

★四川省一级期刊

●万方数据数字化期刊群入网期刊

●《中国学术期刊(光盘版)》入编期刊

●《中国期刊全文数据库》收录期刊

●首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊

●北极星中华期刊网入网期刊

●中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊

●中国农村电气化信息网

●重庆维普中文科技期刊数据库

●《超星数字图书馆》入网期刊

●《中国核心期刊(遴选)数据库》收录

四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954



9 771003 695005

08>

四川电力试验研究院高压基地

四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

Vol.32

2009

No.4

《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

(按姓氏笔划为序)

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

刊号: ISSN 1003-6954
CN 51-1315/TM

2009年第 32卷第 4期(总 201期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力试验研究院

发行范围:公开

主 编:朱 康

副 主 编:吴小冬 谢 舫

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力试验研究院情报室

地 址:成都市青华路 24号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传 真:(028)87314278

E-mail: cdsclj@163.com

E-mail: wxdl_zs@scpc.com.cn

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册 6.00元

[期刊基本参数] CN 51-1315/TM* 1978 *

b* A4* 96* 24* P* ¥6.00* 8000* 24 *

2009-04

目 次

·基金栏目·

敏感设备电压凹陷敏感度综合评估方法的研究 王华伟 李华强 (1)

一种基于重排二次型时频分布的电能质量检测新方法

..... 王丽霞 何正友 赵 静 (5)

多馈入直流系统换流母线电压之间的相互影响及其同时换相失败的研究

..... 肖 俊 李兴源 杨小兵 (11)

基于衰减电流分量的双树复小波相位选线原理

..... 周登登 刘志刚 符伟杰 等 (16)

基于 PSCAD的电力系统次同步谐振研究 邓 婧 李兴源 (20)

·电网技术·

四川电网 2010年短路电流水平分析及限制措施研究

..... 周惟婧 杜新伟 丁理杰 (24)

基于原一对偶内点法的区域电网无功能力评估

..... 张希猛 李华强 赵周芳 等 (28)

基于自适应粒子群算法的负荷最优分配 苏 鹏 刘天琪 黄 健 (32)

低频振荡预警及分析功能在新疆电网 WAMS系统中的应用及改进

..... 张彦军 张 娟 常喜强 等 (36)

电气化铁路谐波在公用电网的渗透研究 周小涵 (41)

三角波移相电流控制法及其在 STATCOM中的应用

..... 王心琦 张代润 杨柳柳 (44)

电弧光保护在电力系统的应用 吴志勇 (49)

基于博弈均衡购电电价的分时电价 孙 琳 刘俊勇 (52)

新疆电网风力发电运行对风电发展建设的启示

..... 马锋福 常喜强 蔡鹏程 等 (57)

·输配电技术·

电力设备介质损耗测量方法研究 曾 伟 李建国 (62)

通过变压器电容式套管末屏获取过电压信号的方法 明志强 许 虎 (65)

浅析输电线路通过综合治理取得的防雷效果 张廷碧 彭力健 刘启俊 (69)

光电互感器在变电站数字化间隔中的应用 郭先平 李 倩 许 诺 (72)

变压器套管事故的分析及预防 欧居勇 付东丰 陈 芑 (75)

配电网中的矩阵故障定位方法 陈文业 (77)

农村电网线损管理研究 周 轩 邹 未 尚茂黎 等 (80)

自动抄表系统的现状及应用 杨 娟 (85)

·仿真技术·

计及 PSS的电力系统时域仿真计算 焦艳杰 陈 宇 陈枳州 等 (88)

PSS/E在四川电网的应用研究 李红军 杨 茹 王电钢 等 (92)

CONTENTS

Integrated Uncertain Evaluation Method of Equipment Sensitivity to Voltage Sag	Wang Huawei Li Huaqiang(1)
A New Method for Power Quality Disturbance Detection Based on Rearranged Bilinear Time—Frequency Distribution	Wang Lixia He Zhengyou Zhao Jing(5)
Study on Voltage Interaction among Converter Buses and Simultaneous Commutation Failure in Multi—Infeed Direct Current System	Xiao Jun Li Xingyuan Yang Xiaobing(11)
Line Selection Principle Using Dual—tree Complex Wavelet Phase Based on Decaying Current Component	Zhou Dengdeng Liu Zhigang Fu Weijie etc (16)
Study of Subsynchronous Resonance in Power System Based on PSCAD.....	Deng Jing Li Xingyuan(20)
Short—circuit Current Analysis and Limiting Measure Research of Sichuan Power Grid in 2010	Zhou Weijing Du Xinwei Ding Lijie(24)
Assessment of Reactive Capability of Regional Power Grid Based on Principal—dual Interior Point Method	Zhang Xineng Li Huaqiang Zhao Zhoufang etc (28)
Load Dispatch Optimization Based on Self—Adaptive Particle Swarm Algorithm	Su Peng Liu Tianqi Huang Jian(32)
Application of Low Frequency Oscillation Early—warning and Analysis Function to WAMS System of Xinjiang Power Grid	Zhang Yanjun Zhang Juan Chang Xijiang etc (36)
Research on Harmonics Penetration of Electrified Railway to Public Power Grid.....	Zhou Xiaohan(41)
Carrier Phase—shift Current Control Method and Its Application to STATCOM.....	Wang Xinqi Zhang Dajun Yang Liu Jiu(44)
Application of Electric Arc Light Protection to Power System	Wu Zhifeng(49)
TOU Price of Electricity Paying Price Based on Game Equilibrium	Sun Lin Liu Junyong(52)
Inspiration of Xinjiang Power Grid Operation Based on Wind Power Generation to Development and Construction of Wind Power	Ma Fengfu Chang Xijiang Cai Pengcheng etc (57)
Research on Dielectric Loss Measurement Method of Power Equipment.....	Zeng Wei Li Jianguo(62)
Method to Obtaining Overvoltage Signal via Condenser Bushing Tap of Transformer	Ming Zhifang Xu Hu(65)
Superficial Discussion on Protection Effect against Lightning of Transmission Line Obtained by Comprehensive Control	Zhang Tingbi Peng Lijian Liu Qijun(69)
Application of Optical Transformer to Digital Bay of Substation	Guo Xianping Li Qian Xu Nu(72)
Analysis of Transformer Bushing Accident and Its Precaution.....	Ou Junyong Fu Dongfeng Chen Peng(75)
Fault Location Method in Distribution Network Based on Matrix Algorithm	Chen Wenye(77)
Research on Reducing Line Loss of Rural Power Grid	Zhou Xuan Zhou Wei Shang Maoli etc (80)
Current Situation and Application of Automatic Meter Reading System.....	Yang Juan(85)
Time Domain Simulation Analysis of Power System Accounting for PSS	Jiao Yanjie Chen Yu Chen Zhizhou etc (88)
Research on PSS/E Application to Sichuan Power Grid.....	Li Hongjun Yang Ru Wang Diangang(92)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2009 Vol.32 No.4

(Ser. No. 201)

Bimonthly Started in 1978

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Test and Research Institute of Electrical Power

Editor & Publisher

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

Address Qingyanggong Chengdu Sichuan China

Postcode 610072

敏感设备电压凹陷敏感度综合评估方法的研究

王华伟, 李华强

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 实际电力系统中, 系统电压凹陷特征及设备电压凹陷耐受能力具有不确定性的特点, 给敏感设备电压凹陷敏感度评估带来了困难。在深入分析现有评估方法及不确定性影响因素的基础上, 综合考虑系统侧和设备侧两方面的不确定性, 提出一种基于模糊变量与随机变量组合的不确定性综合评估方法。将供电系统产生的电压凹陷特征和待评估敏感设备对电压扰动的耐受能力分别处理为模糊变量和随机变量, 直接利用样本数据估计模型参数。最后通过仿真实例验证了所提出评估模型及算法的合理性和准确性, 该方法具有一定的理论价值和明显的工程应用价值。

关键词: 电压凹陷; 设备敏感度; 模糊变量; 随机变量; 不确定性; 参数估计

Abstract: In practical power system, both the voltage sag characteristics occurring in power supply system and the voltage disturbance tolerable ability of sensitive equipment are uncertain, which makes it difficult to evaluate the sensitivity of sensitive equipment to voltage sag. After analyzing the existing assessment methods and the uncertainties of the influence factors deeply, a new integrated uncertain evaluation method based on the combination of fuzzy variable and random variable is proposed comprehensively considering the uncertainties of power system disturbance and equipment tolerant ability. The voltage sag characteristic at the power supply site and the voltage sag tolerable ability of equipment are treated as fuzzy variable and random variable respectively, and the parameters of the evaluation model are estimated by practice samples. The simulation results prove that this method is reasonable and accurate.

