIDI	5.348	5.031	4.332	7.317
CAIDI	3.416	3.396	2.371	4.003
ASAI	0.995	0.995	0.994	0.998

因此,可以看出,对于同一网络,不同的接线方式下,其系统可靠性指标有很大的不同。对可靠性较差的网络,可以采取一定的增强措施,如加装主馈线隔离开关、加分支线保护、备用供电变压器、增加备用电源等方式来增加其运行灵活性,从而提高其可靠性指标。

参考文献

[1] 徐纪法. 供电可靠性综述[J]. 大众用电 2003(9):36

-37.

[2] L. G. Monte Carlo Simulation Based Reliability Studies of a Distribution Test system [J]. Electric Power Systems Research 2000,54(1):55-65.

[3] 别朝红,王锡凡. 蒙特卡洛法在评估电力系统可靠性的应用[J]. 电力系统自动化,1997,21(6):68-75.

[4] 霍利民,朱永利,张在玲,等. 贝叶斯网络在供电系统可靠性评估中的应用[J]. 电工技术学报,2004,19(8):113-118.

[5] 卢锦玲,栗然,刘艳,等. 基于状态空间法的地区环式供电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化,2003(11):21-27.

[6] 万国成,任震,田翔. 供电网可靠性评估的网络等值法模型研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(5):48-52.

[7] 周云海,曹小伟,危雪. 基于网络等值法的配电网可靠性研究[J]. 电气开关 2008(2):20-24.

[8] 汪穗峰. 供电网可靠性定量分析研究综述[J]. 继电器 2008,36(3):78-83.

作者简介:

陈嵩峰(1985),男,工学学士,从事业扩及供用电合同管理工作;

宋明玉(1985),女,硕士研究生,四川省电力公司乐山电业局客户服务中心用电信息采集技术专责。

(收稿日期:2012-12-05)

复合绝缘子憎水性检测技术研究进展

贺含峰¹ 陈洪波² 白 欢² 何 松² 刘 涛² 彭 敬³

(1. 四川省电力公司 四川 成都 610023; 2. 四川电力科学研究院 四川 成都 610072;

3. 重庆市电力公司璧山电业局 重庆 402760)

摘要: 输电线路是否更换运行中的复合绝缘子需要客观、准确、快速、方便地评判出该复合绝缘子的憎水等级。在提出评判工作的标准后,对国内外憎水等级评判工作进行综述,总结了复合绝缘子憎水等级评判的研究现状。首先,对接触角法、喷水分级法以及表面张力法等几种传统的评判方法进行总结比较,并指出由于动态接触角法能够客观准确地评判出复合绝缘子的憎水等级,该法将广泛地利用于憎水等级评价工作中,尽管目前没有利用于憎水等级的在线评判。其次,对基于数字图像处理的憎水等级评判方法的过程进行总结,针对各个过程国内外所采取的方法进行比较、总结。最后,提出实现多因素多参量评判复合绝缘子憎水等级评判是今后工作的发展方向。

关键词: 复合绝缘子; 憎水性; 等级; 评价

Abstract: The current evaluation methods for hydrophobic nature of the composite insulators are summarized, including the basic evaluation methods, that is, the contact angle method, water spray classification and surface tension method, and the classification methods of hydrophobic nature based on digital image processing. The processes of classification methods of hydrophobic nature based on digital image processing are emphatically discussed and compared as well as the advantages and disadvantages of the adopted methods used in each process. In order to realize the on-line evaluation for hydrophobic nature of composite insulators objectively, accurately, rapidly and conveniently, some suggestions on using the dynamic contact angle to evaluate the hydrophobic nature of composite insulators on line are proposed. At last, it is put forward that using the multi-factor and multi-parameter to evaluate the hydrophobic nature of composite insulator is the development direction of the future researches.

Key words: composite insulator; hydrophobic nature; level; evaluation

中图分类号: TM211 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0063-06

0 引言

硅橡胶复合绝缘子具有低表面能、良好的憎水性以及憎水迁移性,能够有效地防止电力系统发生污秽闪络以及提高绝缘子的污闪电压^[1,2],目前,复合绝缘子已经广泛地应用于输电线路外绝缘中^[3]。但是,中国十几年的复合绝缘子运行经验表明复合绝缘子耐污闪能力强不等于能够完全防止污闪事故的发生^[4]。对复合绝缘子憎水等级的评判工作对于运行中的复合绝缘子是否退出线路运行具有重要的指导意义。

目前,国内外对于复合绝缘子憎水等级评判工作进行了研究,在分析国内外大量文献的基础之上,针对国内外复合绝缘子憎水等级评判工作了进行总

结,归纳了复合绝缘子憎水等级评判的研究现状。对于复合绝缘子憎水等级评价方法,其可行性从以下几方面考虑:客观、准确、实用、方便、适合于在线检测。

目前,国内外传统的复合绝缘子憎水等级评价方法分为:1) 接触角法;2) 表面张力法;3) 喷水分级法;4) 基于数字图像憎水性等级评判;5) 其他方法。

1 接触角法

液体在固体表面的接触角是反映液体在固体表面润湿特性的重要指标之一,通常人们所认为的接触角定义为:过气、液、固三相的接触点,向气-液界面做切线,该切线与液-固界面的夹角是接触角^[5]。如图1所示, θ 即为静态接触角。文献[5-

7]指出:在相同的水滴体积下,材料表面静态接触角越大,憎水性越好。通常认为,静态接触角 $\theta > 90^\circ$ 时,表面呈憎水性; $\theta < 90^\circ$ 时,表面呈亲水性。所以,静态接触角可以作为评判憎水性的依据之一。

文献[10]利用接触角测量仪测量复合绝缘子表面静态接触角大小,并据此对复合绝缘子表面憎水性等级进行评判。

文献[8]同时指出,对于憎水性表面的憎水等级,静态接触角方法具有很好的区分性,但是对于亲水表面,这种方法的区分性很差。动态接触角评判憎水等级具有很好的区分性,对于研究液体在材料表面上的铺展有重要意义^[9-11],它能够很好地解释水珠或水迹在材料表面的润湿性,利用这种方法能够有效地对复合绝缘子表面憎水性进行分级^[12]。目前,测量动态接触角的方法主要有如下3种^{[10, [12]]}。

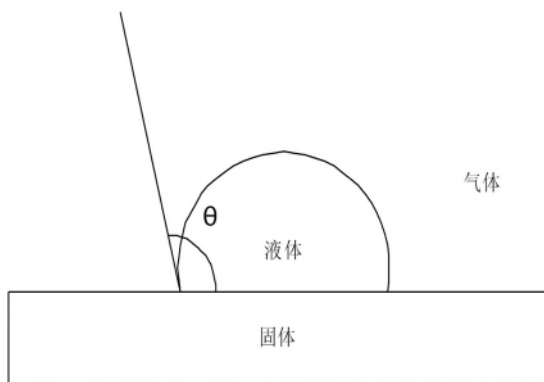


图1 接触角示意图

1) Wilhelmy 方法

文献[13]利用 Wilhelmy 方法测定硅橡胶板上的动态接触角。测量的方法如图2所示。首先将硅橡胶板以一定的速度浸入水中,在浸入水中的过程中,测量接触角,记为前进接触角 θ_a ;然后将硅橡胶板以一定速度从水中提出,测量接触角,记为后退接触角 θ_r 。此方法虽然比较精确,且排除了人为因素的干扰,但测量值与硅橡胶板浸入和提取的速度有关,不适合于在线检测憎水性。

2) 加液/减液法

文献[16]利用加液/减液法测量动态接触角。测量方法是:在固体表面形成液滴后,再以很低的速度向液滴加入液体,使其体积不断增大。开始时,液滴与固体表面的接触面积并不发生变化,接触角逐渐增大。当液滴的体积增大到某一临界值时,液滴

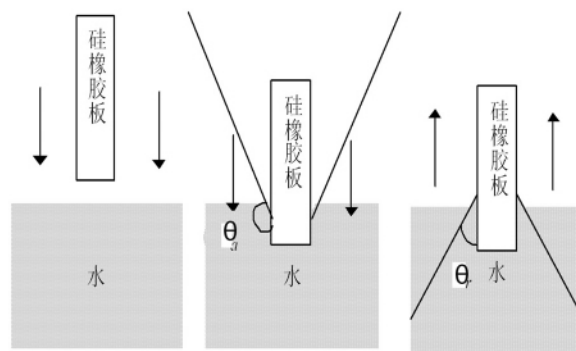


图2 Wilhelmy方法测量动态接触角

在固体表面的三相接触线发生往外移动,而在发生移动瞬间的接触角,被称为前进接触角 θ_a 。在此之后,接触角基本保持不变。反之如果从已形成的液滴不断地以很低的速度把液体吸走,使其体积减小。开始时,液滴与固体表面的接触面积也并不发生变化,但接触角逐渐减小。当液滴的体积减小到一定值时,液滴在固体表面的固/液/气三相接触线开始往里移动。在发生这一移动前的接触角,就是后退接触角 θ_r 。在此之后,接触角也应基本保持不变。利用加液/减液法测量动态接触角精度高,并能有效区分憎水等级,但是不利于实现憎水性的在线监测。

3) 斜面法

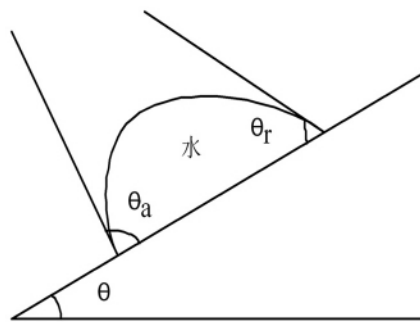


图3 斜面法测量动态接触角

文献[7, 12, 14, 15]利用水珠在倾斜表面测量其前进接触角和后退接触角。具体方法是:将足够大体积的液滴置于待测的样品表面后,把样品表面朝一方缓慢、不断地倾斜。开始时液滴不发生移动,而只是其中的液体由后方向前方转移,使得前方的接触角不断增大,而后方的不断缩小。当倾斜到一定角度时,液滴开始发生滑动。发生滑动前夕液滴的前角就是前进接触角 θ_a ,后角则为后退接触角 θ_r 。斜面倾斜的角度 θ 称为滚动角,如图3所示。斜面法较前面两种方法操作简单,更适合于在线检测复合绝缘子憎水性,今后工作的重点是实现斜面

法的在线监测复合绝缘子的憎水性。

2 表面张力法

表面张力法^[16-18]使用具有不同表面张力的一组液体以确定绝缘子的憎水性。采用 3 个张力范围内的液体混合物: 低范围(30 ~ 56 mN/m, 20 °C)为甲酰胺和乙二醇单乙醚; 中等范围(58 ~ 73 mN/m, 20 °C)为甲酰胺和蒸馏水; 高范围(73 ~ 82 mN/m, 20 °C)为蒸馏水和氯化钠。将少量混合物轻轻喷洒在直径大约为 25 mm 的试样表面上, 记录液体连续层分裂为小液滴所需要的时间。连续层在试样表面保持时间最接近 2 s 的混合物所具有的表面张力被定义为被测试品的表面张力。由于表面张力法中所使用的部分液体如甲酰胺对人体有害^[16, 19], 目前还没有得到广泛的应用。

表 1 HC 法憎水性分级(HC 值)判断标准

HC	试样表面水滴状态描述
HC1	仅形成分立的小水滴, 当垂直于其表面观察时, 它的形状差不多是圆形的。 相应的这些小水滴的 $\theta_r = 80^\circ$ 或更大些。
HC2	仅形成分立的小水滴, 其表面的大部分是由这样的小水滴所覆盖, 当垂直于其表面观察, 还是规则的圆形, 但离圆形形状有些偏离。 相应的这些小水滴大部分的 $\theta_r: 50^\circ < \theta_r < 80^\circ$ 。
HC3	仅形成分立的小水滴。其表面的大部分由不规则形状的小水滴所覆盖。 相应的这些小水滴大部分的 $\theta_r: 20^\circ < \theta_r < 50^\circ$ 。
HC4	观察到的由水珠或水膜覆盖的面积小于 10%。 观察到分立的小水滴和来自水膜的湿润的痕迹(即某些小水滴 $\theta_r = 0^\circ$)。
HC5	观察到的由水珠或水膜覆盖的面积大于 10% 但小于 90%。 观察到分立的小水滴和来自水膜的湿润的痕迹(即某些小水滴 $\theta_r = 0^\circ$)。
HC6	观察到的由水膜覆盖的面积大于 90% 但小于 100% (即仍然能观察到很小的未湿润面积/点/痕迹)。
HC7	在观察的整个面积上形成了连续的水膜。

3 喷水分级法

喷水分级法^[20]是由瑞典输配电研究所 (Swedish Transmission Research Institute, STRI) 提出。具体方法是: 用普通喷壶对试样表面喷洒水雾, 观察水珠在试样表面的分布情况, 对比分级判据和标准图

片, 得出绝缘子表面的憎水性状况。根据运行状态下倾斜伞裙表面水滴的后退角 θ_r (倾斜表面水珠的接触角之一) 和水膜的覆盖面积两个物理量联合判断。憎水性分为 7 级 (分别表示为 HC1 ~ HC7), HC1 级对应憎水性很强的表面, HC7 级对应完全亲水性的表面。憎水性分级 (HC 值) 判断标准见表 1。

在 IEC/TS 62073-2003^[18] 中, “HC 等级”被重新命名为 “WC 等级” (wettability class), 但 WC 各等级所对应的绝缘子表面湿润状态与 HC 等级所对应的完全一致^[16]。

喷水分级法操作简单, 易于现场测试, 目前国内较为广泛地采用这种方法^[2, 21-28]。但是该方法是一种人工肉眼判断的方法, 对人的主观依赖性很大, 只适合于做定性的分析^[6], 因此要寻找更为客观可靠的憎水等级评判方法。

4 基于数字图像处理的憎水等级评判

近年来, 随计算机技术和数码技术的飞速发展, 运用图像处理方法评判复合绝缘子憎水等级的方法得到快速应用和发展。基于数字图像处理的憎水等级评价方法基本步骤如图 4 所示。首先进行图像采集, 然后对图像进行增强去噪处理, 使水珠边缘更加清晰, 然后对水珠或水迹区域进行分割, 提取水珠或水迹的边界, 最后对水珠边界的特征量进行提取, 针对提取的特征量实现憎水性的分级处理。

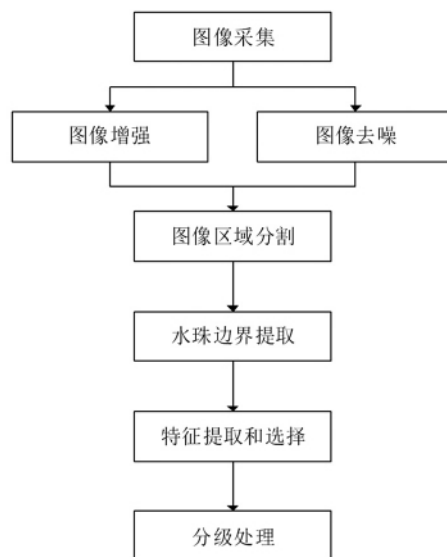


图 4 基于数字图像处理憎水评价基本步骤

4.1 特征值提取

准确地提取水珠边界后, 为了实现复合绝缘子

憎水等级的定量评判,必须对水珠的特征值进行提取。在不同憎水性复合绝缘子表面,水珠的特点如表 2 所示。

根据表 2 中的水珠特点,得到描述水珠的各种特征量。其中,文献[38,55]设正整数 N 为识别出的水珠轮廓数, S_i 、 C_i 、 (x_i, y_i) 分别为水珠 i ($0 \leq i \leq N$) 的面积、周长和包围矩形的中心坐标,通过水珠在不同憎水表面,提出了以下特征量。

表 2 水珠特点

憎水等级	憎水性最好	憎水性下降	憎水性完全丧失
形状	孤立的球型水珠	水珠扁平、变得不规则	水膜
单个水珠/水膜体积个数	最小 很多	变大 个数减小	一片水膜 连成一片
水珠照片特点	透明而且反光,中间部分要明显比整个试样表面更为明亮,反光能力下降 而水珠的边缘部分则要比整个试样表面更暗	部分灰度级出现的频率减小	反光能力严重下降
灰度频率	灰度值分布于各个灰度级	部分灰度级出现的频率减小	集中在某个灰度级
灰度信息量	信息量大	信息量减小	信息最小

水珠覆盖率 $cover$ 为

$$cover = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{LW}$$

水珠分布均匀度 $dis - uni$ 为

$$dis - uni = \frac{\sum_{row=0}^2 \sum_{col=0}^2 \frac{n(row, col)}{N} \ln\left(\frac{n(row, col)}{N}\right)}{Z},$$

其中 Z 是归一化因子 $n(row, col)$ 由下式计算
 $n(row, col) =$

$$\left| col * \frac{L}{3} \leq x_i \leq (col + 1) * \frac{L}{3}; row * \frac{W}{3} \leq y_i \leq (row + 1) * \frac{W}{3} \right|$$

水珠大小均匀度 $area - uni$ 为

$$area - uni = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})}{N\bar{S}}, \text{ 其中 } \bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{N}$$

水珠平均圆度 $plum$ 为

$$plum = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{4\pi S_i}{C_i^2}}{N}$$