Key words: voltage sag; equipment sensitivity; fuzzy variable; random variable; uncertainty; parameter evaluation

中图分类号: TM864 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0001-04

电压凹陷 (voltage sag or dip) 在 IEEE 标准中被定义为: 供电系统母线工频电压有效值突然下降至额定值的 10%~90%, 并持续 10 ms~1 min 后恢复正常的电压扰动现象^[1]。IEC 与 IEEE 均提出了各自的定义, 他们的不同之处在于定义为电压下降值不同, IEC 定义的电压范围为 1%~90%, 而 IEEE 定义的电压范围为 10%~90%^[2]。系统中输配电线路故障、变压器投运、感应电动机启动以及其它启动电流较大的大型负荷接入电力系统时均会引起一定范围的电压凹陷, 因此系统内发生电压凹陷是不可避免的。

随着微电子、电力电子和自动化控制技术的发展, 过程控制器、可编程逻辑器件、调速驱动器等设备对电压凹陷越来越敏感, 使用范围也越来越广, 因此对于用现代科学技术武装起来的工业用户来说, 电压凹陷及其造成的危害已逐渐成为最重要的电能质量问题。严重的电压凹陷可能导致企业生产率和产品质量下降、制造成本增加, 阻碍企业正常的生产计划,

从而造成严重的经济损失^[3,4]。因此, 评估敏感设备的电压凹陷敏感度已经成为电力企业和用户必须面对的重要课题, 同时也是合理规划和改造电网, 制定最优供电方案, 采取合理技术措施的前提, 有重要理论价值和现实意义。

1 现有评估方法

现有敏感设备电压凹陷敏感度评估方法主要有统计法^[5,6]、概率评估法^[7~10]、模糊评估法^[11]等。统计法将系统电压凹陷特征与 CBEMA 曲线或 ITIC 曲线进行比较, 原理简单并易于实现。但不同类设备、同类不同型号设备对电压凹陷的敏感度不同, 因此仅用固定的 ITIC 或 CBEMA 曲线进行评估, 其结果很难符合实际, 且该方法不能进行预测, 对于规划和建设中的电网及用户无法进行评估。

概率评估法基于主观假设的概率模型进行评估, 即在划分出设备敏感度等级的基础上, 假设对应于不同敏感度等级, 敏感设备在凹陷幅值-持续时间平面

基金项目: 国家自然科学基金 (50877049); 四川省应用基础研究项目 (2008JY0043-2)

上的电压耐受曲线 (voltage tolerate curve VTC) 分别服从均匀、正态、指数、反指数等分布, 用假设的概率密度函数进行评估。该方法考虑了负荷 VTC 曲线的不确定性, 但仅能对给定特征的电压凹陷进行评估, 不能完全反映敏感设备受电压凹陷影响的总体情况。

基于推理规则的模糊评估方法结合 ESKOM Windows、ITIC、SEMI F47 等曲线及相应推理规则, 得出系统扰动曲线和设备抗扰动曲线, 并将之统一为基于能量的模糊指标, 通过计算两条曲线的干涉区得出设备可靠性。该方法综合考虑了系统侧与设备侧的不确定性, 但对模糊变量在论域的划分尚无统一标准, 主要依靠研究人员的经验获得。

2 设备敏感度影响因素及其描述

在电力系统中, 系统侧电压凹陷主要由输配电系统的故障引起^[6,8], 其凹陷特征的不确定性主要表现为产生的扰动幅值和持续时间的不确定, 是外延的不确定, 因此用模糊变量描述更符合实际, 如凹陷幅值取决于故障点位置及最大短路电流值^[12], 在故障发生时, 系统可能运行在不同的稳态条件从而产生不同幅值的电压凹陷^[7]。故障点受天气条件、绝缘体污染、动物接触等因素的影响, 具有不确定性^[13], 且同一故障点位置发生不同类型故障, 对公共连接点 (point of common coupling PCC) 电压幅值的影响也不相同。

敏感设备的电压凹陷耐受能力可由设备制造厂提供, 或通过实验测试获得^[7]。由实验测试结果可知, 不同类型设备对电压凹陷的敏感度不同, 同类设备因系统运行特性与状态、带负载水平等条件不同, 其敏感度也存在很大差异, 而在实际中人们不可能对所有设备进行试验和测试。研究表明, 常见敏感设备的电压凹陷耐受能力在凹陷幅值—持续时间平面的区域为: PLC 的电压幅值范围为 30%~90%, 持续时间为 20~400 ms; ASD 的电压幅值范围为 59%~71%, 持续时间为 15~1 755 ms; PC 的电压幅值范围为 46%~63%, 持续时间为 40~205 ms。在该不确定区域, 敏感设备的 VTC 一般受供电侧和设备自身安装位置、结构、性能指标等多因素影响随机分布^[10], 设备电压凹陷耐受能力的不确定性主要表现为造成设备失效的内涵的不确定, 因此, 用随机变量描述更恰当。

当设备供电点发生电压凹陷时, 敏感设备的实际运行状态包括: 正常、基本正常、不太正常偶尔故障、完全故障等多种可能状态。评估电压凹陷引起敏感设备故障, 需要同时结合电压凹陷特征和敏感设备敏感特征进行, 才能更全面反映实际。

3 评估方法

为弥补现有评估方法的不足并结合电力系统实际特点, 这里综合考虑系统电压凹陷特征和设备电压凹陷耐受能力的不确定性, 提出一种新的敏感设备电压凹陷敏感度评估方法^[14]。

3.1 电压凹陷严重程度模糊变量

将敏感设备接入点处的电压凹陷幅值记作 U_p (标么值), 电压下降幅值记为 $\Delta U_p = 1 - U_p$, 并设 ΔU_p 为服从线性分布的 L-R 模糊数 (m, α, β) , 如式 (1)、(2)^[15,16]。

$$\mu(\Delta U_p) = \begin{cases} L(\Delta U_p) & (\Delta U_p < m) \\ 1 & (\Delta U_p = m) \\ R(\Delta U_p) & (\Delta U_p > m) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L(\Delta U_p) = \max[0, 1 - \frac{m - \Delta U_p}{\alpha}] & (\Delta U_p \leq m) \\ R(\Delta U_p) = \max[0, 1 - \frac{\Delta U_p - m}{\beta}] & (\Delta U_p > m) \end{cases} \quad (2)$$

其中, m 为 ΔU_p 的均值, 描述电压凹陷幅值集中的位置; α, β 称为左、右分布参数, 描述电压凹陷幅值可能偏离均值 m 的范围; 左、右参照函数 $L(\Delta U_p)$ 、 $R(\Delta U_p)$ 代表模糊变量 ΔU_p 隶属函数 $\mu(\Delta U_p)$ 的形状。

3.2 模糊参数识别

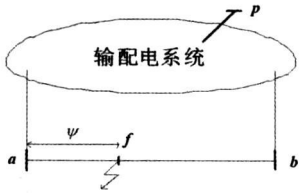


图 1 线路 a—b 发生故障

如图 1, 当线路 a—b 上 f 处发生故障, 求敏感设备接入母线 p 处的电压幅值 U_p 。假定故障点 f 到母线 a 的距离为 ψ (线路 a—b 的长度进行归一化后, 可取 $0 \leq \psi \leq 1$), f 点到母线 b 的距离为 $(1-\psi)$, U_p 与 ψ 有关, 可表示为 $U_p = f(\psi)$ ^[17]。为说明方法, 这里仅以发生三相故障为例进行分析。

设系统中发生三相故障引起母线 p 处电压凹陷

的线路共有 n 条。

(1) 由历史数据统计可分别得出此条线路每年发生三相故障的次数 δ_k ($k=1, 2, \dots, n$);

(2) 求出此 n 条线路分别发生三相故障时, 母线 p 处电压幅值 U_p 的可能取值区间及样本数。

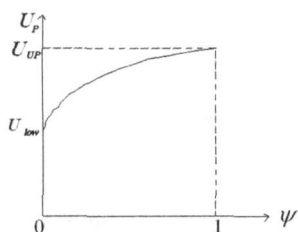


图 2 放射式网络中故障电压与故障位置的关系

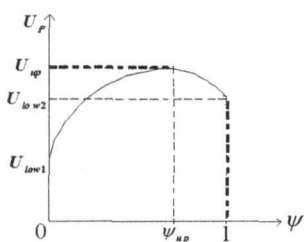


图 3 环式网络中故障电压与故障位置的关系

当线路 $a-b$ 处于放射式网络时, $U_p = f(\psi)$ 如图 2, 则记此时 ΔU_p 可能取值区间为 $[1-U_{up}, 1-U_{low}]$ 一种样本, 样本数为 δ_{ab} 。其中 U_{up} 、 U_{low} 分别为线路 $a-b$ 上发生三相故障时, U_p 的最大、最小值。 δ_{ab} 为线路 $a-b$ 上每年发生三相故障的次数。