另外,由瑞典的 M. Berg 提出的均焔法^[56,57]采用通过提取图片的亮度信息,计算出标准均焔对复合绝缘子憎水性进行评判。但是,由于拍摄现场的光照强度、拍摄角度以及绝缘子的污秽背景均不可控,利用标准均焔表征憎水性等级的效果并不好。

目前,应用比较广泛且很实用的特征值提取方法是形状因子法和最大面积法。

由日本的 T. Tokoro 提出的形状因子法^[58,59]是根据 f_c 的值来判断憎水性等级(HC), f_c 定义为

$$f_c = \frac{4\pi a}{c^2}$$

式中 a 是最大水珠的面积; c 是最大水珠的周长。

为了提高判别的准确率,在形状因子的基础上,文献[42,49]根据最大水珠面积与憎水性好坏的对对应关系提出最大面积法。最大面积比 k 定义为

$$k = \frac{\text{最大水珠(或水迹)的面积}}{\text{图像总面积}}$$

由于形状因子法和最大面积法特征值的简单性和易操作性,广泛地被利用于复合绝缘子憎水等级评判工作中。

另外,在充分考虑复合绝缘子的憎水丧失以及憎水迁移等特性的基础上,文献[60]利用清洁表面接触角、染污表面接触角、憎水恢复接触角、憎水转移接触角等 4 个特征值对复合绝缘子憎水性进行判断。该方法充分考虑了复合绝缘子的憎水丧失及其迁移等特性,能够有效客观地对复合绝缘子憎水性进行评判。

4.2 憎水分级

在获取到水珠/水迹的特征值之后,中心任务就是利用这些参数来确定憎水等级。

当提取的特征值只有 1 个时,根据大量的憎水图片统计以及憎水等级标准图片对照的结果,对憎水等级进行分类。目前应用比较广泛的是采用形状因子法^[58,59]、改进的形状因子法、均焔法^[56,57]进行憎水等级判别。根据特征值属于不同的取值范围确定憎水级别,这种方法易受噪声干扰的影响,图像获取时采光和拍摄距离、图像处理的阈值和噪声都对提取的特征值有较大的影响,因此,利用 1 个特征值实现憎水等级评判时存在很大的误差。

当提取的特征值较多时,国内外目前有两种方法进行评判。第一种方法是利用考虑各个因素综合评判复合绝缘子的憎水等级,如文献[60]利用四因

素法(即清洁表面接触角、染污表面接触角、憎水恢复接触角、憎水转移接触角)实现憎水等级评判。第二种方法是利用分类模型,国内外在憎水分级中应用的分类模型有K-近邻法、支持向量机法等。文献[61]利用K-近邻法对憎水性进行分类,文献[38]利用支持向量机实现憎水性的分级。多个特征值的分类算法客观精确,分级的误差比较小,能够有效地客观地评判复合绝缘子的憎水性。因此,利用多因素方法评判复合绝缘子憎水性是今后进行复合绝缘子憎水评级工作的重点。

5 其他方法

文献[29]直接通过湿润条件下的表面电阻或泄漏电流来表征材料的憎水性。文献[30,31]利用高聚合物表面荷电能力的强弱来定量描述有机材料的憎水性,这两种方法能够有效评判复合绝缘子表面憎水性,但是目前很少被使用。

6 总 结

评价憎水分级方法优劣的标准是:准确、客观、快速、方便地对实现憎水性分级处理。国内外现有的憎水等级的评价的方法很多,但是目前所取得的效果不甚理想。

对于传统的复合绝缘子憎水等级评判工作,倾向使用动态接触角法实现憎水性的分级,今后研究重点是实现该方法的在线检测,开发实用便利的在线检测憎水等级装置。

对于基于数字图像处理的复合绝缘子憎水等级评判工作,如何准确快速地提取水珠的真实边界是未来工作的重要方向,同时为了客观反映憎水等级,实现多因素多参量综合评判憎水等级成为今后工作的重要方向。

参考文献

- [1] 崔江流,宿志一,易辉. 我国硅橡胶合成绝缘子的应用与展望[J]. 中国电力,1999,32(1):38-41.
- [2] 胡毅. 送电线路绝缘子运行性能及分析[J]. 高电压技术,2001,27(2):33-35.
- [3] 刘泽洪. 复合绝缘子使用现状及其在特高压输电线路中的应用前景[J]. 电网技术,2006,30(12):1-7.

- [4] 熊俊. 污湿环境中复合绝缘子泄漏电流特性与湿润模的研究[D]. 北京:华北电力大学,2008.
- [5] 徐志钮,律方成,赵鹏,等. 拟合方法用于硅橡胶静态接触角的测量[J]. 高电压技术,2009,25(10):2475-2480.
- [6] 黄晓明. 基于图像分析技术的复合绝缘子憎水性判断方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2008.
- [7] 张世文,廉育英. 憎水性与接触角的测量[J]. 现代计量测试,1994(3):36-41.
- [8] T. Tokoro, T. Inoki, E. Wada, et al. Diagnosis of Degradation Condition of Silicone Rubber Using Hydrophobic Surface Analysis[C]. ISEIM 2008: Proceedings of 2008 International Symposium on Electrical Insulating. Ed. Eds., 2008(1):89.
- [9] 王晓东,彭晓峰,陆建峰,等. 粗糙表面接触角滞后现象分析[J]. 热科学与技术,2003,2(3):230-234.
- [10] 王晓东,彭晓峰,王补宣. 动态湿润与动态接触角研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报,2003,11(4):396-404.
- [11] 王晓东,彭晓峰,闵敬春. 接触角滞后现象的理论分析[J]. 工程热物理学报,2002,23(1):67-70.
- [12] H. Hillborg, U. W. Gedde. Hydrophobicity Changes in Silicone Rubbers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5):703-717.
- [13] HOMMA Hiroya, LEE Chang-Ryong, KUROYAGI Toshiyuki. Evaluation of Time Variation of Hydrophobicity of Silicone Rubber Using Dynamic Contact Angle Measurement[C]. Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Ed. Eds., 2000(1):637-640.
- [14] 田建华,袁建州. 合成绝缘表面憎水性分级方法介绍[J]. 华北电力技术,1998(5):35-37.
- [15] 田建华. 合成绝缘子憎水性分级试验方法[J]. 电力建设,1998(6):56-57.
- [16] 赵林杰,王浩锐,李成榕,等. 复合绝缘子憎水性带电检测技术的发展与应用[J]. 南方电网技术研究,2007,3(2):38-41.
- [17] Guidance on the Measurement to Wettability of Insulator Surfaces[S], 2003.
- [18] IEC/TS 62073-2003. Guidance on the Measurement to Wettability of Insulator Surfaces[S]. International Electrotechnical Commission, 2003.
- [19] 邱志贤. 高压复合绝缘子及其应用[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [20] STRI Guide 92-1. Hydrophobicity Classification Guide

- [Z]. Swedish Transmission Research Institute, 1992.
- [21] 李震宇, 崔吉峰, 周远翔, 等. 现场运行复合绝缘子憎水性的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(1): 24-26.
- [22] 李名加. 10 kV 合成绝缘子沿面电场分布计算及其憎水性变化因素分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- [23] H Janssen, A Herden, HC Kamer. Lmw Components in Silicone Rubbers and Epoxy Resins[C]. High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on Ed. Eds., 1999(1): 23-27.
- [24] 鲁志伟. 复合绝缘材料憎水性和憎水迁移性的度量[J]. 华北电力技术, 1999(12): 50-51.
- [25] 张福林, 刘地. 复合绝缘子伞套绝缘结构表面憎水性能特点分析[J]. 电瓷避雷器, 2002(2): 3-5 9.
- [26] 袁检, 张建荣, 吴经锋, 等. 复合绝缘子憎水性机理分析[J]. 绝缘材料, 2002(2): 1-3.
- [27] 鲁志伟, 杨秀媛. 硅橡胶憎水迁移机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 51-55 73.
- [28] 于永清. 丧失憎水性的直流复合绝缘子耐污特性[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 12-15.
- [29] Liang Xidong, Cheng Xupeng, Xue Jiaqi. Effective Contaminant Deposit density a New Concept of the Pollution Level of Composite Insulators[C]. Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Ed. Eds.: Brisbane, 1994(1): 523-525.
- [30] RS Gorur, JW Chang, OG Amburgey. Surface Hydrophobicity of Polymers Used for Outdoor Insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(4): 1923-1933.
- [31] Chang JW, Gorur RS. Surface Recovery of Silicone Rubber Used for HV Outdoor Insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(6): 1039-1046.
- [32] 姜联堂, 甘露, 林均. 基于图像分析绝缘子憎水性分级系统[J]. 鄂州大学学报, 2007, 14(5): 5-7.
- [33] 程养春, 刘斌, 李成榕, 等. 超高压直流线路复合绝缘子检测方法的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 47-52.
- [34] 赵林杰, 李成榕, 熊俊, 等. 基于带电检测的复合绝缘子憎水性评价[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 135-142.
- [35] 吴旭涛. 运行中复合绝缘子憎水性能的影响因素[J]. 宁夏电力, 2003(4): 45-46 57.
- [36] 宋伟, 赵林杰, 李成榕, 等. 复合绝缘子在线检测技术的发展[J]. 高电压技术, 2005, 33(5): 28-30.
- [37] 董文婷. 边缘检测方法在憎水性图像分析中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [38] 王泉德, 文必洋, 王先培. 采用图像识别和分类判定绝缘材料憎水等级[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(1): 93-98.
- [39] 周彬, 孙毅, 祁兵. 硅橡胶复合绝缘子憎水性图像分割算法[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2008, 13(1): 19-22.
- [40] 周彬. 基于数学形态学的图像处理算法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [41] 唐良瑞, 董文婷, 孙毅. 基于模糊数学的绝缘子憎水性图像边缘检测算法[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 35-38 43.
- [42] 唐良瑞, 赵春辉, 祁兵. 基于蚁群算法的绝缘子憎水性等级判别方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1322-1327.
- [43] 赵春辉. 憎水性图像处理算法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [44] 于文文, 孙毅, 唐良瑞. 基于区域相似特征的憎水性图像分割算法[J]. 计算机应用, 2008, 28(7): 1747-1749, 1763.
- [45] 王香菊. 图像去噪方法及应用[J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(27): 213-215.
- [46] 陶维亮, 王先培, 刘艳, 等. 复合绝缘子接触角的图像处理检测[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(2): 232-237 244.
- [47] 祁兵, 唐良瑞, 赵春辉. 绝缘子憎水性图像水珠/水迹形状提取算法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 19-24.
- [48] T Peli, D Malah. A Study of Edge Detection Algorithm [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1982, 20(1): 1-21.
- [49] 唐良瑞, 张晶, 孙毅. 基于信息测度和 Hausdorff 距离的复合绝缘子憎水性等级判定[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 35-41.
- [50] 祁兵, 唐良瑞, 张晶. 绝缘子憎水性图像检测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 120-124.
- [51] 张晶. 基于 FCM 的绝缘子憎水性图像处理方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [52] 唐良瑞, 于文文, 陆俊. 基于 S-L 模型的憎水性图像水珠形状提取[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 37-39.
- [53] 于文文. 基于 Snake 模型的憎水性图像分割算法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.

(下转第76页)

影响较小,随着装机容量的逐渐增加,谐波含量可能超过国标要求,需要装设消谐装置解决此类问题。

(3) 针对分散式风电接入地区电网造成负荷预测、电网规划和运行的不确定性,提出进一步提高分散式风电功率预测准确率,根据历史运行情况,逐步将分散式风电出力纳入发电计划安排。同时根据政府地区发展规划,着眼于长远规划,根据地区风资源特性,合理研究分散式风电接入配套工程建设,避免临时性分散式风电建设打乱了地区电网建设的整体规划。

5 结 语

今后,分散式风电接入会越来越广泛,其主要的发展趋势是将基于多个布点的分散式风电系统接入同一配电网中进行统一调度、相互协调,为系统提供高峰电能以提高系统的稳定性和供电可靠性。虽然中国现状是风电模式还是传统集中接入,但是风电接入的发展方向将是分散式风电接入模式。

前面主要针对分散式风电接入后对地区电网运行带来的各种问题,分析分散式风电的特点、优点、接入方式以及运行方式对系统电压、继电保护动作情况、负荷预测等方面的影响。通过对分散式风电接入后带来的各种问题进行仔细分析,为今后分散

式风电的大规模发展提供了一定的理论指导和相关建议。

参考文献

- [1] 国家能源局. 国能新能[2011]226 国家能源局关于分散式接入风电开发的通知[R]. 2011.
- [2] 国家能源局. 国能新能[2011]374 国家能源局关于印发分散式接入风电项目开发建设指导意见的通知[R]. 2011.
- [3] 王敏,丁明. 含有分布式电源的配电网系统规划[J]. 农村电气化, 2003 (7): 19-20.
- [4] 王建,李兴源,邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 90-97.
- [5] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 35-40.

作者简介:

孙立成(1982),男,工程师,研究方向为新能源、分布式电源规划运行研究;

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

赵志强(1977),男,高级工程师,研究方向为电力系统规划运行。

(收稿日期:2012-12-29)

(上接第68页)

- [54] Qiuxia Yang, Liangrui Tang, Wenwen Yu. Waterdrops Shape Extraction of Hydrophobic Image Based on Snake Model [C]. Image and Signal Processing, 2009, Tianjin 2009(1): 1-3.
- [55] 彭亮. 水珠边缘检测算法的研究及其在电力行业中的应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [56] Marcus Berg, Rajeev Thottappillil, Viktor Scuka. A Digital Image Processing Method for Estimating the Level of Hydrophobicity of High voltage Polymeric Insulating Materials [C]. 1999 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Ed. Eds, 1999(1): 756-762.
- [57] M Berg, R Thottappillil, V Scuka. Hydrophobicity Estimation of HV Polymeric Insulating Materials Development of a Digital image Processing Method [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 2001, 8(6): 1098-1107.
- [58] TETSURO Tokoro, YIKI Omoto, MASAMITSU Kosaki.

Image Analysis of Hydrophobicity of Polymer Insulators Using PVM. [C]. 2001 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001, (1): 581-584.

- [59] T Tokoro, M Nagao, M Kosaki. Image Analysis of Hydrophobicity of Silicone Rubber Insulator [C]. 1999 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999(1): 763-766.
- [60] Wang Xun, Liang Xidong, Zhou Yuanxiang, et al. Four-parameter Method for Hydrophobicity Judgement and Mechanism of Hydrophobicity Transfer Property [C]. Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, 2003(1): 1222-1225.
- [61] 彭克学,王泉德,王先培. 基于表面喷水图像分析的绝缘子表面憎水性检测方法[J]. 绝缘材料, 2005(1): 47-51.

(收稿日期:2012-12-27)

国网典型设计变电站高低构架出线的防雷保护

张 磊,任德顺,刘成立

(四川电力设计咨询有限责任公司,四川 成都 610016)

摘 要:近年来国家电网公司的“输变电工程典型设计”得到广泛的推广应用,其中新型变电站设计中多采用高低构架联合出线,减少了占地,但会带来变电站出线档防雷保护设计复杂的问题。利用 Matlab 设计出对架空地线的防雷范围进行图像化显示和计算机辅助分析的应用软件,使用方法简洁。在多个变电站设计中得到应用,具有良好的推广价值。

关键词:典型设计;高低构架;架空地线;Matlab;防雷保护

Abstract: The typical design of power transmission and transformation project of State Grid Corporation of China is widely used recently. In order to reduce the area, the high-low framework is adopted in the design of new substation. But it will lead to the complicated design of protection against lightning in outgoing line of substation. Based on Matlab, a computer-aided analysis and displaying software is developed for the protection against lightning of overhead grounding wire in substation, which is simply to use. This software has been promoted in the design of several substations.