当线路 $a-b$ 处于环式网络时, $U_p = f(\psi)$ 如图 3, 则将此时 ΔU_p 可能取值区间分解为 $[m \ln(1-U_{low1}), 1-U_{up})$, $[\max(1-U_{low1}, 1-U_{up}), \max(1-U_{low2}, 1-U_{up})]$, $[m \ln(1-U_{low2}), 1-U_{up})$, $[\max(1-U_{low2}, 1-U_{up}), \max(1-U_{low1}, 1-U_{up})]$, 并分别记为一种样本, 其样本数分别为 $\delta_{ab} \psi_{up}$ 、 $\delta_{ab} (1-\psi_{up})$ 。其中, U_{low1} 、 U_{low2} 分别为线路 $a-b$ 上 $\psi=0$ 、 $\psi=1$ 处发生三相故障时 U_p 的值, U_{up} 为 U_p 的极值, ψ_{up} 为 U_{up} 所对应的 ψ 值。

n 条线路的所有样本构成电压凹陷幅值 ΔU_p 的模糊集合 $\Delta \bar{U}_p$ 。

(3) 取 $U_j = \frac{j}{1000}$ ($j=1, 2, \dots, 1000$), 由模糊统计法求 U_j 对 $\Delta \bar{U}_p$ 的隶属度 $\mu_{\Delta \bar{U}_p}(U_j)$, 即 $\mu_{\Delta \bar{U}_p}(U_j)$ 覆盖 U_j 的样本数 / 总样本数。

(4) 求出 ΔU_p 的均值 m 。

$$m = \frac{\sum_{j=1}^{1000} \mu_{\Delta \bar{U}_p}(U_j) \cdot U_j}{\sum_{j=1}^{1000} \mu_{\Delta \bar{U}_p}(U_j)} \quad (3)$$

(5) 利用各样本左端点最小值 $\Delta U_{p \min}$ 、右端点最大值 $\Delta U_{p \max}$ 、 m 值可得左右分布参数 α 、 β 如式 (4)。

$$\begin{cases} \alpha = m - \Delta U_{p \min} \\ \beta = \Delta U_{p \max} - m \end{cases} \quad (4)$$

3.3 设备电压耐受能力

设备的电压耐受能力为随机变量, 假设敏感设备电压耐受能力 ΔU_1 服从参数为 μ 、 σ 的正态分布^[10], 记为 $\Delta U_1 \sim N(\mu, \sigma^2)$, 其概率密度函数为

$$f(\Delta U_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\Delta U_1 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5)$$

其中, μ 、 σ 分别为电压耐受能力 ΔU_1 的均值和方差。对凹陷持续时间, 方法类似。

3.4 敏感度评估模型

确定设备因电压凹陷引起故障的判据是系统电压凹陷严重程度大于敏感设备电压耐受能力^[18]。因此, 设备故障事件可表示为 $\Delta U_p > \Delta U_1$ 或 $\Delta U_p - \Delta U_1 > 0$, 记为 $\bar{A}$ 。则基于模糊变量和随机变量组合的敏感设备电压凹陷敏感度评估模型为

$$P(\bar{A}) = P(\Delta U_p > \Delta U_1) \quad (6)$$

$$\text{或 } P(\bar{A}) = P(\Delta U_p - \Delta U_1 > 0) \quad (7)$$

因设备故障事件隶属函数求解困难, 故引入模糊数学中截集概念和分解定理^[15, 16], 将求解 $P(\bar{A}) = P(\Delta U_p - \Delta U_1 > 0)$ 转化为求解 $P(\bar{A}_\lambda) = P(\Delta U_{p\lambda} - \Delta U_1 > 0)$, 其中, $\Delta U_{p\lambda}$ 为 ΔU_p 的 λ 截集。

3.5 敏感度评估方法

对任意阈值 λ , 由式 (1)、(2) 可得系统侧电压下降幅值 ΔU_p 的区间 $\Delta U_{p\lambda} = [\alpha, d_\lambda]$, α 、 d_λ 的求解公式如下:

$$\begin{cases} \alpha = m - (1-\lambda)\alpha \\ d_\lambda = m + (1-\lambda)\beta \end{cases} \quad (8)$$

设系统侧电压凹陷幅值 ΔU_p 在区间 $[\alpha, d_\lambda]$ 内服从均匀分布, 其概率密度函数为:

$$f(\Delta U_{p\lambda}) = \frac{1}{d_\lambda - \alpha} \quad (9)$$

根据概率理论, 普通事件 $\bar{A}_\lambda$ 的概率, 即当阈值为 λ 时, 敏感设备的故障概率 F_λ 为:

$$\begin{aligned} F_\lambda &= P(\bar{A}_\lambda) = P(\Delta U_{p\lambda} - \Delta U_1 > 0) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta U_1) \left[\int_{\Delta U_1}^{+\infty} f(\Delta U_{p\lambda}) d(\Delta U_{p\lambda}) \right] d(\Delta U_1) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta U_1) d(\Delta U_1) + \int_{\alpha}^{d_\lambda} \frac{d_\lambda - \Delta U_1}{d_\lambda - \alpha} f(\Delta U_1) d(\Delta U_1) \end{aligned} \quad (10)$$

将式 (5)、(8)、(9) 代入, 经过积分变换, 则求 F_λ 的公式 (10) 变为

$$F_{\lambda} = \frac{1}{d_k - \alpha} \{ [d_k - \mu) \Phi(\frac{d_k - \mu}{\sigma}) - (\alpha - \mu) \Phi(\frac{\alpha - \mu}{\sigma})] + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} [\exp(-\frac{(d_k - \mu)^2}{2\sigma^2}) - \exp(-\frac{(\alpha - \mu)^2}{2\sigma^2})] \}$$
 (11)

在 (0, 1) 内产生均匀分布的随机数 λ_i ($i=1, 2, \dots, N$), 由式 (11) 求得阈值为 λ_i 时的故障概率 F_{λ_i} , 则当模拟次数 N 足够大时, 设备故障的概率 F 为

$$F = P(\Delta U_p - \Delta U_l > 0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{\lambda_i}$$
 (12)

4 测试系统仿真与分析

4.1 IEEE-30 节点标准测试系统

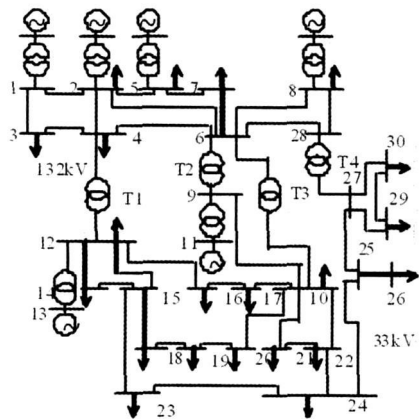


图 4 IEEE-30 节点标准测试系统

利用前面提出的评估模型和方法, 对如图 4 所示的 IEEE-30 节点标准测试系统^[19]运用 Matlab 进行仿真分析。测试系统由 6 台发电机组、30 条母线、4 台变压器和 37 条线路组成, 且变压器 T1 为 $Y_0/\Delta-11$ 接线方式; T2~T4 为 $Y/\Delta-11$ 接线方式; 线路发生故障的概率见文献 [20]。

4.2 敏感设备接入不同母线的故障概率分析

以 PC 机作为敏感设备接入不同母线进行分析。基于文献 [10] 的研究成果, 取 PC 机电压下降幅值耐受能力 ΔU_l 为服从参数 $\mu=0.455$ 、 $\sigma=0.028$ 的正态分布。

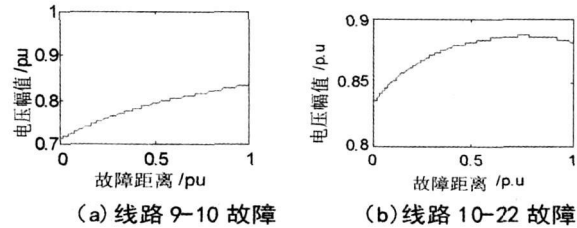


图 5 三相故障时母线 11 的电压幅值

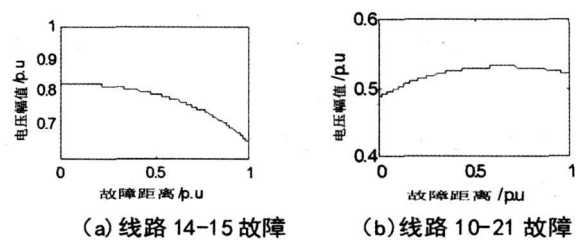


图 6 线路三相故障时母线 26 的电压幅值

图 5、图 6 分别给出当线路 9-10、线路 10-22 发生三相故障时, 母线 11 的 $U_p=f(\psi)$ 曲线以及当线路 14-15、线路 10-21 发生三相故障时, 母线 26 的 $U_p=f(\psi)$ 曲线, 对应的 ΔU_p 取值样本如表 1 所示。