Key words: typical design; high-low framework; overhead grounding wire; Matlab; protection against lightning

中图分类号: TM744 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2013)02-0069-04

输变电工程典型设计是国家电网公司“三抓一创”重点工作之一;是国家电网公司实施集约化管理,统一工程建设标准、规范建设管理、合理控制造价的重要手段;是国家电网公司建设“资源节约型、环境友好型”社会,大力提高集成创新能力的重要体现^[1]。

随着输变电工程典型设计的推广使用,新建变电站逐渐采用高低构架联合出线,能减少占地,具有良好的经济和社会效益。但其带来的变电站出线档地线防雷保护问题,如采用传统方法,计算和绘图都较为复杂,耗时且易出错。为此,公司(四川电力设计咨询有限责任公司,下同)基于 Matlab 开发了架空地线保护范围的图形化辅助软件,提高了设计效率,保证了设计质量。该软件应用在公司所设计的数个变电站中,取得了良好的效果。

1 新型变电站的高低构架出线

传统变电站占地面积较大,在经济发达地区需占用较多基本农田,在川西高山地带,山高坡陡,地形复杂,大于 30°的山坡比比皆是,仅有的山间平坝多为人口密集点和耕作区,站址选择更为困难。

“输变电工程典型设计”是由国家电网公司基

建部牵头,联合各省电力公司推广应用的变电站典型优化设计。“资源节约型、环境友好型、工业化”(简称“两型一化”)是国家电网公司对新建变电站工程的实施细则要求^[1]。

变电站典型设计配电装置为户外 GIS,场地较小,采用高构架和低构架联合出线,是合理和经济的,同时减少占地面积和节省用钢量,降低了工程造价,外观简单、整齐、美观,也为电气设备进一步紧凑布置创造了条件,达到了整体优化的效果^[2]。

公司在川西地区的多个变电站采用高低构架设计,减少占地面积,取得了良好的经济和社会效益。

2 高低构架地线的保护范围

但是,高低出线构架布置方式存在着地线保护范围问题,因受后侧高构架导线影响,前侧低构架无法按常规方式布置地线,整个构架出线的防雷保护只能依靠高构架上布置的地线。如果前侧低构架出线偏角大,将会偏出地线保护范围,造成严重的安全隐患。

因双排高低构架的出线方式比较复杂,在设置地线时,需综合考虑高构架、低构架布置的联合保护范围,以及低构架地线与高构架导线的安全距离。

如何设定地线的根数、高度、距离、安装位置等,需要进行大量计算,用传统的方法,无法精确计算每一点,为保证安全,往往采用提高地线支架高度和增加地线根数,造成浪费。

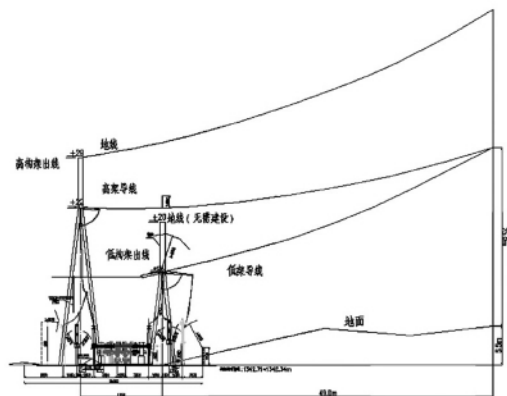


图 1 某 220 kV 变电站高低构架出线断面图

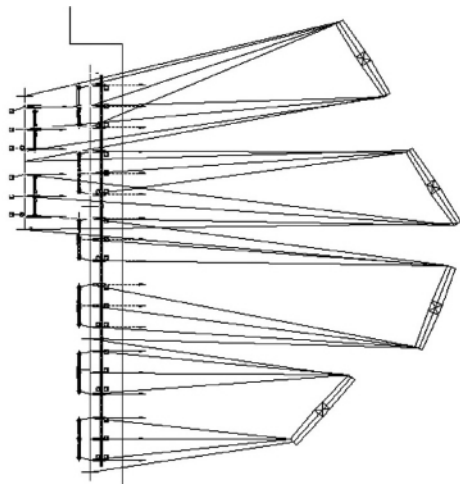


图 2 某 220 kV 变电站高低构架出线平面图
双架空地线的保护范围如图 3^[3-5]。

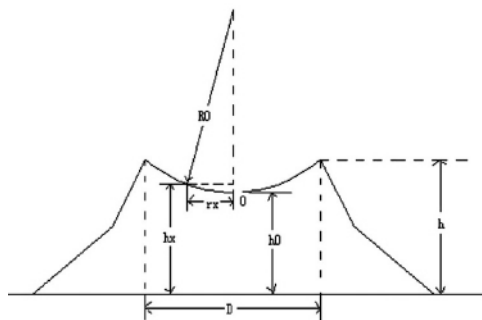


图 3 两地线间的防雷保护范围

因此,公司使用 Matlab 软件,进行高低构架地线保护的图像显示和分析计算,在变电站设计中取得了良好的效果。

3 基于 Matlab 的地线保护范围的图像显示和分析

3.1 Matlab 简介

Matlab 为美国 Math Works 公司于 1982 年推出的高性能数值计算和可视化软件,可用于概念设计、算法开发、建模仿真、实时实现理想的集成环境等。它具有编程效率高、程序设计灵活、图形功能强等优点,已经发展成为应用于多种学科、多种工作平台的大型软件^[6,7]。

Matlab 语言的强大的数值运算功能、数据可视化功能、2D/3D 绘图功能都为数据分析和处理提供了可靠的保证。利用 2D/3D 绘图功能可对数据结果进行图像化显示。图像结果处理后利用鼠标拖动可任意变换观察角度以寻找最佳观察角度,这一功能也是很多其他语言不具备的。

3.2 Matlab 主程序和 GUI 界面设计

公司利用 Matlab 编制主程序,在三维空间中绘制导地线位置及架空地线保护范围,在图形中直观显示。同时,计算也给出导线是否在保护范围之内,并给出导线保护范围的具体位置。

架空地线保护范围计算和分析主程序如下。

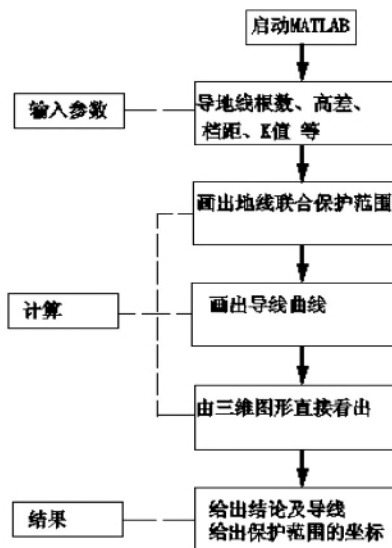


图 4 Matlab 主程序流程

利用 Matlab 程序的图形用户界面 (GUI) 功能,可以设计出方便用户使用的输入式界面,输入数据分为基本参数、地线参数和导线参数 3 种,其界面如图 5。

3.3 架空地线保护范围的图像显示

借助于 MTALAB 的强大的计算和图像处理能力,可以把国标中架空地线防雷范围用图像表示出来。图 6 是双地线保护范围的计算结果。利用 Matlab 中的函数功能把双架空地线的保护范围表示为

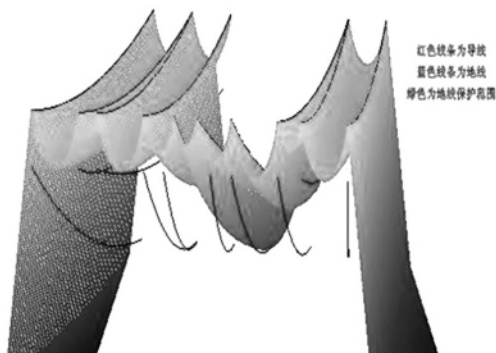


图 10 高低构架地线保护图

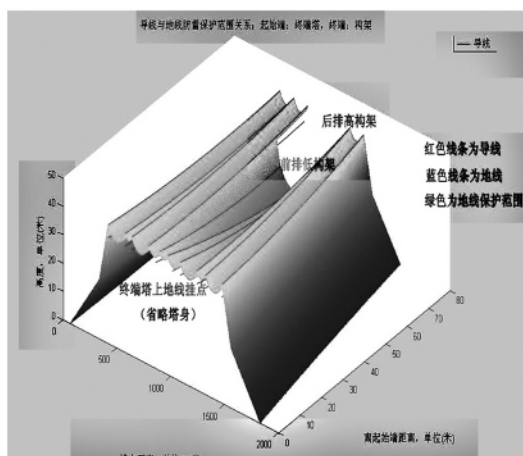


图 11 高低构架地线保护图

5 结 语

国网公司的变电站典型设计符合“资源节约型、环境友好型、工业化”的设计要求,具有良好的经济效益和社会效益。其高低构架出线的地线保护范围

与常规设计不同,传统计算方法复杂且误差较大。

公司在 Matlab 平台下利用其强大的数值计算能力,开发计算绘图软件,完成架空地线架设的理论计算,并能直观方便进行设计调整,满足防雷安全。

在公司设计的多个变电站高低构架出线配合中,使用该软件进行计算验证,取得了较好的效果。

参考文献

- [1] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程典型设计 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] 肖继峰. 现代新型变电站—浅谈 500 kV 圣泉变电站的设计 [J]. 华中电力, 2011, 1(24): 11-13.
- [3] DL/T 620-1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合 [S].
- [4] GB 50057-1994 建筑物防雷设计规范 [S].
- [5] 张志涌. 精通 MATLAB 6.5 版 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [6] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册 (第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [7] 孙宇新, 王纪俊. 基于 MATLAB 的避雷针保护范围的计算机辅助分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(6): 63-66.

作者简介:

张 磊 (1977), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为输变电;

任德顺 (1964), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为输变电;

刘成立 (1982), 男, 本科, 工程师, 研究方向为输变电。

(收稿日期: 2012-12-13)

(上接第 39 页)

- [6] 滕松林, 杨校生. 触电漏电保护器及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [7] 武一, 李奎, 岳大为, 等. 消除剩余电流保护动作死区的理论与方法 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 44-49.
- [8] 李奎, 陆俭国, 武一. 消除漏电电流保护死区的新技术及其试验方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(20): 28-32.
- [9] 李春兰, 杜松怀, 苏娟, 等. 一种新的基于小波变换和混沌理论的触电信号检测方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 47-52, 154.
- [10] 李春兰, 苏娟, 杜松怀, 等. 基于小波分析和 BP 神经网络的触电信号检测模型 [J]. 农业工程学报, 2010,

26(S2): 130-134.

- [11] 蔡志远, 庞佳, 陈廷辉. 基于剩余电流和漏电阻抗的漏电保护方法的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 61-64.
- [12] 李奎, 陆俭国, 武一, 等. 自适应漏电保护技术及其应用 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(10): 53-57.
- [13] 李开成, 刘建锋, 黄海煜, 等. 基于 MSP430 单片机的数字式漏电保护器的研制 [J]. 继电器, 2008, 36(8): 64-67.
- [14] IEC 60990-1999, Methods of Measurements of Touch Currents and Protective Conductor Current [S].

(收稿日期: 2012-12-19)

分散式风电接入对地区电网运行影响的研究

孙立成, 赵志强, 王新刚, 常喜强
(新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 分散式风电接入系统运行给地区电网电压、谐波和负荷预测等方面带来了新的挑战。针对目前分散式风电的接入和发展趋势, 开展了对地区电网运行影响的研究。通过对国内其他地区分散式风电接入情况分析, 结合本地区电网接入分散式风电后的实际情况, 说明了分散式风电接入对地区电网带来的影响并提出了分散式风电接入后所需要采取的应对措施和建议。

关键词: 分散式风电; 电压; 谐波

Abstract: The integration of distributed wind power gives a new challenge to the forecasting of voltage, harmonic and load in regional power grid. Aiming at the present integration and development trend of distributed wind power, the research of the influence on regional power grid operation is carried out. Through the analyses on distributed wind power integration in other regions in China, and combined with the actual situation of distributed wind power integration in Xinjiang, the influences of distributed wind power integration on regional power grid are described, and the countermeasures and suggestions after the integration of distributed wind power are put forward.

Key words: distributed wind power; voltage; harmonic

中图分类号: TM715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0073-04

0 引言

随着国家能源局于2011年颁发国能新能[2011]374号《关于印发分散式接入风电项目开发建设指导意见的通知》和国能新能[2011]226号《关于分散式接入风电开发的通知》, 大规模分散式风电接入电网运行将成为后续风电接入的另一种主流接入方式。

新疆风能资源丰富, 风电开发潜力较大。目前, 风电已进入快速发展阶段。至2015年风电总装机规模将达到约5 800 MW, 风电装机占11.51%; 其中分散式风电接入预计将占20%左右, 远景装机容量更多。大规模分散式风电接入电网运行将成为新疆地区电网安全运行又一重要关注的问题之一。面对大规模分散式风电并网运行带来的严峻挑战, 需深入研究电网大规模分散式风电接入带来的影响, 开展研究应对措施和提出相关建议, 这对于电网安全经济运行意义重大。

通过对于分散式风电带来的影响的研究, 使分散式风电接入满足地区电网相关要求。将在保证电网安全、稳定运行情况下尽可能提高风电接纳能力。

1 分散式风电定义及界定标准^[1 2]

定义: 分散式接入风电项目是指位于负荷中心附近, 不以大规模远距离输送电力为目的, 所产生的电力就近接入当地电网进行消纳的风电项目。

界定标准: 分散式接入风电项目应具备以下所有条件。

(1) 应充分利用电网现有的变电站和送出线路, 原则上不新建高压送电线路和110 kV、66 kV变电站, 并尽可能不新建其他等级的输变电设施;

(2) 接入当地电力系统110 kV或66 kV降压变压器及以下等级的配电器;

(3) 在一个电网接入点接入的风电装机容量上限以不影响电网安全运行前提合理确定, 统筹考虑各电压等级的接入总容量, 并鼓励多点接入;

(4) 除示范项目外, 单个项目总装机容量不超过50 MW。

2 分散式风电发电形式及优点

分散式风力发电的形式一般采用风力发电与太

阳能发电、柴油机发电等组合式发电系统,即“风光”、“风油”和“风光油”互补发电。这些系统近年来都有所发展,特别是采用“风光”互补发电系统发电,是未来的发展方向。太阳能与风能在时间上和地域上有着很强的互补性。太阳能和风能在时间上的互补性使“风光”互补发电系统在资源上具有最佳的匹配性,“风光”互补发电系统是资源条件最好的独立电源系统,也是今后相当时期内的发展趋势。

分散式发电具有投资省、占地面积较少、接入方式灵活、能源种类多样等优点。可以在电网未能通达的偏远地区,如高山、草原和海岛等地区,用小型风力发电机为蓄电池充电,再通过逆变器转换成交流电向终端用户供电。

在偏远的负荷突然增长地区,就地安装分散式风电可以避免大量的输配电设备扩容费用;对于用电压力大的负荷中心区域,可以缓解用电压力,延缓电网的扩建或者改建,节约输配电线路的投资。通过合理优化分散式风电的接入位置和接入容量,可以明显降低电网线路损耗,改善电网末端的电能质量。充分利用风能等可再生能源,降低了对一次能源的依赖性,同时还可减少有害物的排放量,减轻对环保的压力。

3 对地区电网运行的影响

随着越来越多的分散式风电接入运行,对地区电网运行带来了一些新的问题,经过计算、仿真分析,主要集中在以下问题。

3.1 对地区电网电压运行稳定性的影响

电压维持在规定电压范围内才能保证电能质量。配电系统的调压规则是以潮流从变电站流向用户为基础的,但在分散式电源接入电网之后,配电系统从放射状结构变为多电源结构,潮流的大小和方

向有可能发生巨大改变,从而使电力系统中某些部分的电压也发生变化。同时分散式风电接入将对系统电压及损耗带来变化,因而需要合理配置接入点。接入点及接入容量大小将会决定分散式风电的运行策略,并影响系统的可靠性指标。因此首先需要进行地区电网潮流计算,分析其对系统电压以及损耗的影响,确定其接入点以及接入容量的大小。

地区电网可以通过调整变压器分接头、投切集中补偿装置(包括并联电容器、同步调相机、静止补偿器)等方式改变系统的电压分布,提高系统终端变电所的母线电压,使得用户电压满足一定的标准。分散式风电的接入将会引起系统潮流分布的变化,由于风电自身随机性、波动性等特点将会造成系统的电压波动较大,给电压调整带来新的影响。

3.2 对地区电网电能质量的影响

由于分散式风电接入距离负荷中心较近,基于风机自身特点将给电力系统带入一定的谐波,对于电压将会造成闪变,根据周边负荷对电能质量的适应性,应加强对于分散式风电并网点的电能质量检测 and 治理工作。

根据 IEC 61400-21 标准,分别对地区电网 4 个接入点在单台 77-1500 直驱风机 3 种运行、启动状态时做了相关计算分析,可得电压闪变值结果如表 1。

表 1 电压闪变值

状态	风机连续运行时电压闪变值	风机切入风速启动时电压闪变值	风机额定风速启动时电压闪变值
A 变电站	0.045	0.021	0.030
B 变电站	0.050	0.020	0.032
C 变电站	0.080	0.017	0.060
D 变电站	0.042	0.022	0.058

通过计算分析,均满足国标要求,但是通过对于

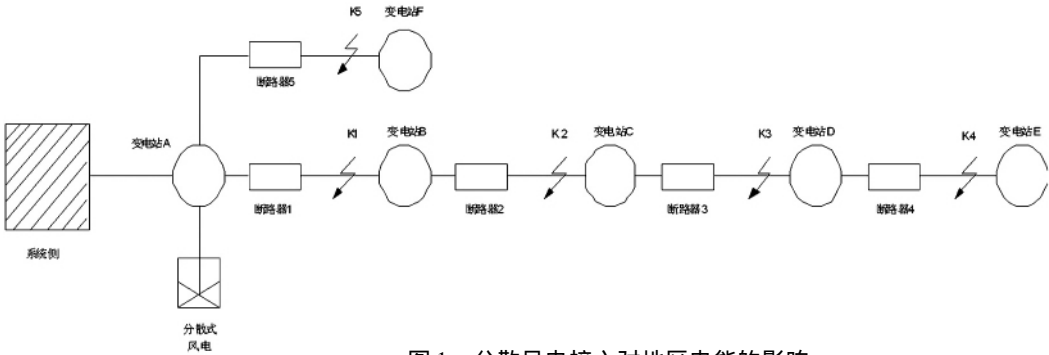


图 1 分散风电接入对地区电能的影响

接入风电装机容量的逐渐增加发现接入点闪变值有增大趋势。根据接入点电网结构特点,当超过一个临界值时则需要借助消谐装置进行谐波治理。

3.3 对地区电网继电保护的影响

分散式风电接入配电网后,在发生短路故障时能提供一定的短路电流,短路电流大小和风电的装机容量、接入位置和故障发生的位置有关,从而对配电网继电保护的选择性和灵敏性有一定影响,可能导致保护误动或拒动(见图1)。