表 1 节点 11、26 的电压凹陷幅值取值样本

敏感设备 接入母线	故障线路		电压凹陷 ΔU_p 的取值样本		
	首末端 母线号	年故障 次数	样本	ψ	$1-\psi$
11	9-10	0.028 8	(0 166 2 0 290 4)	1	—
			—	—	—
	10-22	0.032 9	(0 112 4 0 166 2) (0 112 4 0 116 6)	0.761	—
			—	—	0.239
26	14-15	0.037 4	(0 173 0 0 349 7)	1	—
			—	—	—
	10-21	0.027 7	(0 466 9 0 513 2) (0 466 9 0 476 7)	0.655	—
			—	—	0.345

由 3.2 节求得母线 11、母线 26 的电压凹陷幅值模糊变量 (m, α, β) 分别为 0.180 5、0.167 6、0.819 5 和 0.448 8、0.357 5、0.551 2。对 PC 机接入此两条母线分别用前面方法和蒙特卡罗法^[14]进行 10 000 次仿真, 结果如表 2。

表 2 PC 机电压凹陷敏感度评估结果

节点	本文方法	蒙特卡罗法	相对误差 %
11	0.248 4	0.249 1	0.28
26	0.578 3	0.578 2	0.02

该方法与蒙特卡罗方法的评估结果吻合, 相对误差最大均小于 1%, 同时, PC 机在母线 11 的故障概率小于母线 26 与实际中发电机组附近凹陷频次明显降低的情况^[20]是一致的, 表明所提出的评估模型及算法具有合理性和准确性。

5 结 论

针对现有评估方法仅考虑系统电压凹陷特征或设备电压凹陷耐受能力的问题, 基于系统扰动和设备耐受能力的不确定性在内涵和外延上的区别, 分别采用随机变量和模糊变量对不同特点的不确定性进行

(下转第 10 页)

—997.

- [8] 岳蔚,刘沛. 基于数学形态学消噪的电能质量扰动检测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(7): 13—17.
- [9] 崔屹. 图象处理与分析——数学形态学方法及应用[M]. 北京, 科学出版社, 2002.
- [10] 赵春晖. 数字形态滤波器理论及其算法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 1998.
- [11] 曾纪勇. 基于数学形态学的电能质量检测方法及应用[D]. 华中科技大学, 2006.
- [12] 王宏禹. 非平稳随机信号分析与处理[M]. 北京, 国防工业出版社, 1999.

- [13] 葛哲学,陈仲生. Matlab时频分析技术及其应用[M]. 北京, 人民邮电出版社, 2006.

作者简介:

王丽霞(1985—),女,山西,硕士研究生,研究方向为数字信号处理及信息理论在电力系统中的应用;

何正友(1970—),男,教授,四川,博士生导师,主要从事现代信息论在电力系统故障分析中的应用、配电网综合自动化等方面的研究工作;

赵静(1982—),女,四川,博士研究生,研究方向为数字信号处理及信息理论在电力系统中的应用。

(收稿日期: 2009—05—10)

(上接第 4 页)

表达,综合考虑了两方面的不确定性,提出了一种更符合实际的综合不确定性评估方法。对个人计算机的仿真结果证明了提出的评估模型及算法的合理性和准确性。

参考文献

- [1] IEEE Std 1159—1995. IEEE Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality
- [2] 程浩忠. 电能质量概论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [3] 王克星,宋政湘,陈德桂,王建华,耿英三. 基于小波变换的配电网电压暂降的干扰源辨识[J]. 中国电机工程学报, 2003, 6.
- [4] M. H. J. Bollen. Reliability Analysis of Industrial Power Systems Taking into Account Voltage Sags[J]. Industry Applications Society Annual Meeting 1993., Conference Record of the 1993 IEEE 2—8 Oct 1993 Page(s): 1461—1468 vol 2.
- [5] Lee G J, Albu M M, Heydt G T. A power quality index based on equipment sensitivity, cost and network vulnerability[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(3): 1504—1510.
- [6] Martinez J A, Martin A J. Voltage sag studies in distribution networks— part II: voltage sag assessment[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1679—1688.
- [7] Gupta P, Milanovic J V. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 711—718.
- [8] Milanovic J V, Gupta C P. Probabilistic assessment of financial losses caused by interruptions and voltage sags— part I— the methodology[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 918—924.
- [9] Milanovic J V, Gupta C P. Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags— part II— practical implementation[J]. IEEE Trans on Power De-

livery, 2006, 21(2): 935—932.

- [10] 肖先勇,王希宝,薛丽丽,刘波,杨洪耕. 敏感负荷电压凹陷敏感度的随机估计方法[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 30—33.
- [11] 沈正杰. 敏感性设备受电压骤降影响评估[C]. 中国台湾: 中国台湾国立中山大学博士学位论文. 2007.
- [12] T. A. Short 著, 徐政译. 配电可靠性与电能质量[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [13] Milanovic J V, Aung M T, Gupta C P. The influence of fault distribution on stochastic prediction of voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 278—285.
- [14] 董玉革. 随机变量和模糊变量组合时的模糊可靠性设计[J]. 机械工程学报, 2000, 36(6): 25—29.
- [15] 杨纶标,高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [16] 李安贵,张志宏. 模糊数学及其应用[M]. 第二版. 北京, 冶金工业出版社, 2006.
- [17] C. H. Park and G. Jang. Stochastic Estimation of Voltage Sags in a Large Meshed Network[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(3): 1655—1664.
- [18] M. H. J. Bollen. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions[M]. ser Power Engineering. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000.
- [19] 李娟娟. 电网电压骤降的分析评估及其抑制措施[D]. 福州: 福州大学, 2005.
- [20] C. H. Park, G. Jang and R. J. Thomas. The Influence of Generator Scheduling and Time-Varying Fault Rates on Voltage Sag Prediction[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(2): 1243—1250.

作者简介:

王华伟(1981—),男,硕士研究生,研究方向: 电压稳定及电压无功控制;

李华强(1965—),男,博士,教授,长期从事电压稳定及优化问题研究。

(收稿日期: 2009—04—11)

一种基于重排二次型时频分布的电能质量检测新方法

王丽霞, 何正友, 赵 静

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 电能质量扰动信号是一种典型的非平稳信号, 采用二次型时频分布能够获得其时间频率联合特性。提出一种基于重排二次型时频分布的电能质量检测新方法, 首先采用瞬时无功功率理论和广义形态滤波器将电能质量信号的基波成分和扰动成分分离, 再利用重排二次型时频分布对扰动分量进行分析, 从而获得时频聚集型更好的扰动分量的时频联合分布, 直观地表达出扰动信号的时频特性。仿真算例验证了此方法对各种常见电能质量扰动和交叉电能质量扰动的检测和特征提取是有效的。

关键词: 电能质量; 瞬时无功功率; 广义形态滤波; 二次型时频分布; 重排

Abstract: Bilinear time-frequency analysis is a useful character description to study non-static signal such as power quality disturbance. A new method based on rearranged bilinear time-frequency distribution is introduced for power quality disturbance detection. Firstly, the fundamental component and the disturbance are separated using instantaneous reactive power theory and generalized morphological filter, and then the disturbance is analyzed with rearranged bilinear time-frequency distribution accordingly for better time-frequency concentration. Simulation results of common power quality disturbances and crossed power quality disturbances have proven the effectiveness of the proposed method.

Key words: power quality; instantaneous reactive power; generalized morphological filter; bilinear time-frequency distribution; rearrangement

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0005-06

0 引 言

电能作为一种高效、清洁、可控的能源, 已经得到最广泛的应用。但随着科技的发展, 电力系统中电负荷类型的改变和非线性负载的使用使得波形畸变、电能质量下降; 而带有基于微处理机的控制器和功率电子器件的现代用电设备的使用, 又提高了对电能质量的要求。因此, 电能质量的研究成为一个热点问题。

电能质量问题主要包括谐波畸变问题和电力系统发生故障及投切操作时所伴随的暂态现象, 如电压瞬变、冲击和中断等^[1]。其中稳态谐波问题可由快速傅立叶变换及其改进算法、最小二乘估计、卡尔曼滤波、时间序列分析及神经网络等来解决^[2]。但对于时变谐波和暂态现象等非平稳信号, 需要有一个时间和频率的联合分布来描述其局部特性。对于信号的时频联合分布, 目前提出的方法有短时傅立叶变换、小波分析等等。但是短时傅氏变换只能在窗函数

的有效持续时间内信号是平稳的前提下, 粗略地反映信号在该时刻附近的局部频谱特征, 而这个局部平稳性条件通常无法满足或只是近似满足^[3]。由于缺乏能量集中的小波基, 小波变换事实上只是时间-尺度的联合分布, 只能获得信号在某一个频段上的系数, 难以对时变谐波作出精确的分析^[4, 5]。Wigner-Vill分布(WVD)通过自相关函数将信号的时间和频率联合起来, 成为真正意义上的时间-频率联合函数。相对于其他时频分析方法而言, Wigner-Vill分布不仅简洁、有效, 而且具有较高的分辨率, 能量集中性和跟踪瞬时频率的能力, 可以更清晰表征信号在时频域内的变化。但是, Wigner-Vill分布存在一个缺陷就是交叉项的存在, 限制了Wigner-Vill分布的使用, 因此也产生了许多改进算法^[6]。重排二次型时频分布就是在Wigner-Vill分布的基础上进行改进, 通过增加核函数和进行分布系数重排来进一步抑制交叉项和提高时频分辨率。

这里针对电能质量扰动信号的特点, 提出使用瞬时无功功率分解, 广义形态滤波和重排二次型时频分布相结合的方法。通过对基波成分的剔除和对二次

基金项目: 国家自然科学基金项目(50407009); 四川省杰出青年基金项目(06ZQ026-012); 教育部优秀新世纪人才支持计划项目(NCET-06-0799)

时频分布的重排进一步抑制交叉项,提高时频分析的精度。该方法能够更精确地对多分量谐波和各种暂态扰动以及交叉扰动做出分析。

1 基本原理

1.1 基于瞬时无功功率理论和广义形态滤波的基波分量提取

H. Akagi等提出了 $\alpha\beta$ 0 坐标系下的瞬时无功功率和瞬时无功电流的概念^[7]。该方法应用于提取基波的基本思路是先对信号进行 $\alpha\beta$ 变换和 dq 变换,信号中的基频分量被转换为直流分量,而谐波分量转换为频率 $f_k = f_k - f_s$ 的量(其中: f_k 为变换前的谐波频率 f_s 为系统频率, $\alpha\beta$ 变换和 dq 变换的表达式分别为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = C_{23} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}$$

得到信号 u_α 和 u_β 后,对其进行低通滤波,滤波的目的是将非直流分量滤去,仅保留直流分量。然后对信号进行 dq 反变换和 $\alpha\beta$ 反变换,即可获得信号的基波分量。基于无功功率分解最初是对三相系统进行变换,但是对于单相的信号,可以通过人为的将采样信号向后移动 120° 和 240° 来构造一个虚拟的三相系统,再对其进行变换。

信号的无功功率分解将信号的基波成分和扰动成分分为直流成分和振动成分。降低了信号的滤波难度,因此只需设计一个能够将直流成分和其它成分分离的低通滤波器即可。这里可以采用广义形态滤波器,广义形态滤波器对直流信号的滤波去噪效果很好,并且只有加减和取最大最小值的运算,相对于其它方法有计算简单对硬件要求低的优点^[8]。

通常使用的形态滤波器,都是以形态开一闭、形态闭一开运算的组合形式出现^[8]。为避免统计偏倚现象,可以采用开运算和闭运算为不同结构元素的广义形态滤波器^[10]。这里采用广义开一闭(GOC)与广义闭一开(GCO)运算的算数平均来构造滤波器。两者分别定义为

$$GOC(f(n)) = (f \circ g_1 \cdot g_2)(n) \quad (2)$$

$$GCO(f(n)) = (f \cdot g_1 \circ g_2)(n) \quad (3)$$

若要把基波分量以外的分量除去,结构元素的长度就必须大于其他分量进行无功功率分解后的信号半个周期的长度^[11]。因此若信号的采样点是 5 000 Hz 即每周 100 点, g_1 和 g_2 长度就可以选取为 50 和 60 点。由于这里需要保留的信号为直流成分,因此结构元素的形状取扁平结构元素即可。

1.2 重排二次型时频分布理论

Wigner 分布通过信号的相关函数将时间和频率联系起来,获得了真正意义上的时频联合分布函数^[6,12]。Wigner 分布的定义如下。

信号 $x(t)$ 的自 Wigner 分布定义为

$$W_{xx} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-j\Omega\tau} d\tau \quad (4)$$

因为信号在 Wigner 分布的公式中出现过两次,因此此类分布被称之为双线性时频分布,二次型时频分布或是非线性时频分布。Wigner 分布给出了构造时间频率联合分布的方法,但是在信号分析的领域,为了避免负频率的出现,在进行时频变换前需要先将实信号通过 Hilbert 变换成为解析信号。其定义如下。

设 $x(t)$ 为实信号,则其解析信号为

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (5)$$

其中 $\hat{x}(t)$ 为信号 $x(t)$ 的 Hilbert 变换,定义为

$$\hat{x}(t) = H[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (6)$$

WVD 具有许多优良的性质,因此才能在信号分析中的得到应用。这些性质包括实值性,时、频边缘特性,能量边缘特性及有限支撑特性。但是由于 WVD 是非线性的,因此存在着交叉项的问题,采用合适的核函数可以有效的抑制核函数。Cohen 给出了所有二次型时频分布的统一形式。

$$C_{xx}(t, \Omega; g) = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-j\Omega\tau} g(\theta, \tau) d\theta d\tau d\theta \quad (7)$$

其中 $r = x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2)$ 为信号的自相关函数。 $g(\theta, \tau)$ 称为核函数,作用为对模糊域进行滤波。选择不同的核函数,就得到不同类型的分布。不定原理的约束限制了时频分辨率的提高,核函数的选择有时也难以在时域和频域上都较好的抑制交叉项而保留自项,但是对二次时频分布的系数处理可以进一步提高分辨率和抑制交叉项,其中的一个方法就是重排。

Cohen 时频分析可视作为一个核函数和信号 Wigner

er-V ill分布的二维卷积。即在点 (t f)附近区域的一个加权平均。重排的关键在于这些值不必以 (t f)为时频的几何中心对称分布,因此加权平均不应位于点 (t f)而是位于时频域的重心,更能表现信号的局部能量^[13]。

$$C_x(t f \Pi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Pi(t-s f-s)W_s(s \xi)dsd\xi \quad (7)$$

经过推导 Cohen的时频分布可以化为上式的形式,其中 $W_x(S \xi)$ 代表信号的 W igner-V ill分布, $\Pi(t-s f-s)$ 为核函数。重排二次型时频分布的第一步就是先对信号进行二次型时频分布计算,然后在计算时频分布的重心, Cohen类时频分布的时频重心计算公式如下。

$$\begin{aligned} \hat{t} &= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s \Pi(t-s f-s)W_x(s \xi)dsd\xi}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Pi(t-s f-s)W_x(s \xi)dsd\xi} \\ \hat{f} &= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \xi \Pi(t-s f-s)W_x(s \xi)dsd\xi}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Pi(t-s f-s)W_x(s \xi)dsd\xi} \end{aligned} \quad (8)$$

$\hat{t}$ 和 $\hat{f}$ 分别为转移到的时间和频率的中心。重排后的每一点时频分布系数等于所有转移到这一点时频分布系数的叠加。计算的公式如下。

$$C_x(\hat{t} \hat{f} \Pi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C_x(t f \Pi)\delta(\hat{t}-t)\delta(\hat{f}-f)dt df \quad (9)$$

2 算法设计

电能质量扰动信号多可以视为扰动信号和标准工频信号的叠加,由于二次时频分布的非线性,两者之间会存在很大的交叉项,并且对于扰动分量能量较小的信号,很难选择合适的核函数使得在抑制交叉项的同时较好的保留扰动分量的自项,易造成误测和扰动湮没的现象。因此,为了更好地减小交叉项出现的可能,更方便准确地检测出扰动分量,故提出一种基于重排二次型时频分布的电能质量检测算法,其计算步骤可分为以下三步。

(1)基波提取:把采集到的待分析的单相信息向后移动 $1/3$ 和 $2/3$ 个周波作为 b相和 c相,虚构出三相电压。然后将构造的三相电压信号按式 (1)进行 $\alpha \beta$

变换和 d q变换,此时信号的基波成分变成 d q坐标下的直流分量,因此对 u_d 和 u_q 进行低通滤波,滤波器采用广义形态开闭运算和闭开运算的算数平均,具体的计算如式 (2)和式 (3)。然后将滤波后的 u_d 和 u_q 进行 d q反变换和 $\alpha \beta$ 反变换就得到了信号的基波成分。用原信号减去提取到的基波成分即得到了扰动波形。

(2)扰动信号的二次型时频分布:将提取到的扰动信号进行 H ibert变换使之成为解析信号,再按照式 (7)进行二次型时频变换。这里采取的变换方式为平滑伪 WVD,这种分布通过在时域和频域上加窗能对交叉项进行较好的抑制。