当线路变电站C、D间线路上任一点K3发生短路故障时,故障线路的保护感受到的电流为系统和风电共同提供,此影响是有利的,使原保护更加灵敏。

当线路变电站D、E间线路任一点K4发生短路故障时,应由断路器4动作切除故障线路,但是当风电的容量足够大时,断路器3的保护范围可能延伸至变电站D、E间线路,两个保护都动作,继电保护失去选择性。

当风电容量不是很大,引起的影响不至于使保护误动或拒动时,可不对继电器保护进行更换;而当风电容量较大时,有可能引起保护误动或拒动,此时应重新整定保护值。

3.4 对地区电网运行方式安排的影响

分散式风电接入电网运行后改变了地区电网电源和负荷分布,潮流流向也发生变化,运行方式安排时需要统筹考虑分散式风电接入后的潮流流向和输电线路的承载能力。随着分散式风电接入布点的不断增多,势必在电网设备检修时、负荷转移的情况下调整电网运行方式带来新的问题。

3.5 对地区电网安全自动装置、重合闸等的影响

分散式风电接入电网后对于电网中已经装设的安全自动装置动作行为将有一定的影响,需要综合考虑分散式风电布点情况,调整相关策略满足电网安全运行要求。电网发生故障后,如果分散式风电保护未及时动作,产生孤岛效应,会对自动重合闸产生一定的影响,因此,风电机组需要装设可靠的防孤岛保护装置,如同时装设一套主动式和一套被动式孤岛保护,同时为避免重合闸发生误重合给电网和风电机组带来的冲击,系统侧需要采用检无压型重合闸。

3.6 对地区负荷预测的影响

由于分散式风电接入方式的灵活性,采用风况

满足要求的就近接入原则,接入地区电网的配电网端,达到就地消纳的效果。但是基于风电自身特性,如在短期内,风能就在不断变化,风电发电出力可以等效为地区电网的负负荷。随着风电随机性和波动性的增强,地区负荷预测的准确性也随之降低。当分散式风电出力较大时,由于对于负荷预测影响较大,造成地区电源的发电计划安排不利。

3.7 对地区电网规划的影响

分散式风电的接入会使地区电网的负荷预测、规划和运行与过去相比有更大的不确定性。大量的配电网用户端安装分散式风电为其提供电能,使得配电网规划人员更加难于准确预测负荷的增长情况,从而影响规划^[3-5]。

电网规划问题的动态属性同其维数密切相联,若在出现许多发电机节点,使得在所有可能的网络结构中找到最优的网络布置方案就更加困难。

对于想在配电网安装分散式风电的发电公司,预想维持系统现有的安全和质量水平不变的配电网公司之间的冲突。为了维护系统的安全、稳定的运行,必须使分散式风电能够接受实时调度,要实现该目标,通过电力电子设备对其进行需要的控制和调节,将分散式风电单元集成到现有的配电系统中,这不但需要改进现有的配电自动化系统,还要由被动到主动(电压调整、保护政策、干扰和接口问题)地管理电网。

4 接入后需采取的措施及建议

由于分散式风电接入给地区电网带来了很大的影响,若保证分散式风电的正常发电和地区电网的安全、稳定运行,需要采取一定的措施,具体表现在以下几个方面。

(1) 针对分散式风电接入地区电网后对于系统电压波动较大的问题,提出采用分散式风电接入时需配置一定容量的动态无功补偿装置,并且采用恒电压模式调节,来避免风电发电对地区电压波动较大的问题。

(2) 针对分散式风电接入地区电网对电能质量影响的问题,提出在分散式风电并网点应装设电能质量在线监测装置,可以在风机运行的不同工况下实时监测上网电力的电能质量。经过计算分析,容量较小的分散式风电接入系统,对于系统电能质量

影响较小,随着装机容量的逐渐增加,谐波含量可能超过国标要求,需要装设消谐装置解决此类问题。

(3) 针对分散式风电接入地区电网造成负荷预测、电网规划和运行的不确定性,提出进一步提高分散式风电功率预测准确率,根据历史运行情况,逐步将分散式风电出力纳入发电计划安排。同时根据政府地区发展规划,着眼于长远规划,根据地区风资源特性,合理研究分散式风电接入配套工程建设,避免临时性分散式风电建设打乱了地区电网建设的整体规划。

5 结 语

今后,分散式风电接入会越来越广泛,其主要的发展趋势是将基于多个布点的分散式风电系统接入同一配电网中进行统一调度、相互协调,为系统提供高峰电能以提高系统的稳定性和供电可靠性。虽然中国现状是风电模式还是传统集中接入,但是风电接入的发展方向将是分散式风电接入模式。

前面主要针对分散式风电接入后对地区电网运行带来的各种问题,分析分散式风电的特点、优点、接入方式以及运行方式对系统电压、继电保护动作情况、负荷预测等方面的影响。通过对分散式风电接入后带来的各种问题进行仔细分析,为今后分散

式风电的大规模发展提供了一定的理论指导和相关建议。

参考文献

- [1] 国家能源局. 国能新能[2011]226 国家能源局关于分散式接入风电开发的通知[R]. 2011.
- [2] 国家能源局. 国能新能[2011]374 国家能源局关于印发分散式接入风电项目开发建设指导意见的通知[R]. 2011.
- [3] 王敏,丁明. 含有分布式电源的配电网系统规划[J]. 农村电气化, 2003 (7): 19-20.
- [4] 王建,李兴源,邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 90-97.
- [5] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 35-40.

作者简介:

孙立成(1982),男,工程师,研究方向为新能源、分布式电源规划运行研究;

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

赵志强(1977),男,高级工程师,研究方向为电力系统规划运行。

(收稿日期:2012-12-29)

(上接第68页)

- [54] Qiuxia Yang, Liangrui Tang, Wenwen Yu. Waterdrops Shape Extraction of Hydrophobic Image Based on Snake Model [C]. Image and Signal Processing, 2009, Tianjin 2009(1): 1-3.
- [55] 彭亮. 水珠边缘检测算法的研究及其在电力行业中的应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [56] Marcus Berg, Rajeev Thottappillil, Viktor Scuka. A Digital Image Processing Method for Estimating the Level of Hydrophobicity of High voltage Polymeric Insulating Materials [C]. 1999 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Ed. Eds, 1999(1): 756-762.
- [57] M Berg, R Thottappillil, V Scuka. Hydrophobicity Estimation of HV Polymeric Insulating Materials Development of a Digital image Processing Method [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 2001, 8(6): 1098-1107.
- [58] TETSURO Tokoro, YIKI Omoto, MASAMITSU Kosaki.

Image Analysis of Hydrophobicity of Polymer Insulators Using PVM. [C]. 2001 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001, (1): 581-584.

- [59] T Tokoro, M Nagao, M Kosaki. Image Analysis of Hydrophobicity of Silicone Rubber Insulator [C]. 1999 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999(1): 763-766.
- [60] Wang Xun, Liang Xidong, Zhou Yuanxiang, et al. Four-parameter Method for Hydrophobicity Judgement and Mechanism of Hydrophobicity Transfer Property [C]. Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, 2003(1): 1222-1225.
- [61] 彭克学,王泉德,王先培. 基于表面喷水图像分析的绝缘子表面憎水性检测方法[J]. 绝缘材料, 2005(1): 47-51.

(收稿日期:2012-12-27)

300 MW 机组脱硫系统增容改造

邓启福 朱彬志

(国电深能四川华蓥山发电有限公司 四川 达州 635214)

摘 要: 环境保护已经成为大家日益关注的话题,火力发电厂的烟气排放是否达标排放,关系到自身的生存问题。介绍了 2×300 MW 机组脱硫系统增容改造方案,重点是 DCS 控制系统的改造方案及功能要求。

关键词: 脱硫; 增容; DCS; 改造

Abstract: The environmental protection has been the growing concern, so whether the flue gas emission of thermal power plant meets the standard is concerned to its survival. The reformation scheme of capacity expansion for desulfurization system of 2×300 MW units is introduced, whose emphasis is the reformation scheme and function requirements of distributed control system (DCS).

Key words: desulfurization; capacity expansion; DCS; reformation

中图分类号: TK223 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2013)02-0077-03

0 引 言

近年来,由于电煤紧张,各火电厂燃煤管理部门想方设法,采取多种行之有效的途径,确保电煤供应,保发电保稳定。由于所来煤源种类繁多,这就使得所买入的煤炭和当初设计电厂时提供的煤炭样品出入很大。而且这些多种途径买入的煤炭含硫量很高,这样就造成有些电厂的烟气排放有时会达不到环保要求,同时也给煤炭掺烧(低硫煤与高硫煤混合、高热值煤与低热值煤混合等)带来困扰。为了彻底解决这一问题,国电深能四川华蓥山发电有限公司决定对该厂 2×300 MW 机组脱硫系统进行增容改造。

1 设备及系统概况

国电深能四川华蓥山发电有限公司 2×300 MW 机组现有脱硫系统采用石灰石—石膏湿法(以下简称 FGD)烟气脱硫设备。1 号机组配置吸收塔 1 座 3 台循环浆泵 2 台氧化风机 2 台石膏浆排除泵;2 号机组配置吸收塔 1 座 3 台循环浆泵 2 台氧化风机 2 台石膏浆排除泵;公用系统配置为:2 台湿磨机 2 台称重给料机 2 台埋刮板输送机 2 台氧化风机 2 台真空皮带机 1 个石灰石浆液箱 1 个事故

浆液箱 2 个湿磨机再循环箱 1 个石膏浆液箱。

控制系统采用上海 FOXBORO 公司的 I/A 系统,配置为: 31、32 号机组 FGD 及其公用系统采用集中控制方式,无远程 IO 站,原脱硫工程配置 3 台操作员站和 1 台工程师站。在脱硫控制室内,运行人员以 LCD、键盘和鼠标为主要操作手段,实现对 31、32 号单元脱硫系统及其公用系统正常工况的监视和控制;异常工况的紧急事故处理。

原有脱硫 DCS 共配置有 3 对 CP,均布置在电控楼电子设备间内。配置有控制柜、电源柜、模件柜、继电器柜。原有 DCS 系统各 CP 的 IO 点分配方案见表 1。

表 1 原 OCS 系统各 CP 的 IO 点分配方案表

CP 编号	原有控制对象	原有控制点数
CP6001	31 号机组脱硫系统	683
CP6002	32 号机组脱硫系统	710
CP60033	公用系统	715

原控制室布置: 电控楼 12.83 m 层布置有脱硫控制室、工程师室、电子设备间等。控制室内布置有 3 台操作员站、1 台工业电视主机、2 台打印机和 1 面火灾报警盘;工程师室布置有 1 台工程师站和 1 台打印机。电子设备间布置有原工程 11 面 DCS 机柜、8 面电动门电源柜和 1 面仪表电源柜。为了 FGD 的运行安全,烟气旁路挡板设置了硬手操,按

钮放在操作台上。

2 改造方案

2.1 工艺流程的改造方案

原脱硫系统包含: 吸收剂制备系统、烟道系统、SO₂ 吸收系统、石膏脱水及处置系统、工艺水系统、压缩空气系统、浆液排放系统等

本次改造需要改进和增容的有如下几个系统。

吸收剂制备系统、SO₂ 吸收系统、石膏脱水及处置系统、工艺水系统、工业水系统、压缩空气系统、浆液排放系统; 水工、暖通、电气、热控和施工等所涉及专业的设计; 以及同脱硫系统相连的水、气、浆液等接口的引接。

本次改造主要涉及下列内容。

(1) 增设 28 t/h 出力的湿式球磨机制浆系统一套。增加一个容量为 200 m³ 的石灰石浆液箱和两台石灰石供浆泵。

(2) 增设 50 t/h 出力的真空皮带机 1 套。增加 1 个石膏浆液箱及两台浆液泵 , 更换大容量的石膏旋流器及石膏溢流浆液泵。

(3) 每个吸收塔新增 1 个循环泵 , 新增 1 层喷淋层 , 装在原吸收塔顶喷淋层与除雾器之间的空余空间 , 喷嘴采用单向下喷方式。更换两台大容量的石膏排出泵。

(4) 每塔增加 1 台大容量的氧化风机 , 每塔增加两个上层搅拌器及氧化喷枪。

(5) 新增石灰石粉仓 1 个。增加 1 个埋刮板输

送机。

2.2 控制系统的改造方案

根据华蓥山电厂脱硫系统 DCS 目前的配置和使用状况 , 以及系统扩容需求 , 本次 DCS 系统扩容配置目前 FOXBORO 公司的 MESH 系列 DCS 产品 , 具体方案如下。

(1) 网络

扩容部分系统网络采用福克斯波罗公司最新的网状以太网(Mesh Ethernet Network) MESH。新增 1 台工程师站(AW70) 、1 对控制处理器(FCP270) , 通过冗余的网络接口接入网络 , 网络接口设备采用 1 对冗余的 MESH 网 24 口交换机。该 MESH 网通过 1 对冗余的地址转换卡(ATS) 和原来的 NODE-BUS 连接 , 网络性能大大增强 , 操作系统界面友好性提高 , 硬件通用性提高 , 兼顾了 NODEBUS 网络的可用性和 MESH 网络的先进行。

(2) 工作站

新增 1 套 MESH 网下的 P92 系列(WinXP 操作系统) 工程师站。配置相应的系统软件和历史库软件 , 实现对新增部分设备的组态控制等管理。

(3) 控制站及 I/O 卡件

根据技术要求 , 配置 1 对控制站 , 采用 FOXBORO 公司最新的 FCP270 控制器 , 冗余配置。

I/O 卡件根据 I/O 清单配置 , 采用 FBM200 系列卡件(与原系统相同) 。根据技改方案 I/O 清单以及对 I/O 卡件配置的要求 , 现场 I/O 配置如表 2。

(4) 机柜

根据上述系统设备和 I/O 点数要求 , 脱硫控制

表 2 DCS I/O 摘要与配置

信号类型		使用			提供数量				
		数量	剩余 10%	总计	数量	剩余 %	I/O 模块 类型	I/O 模块 数量	通道 数量
SUM									
非冗余	模拟输入 (4 - 20 mA , 8Pts)	47	5	52	56	19.15	FBM201	7	8
非冗余	模拟输出 (4 - 20 mA , 8Pts)	7	1	8	8	14.29	FBM237	1	8
非冗余	数字输入 (16 Pts)	286	29	315	320	11.89	FBM207	20	16
非冗余	数字输出 (16 Pts)	162	17	179	192	18.52	FBM242	12	16
非冗余	热电阻输入 (4 - 20 mA , 8Pts)	44	5	49	56	27.27	FBM203	7	8
总计		546	57	603	632	15.75	FBM2XX	47	

室和工程师室布置不变,由于系统和设备的增加,电子设备间相应增加1面DCS主机柜,用于安装新增的网络设备(MESH交换机)和控制器(FCP270)等、2面模件柜、2面继电器柜。新增的盘柜布置在电子设备间的备用盘位上。新增的1对ATS卡件安装在原有CP60的空槽位中。另外,新增各DCS机柜电源接自原有DCS电源柜备用回路。

(5) 扩展性

根据本次扩容改造的需求,本技术协议配置的设备完全可满足技术要求,并未利用原有的DCS设备。同时,也实现了新增设备的DCS控制软件与原系统软件的整合。

2.3 控制系统功能要求

DCS系统主要具备3个功能:数据采集和处理系统(DAS)、模拟量控制系统(MCS)及顺序控制系统(SCS)。DCS系统控制的具体范围主要包括下列系统。

1) 数据采集系统(DAS)

数据采集和处理系统(DAS)的基本功能包括:数据采集、数据处理、操作显示、成组显示、画面显示、棒状图显示、报警显示、事故顺序(SOE)记录、跳闸一览表、事故追忆、性能与效率计算和经济分析、打印制表、屏幕拷贝、历史数据存储和检索等。技改后新增的设备都将纳入DCS的DAS系统。

该系统监测的主要参数有以下5点。

- (1) FGD装置工况及工艺系统的运行参数;
 - (2) 主辅机的运行状态;
 - (3) 主要阀门的开关状态及调节阀门位置信号;
 - (4) 电源及其他需监视的独立设备的运行状态;
 - (5) 主要的电气参数等。
- 2) 主要闭环调节回路(CCS)
石灰石加浆调节。
 - 3) 主要顺序控制(SCS)功能组
脱硫系统启动、停止顺序控制、除雾器清洗、石

灰石制浆系统顺序控制、石膏脱水系统顺序控制等。技改后,将新增循环浆泵、真空皮带、石灰石贮运、石灰石浆液制备、氧化空气等顺序功能子组以满足扩容后的设备监控需要。

4) FGD系统的联锁保护

FGD装置的保护动作条件:FGD进口温度过高、进口压力过高、出口压力过高、增压风机故障、换热器故障、循环浆泵投入数量不足等。

技改后,新增阀门、泵和电机等控制对象的联锁保护功能都将纳入到扩容后的DCS控制系统中。

5) 历史库

利用旧系统的历史库,将新系统中重要的点加入到旧系统的历史库中。

3 改造后的效果

在脱硫增容改造工程完成后,经过168h的连续运行,各设备运转正常。并在2011年8月13日至16日对31号机组进行了增容改造性能考核试验,正常运行时脱硫效率达到了99%,综合脱硫效率(算上升停炉时未投入脱硫系统)达到了92%以上。

参考文献

- [1] GWPB 3-1999 锅炉大气污染物排放标准[S].
- [2] GB 13223-2003 火电厂大气污染物排放标准[S].
- [3] IEC 255-22 量度继电器和保护装置的电气干扰试验[S].
- [4] DL/T 657-1998 火力发电厂模拟量控制系统在线验收测试规程[S].
- [5] DL/T 658-1998 火力发电厂顺序控制系统在线验收测试规程[S].
- [6] DL/T 659-1998 火力发电厂分散控制系统在线验收测试规程[S].