(3)时频分布结果的重排:为了进一步提高分辨率和抑制交叉项,对平滑伪 WVD分布的结果进行重排。重排的计算过程如式 (8)和 (10)所示。

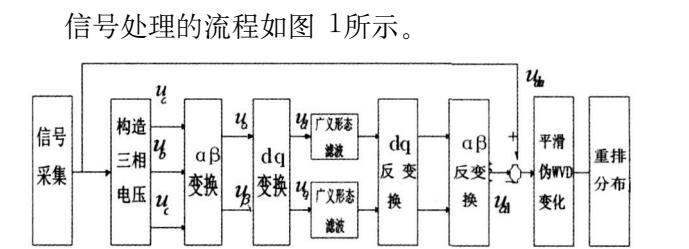


图 1 算法示意图

3 仿真结果与分析

3.1 算法的特性分析

以谐波扰动为例,分析其设计的算法所具有的优势和特性。

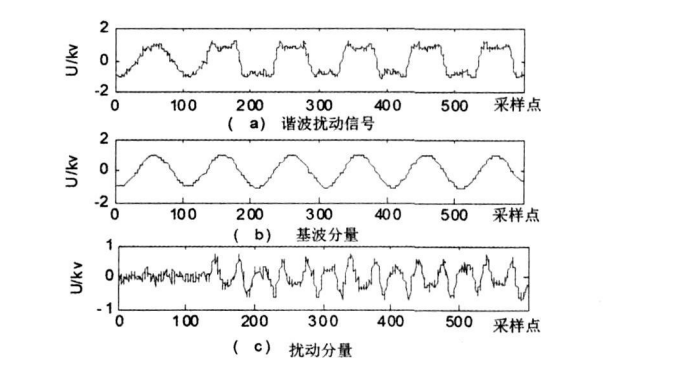


图 2 谐波扰动信号的提取

本算例采用的电能质量扰动信号为一预设的谐波扰动信号 (如图 2(a)),其中基波的幅值为 1 kV,信号从 133点开始加入三次和五次谐波,谐波分量幅值分别为 0.4和 0.2并且添加了方差为 0.1的高斯白噪声。图 2(b)和 (c)为采用无功功率分解和广义

滤波器所提取的基波分量和谐波分量,可以看出此算法可以较好的将信号的基波成分和扰动成分分离。将信号的基波和扰动分离的目的是为了避免在进行二次型时频变换时,基波和扰动成分之间出现的交叉项影响分析效果。为了获得扰动分量的时频信息,对扰动分量进行平滑伪 WVD 及重排。

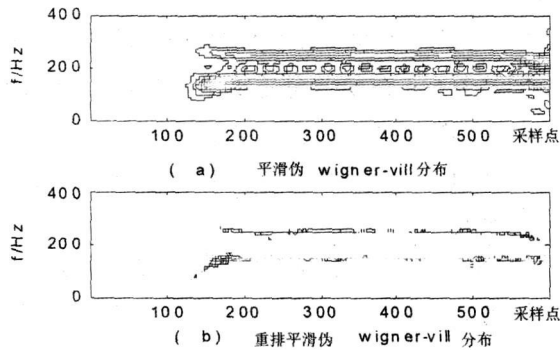


图 3 扰动分量的二次时频变换

图 3(a)为谐波扰动信号的平滑伪 Wigner-Vill 分布,横轴表示时间,纵轴表示频率,颜色反映此点分布系数的大小,也一定程度上反映信号在此点附近的能量。从图中可以直观的读出扰动信号的能量主要积聚在 150 Hz 和 250 Hz 附近,并可以读得信号的扰动分量是从 100 点到 150 点之间开始出现的,因此可以获得大致的扰动起至时刻。但是,从图 3(a)中可以看到,分布结果的时频分辨率不是很高,并且在两个扰动分量之间,还存在着一些振荡的交叉项。图 3(b)为重排后的平滑伪 WVD,从图中可以明显的看到,系数更加集中的分布在 150 Hz 和 250 Hz 附近,说明通过重排确实能够进一步的提高时频分辨率。并且,两个扰动分量之间的交叉项基本消失,说明重排可以更好的抑制交叉项。以上两图的对比表明,重排平滑伪 WVD 比平滑伪 WVD 能更准确的反应信号的时间和频率特征。

为了进一步考察重排平滑伪 WVD 的特性,参考边缘特性的计算,对平滑伪 WVD 分布系数矩阵和重排后的分布系数矩阵进行频率特性提取。二次型时频分布获得的都是一个 $N \times M$ 的矩阵 (N 为数据采样点数, M 代表信号的归一化频率从 0 到 0.5 离散为多少份)。由于平滑窗和能量重排的影响,信号的平滑伪 Wigner-Vill 分布和重排平滑伪 Wigner-Vill 分布很可能丧失了边缘特性,但是既然分布的结果是反映信号的时频特性,仍可以参考频率边缘特性的定义通过对矩阵的运算来检测扰动信号的频率成分。具体的计算如式 (10) 所示。

$$|s(f_h)|^2 = \sum_{n=1}^N C_x(n, f_h) \quad h = 1, 2 \dots M \quad (10)$$

按上式计算算例的频率成分。

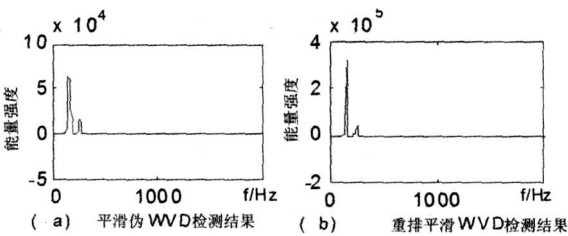


图 4 扰动分量的频率检测

观察图 4 的频率检测结果,两种分布都出现了两个尖峰,说明扰动的谐波成分有两个,从计算结果中寻找两个极大值出现的位置,分别都对应着频率 150 Hz 和 250 Hz。但是,重排后的平滑伪 WVD 频率检测脉冲明显比未重排的窄,说明重排确实使得能量更加集中,获得了更高的频率分辨率。同时,以上的统计也可以作为获得信号的频率成分的一个方法。

以上的分析说明,所设计的方法能够有效的分离基波和扰动,直观的反映扰动信号的时频特征。与直接对信号进行二次型时频分布比较,能够更有效避免和抑制交叉项的出现,并进一步的提高分辨率。实现算法设计的目标。下面采用此方法对其它类型的电能质量扰动和交叉电能质量扰动算例进行仿真,进一步证明此方法的可行性。

3.2 其他类型电能质量扰动信号的仿真结果

电能质量扰动的另一种类型是电压的暂变,包括电压的暂降、暂升和中断。除了电压完全中断为 0,此类扰动的信号频率并未发生变化,因此理想的时频分析中不应该出现基频以外的频率成分,但是由于该算法是通过将信号的数据点移动来虚构三相的信号,也就意味着三相的电压变动不出现在相同时刻,因此在电压暂变时刻后的 2/3 周期内会出现一些系数。以最常出现的电压暂降为例进行计算。

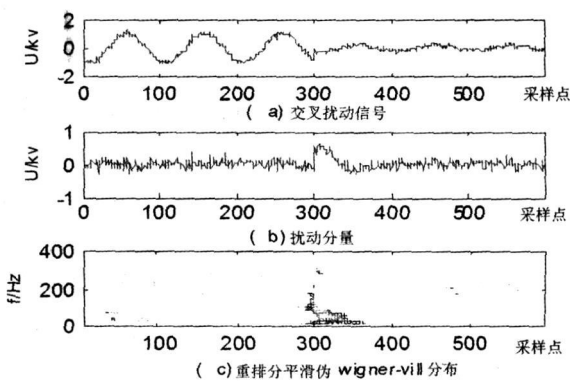


图 5 电压暂降及其分析结果

此算例为一电压暂降信号,在 300 点时,电能质量信号发生暂降,暂降为 0.2 pu 同时信号中加入了高斯白噪声。图 5(c)给出了扰动信号的重排平滑伪 Wigner-Vill 分布,从图中可以看出从 300 点以后,信号出现了一些在基频周围的分量。

除了单一的电能质量扰动以外,还时常会出现一些扰动出现时刻重叠的交叉扰动。如电压暂变的同时往往伴随着一些暂态,这些暂态往往频率比较高,出现时间较短。以下这个算例就是在电压中断时刻同时出现暂态振荡的电压扰动信号。

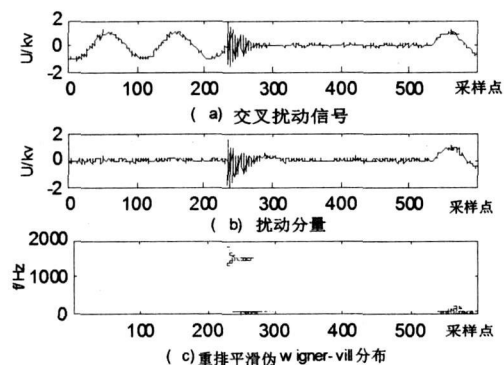


图 6 交叉扰动及其分析结果

信号在 234 点时发生了电压中断并伴随着一个暂态振荡。振荡为频率 1 500 Hz 的常数调频高斯调幅振荡,振荡的最大幅值为 2 pu 持续的时间为 40 个采样点。由图 6(c)为扰动分量的时频表示,由图中可以看到扰动存在于扰动发生的起止点,并可以观察到在扰动发生的开始时刻,不仅存在一个基频附近的分量,还存在一个以 1 500 Hz 频率为中心的分量。因此文中所述的方法,不但能够检测出暂态扰动,还能够将各类型的扰动分离,直观的给出各种扰动的时频信息。