(收稿日期:2012-12-13)

节约能源 保护环境

吸收塔浆液密度高对脱硫系统的影响及控制措施

兰 江

(珙县电厂 ,四川 珙县 644500)

摘 要: 介绍了珙县电厂 2×600 MW 机组脱硫系统自投运以来,脱硫吸收塔浆液密度高对脱硫系统安全、稳定运行及达标排放的影响,针对现场实际进行分析,并提出对吸收塔密度高的控制措施,通过一系列改进措施后效果明显,使脱硫系统安全可靠得到明显的提高,有效地保证了脱硫效率和投运率。

关键词: 湿法脱硫; 浆液密度; 影响; 投运率; 措施

Abstract: The influences of high slurry density of absorption tower on the safe and stable operation and the standard - meeting emission of desulfurization system have been introduced since the desulfurization system of 2×600 MW units being put into operation. Aiming at the analysis of the actual situation in the field, the control measures for the high density of absorption tower are put forward. Through a series of improvement measures, the effect is obvious, the security and reliability of desulfurization system are improved, which effectively ensures the desulfurization efficiency and the rate of putting into operation.

Key words: wet desulfurization; slurry density; influence; rate of putting into operation; measures

中图分类号: TK217 文献标志码: B 文章编号: 1003 - 6954(2013)02 - 0080 - 04

0 引 言

随着国家和地方省市一系列节能减排政策的出台,对火电厂烟气脱硫系统的正常稳定运行和达标排放要求越来越高,如何保证脱硫系统的安全稳定运行对火电厂而言至关重要。在石灰石 - 石膏湿法烟气脱硫中,吸收塔浆液密度是确保脱硫系统安全、经济及稳定运行的重要参数,吸收塔浆液密度控制不当会给脱硫系统带来严重的后果。珙县电厂 2×600 MW 机组烟气脱硫系统自投运以来,由于各种因素造成吸收塔浆液密度居高不下,严重影响脱硫装置的安全稳定运行。对吸收塔浆液密度高的危害、原因进行认真分析,并有针对性地提出控制解决措施,从而确保脱硫系统的安全稳定运行。

1 脱硫系统概况

珙县电厂 2×600 MW 机组烟气脱硫项目是与主机同步建设的工程,由中国华电工程(集团)有限公司引进的 M. E. T 烟气脱硫技术,采用石灰石 - 石膏湿法,进行全烟气脱硫,采用一炉一塔模式,无 GGH,引风机和增压风机合用,设计脱硫效率不低于 96.2%。1 号、2 号炉脱硫装置分别于 2011 年 2 月、

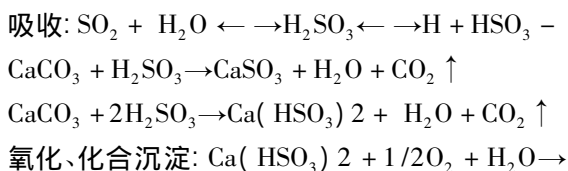
8 月与主机同步完成 168 h 试运。

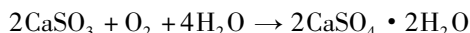
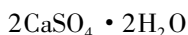
2 石灰石 - 石膏湿法烟气脱硫工艺

珙县电厂 2×600 MW 机组烟气脱硫工程采用一炉一塔的石灰石 - 石膏湿法脱硫工艺。从锅炉出来的烟气经电除尘器除尘,再经引风机升压后直接进入吸收塔内,原烟气在吸收塔内与喷淋层喷射的浆液逆向接触,原烟气中的 SO_2 与被吸收塔浆液循环泵打入喷淋层喷淋下来的石灰石/石膏浆液逆流接触发生化学反应,生成亚硫酸钙(CaSO_3),并被氧化风机鼓入的空气强制氧化成硫酸钙,结晶后生成石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),经过处理的烟气经除雾器除去液滴后以 50°C 左右的温度进入烟囱排向大气。

充分洗涤烟气后的浆液被收集在吸收塔浆池中,吸收塔浆池分为氧化区和结晶区。在氧化区,氧化空气通过空气分配系统被鼓入浆液中,使浆液中生成的亚硫酸钙氧化形成石膏。在结晶区,细的石膏颗粒变大,形成易于脱水的大晶体。

主要化学反应如下。





吸收塔石膏浆液通过石膏浆液排出泵,送至石膏浆液旋流站进行一级脱水,石膏浆液旋流站底流含固量约50%,进入真空皮带脱水机给料箱,通过真空皮带脱水机给料泵送至真空皮带脱水机进行二级脱水,脱水后的产物为含水量小于10%的石膏,经皮带输送机送至石膏仓。

石膏脱水系统共设置2台石膏水力旋流器,为单元制配置,每台设置旋流子7个(6用1备),分别对应2座吸收塔。设置2台真空皮带脱水机共用,每台真空皮带脱水机出力为2台锅炉的100% BM-CR工况的75%。

3 吸收塔浆液密度高的危害

3.1 对设备、管道及电耗的影响

当吸收塔浆液密度升高时,会造成浆液循环泵、石膏浆液排出泵、吸收塔搅拌器电流增加、电机线圈温度升高,从而造成循环泵、石膏排出泵、吸收塔搅拌器等工作负荷增大,电耗增加。浆液密度升高后对浆液循环泵、石膏浆液排出泵、吸收塔搅拌器、浆液循环管道、石膏排出管道等冲刷、磨损增加,造成设备出力下降,管道泄漏,严重时造成设备损坏。

3.2 对吸收塔内设备及浆液循环泵的影响

当吸收塔浆液密度高时,烟气中携带的石膏会沉积在最上层喷淋管上,造成最上层的喷淋管承重增加。同时还会造成喷淋管内石膏沉积,循环泵对喷淋管的压力增大,导致喷淋管组承载力加大,当承载力大到一定程度后,会导致喷淋管组坍塌。

当吸收塔浆液密度高,石膏浆液中的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 过饱和度过大时,溶液中的 CaSO_4 就会在吸收塔内各组件表面析出结晶形成石膏垢,造成石膏在塔壁、塔底、循环泵入口滤网等部位大量沉积,特别是浆液循环泵入口滤网,石膏大量沉积,致使浆液循环浆液量下降,造成循环泵容易气蚀,再加上浆液的腐蚀,使循环泵叶轮损坏很快。循环泵的气蚀还会引起循环泵、管道及入口滤网震动,造成循环泵损坏,管道泄漏,滤网损坏。

3.3 对脱硫效率的影响

吸收塔浆液密度高,会抑制 SO_2 的吸收,导致反应不完全,脱硫效率明显下降。浆液循环泵叶轮磨

损,入口滤网石膏大量沉积堵塞,致使循环浆液量降低,液气比降低,脱硫效率降低。循环泵入口滤网破损、循环管道衬胶破损脱落,造成吸收塔内杂物及管道脱落的衬胶进入喷淋层内堵塞喷嘴,降低脱硫效率。

3.4 对脱硫投运率的影响

脱硫吸收塔浆液密度正常运行控制在 $1\ 080 \sim 1\ 130\ \text{kg}/\text{m}^3$ 左右,最高不超过 $1\ 200\ \text{kg}/\text{m}^3$,由于吸收塔浆液密度高对脱硫系统的危害,为确保脱硫系统安全运行,脱硫系统被迫退出运行,严重影响脱硫系统投运率。

4 吸收塔浆液密度高的原因分析

4.1 煤质影响

珙县电厂地处西南高硫煤地区,原煤含硫量普遍较高,珙县电厂 $2 \times 600\ \text{MW}$ 机组烟气脱硫工程设计燃煤含硫量3.54%,由于煤源紧张,进煤矿点多而杂,造成实际入厂煤质时有超过设计煤质,且煤质热值偏低,致使设计工况下的脱水系统不能满足目前脱硫需要,造成脱硫吸收塔浆液密度居高不下。

4.2 石膏脱水系统影响

4.2.1 浆液品质影响

(1) 由于煤质含硫量超过设计值,为保证脱硫效率,石灰石供浆量增大导致浆液密度高,石灰石供浆量过大会造成石膏中碳酸钙含量增大,未反应的石灰石颗粒随浆液进入脱水系统,堵塞脱水机滤布孔造成脱水效果变差,脱水机无法正常运行,浆液密度不能控制。

(2) 石灰石中的氧化镁等杂质含量过多,在吸收塔内会影响石膏结晶的粒度和纯度,不利于石膏的结晶,同时各种杂质进入脱水机后会附着在石膏表面,阻碍石膏脱水,致使脱水机不能正常运行。

(3) 吸收塔入口烟尘浓度大,烟气中的烟粉尘进入浆液系统,由于其粒径较小会包裹在石灰石颗粒的表面,并对石灰石的溶解造成影响,由此导致浆液中石灰石颗粒增多,浆液密度增大,石膏脱水效率降低。杂质含量过高,对设备造成磨损,特别对于水力旋流器,杂质的磨损会造成旋流子沉砂嘴口径变大,使得旋流效果达不到设计要求,底流浓度降低,造成脱水效果变差。

(4) 石膏浆液中 CaSO_3 含量过高易生成 CaSO_3

• $1/2 \text{H}_2\text{O}$ 该物质呈针状晶体,其粒径偏小,粘度高,密度大。当 $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ 含量过高时,会造成浆液粘稠、密度偏大,致使真空皮带脱水机难以分离出水分。造成石膏浆液中 CaSO_3 含量过高的主要原因是脱硫塔内浆液氧化不充分,由于塔内氧化空气量不足,使得浆液中的亚硫酸钙难以被完全氧化为硫酸钙。

(5) 石膏浆液中氯离子主要来源于烟气中的 HCl 和工艺水,石膏浆液中的晶体在结晶过程中,氯离子与溶液中的钙离子生成性质稳定的六水氯化钙,会造成石膏含水率上升。此外,氯化钙还阻碍结晶水析出,对石膏脱水造成影响。

4.2.2 脱水系统设备影响

(1) 由于煤质偏离设计煤质,致使旋流站出力不足,且旋流子分离效果差,未达到设计底流浓度 50%,造成底流浆液浓度和浆液量不足,此外旋流子堵塞、泄漏频繁,故障率高,致使吸收塔密度不能正常维持。

(2) 浆液品质恶化,脱水机脱水效果变差,含水率大增,造成石膏皮带输送机主动、从动滚筒、托辊等转动部分石膏粘附、堆积,致使皮带机经常跑偏跳闸,脱水机联动跳闸停运,严重影响脱水机安全稳定运行。

(3) 由于浆液品质差,造成脱水机下料口、刮刀及滤布冲洗斜槽石膏堆积严重,造成脱水机滤布卷入驱动轮与石膏出口托辊之间间隙内,使滤布、托辊损坏,严重影响脱水机正常运行。

(4) 脱水机滤布冲洗水喷嘴由于水质原因,造成堵塞频繁,滤布冲洗效果差,过滤能力降低。

(5) 脱水机给料系统再循环衬胶管道弯头磨损泄漏频繁,消缺率较高。

4.3 废水系统运行影响

废水旋流子堵塞频繁,致使浆液中大量的悬浮物、重金属、氟离子和氯离子等不能及时消除,一方面加速脱硫设备的腐蚀,另一方面影响浆液及石膏的品质。

5 采取的控制措施

(1) 加强燃煤管理,做到高、低硫煤的合理掺配,使燃煤尽量接近设计煤质。

(2) 认真做好石灰石进料验收工作,提高石灰

石进料品质。

(3) 优化电除尘各电场二次电压、电流及振打时间的设定,将电除尘 5 个电场振打间隔时间延长,降低烟尘的二次飞扬,提高除尘效率,降低烟尘浓度,减少对吸收塔浆液污染,提高浆液品质。

(4) 加强运行调整,维持 pH 值在 5.0 ~ 5.8,加强对氧化空气系统运行监视调整,根据浆液品质化验数据进行调整,防止 CaSO_3 含量过高。根据 1 号脱硫氧化空气冷却水量低,氧化空气温度高,氧化风管存在堵塞的现象,将氧化空气喷嘴孔径增大,氧化冷却水量由 5 m^3 增大到 8 m^3 ,有效地降低氧化空气温度,防止氧化风管结垢堵塞,确保氧化空气系统正常运行,避免浆液品质恶化影响脱水系统正常运行。

(5) 为提高石膏旋流站出力,将预留旋流子接口投入,使旋流子由 7 个增为 8 个,同时将石膏浆液再循环回流管节流孔板由 180 mm 降低至 170 mm,提高旋流站入口流量,使旋流站出力得以提高。此外由于目前旋流子底流浓度低于 45%,将旋流子改为一分二旋流子,旋流子直径由 150 mm 减小到 100 mm,在总流量不变情况下使底流浓度达到 50% 以上,提高了脱水效果。

(6) 为确保脱水机安全稳定运行,将石膏皮带输送机取消,脱水机脱除的石膏直接落入石膏库中,并将石膏下料口增大防止石膏堆积。

(7) 为防止脱水机滤布、托辊损坏,在驱动轮与石膏出口托辊间设置托板,防止滤布卷入驱动轮;将滤布冲洗斜槽降低 100 mm,增大斜槽与滤布间隙,防止石膏堆积顶住滤布使其移动困难,同时运行值班员加强对石膏刮刀及斜槽的冲洗,防止堆积石膏;此外在滤布张紧托辊上部设置保护开关,在滤布卷入驱动轮张紧托辊上升时,保护动作,脱水机跳闸,确保脱水机安全运行。

(8) 适当改大滤布冲洗喷嘴,提高滤布清洁程度,提高脱水效果。

(9) 为防止旋流站筒壁磨损泄漏,在筒壁内设置不锈钢护板圈,防止磨损;将脱水给料管路弯头更换为耐磨弯头;运行中定期对石膏旋流站进行冲洗,防止堵塞,确保脱水系统稳定运行。

6 运行效果及存在的问题

据统计,珙县电厂 1、2 号脱硫系统投运后,因吸

收塔密度高造成脱硫超标排放 6 次,脱硫被迫停运 5 次,吸收塔密度最高达到 $1\,350\text{ kg/m}^3$ 。通过一系列的改进、控制措施后,未发生因吸收塔密度高原因停运脱硫系统的情况,吸收塔浆液密度控制在 $1\,200\text{ kg/m}^3$ 以下,脱硫系统投运率由之前的 82.5% 提高至 98.48%,取得良好的效果。虽然通过改进控制

措施达到了预期的效果,但目前仍存在废水系统旋流子堵塞频繁、脱水机滤布冲洗水质差、双机运行脱水机无备用等影响脱硫系统正常运行的因素,有待今后做进一步改进,以确保脱硫系统安全稳定运行和达标排放。

(收稿日期:2012-12-22)

(上接第 42 页)

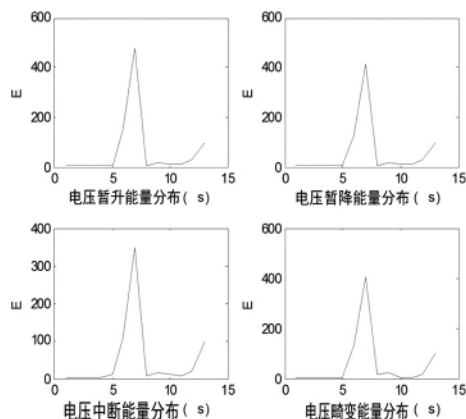


图 8 暂态电能扰动信号能量 E 分布

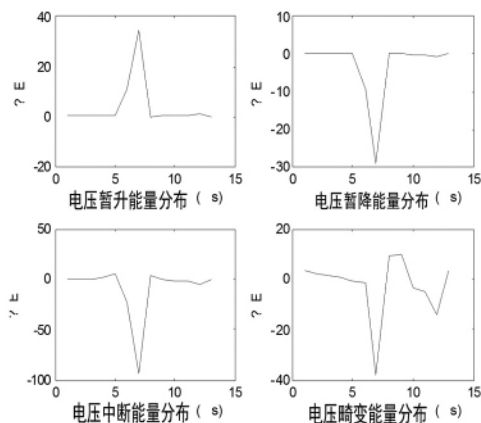


图 9 暂态扰动信号能量差分布

从图中可以明显看出,在暂态电能质量扰动辨识中采用能量差 ΔE 函数,可以明显地识别出各种暂态扰动。通过图 8 和图 9 的仿真结果对比,可以看出,在扰动识别分类中,采用能量差函数 ΔE 可以快速有效地分辨出暂态扰动的类型。

4 结 语

分析了间歇性电源接入系统后,容易引起的几种暂态电能质量问题,重点研究了基于小波变换的暂态电能质量分析。首先详细介绍了暂态电能质量扰动小波检测的基本原理,然后给出能够识别暂态扰动的能量函数,并给出仿真算例验证理论的正确

性。理论分析和仿真结果表明,该方法在暂态电能质量扰动的分析上具有很好效果,能够实现对暂态电能质量扰动快速、准确的检测,为研究间歇性电源接入系统暂态电能质量扰动问题提供了有效、可行的检测方法。

参考文献

- [1] 李渝,范高峰,李庆,等.达坂城风电接入系统对新疆电网电能质量的影响[J].电网技术,2007,31(6):88-92.
- [2] 迟永宁,刘燕华,工伟胜,等.风电接入对电力系统的影响[J].电网技术,2007(3):77-81.
- [3] 席晶,李海燕,孔庆东.风电场投切对地区电网电压的影响[J].电网技术,2008(10):58-62.
- [4] HE Haibo, STARZYK J A. A Self-organizing Learning Array System for Power Quality Classification Based on Wavelet Transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1):286-295.
- [5] 赵凤展,杨仁刚.基于时域、小波变换和 FFT 的电能质量扰动识别[J].继电器,2006,34(8):50-55.
- [6] 储珺,马建伟.基于小波变换的电能质量扰动信号的检测[J].电力系统保护与控制,2009,37(5):34-37.
- [7] 刘桂英,栗时平.风电接入系统暂态电能质量扰动小波检测方法[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(1):22-27.
- [8] 秦英林,田立军,常学飞.基于小波变换能量分布和神经网络的电能质量扰动分类[J].电力自动化设备,2009,29(7):64-66.
- [9] 周龙华,付青,余世杰,等.基于小波变换的谐波检测技术[J].电力系统及其自动化学报,2010,22(1):80-85.
- [10] 林涛,樊正伟.利用小波变换及人工神经网络识别电能扰动[J].高电压技术,2007,33(7):151-153.

作者简介:

潘从茂(1987),男,硕士研究生,研究方向为洁净能源发电及其并网技术;

李凤婷(1965),女,教授,工学博士,硕士生导师,研究方向为风电并网技术与电力系统继电保护。

(收稿日期:2012-12-15)

进口亚临界锅炉饱和蒸汽含钠量超标的原因研究与应用

彭卫红

(神华巴蜀江油发电厂 四川 江油 621709)

摘要: 2012年3月发现锅炉饱和蒸汽钠离子含量连续超标,最大达到 $76\text{ }\mu\text{g/L}$ 。通过检查、分析研究和实验结果,提出汽包裂纹处理的方法及注意事项。将锅水协调pH-磷酸盐处理工艺改为低磷酸盐处理工艺,并修改相应控制标准,提出解决汽包水位偏差和波动的相应对策。经处理,饱和蒸汽钠离子含量达标。

关键词: 进口亚临界机组; 饱和蒸汽含钠量; 超标; 措施

Abstract: In March 2013, it was found that the sodium (Na^+) content in saturation steam continuously exceeded the standards, and the maximum value reached $76\text{ }\mu\text{g/L}$. Through the inspection, analysis and test results, the treatment and cautions for the cracks of steam drum are proposed. Meanwhile, the pH-phosphate treatment process is changed to low phosphate treatment process, and the relevant control standards are revised. The countermeasures for the deviation and fluctuation of water level in steam drum are proposed too. After the treatment, the sodium content in saturation steam reaches the standards.

Key words: imported subcritical units; sodium content in saturation steam; exceeding standard; measure

中图分类号: TK224 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2013)02-0084-03

神华巴蜀江油发电厂 $2\times 330\text{ MW}$ 机组 $1\text{ }025\text{ t/h}$ 亚临界锅炉由法国STEIN公司生产,四角切圆、强制循环炉。汽包结构:由外筒和内筒组成,内设百叶窗、旋风子汽水分离装置,对水、汽进行分离。机组水汽品质控制标准由法国STEIN公司提供。

2012年3月运行中监督发现,31号机组饱和蒸汽中含钠量超标(Na^+ : $45\text{ }\mu\text{g/L}$),监视机组运行在其后的2个月时间内,经反复取样复查,仍超标,最大含钠量为 $76\text{ }\mu\text{g/L}$ 。江油发电厂组织运行、化学、锅炉专业成立联合攻关小组,查找、分析引起31号机组饱和蒸汽含钠量超标的原因,提出处理对策,尽快使蒸汽含钠量合格,防止蒸汽系统结盐和腐蚀。

1 初步原因分析

根据《电厂化学水处理》,钠盐的携带分为溶解携带和机械携带:溶解携带与锅水含盐量有关;机械携带与汽包水位、汽水分离装置效果有关。因31号机组仍在运行中,只作了以下排查。

1.1 运行中水汽质量普查

化学监督人员对31号机组所有水、汽进行取样分析:补给水、给水、凝结水、锅水所有指标均处于控制标准范围内;过热、再热蒸汽所有指

标处于控制标准范围内;饱和蒸汽含钠量为 $65\text{ }\mu\text{g/L}$;电导率为 $0.21\text{ }\mu\text{S/cm}$ 。二氧化硅、铜、铁离子含量处于控制标准范围内。

经化学监督人员每周4次对31号机组所有运行水、汽进行取样分析,连续2个月发现31号机组补给水、给水、凝结水、锅水所有指标均处于控制标准范围内;过热、再热蒸汽的指标处于控制标准范围内,但当饱和蒸气含钠量超标过大时会引起过热蒸汽含钠量超标;饱和蒸汽含钠量最大为 $76\text{ }\mu\text{g/L}$;电导率为 $0.21\text{ }\mu\text{S/cm}$ 。二氧化硅、铜、铁离子含量处于控制标准范围内。

1.2 检查运行中锅内水质处理

江油发电厂按法国STEIN公司给定的控制工艺,采用协调磷酸盐处理,指标控制如表1。

查看历史记录:两机组首次检查性检修中,化学监督情况表明,热力系统未发现腐蚀现象,但发现汽轮机高、中压转子、隔板结盐较多,高压转子盐垢的主要成分为磷酸盐,垢样成分分析磷以氧化物表示(P_2O_5)占4成以上。随后进行的机组A修、B修化学监督中同样发现汽轮机有积盐现象且高压转子集盐中磷含量较高。查阅机组水汽品质控制运行日志,锅水品质合格率均在98%以上,证明控制水平不是汽轮机通流部件积盐的主要原因,初步怀疑法

国 STEIN 公司规定的控制工艺存在缺陷。

表 1 锅炉锅水控制标准

控制项目	符号	标准
阳离子交换导电度 ($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)	DD	≤ 30
钠/磷酸根摩尔比	R	≤ 3
含盐量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\Sigma \text{P 阳} + \Sigma \text{P 阴}$	不检测
氯/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	CL -	不检测
二氧化硅/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	SiO_2	≤ 200
磷酸根/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	PO_4^{3-}	3 ~ 5
pH(25 $^{\circ}\text{C}$)	pH	9.1 ~ 9.6

1.3 机组运行中汽包水位控制

(1) 运行人员严格按运行规程将汽包水位投入外部定值状态,并监视水位在表 2 范围。

表 2 汽包监视水位

蒸汽流量 ($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	400	500	600	700	800	900	1000
水位 /mm	-342	-342	-310	-280	-260	-255	-255

(2) 查询运行日志,锅炉水位调节困难,水位波动幅度经常接近甚至超过许可范围。

(3) 热控车间检查校验汽包水位计,发现实际水位比 DCS 显示水位高 35 mm。

1.4 汽包内部的检查

(1) 2012 年 31 号机组大修时,打开汽包检查发现汽水分离界限不明显,对汽水分离装置检查未见异常。

(2) 各加药管、排污管正常。

(3) 汽包内筒检查:通过拆除汽水分离装置,对汽包内筒壁进行全面检查发现:汽包内筒壁有 23 道裂纹,最长裂纹贯穿内筒壁 2/3。

1.5 含钠量超标的主要原因

(1) 汽包内筒壁焊缝裂纹,部分饱和蒸汽未经过汽水分离装置分离,直接通过裂纹进入蒸汽系统,使饱和蒸汽带水,引起饱和蒸汽含钠量超标。

(2) 法国 STEIN 公司的控制工艺存在缺陷,锅水处理中磷酸盐偏高,使锅水中钠离子含量偏高,蒸汽通过溶解携带使钠离子含量偏高,甚至超过控制范围。

(3) 机组运行中,汽包水位偏高和波动,导致蒸汽与锅水分离不彻底,引起饱和蒸汽含钠量偏高。

2 进一步原因分析与研究

2.1 汽包内筒壁焊缝裂纹原因分析

(1) 通过对焊缝金属检测,发现 23 条裂纹焊缝存在焊缝夹渣、气孔、未融合等焊接缺陷。增加检测,又新发现 12 条焊缝存在同样缺陷。

(2) 汽包内筒壁焊缝因承受附加拉应力产生裂纹:检查运行日志,核对停机曲线,发现机组停运过程未严格按照曲线进行,冷却过快,汽包内外筒壁膨胀系数不一致(汽包筒体壁厚 163 mm,内筒壁厚 10 mm),内筒壁承受附加拉应力;频繁的启停,加快裂纹的形成和发展,最长裂纹达 450 mm。

2.2 法国 STEIN 公司控制工艺研究

(1) 随锅炉压力的升高,蒸汽的性质愈来愈接近水的性质,其对盐分的溶解携带系数成百倍增加。

(2) 随锅炉压力的升高,汽水密度差越小,汽水分离更加困难。锅水含盐量是影响蒸汽机械携带的主要因素,当锅水含盐量达到临界值时,蒸汽含盐量更是与锅水含盐量成平方关系增长。

(3) 该厂 2 台亚临界锅炉汽包内未设置洗汽装置,蒸汽溶解盐类和经汽水分离装置未彻底分离掉的锅水水滴得不到处理而进入蒸汽。

(4) 亚临界锅炉的汽包直径相对较小,水汽靠重力自然分离作用降低。

以上因素决定了亚临界汽包锅炉锅水的极限含盐量将大大降低。在凝汽器无泄漏和补给水质量合格的情况下,为控制腐蚀和结垢向锅内添加的磷酸盐就是形成锅水盐分的主要物质。应该说,法方在制定锅水控制标准时已经注意到这一问题,其磷酸盐含量上限已比通常的协调磷酸盐处理工艺控制上限低了许多,但仍显得保守。

从减少汽轮机通流部件结盐,并保证热力系统腐蚀速率合格且达到期望最小值出发,尽管机组无凝结水精处理装置,但现场运行长时间均未发现凝汽器泄漏,凝汽器无泄漏和品质优良的补给水决定了锅水添加磷酸盐的防垢作用已大大降低,其主要作用已成为调节锅水 pH 值,防止金属部件的腐蚀。这从理论上给进一步降低锅水中磷酸盐含量提供了可能。由此,将锅水控制标准作了如下调整,调整后控制标准如表 3 所示。

表 3 锅炉锅水调整后控制标准

控制项目	符号	标准
阳离子交换导电度/ ($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)	DD	≤ 30
钠/磷酸根摩尔比	R	/
含盐量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\Sigma \text{P 阳} + \Sigma \text{P 阴}$	不检测
氯/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 1	
二氧化硅/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	SiO_2	≤ 200
磷酸根/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	PO_4^{3-}	0.5 ~ 3
pH(25℃)	pH	9.1 ~ 9.6

在现场运行中,重点控制锅水磷酸根和 pH,钠磷摩尔比不再严格控制。这是因为有研究表明:磷酸盐上限控制在 3 mg/L 时,此浓度已低至在炉管局部浓缩处,磷酸盐不超过其溶解度,已最大可能地避免了因析出发生的磷酸盐隐藏,控制钠磷摩尔比已失去实际意义。也就是说:将锅水协调 pH-磷酸盐处理工艺改为了低磷酸盐处理工艺。

近年的研究发现:沉积并不是控制磷酸盐隐藏的主要机制,而磷酸盐和 Fe_3O_4 保护膜发生反应才是控制磷酸盐隐藏的主要因素。以往公认的磷酸盐处理锅炉发生的碱性腐蚀破坏实际上是酸性磷酸盐腐蚀,这种腐蚀现象在协调 pH-磷酸盐处理工艺下始终是一个潜在危险。因此已有专家提出原则性意见为:协调磷酸盐处理可用于高压锅炉,不宜用于超高压锅炉,不可用于亚临界参数锅炉。新的国标条文 GB/T 12145-1999 也规定:协调磷酸盐处理不适用于亚临界参数电厂。推荐使用的工艺为低磷酸盐处理或低磷酸盐加氢氧化钠处理,这证明该厂锅水处理工艺的方向是正确的。

2.3 汽包水位的研究

(1) 经过反复试验,法国 STEIN 公司提供的水位定值正确。

(2) 通过对比试验,发现锅炉运行实际水位与 DCS 盘上显示水位不一致,实际水位比 DCS 盘上显示水位高 35 mm。

(3) 锅炉水位调节采用给水泵加调节阀控制,因调节阀漏量大,线性差,调节困难,水位波动幅度经常接近甚至超过许可范围。

3 应用及实验

(1) 汽包内筒焊缝的处理:为消除焊接缺陷,焊缝修复时打磨量大,需填充金属多,会附加应力的产生。因此,首先对汽包内筒壁进行分段定位,确保修

复后内筒长度、位置与原设计一致;其次为确保不留隐患,每道裂纹打磨后,100%着色探伤;然后内筒材质为 A52CP,为防止焊接变形及附加应力产生,对此做专项的焊接工艺评定。本次共处理焊缝 35 条,全部恢复与设计一致。

为减少锅炉停运过程中内筒因承受附加应力裂纹,要求锅炉控制员在机组停运过程严格按照曲线执行。

(2) 在控制好锅炉补给水、凝结水品质的条件下,在保证锅水 pH 前提下,锅水采用低磷酸盐处理,磷酸根 PO_4^{3-} 控制在 $\leq 3.0 \text{ mg/L}$,减少锅水含盐量。

进一步实验证明:锅水虽采用了低磷处理,实际运行中加药量逼近或超上限,仍可能使饱和蒸汽钠含量超标,从亚临界机组磷酸盐主要作用转变为提高锅水 pH,防止金属腐蚀,防垢弱化作用出发,进一步调整锅水控制指标,磷酸盐为 0.3 ~ 1 mg/L, pH 为 9.1 ~ 9.6。同时为减少进入系统内的杂质,磷酸盐药品采用分析纯。当磷酸根接近标准上限时,如 pH 不能满足标准下限,适当投加氢氧化钠提高 pH。

(3) 热控人员调整汽包实际水位与 DCS 显示一致,并制定定期校对制度,为运行调节水位提供真实数据。

(4) 更换给水调节阀,调整阀门调节性能,为运行灵活、及时调节水位提供可能。运行控制人员加强对 31 号炉汽包水位监视,防止汽包水位偏高。

4 运行效果

31 号机组于 2012 年 10 月启动运行后,通过全面的化学检验,机组饱和蒸汽含钠量全面合格,超标问题得到了很好的根治,31 号机组水汽品质合格率达到 100%。有效地减缓了机组蒸汽系统结盐,明显地降低了腐蚀速率,保证了机组的安全稳定运行。还准备将该结果推广应用到全国范围内法国 STEIN 公司的同类型锅炉机组上。

参考文献

- [1] 四川巴蜀江油发电厂,四川巴蜀江油发电厂化学运行规程[S].
- [2] 四川巴蜀江油发电厂出版,四川巴蜀江油发电厂锅炉运行规程[S].
- [3] 四川巴蜀江油发电厂出版,四川巴蜀江油发电厂锅炉检修规程[S].
- [4] 电厂化学水处理[M]. 武汉:大学出版社.

(收稿日期:2012-11-16)

计及电网负荷的发电机自励磁动态过程及相关问题

滕予非,丁理杰,张 华,汤 凡,魏 巍
(四川电力科学研究院,四川 成都 610072)

摘 要: 对考虑负荷情况下发电机自励磁动态过程进行了分析。分析结果表明,当发电机带长线路的孤网内存在负荷时,由于负荷对发电机转速升高有限制作用,系统过电压不会上升到饱和点,从而对系统中的设备起到了很好地保护作用。同时发现,孤网系统内的最小负荷对自励磁抑制措施也会产生相应的影响。建议在制定相关措施时,需根据本地最小负荷进行校验。

关键词: 自励磁; 有功负荷; 抑制措施

Abstract: The dynamic process of generator self-excitation is analyzed considering the effect of active load in the system. The analysis results show that, when there is the active load in the isolated grid which contains the generator and the unload long transmission lines, the overvoltage of the system caused by self-excitation can be limited obviously, because the rotating speed of the generator can be limited by the load. Therefore, the equipment in the system can be protected. Meanwhile, the minimum load in isolated grid has the effect on the restraining measures of the self-excitation too. It is suggested that the local minimum load should be considered when drawing up the measures.