为了证明此算法能够应用于实测信号的分析,以下算例选取的原始信号是来自于牵引供电系统的一组实测信号。实测算例 1 见图 7。

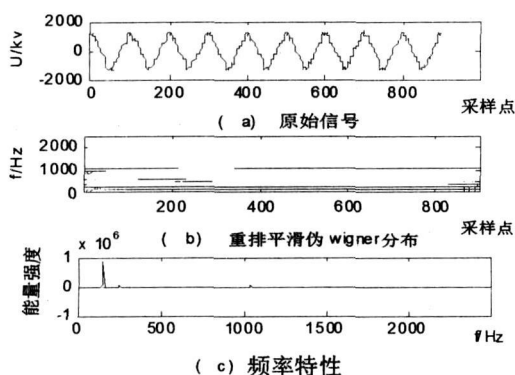


图 7 实测算例 1

本算例数据的采样频率为 5 000 Hz 长度为 900 点。从分析的结果来看,明显为发生谐波扰动的信号,谐波的成分主要为 3 次 5 次和 21 次,其中 3 次和 5 次谐波贯穿于整个信号,21 次谐波有中断,期间还存在一些其它分量的谐波。按照式 (10) 进行频率特性计算,检测到三个比较明显的极大值,分别对应着 150 Hz 250 Hz 和 1 050 Hz 其中以三次谐波的能量最大。

4 结 论

前面介绍了一种基于重排二次型时频分布的电能质量检测的新方法。先利用无功功率分解和广义形态滤波,将电能质量扰动信号的基频成分从信号中分离,然后使用重排二次型时频分布对扰动分量进行变换,从而得到扰动的时间频率联合分布,获得扰动的时频信息。通过预设信号和实测数据的仿真证明了此种方法能有效防止交叉项的出现,获得更好的时频聚集性,对电能质量的扰动检测是直观和有效的。如何从分布矩阵中进一步提取数字特征,结合人工智能的方式进行分类识别是下一步的研究工作。

参考文献

- [1] 林海雪. 现代电能质量的基本问题 [J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5—10.
- [2] 王兆安、杨军、刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京: 机械工业出版社. 1998.
- [3] Wright P S Short-time fourier transforms and wigner-vill distributions applied to the calibration of power frequency harmonic analyzers [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement 1999, 48(2): 475—478.
- [4] Keaochantranond T Boonseng C Harmonics and interharmonics estimation using wavelet transform [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition (Cat No 02CH37377), Yokohama Japan, 2002: 775—777.
- [5] 周厚奎, 张昱, 金心宇. 基于傅立叶和小波变换的电网谐波分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(6): 59—99.
- [6] 胡广书. 现代信号处理教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [7] Angrisani L Daponte P D'Apuzzo M, et al A measurement method based on the wavelet transform for power quality analysis [J]. IEEE Trans Power Delivery 1998, 13(4): 990

—997.

- [8] 岳蔚,刘沛. 基于数学形态学消噪的电能质量扰动检测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(7): 13—17.
- [9] 崔屹. 图象处理与分析——数学形态学方法及应用[M]. 北京, 科学出版社, 2002.
- [10] 赵春晖. 数字形态滤波器理论及其算法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 1998.
- [11] 曾纪勇. 基于数学形态学的电能质量检测方法及应用[D]. 华中科技大学, 2006.
- [12] 王宏禹. 非平稳随机信号分析与处理[M]. 北京, 国防工业出版社, 1999.

- [13] 葛哲学,陈仲生. Matlab时频分析技术及其应用[M]. 北京, 人民邮电出版社, 2006.

作者简介:

王丽霞(1985—),女,山西,硕士研究生,研究方向为数字信号处理及信息理论在电力系统中的应用;

何正友(1970—),男,教授,四川,博士生导师,主要从事现代信息论在电力系统故障分析中的应用、配电网综合自动化等方面的研究工作;

赵静(1982—),女,四川,博士研究生,研究方向为数字信号处理及信息理论在电力系统中的应用。

(收稿日期: 2009—05—10)

(上接第 4 页)

表达,综合考虑了两方面的不确定性,提出了一种更符合实际的综合不确定性评估方法。对个人计算机的仿真结果证明了提出的评估模型及算法的合理性和准确性。

参考文献

- [1] IEEE Std 1159—1995. IEEE Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality
- [2] 程浩忠. 电能质量概论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [3] 王克星,宋政湘,陈德桂,王建华,耿英三. 基于小波变换的配电网电压暂降的干扰源辨识[J]. 中国电机工程学报, 2003, 6.
- [4] M. H. J. Bollen. Reliability Analysis of Industrial Power Systems Taking into Account Voltage Sags[J]. Industry Applications Society Annual Meeting 1993., Conference Record of the 1993 IEEE 2—8 Oct 1993 Page(s): 1461—1468 vol 2.
- [5] Lee G J, Albu M M, Heydt G T. A power quality index based on equipment sensitivity, cost and network vulnerability[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(3): 1504—1510.
- [6] Martinez J A, Martin A J. Voltage sag studies in distribution networks— part II: voltage sag assessment[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1679—1688.
- [7] Gupta P, Milanovic J V. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 711—718.
- [8] Milanovic J V, Gupta C P. Probabilistic assessment of financial losses caused by interruptions and voltage sags part I— the methodology[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 918—924.
- [9] Milanovic J V, Gupta C P. Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags— part II: practical implementation[J]. IEEE Trans on Power De-

livery, 2006, 21(2): 935—932.

- [10] 肖先勇,王希宝,薛丽丽,刘波,杨洪耕. 敏感负荷电压凹陷敏感度的随机估计方法[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 30—33.
- [11] 沈正杰. 敏感性设备受电压骤降影响评估[C]. 中国台湾: 中国台湾国立中山大学博士学位论文. 2007.
- [12] T. A. Short 著, 徐政译. 配电可靠性与电能质量[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [13] Milanovic J V, Aung M T, Gupta C P. The influence of fault distribution on stochastic prediction of voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 278—285.
- [14] 董玉革. 随机变量和模糊变量组合时的模糊可靠性设计[J]. 机械工程学报, 2000, 36(6): 25—29.
- [15] 杨纶标,高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [16] 李安贵,张志宏. 模糊数学及其应用[M]. 第二版. 北京, 冶金工业出版社, 2006.
- [17] C. H. Park and G. Jang. Stochastic Estimation of Voltage Sags in a Large Meshed Network[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(3): 1655—1664.
- [18] M. H. J. Bollen. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions[M]. ser Power Engineering. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000.
- [19] 李娟娟. 电网电压骤降的分析评估及其抑制措施[D]. 福州: 福州大学, 2005.
- [20] C. H. Park, G. Jang and R. J. Thomas. The Influence of Generator Scheduling and Time-Varying Fault Rates on Voltage Sag Prediction[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(2): 1243—1250.

作者简介:

王华伟(1981—),男,硕士研究生,研究方向: 电压稳定及电压无功控制;

李华强(1965—),男,博士,教授,长期从事电压稳定及优化问题研究。

(收稿日期: 2009—04—11)

多馈入直流系统换流母线电压之间的相互影响 及其同时换相失败的研究

肖 俊, 李兴源, 杨小兵

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 为了研究多馈入直流系统中换流母线电压之间的相互影响, 以交直流系统潮流计算为基础, 推导得出了多馈入直流系统换流母线电压相互影响的关系式。然后据此分析研究了某条或某几条换流母线附近发生故障是否会引起多个换流站同时换相失败, 并推导得到了相应的临界电气距离。最后, 以 CIGRE HVDC 标准模型为基础构建三馈入直流输电系统模型, 并用 PSCAD 进行仿真分析, 验证了换流母线电压相互影响关系式的合理性。

关键词: 多馈入直流; 换流母线电压; 相互影响; 换相失败; 临界电气距离

Abstract: For researching the interaction among converter buses in M IDC (Multi-Infeed Direct Current) system, the converter bus voltage interaction formula of M IDC is deduced based on power flow equation of AC/DC system. And then, according to the formula, whether the faults of one or several converter buses will lead to the occurrence of commutation failure in other direct current systems is analyzed, meanwhile the critical electrical distance is also deduced. At last, a three-infeed HVDC (high voltage direct current) model is constructed according to the CIGRE HVDC, and then the model is simulated and analyzed by PSCAD. According to the result of simulation, it shows that the converter bus voltage interaction formula is reasonable.