Key words: self-excitation; active load; restraining measures

中图分类号: TM713 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0087-05

随着四川电网的发展,边远藏区的孤立电网开始逐渐接入四川主网架。但由于这些孤立电网往往远离负荷中心,在建设的初期,这些电网与主网之间往往仅通过一回联络线相连,而且该联络线的距离一般都较长。一旦由于开关偷跳等原因,出现联络线主网侧断路器跳开的情况,小网内原来的小型发电机组就会在长联络线对地电容电流助磁作用下产生自励磁,严重的影响设备与负荷的安全。

长期以来,有大量的学者对电力系统自励磁现象的机理进行了深入的研究。文献[1]对自励磁现象进行了详细的分类,并给出了每种自励磁的产生条件。同时,大量的文献也通过特征值分析法^[2,3]、频域分析法^[3]以及状态空间法^[4,5]等数学方法对自励磁现象进行分析。在自励磁现场及抑制策略方面,文献[6]利用理论计算与仿真的方法分析了特高压线路引起机组自励磁的现场,并提出利用 MOA 材料抑制自励磁的方法。文献[7]则分析了频率对自励磁的影响。

然而,以上的分析往往考虑的是黑启动或者是水电长距离传输的情况,采用的是发电机组空载带长输电线路的模型,而没有考虑发电机所在的孤网

内负荷的特性。因此,许多文献都提出发电机出现自励磁时电压理论上可以升到无限值,仅仅因为实际存在磁路饱和,电压不会无限升高^[8]。

然而,当发电机所在的孤网存在负荷时,这些负荷的电压静特性将对发电机的转速产生影响,从而达到抑制自励磁电压的效果。对计及孤网内负荷情况下发电机组自励磁的动态过程进行了分析,提出在制定自励磁抑制措施时,应考虑孤网内最小负荷的观点。

1 发电机自励磁产生机理及抑制措施

自励磁现象是指当发电机所带的容性负荷达到某一指标后,回路中的容性电流所产生的助磁会使发电机的端电压快速增大,而升高的发电机电压又引起容性电流的增长,正反馈作用使机端电压自发增大、越来越高,从而对设备安全造成威胁的现象。因此在孤网远距离并网、水电厂长距离外送以及电网黑启动情况下,均应对发电机的自励磁现象进行校核,从而制定相应的抑制措施。

由文献[9]可知,发电机带空载线路带空载长

线不发生自励磁的判断为

$$W_h > Q_c^* x_{d^*} \quad (1)$$

式中, W_h 为发电机容量; Q_c 为线路富余充电功率, 为计及了系统高压电抗器、低压电抗器以及低容补偿后的综合充电功率; x_{d^*} 为系统等值同步电抗的标么值, 为计及了发电机同步电抗、升压变压器电抗与线路电抗的综合同步电抗。

由此可见, 为了抑制自励磁的发生, 往往可以采用在线路中投入高压电抗器、低压电抗器等感性无功补偿装置, 对线路中的充电功率实现过补偿。

2 计及电网负荷的发电机自励磁动态过程

2.1 分析系统

为了说明概念, 特采用一个简单的分析系统如图1所示。

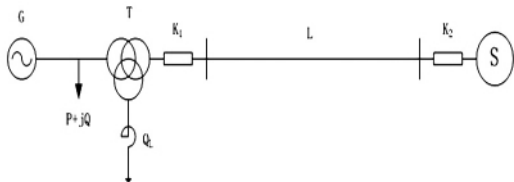


图1 分析系统示意图

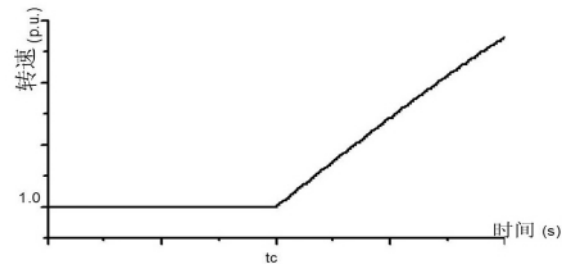
图中, G 为小网系统等值的发电机组。 P 、 Q 为小网内等效的有功及无功负荷, 为简化分析, 可等效为恒阻抗负荷。 Q_L 为等效的是小网侧变电站内所投入的感性无功补偿装置, 用以补偿输电线路的充电功率。 L 为长联络线路。而 K_1 、 K_2 则为联络线路两侧变电站内的开关。由图1可知, 在某时刻 K_2 断路器因某种原因跳开后, 小网发电机 G 将可能在线路 L 充电功率的作用下出现自励磁风险。

2.2 系统欠补偿时发电机自励磁动态过程

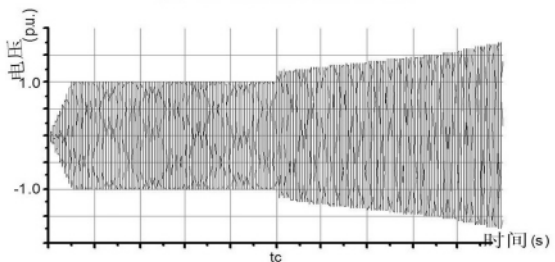
当 K_2 断开后, 若孤网系统因配置低压电抗器、高压电抗器容量不足而在 50 Hz 下处于欠补偿状态, 当孤网系统无负荷时, 可以得到发电机机端电压及转速变化如图2所示。由图2可知, 在 $t = t_c$ 时刻, 当小机组与长线路形成孤网时, 如果没有当地负荷, 发电机的转速将持续的上升, 直至发电机自身过速保护动作。在此期间, 发电机机端电压也因线路容性电流的助磁作用而持续上升, 直至设备饱和。

而如果发电机所在的孤网内存在着有功负荷, 其转速、电压变化曲线则会发生明显的变化, 其变化

曲线如图3所示。

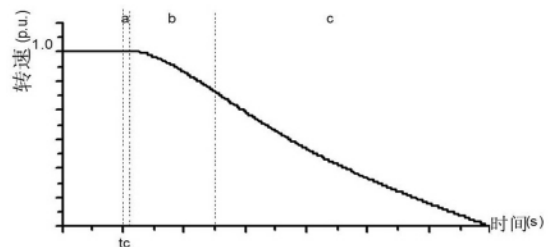


(a) 发电机转速响应曲线

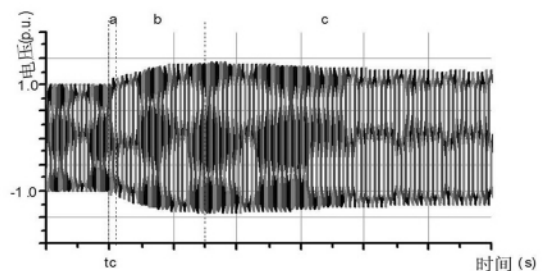


(b) 发电机机端电压变化曲线

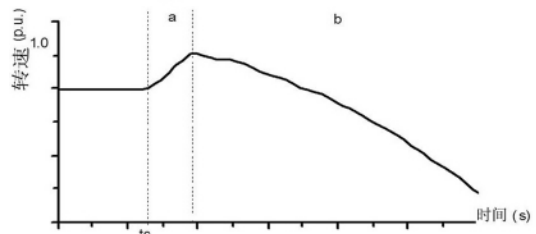
图2 欠补偿无负荷情况下, 发电机转速、电压变化曲线



(a) 发电机转速响应曲线



(b) 发电机机端电压变化曲线



(c) 发电机转速响应曲线 a 阶段局部放大图

图3 欠补偿有负荷情况下, 发电机转速、电压变化曲线

由图3可知, 当孤网系统内存在有功负荷时, 发电机机端的电压不会上升至饱和点, 而是达到一个较低的电压水平后回落。分析其原因, 可以将 K_2

开关断开后的过程分为如下3个阶段。

阶段1: 该阶段转速局部放大图如图3(c)所示。该阶段由于开关K2断开, 发电机输出有功减少, 因此发电机开始加速。同时由于系统处于欠补偿状态, 发电机开始自励磁, 因此机端电压也开始有所上升。由于机端电压的上升, 孤网内有功负荷根据其静特性也开始增加, 直到当系统内负荷增加到与发电机机械功率 P_m 相等, 该阶段结束。

阶段2: 当系统内负荷增加到与发电机机械功率 P_m 相等后, 由于系统仍处于欠补偿自励磁阶段, 因此系统电压持续升高。但是, 由于负荷的有功已经超过发电机原动机的机械功率, 发电机开始减速。同时, 随着频率的减小, 系统中感性无功开始增加, 容性无功开始减小。

阶段3: 当发电机减速到临界频率 f_c 时, 系统中感性无功开始大于或等于容性无功, 由欠补偿变为过补偿。自励磁阶段结束, 发电机机端电压开始减小。从此之后, 发电机的转速及机端电压响应曲线则由发电机及控制器参数决定。

由以上的分析可知, 即使系统一开始处于欠补偿状态, 但如果孤网系统内有有功负荷的存在, 发电机机端电压不会达到饱和值, 而会在负荷静特性的影响下, 达到一个最大值后回落。该最大值出现在发电机转速降到临界频率 f_c 时, 在该频率下, 系统处于完全补偿状态, 即

$$2\pi f_c L_* = \frac{1}{2\pi f_c C_*} \quad (2)$$

式中 L_* 、 C_* 分别为系统中等值电感与电容。

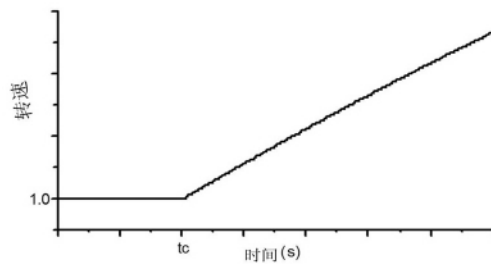
2.3 系统过补偿时发电机自励磁动态过程

为了防止自励磁的发生, 很多系统常常利用配置高压电抗器、低压电抗器的方式实现过补偿。但是, 由于发电机组在失负荷后会产生升速, 则极有可能将过补偿变为欠补偿, 实现自励磁。

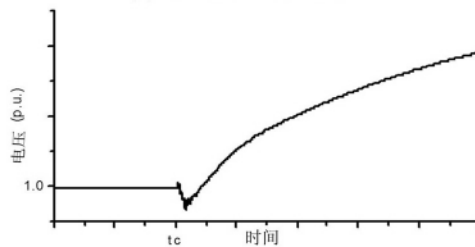
图4所示是孤网系统过补偿时, 系统中无负荷情况下, K2开关跳开后, 发电机转速与电压的变化曲线。由图4可知, 由于系统处于过补偿状态, 因此在 t_c 时刻, 发电机甩负荷后, 机端电压有所下降。然而, 由于发电机功率不平衡, 孤网内频率持续上升, 系统由过补偿转为欠补偿, 发电机再次进入自励磁区域, 机端电压持续上升。

而当孤网系统内存在着有功负荷时, 负荷的存在可以限制发电机转速的上升, 避免发电机进入自励磁区域。即使发电机进入自励磁区域, 也能迅速

的将转速拉低。在该情况下, 发电机转速、电压变化曲线如图5所示。

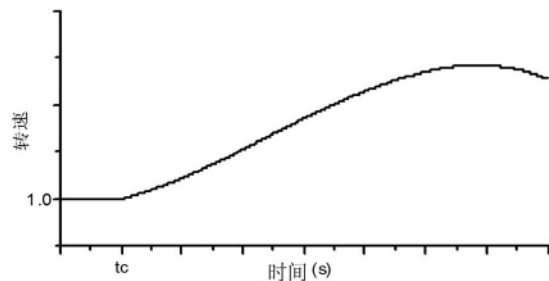


(a) 发电机转速响应曲线

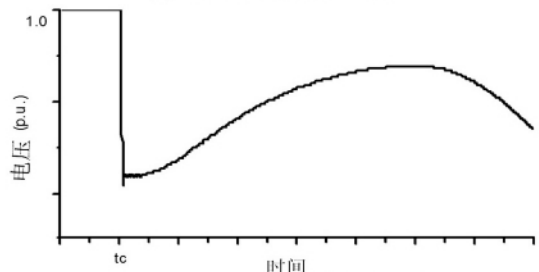


(b) 发电机机端电压有效值变化曲线

图4 过补偿无负荷情况下, 发电机转速、电压变化曲线



(a) 发电机转速响应曲线



(b) 发电机机端电压有效值变化曲线

图5 过补偿有负荷情况下, 发电机转速、电压变化曲线

2.4 小结

由图5可知, 由于负荷的存在, 发电机转速上升受到了明显的限制, 系统没有进入欠补偿区域, 因此发电机机端电压没有出现过电压的情况。

由以上两种情况的分析可知, 孤网中存在着有功负荷的存在可以通过限制发电机转速升高的方式, 避免系统进入自励磁区域, 或者很快的将系统从欠补偿区域中拉出, 防止系统长时间处于过电压状态, 对

系统中的设备起到了很好的保护作用。

同时,以上的分析仅考虑了有功负荷的作用,如果当地存在着感性无功负荷,相当于增加了系统的补偿度,对抑制发电机自励磁效果更加明显。

3 考虑负荷特性后系统自励磁的抑制措施

3.1 措施配置方案

由以上的分析可知,当孤网系统不存在负荷时,无论系统处于欠补偿还是过补偿状态,随着系统频率的增加,系统最终均会进入自励磁区域,而产生极高的过电压。此时,必须通过发电机过速保护、高电压保护等装置对发电机的转速和机端电压进行限制。而系统中感性无功装置的配置,应该保证发电机在可能出现最高转速的情况下依然处于过补偿状态。

然而,当孤网内存在负荷的情况下,发电机的转速和电压均会得到明显的限制,此时可以考虑减少感性无功的补偿度,甚至不装设高压电抗器、低压电抗器等补偿装置,以提高系统的电能质量。而高压电抗器、低压电抗器的装置容量则应配合当地的最小负荷进行校验。

3.2 算例分析

以四川藏区某规划系统为例,探讨最小负荷对系统自励磁抑制措施的影响。该系统简化模型如图6所示。

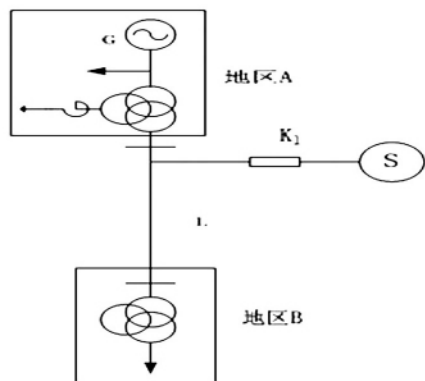


图6 算例系统

图6中,地区A与地区B均为小地区网络,当地电压等级均为35 kV。两个地区经变压器升压后,利用一回220 kV的输电线路相连。线路长度为69 km,型号为LGJ-400。同时,A地区在本地变电站220 kV侧与四川主网S相连。

图中A地区有多个小水电厂,并可等效为一台容量为8 MW的发电机。而B地区则仅为负荷站,

没有机组上网。根据自励磁概念,当A地区与四川主网之间的开关K1断开后,A地区、B地区以及之间的输电线路则形成孤网,输电线路的充电功率则可能造成A地区机组自励磁而产生过电压。

以下将针对A、B地区无负荷以及A、B地区最小6 MW负荷两种情况,对抑制自励磁的措施进行分析。

3.1.1 A、B地区无负荷

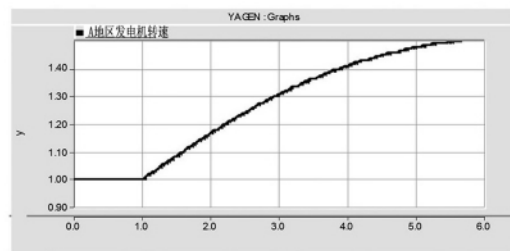
根据小机组自励磁发展的规律,建议对整个线路采取过补偿的策略。由于西地—牙根采用LGJ-400型号的输电线路,输电长度为69 km。假设输电线路的几何均距为5.5 m,可以得到线路每公里的电纳为

$$B = 2.92 \text{ S/km} \quad (3)$$

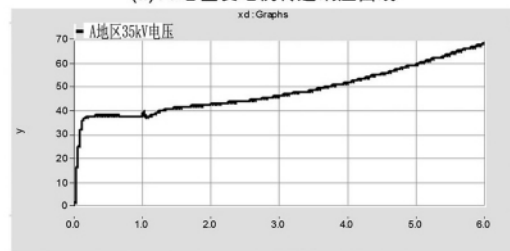
因此,对于一条69 km 220 kV的输电线路而言,整条线路的充电功率 Q_c 为

$$Q_c = U_N^2 B l = 11.96 \text{ Mvar} \quad (4)$$

为了实现系统过补偿,在A地区变电站补偿12 Mvar的感性无功,此时加上变压器的励磁回路,系统实现了较大程度的过补偿。然而,当 $t = 1.0 \text{ s}$ 时,K1开关跳开后,由于发电机转速增加,系统渐渐地由过补偿变为欠补偿,发电机依然有自励磁风险。这种情况下,系统的仿真波形图如图7所示。



(a) A地区发电机转速响应曲线



(b) A地区35kV电压有效值响应曲线

图7 无负荷仿真结果

由图7所示,在两地区无负荷情况下,若仅采用感性无功配置过补偿的措施,完全无法抑制自励磁。考虑到此时自励磁是由于发电机升速造成的,因此需要利用高周切机、机组过速保护、过压保护等辅助措施。当A地区采用机组过速保护措施时,当机组转速超过1.3 p.u.时,延时0.5 s跳开,系统仿真结

果如图8所示。由图8可知,当采用机组过速保护后,系统及时的切除机组,将本地区的过电压限制在了1.27 p. u. 以内,满足系统标准。由此可见,当孤网地区负荷很小时,需要同时配置感性无功及相应的高周切机保护装置,才能抑制自励磁,防止设备损坏。

3.1.2 A、B地区最小负荷6 MW 情况

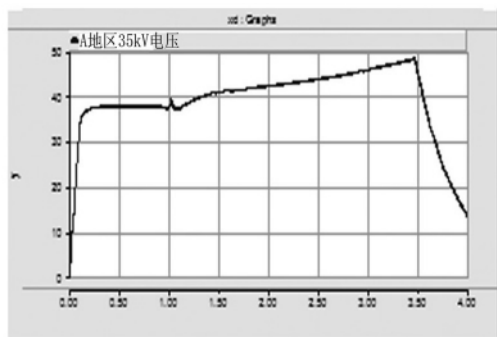
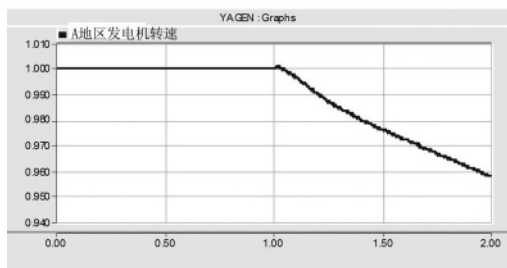
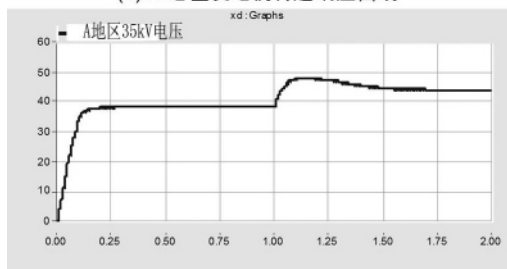


图8 采用机组过速保护后系统电压变化图

仿真结果表明,当A、B地区最小存在6 MW有功负荷时,仅需在A地区变电站补偿3 Mvar的感性无功,即可将过电压抑制在1.3 p. u. 以内,该情况的仿真图如图9所示。



(a) A地区发电机转速响应曲线



(b) A地区35kV电压有效值响应曲线

图9 有负荷仿真结果

由图9可知,当孤网地区内有较大的负荷时,少量的感性无功补偿,即可限制过电压的幅值。同时较大的负荷阻止了发电机转速的抬高,也进一步对自励磁产生抑制作用。

4 结 论

对考虑负荷作用下高压电抗器、低压电抗器发电机自励磁动态过程进行了分析,同时对考虑负荷

情况下系统的自励磁抑制措施进行了分析,得出了以下结论。

1) 孤网中有功负荷的存在可以通过限制发电机转速升高的方式,避免系统进入自励磁区域,或者很快的将系统从欠补偿区域中拉出,防止系统长时间处于过电压状态,对系统中的设备起到了很好地保护作用;

2) 当孤网系统不存在负荷时,无论系统处于欠补偿还是过补偿状态,随着系统频率的增加,系统最终均会进入自励磁区域,而产生极高的过电压。此时,必须通过发电机过速保护、高电压保护等装置对发电机的转速和机端电压进行限制。当孤网内存在负荷的情况下,发电机的转速和电压均会得到明显的限制,此时可以考虑减少感性无功的补偿度,甚至不装设高压电抗器、低压电抗器等补偿装置,以提高系统的电能质量。而高压电抗器、低压电抗器的装置容量则应配合当地的最小负荷进行校验。

3) 由此可见,当系统中对抑制自励磁措施进行配置时,需要考虑系统本地的最小负荷。同时,在配置时,需要考虑检修及备用等情况。

参考文献

- [1] 蒲利春. 同步发电机自励磁产生条件的研究[J]. 四川师范大学学报:自然科学版, 1999, 6(22): 695-700.
- [2] 肖友强, 蒲利春. 同步发电机自励磁的产生条件[J]. 水电能源科学, 1999, 9(17): 19-52.
- [3] 关根泰次. 电力系统暂态解析论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [4] 陈闽江, 陈家庚, 丁明. 多机电力系统自励磁判定的状态分析法[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 53-56.
- [5] 唐志平. 同步电机自励磁状态空间分析[J]. 大电机技术, 1999, 29(5): 34-41.
- [6] 贺家李, 贺继红, 王小玲, 等. 发电机自励磁发生根源及其对特高压输电运行的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 52-58.
- [7] 张国松, 刘俊勇, 贺星棋, 等. 考虑频率波动的水电孤网发电机自励磁研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(1): 84-87.
- [8] 张学群, 康积涛, 李林, 等. 电力系统自励磁研究概述[J]. 电力学报, 2010, 25(4): 311-314.
- [9] 陈珩. 同步电机运行基本理论与计算机算法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

作者简介:

滕予非(1984)男,博士,工程师,研究方向为电力系统及其新型输电的分析与控制。(收稿日期:2013-01-06)

进口亚临界机组锅炉燃烧器改造

黄国恩

(四川巴蜀江油发电厂, 四川 江油 621709)

摘要: 经论证水平浓淡燃烧器有效地保证了锅炉稳定燃烧, 相应经济运行指标得到提高, 满足机组的经济运行, 达到改造设计的要求, 效果优良。

关键词: 燃烧器; 稳燃; 热效率; NO_x

Abstract: The experimental results show that the stability of boiler combustion can be guaranteed effectively by the horizontal bias burner, and its corresponding economic performance indices have been improved to meet the economic operation of the unit. The requirements of transformation design for the unit are achieved, which has an excellent effect.

Key words: burner; stable combustion; thermal efficiency; NO_x

中图分类号: TM621.2 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0092-03

1 机组概况

巴蜀江油发电厂 330 MW 机组 1991 年相继投产, 锅炉设计燃用 60% 渭北煤 + 40% 广旺煤, 天然气点火、助燃。最大连续蒸发量为: 1 004 t/h, 主蒸汽压力: 18.4 MPa, 主蒸汽温度: 543 °C, 配 330 MW 汽轮发电机。锅炉系法国斯坦因工业公司制造的亚临界、强制循环、中间再热、四角切向燃烧、固态排渣。N 型布置煤粉炉, 采用 4 组共 20 只四角布置直流燃烧器, 分别由 5 层煤粉燃烧器和 3 层天然气燃烧器, 开式制粉系统。制粉乏气排大气不作为三次风进入炉内燃烧。四角燃烧器周围均布置有卫燃带。锅炉过热器则低温过热器、中温过热器、高温过热器共 3 级组成, 2 级喷水减温调节汽温; 再热器由壁式低温再热器、对流式高温再热器组成, 主要采用改变燃烧器喷口倾角方式调节汽温。低温再热器布置在水冷壁前墙和两侧墙 35 M 标高以上, 与水冷壁形成复式壁结构。

2 存在的问题

近年来, 锅炉运行存在两大问题。

一是锅炉出现满负荷熄火, 尤其是 2005 年 4 月份以来, 锅炉频繁出现满负荷熄火, 影响了锅炉机组

的经济、安全运行;

二是锅炉的带负荷能力受到严重影响, 31 号炉投运所有给粉机, 并投运一层天然气(4 000 Nm^3/h), 锅炉也仅能带 260 MW 左右的负荷。

3 初步原因分析

从锅炉运行情况看, 由于锅炉实际燃用煤种变差, 主要表现为灰份大(约 45% ~ 55%)、发热量低(约 12 500 ~ 14 000 kJ/kg)。严重偏离设计煤种, 导致锅炉出现一系列问题: 由于煤种变差, 锅炉要达到满负荷, 燃料量增加, 风量增加, 导致锅炉炉内温度水平低, 直接导致煤粉气流的着火热源温度低, 煤粉气流着火困难, 这是导致锅炉满负荷熄火的根本原因; 另外由于燃料发热量降低, 要达到满负荷运行, 必须大大加大入炉煤量, 根据现有分析煤种的分析结果, 要达到满负荷, 与设计煤种相比, 煤量要增加近 40%, 从而导致给粉机出力达不到现有煤种的要求, 导致锅炉出力降低。因此, 煤质恶化(偏离设计煤种)是锅炉熄火的主要原因。

锅炉燃烧器采用法国 STEIN 公司设计的直流燃烧器, 对煤质变化的适应能力差, 当煤质偏离设计煤种, 锅炉燃烧会急剧恶化。这是锅炉熄火的另一主要原因。

煤质因受地理位置、运力等影响在今后较长时

间不会有根本性好转。因此,在现有煤质情况下,如何通过技术改造,保证锅炉能满负荷安全运行,是摆在江油发电厂技术人员面前的一个难题。

4 改造初步方案

针对江油发电厂 330 MW 机组锅炉运行情况的现状,根据专家建议,确定改造的初步方案。

(1) 针对煤粉气流着火难、锅炉满负荷熄火的情况,采用浓淡燃烧技术,在一定程度上降低对着火热的需求。根据锅炉的燃烧器布置情况,采用水平浓淡燃烧技术以适应锅炉燃烧系统的布置。

(2) 在燃烧器区域敷设一定面积的卫燃带,提高燃烧器区域的温度水平,满足煤粉气流着火的需求。

(3) 针对锅炉出力不足的问题,更换给粉机,加大给粉机出力,满足锅炉在现有煤种的情况下锅炉所需的燃料量要求。

该厂 330 MW 机组锅炉燃烧器区域在建设时期已经安装有卫燃带,所以未作改动;对于锅炉出力不足有多种原因:主要是煤粉未完全燃烧、未按设计煤种配煤、结焦严重影响出力,从机组原有设计上来看,给粉机是能满足机组的负荷要求的,所以也未对给粉机进行扩容改造。而百叶窗水平浓淡燃烧器能在不改变燃烧系统的情况下,有效地克服锅炉上述问题。因此重点对燃烧器本体进行改造。

5 燃烧器改造措施

水平浓淡燃烧器在布置上使浓侧气流靠近向火侧(见图1),使进入炉膛的浓侧煤粉气流直接与上游来的高温烟气混合。上游来的高温烟气直接冲刷浓侧一次风气流,使一次风气流迅速得到加热。煤粉气流能通过这种强烈的混合得到大量的着火燃烧所需要的热量,能及时地着火燃烧,提高含粉气流的着火稳定性。

燃烧器改造是在原有燃烧器中心标高和燃烧器框架及燃烧器摆动执行机构的结构、尺寸、摆角不变的情况下,对下三层(A、B、C层)一次风燃烧器进行重新设计更换,使之与现有煤种适应。改造后燃烧设备的布置与改造前相同,采用四角布置、切向燃

烧、直流摆动式百叶窗水平浓淡煤粉燃烧器。风、粉气流从炉膛四角喷进炉膛后,在炉膛中心形成假想双切圆,假想双切圆直径分别为 $\Phi 1\ 610/\Phi 1\ 770$ mm。将下3层煤燃烧器原有的12个喷口和大风箱内煤粉管道全部更换为百叶窗水平浓缩器和喷口;一次风喷口采用周界风及向外翘边。

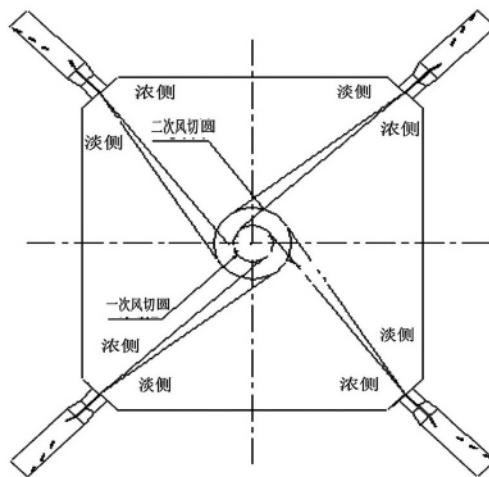
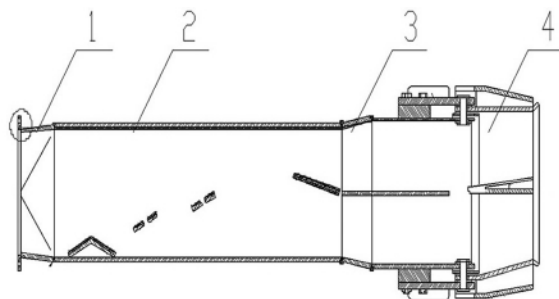


图1 水平浓淡燃烧器布置示意图

在喷口内加装水平钝体等结构,因实际燃用煤质变化范围大,为有效防止在燃用煤质较好的情况下出现烧损喷口的问题,采用一次风喷口向外翘边的措施,解决周界风过早混合的问题,增加高温烟气回流量,加强煤粉气流的着火稳定性。

浓缩器根据锅炉燃用煤质情况,采用具有丘体+开口叶片式浓缩器(图2),百叶窗水平浓淡燃烧器由一次风风管相连的法兰、方圆接、百叶窗浓淡器、风管过渡段、风管头部和喷口组成。改造后的燃烧器部体尺寸:1 300 mm。燃烧器喷燃口在外形尺寸上和原位置尽量一致。



1 为方圆接;2 为浓缩器;3 为风管过渡段;4 为燃烧器喷口

图2 水平浓淡燃烧器结构示意图

改造后,采用水平浓淡煤粉燃烧器百叶窗浓缩器的设计参数。

浓淡侧风量比: 1.1 ~ 1.30

煤粉浓缩比: ≥ 2

阻力系数比: ≤ 2

阻力: $\leq 42 \text{ mmH}_2\text{O}$

为改造后燃烧器燃烧煤种相适应,调整一次风速,以进一步提高锅炉运行经济性和稳定性。改造后燃烧器阻力增加,在不改造一次风机、空气预热器的前提下加强一次风门的调节灵活性和能力;对空气预热器蓄热组件进行清洗,保持风烟系统内通风正常;制粉要求煤粉细度(R_{90})不大于20%。

6 燃烧器改造的不足及改进措施

经过一段试运行,发现水平浓淡燃烧器存在以下不足。

- 1) 喷口烧损现象普遍,烧损情况严重;
- 2) 一次风管、燃烧器内易发生堵粉事故;
- 3) 浓缩器箱体、叶片和喷口钝体处有严重的磨损。

经过论证,采取如下改进措施。

1) 根据该厂燃料特性对燃烧器喷口进行重新设计,优化喷口结构;适当提高一次风风压,提高一次风流速;

2) 改进百叶窗浓缩器结构,运行中加强对一次风速、风压的监视,增加吹扫装置等方式减少堵粉情况的发生;

3) 浓缩器箱体、叶片和喷口钝体处采用耐磨材料制作或采用陶瓷贴片防磨等方法减少局部磨损,提高燃烧器的使用寿命。

通过改进,31号机组锅炉有效地解决了上述问题,具备运行的条件。

7 燃烧器改造前后性能试验对比

7.1 燃烧器改造前机组热效率

发电机组负荷325 MW时,机组热效率为88.522 3%。

发电机组负荷285 MW时,机组热效率为89.962 5%。

发电机组负荷240 MW时,机组热效率为88.178 4%。

在燃烧器改造前试验期间煤质灰份含量较高、固定碳含量和发热量明显偏低,另外,由于近两年燃

煤热值下降较多且波动大,锅炉机组经常出现高负荷灭火现象,对机组的安全运行带来了很大的影响。为此电厂被迫采取低氧量的运行方式,虽然对煤粉着火有利,但对煤粉的燃烬不利,飞灰可燃物较以前大幅度增加了2.0%左右,这些都将明显影响锅炉机组的热效率。试验结果表明:在发电负荷为325 MW时锅炉的飞灰含碳量达到了4.00%,机械不完全燃烧热损失达到了5.28%。

锅炉回转式空气预热器的漏风系数和漏风率有明显增大,漏风和堵灰情况较为严重。空气预热器漏风率大,一方面降低锅炉热效率,对锅炉的热效率影响较大,另一方面增加送、引风机的电耗,从而增加厂用电;更为严重的是由于空气预热器大量的漏风和大面积的堵灰导致锅炉燃烧用风严重不足和一次风压太低,最终导致锅炉机组不能正常带负荷。

7.2 燃烧器改造后机组热效率

发电机组负荷325 MW时,机组热效率为92.466 43%。

发电机组负荷280 MW时,机组热效率为92.389 7%。

发电机组负荷230 MW时,机组热效率为92.752 5%。

就改造前后热效率对比:锅炉机组热效率(发电机组在3种负荷下)分别提高3.944 1%、2.427 2%、4.574 1%。在燃用煤质和现有设备状况以及相关试验条件下,锅炉机组热效率较改造前有所提高;锅炉机组运行稳定,主、再热蒸汽参数与改造前相当;锅炉燃用12 500 ~ 21 000 kJ/kg范围内煤种,对煤质变化的适应能力增强;锅炉停用天然气助燃的情况下,稳燃最低负荷为626.0 t/h,对应机组发电负荷为230 MW,达到机组设备改造设计要求,锅炉运行中结焦情况也有了较大的改善。

8 结 语

神华巴蜀江油发电厂进口亚临界锅炉燃烧器改造后,煤质变化的适应能力增强,低负荷(40% BM-CR)时可不投天然气稳燃,煤粉燃烬率高,未出现水冷壁高温腐蚀和结渣现象, NO_x 排放量大大降低。对国内其他类似电厂燃烧器改造有一定的借鉴意义。

(收稿日期:2013-01-20)



XMY

川电兴名源

成都市兴名源电器有限公司

诚信、专业、求实、创新



成都市兴名源电器有限公司位于成都市大邑工业集中发展区内，注册资金2000万元，公司专业从事0.5~35 kV电流、电压互感器和干式组合互感器研发、生产及销售。

公司拥有一支技术精湛、工作经验丰富、责任心强的精英团队，先后构建了具有国际领先技术的环氧树脂浇注生产线、自动压力凝胶生产线、真空滤注油生产线，并配备了国内外先进的试验、检验仪器设备。

公司通过了ISO9001:2008质量管理体系认证，生产的产品全面通过电力工业设备电气质量检验测试中心（武高所）和机械工业第五（西安）计量测试中心站西安高压电器研究所（西高所）的各项检测项目。是国家电网中标企业，通过了国家电网公司招投标管理中心审查委员会审核，取得《国家电网公司集中招标活动供应商资质业绩信息核实结果证明函件》。

联系电话：028-88269989

028-88269916