Key words: multi-infeed HVDC; converter bus voltage; interaction; commutation failure; critical electrical distance

中图分类号: TM721.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0011-05

0 引 言

由于高压直流 (High Voltage Direct Current HVDC) 输电在远距离、大容量输电和电力系统联网等方面的显著优势, 使其在中国“西电东送”和“全国联网”中发挥了重要作用。随着中国电网的建设和高压直流输电技术的发展, 多回直流输电线路落在同一个交流系统是不可避免的^[1]。由此, 便形成了多馈入直流输电系统 (Multi-Infeed Direct Current M IDC)。目前, 天广、三广及贵广 I、II 4 回直流落点广东, 葛南、龙政及宜华 3 回直流落点上海和常州, 多馈入高压直流输电系统已在中国南方电网和华东电网中形成。根据规划, 到 2015 年南方电网将有 7 回甚至更多的直流落点其中, 华东电网将有 8 回或者更多的直流落点其中, 届时将形成世界上落点最多、结构最复杂的交直流输电系统。

基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助项目 (2004CB217907); 国家科技支撑计划项目 (2008BAA13B01)

在多馈入直流系统中, 各回系统相互影响, 一回或多回输电系统发生故障将不可避免地影响到其它各回输电系统。这种影响与各回系统自身强度、系统间的联系紧密程度都有关。然而, 到目前为止, 换流母线电压之间的相互影响还有待进一步研究^[2~5]。针对这一情况, 以交直流系统潮流计算为基础, 推导得出了多馈入直流系统各换流母线电压间相互影响的关系式。然后据此分析研究了某条或某几条换流母线附近发生故障是否会引起多个换流站同时换相失败, 并推导得到了相应的临界电气距离。最后, 以 CIGRE HVDC 标准模型^[6]为基础构建三馈入直流输电系统模型, 并用 PSCAD 进行仿真分析, 验证了换流母线电压相互影响关系式的合理性。

1 换流母线电压对换相失败的影响

当两个桥臂之间换相结束后, 刚退出导通的阀在反向电压作用的一段时间内, 如果未能恢复阻断能力, 或者在反向电压期间换相过程一直未能进行完

毕,这两种情况在阀电压转变为正向时被换相的阀都将向原来预定退出导通的阀换相,称之为换相失败。换相失败的本质是逆变器熄弧角 γ 小于阀固有极限熄弧角 $\gamma_{\min}^{[7]}$ 。

交流系统中换流母线电压变化是导致换相失败的主要原因,它主要从两方面影响换相过程:电压幅值和电压过零点相位移^[8]。在文献[9]中分别给出了电压幅值和电压过零点相位移对换相失败的影响如下。

在三相对称故障情况下,换流母线电压幅值降低。此时,存在某个临界电压降,当换相电压降低的程度超过这个值就会引发换相失败,这里简称为临界电压降^[10],用 ΔU 表示。

$$\Delta U \approx 1 - \frac{X_c}{X_c + \cos \gamma_0 - \cos \gamma} \quad (1)$$

式中, X_c 为换相电抗 (pu); γ_0 为换流阀固有极限熄弧角; γ 为直流系统额定熄弧角。

不对称故障情况下,伴随电压幅值降低的同时换相电压过零点发生了相位移。此时,考虑过零点相位移的情况下,换相失败的临界电压降 ΔU 可表示为

$$\Delta U \approx 1 - \frac{X_c}{X_c + \cos(\gamma_0 + \phi) - \cos \gamma} \quad (2)$$

式中, ϕ 为过零点的位移角度,当 $\phi=0$ 时即为式(1)的形式。研究认为,在换相失败中起决定性作用的是换相电压幅值的降低而不是电压过零点漂移^[9]。

2 多馈入直流系统换流母线电压之间的相互影响

在多馈入直流系统中,直流与直流系统间、交流与直流系统间相互影响。一个系统发生故障可能不仅导致自身的直流系统发生换相失败,甚至可能引发多个直流系统发生换相失败。一个故障是否会引发多个直流系统同时发生换相失败不仅与各系统自身强度有关,而且与各系统间的耦合强度有关。由于交流系统换流母线电压的变化是导致换相失败的主要原因,因此可以通过研究多馈入直流系统换流母线间的电压影响关系来分析一条换流母线(或多条换流母线)附近发生故障是否会引发其他多个换流站同时发生换相失败。

多馈入直流输电系统的潮流计算属于交直流输电系统潮流计算。归纳目前已经提出的各种交直流电力系统潮流算法,可以基本上分成两大类:联合求解法及交替求解法^[11]。联合求解法将交流系统潮流

方程组和直流系统的方程组联立起来,统一求解出交流及直流系统中所有未知变量。而交替求解法则将交流系统潮流方程组和直流系统的方程组分开来求解,求解直流系统方程组时各换流站的交流母线电压由交流系统潮流的解算结果提供;而在进行交流系统潮流方程组的解算时,将每个换流站处理成接在相应交流节点上的一个等效的有功、无功负荷,其数值则取自直流系统潮流的计算结果。这样交替迭代计算,直到收敛。由于交流和直流系统方程组在迭代过程中分别单独进行求解,计算交流系统潮流,就可以采用任何一种有效的交流潮流算法。至于直流系统方程组,则可以仍用牛顿法求解。若交流潮流采用快速解耦法模型,则交替求解算法就变成依次迭代求解下列三个方程组^[11]。

$$d = J_{dc} \Delta x \quad (3)$$

$$\Delta P / U = B' \Delta \theta \quad (4)$$

$$\Delta Q / U = B'' \Delta U \quad (5)$$

其中, d 为直流系统中每个换流器所对应的方程组, x 为直流系统变量向量 $x = [U_d, I_d, K_a, \cos \theta_d, \varphi]^T$, $J_{dc} = \frac{\partial d}{\partial x}$ 。系数矩阵 B'' 由节点导纳矩阵的虚部构成。矩阵 B' 与 B'' 阶数不同,且其元素在节点导纳矩阵虚部的基础上进行了相应的修改^[11]。

交替求解法将交流和直流系统方程组分开求解,在求解过程中分别把分界线上的电压及注入无功功率近似地看成是恒定的,忽略了彼此的耦合。当交流系统较强时换流站交流母线电压对注入无功功率变化并不敏感,其收敛特性是非常好的。鉴于此,在用交替求解法计算交直流系统潮流时,近似地只对交流系统进行一次潮流计算而不对直流系统进行潮流计算且不再继续往后迭代。此时在计算交流系统潮流时直流系统等效成有功、无功负荷。经过这一近似化简之后,交直流系统的潮流计算由依次迭代求解式(3)、(4)、(5)变为只对式(4)、(5)进行一次计算。

对于如图 1 所示的 n 馈入直流输电系统,根据式(5)有

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta Q_1}{U_1} \\ \frac{\Delta Q_2}{U_2} \\ \vdots \\ \frac{\Delta Q_n}{U_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ B_{n1} & B_{n2} & \cdots & B_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

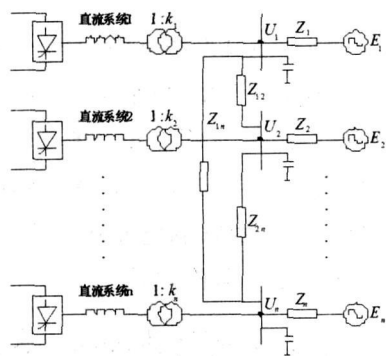


图 1 多馈入直流系统简化模型

其中, $\Delta U_1, \Delta U_2, \dots, \Delta U_n$ 为各换流母线电压的幅值变化量, $\Delta Q_1, \Delta Q_2, \dots, \Delta Q_n$ 为各换流母线处的无功变化量, B_{ij} 为导纳 Y_{ij} 的虚部。

由此,可以得到一组方程式:

$$\frac{\Delta Q_j}{U_j} = B_{j1} \Delta U_1 + B_{j2} \Delta U_2 + \dots + B_{jn} \Delta U_n \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

对于非故障系统 j 假设 $\Delta Q_j / U_j = 0$ 即可得到第 j 条换流母线电压幅值的变化量与其他系统换流母线电压幅值变化量 ΔU_i ($i=1, 2, \dots, n, i \neq j$) 的关系式。

$$\Delta U_j = -\frac{B_{j1}}{B_{jj}} \Delta U_1 - \frac{B_{j2}}{B_{jj}} \Delta U_2 - \dots - \frac{B_{jn}}{B_{jj}} \Delta U_n \quad (8)$$

对于 n 馈入直流输电系统,根据上式可以列出所有非故障系统 (m 个) 对应换流母线电压幅值变化量 ΔU_j 的表达式,共 m 个。在这 m 个方程中,故障系统换流母线电压幅值变化量 ΔU_i ($n-m$ 个) 为已知量,非故障系统换流母线电压幅值的变化量 ΔU_j (m 个) 为待求量。通过解这个方程组便可以求解出当某一个(或多个)系统发生故障其换流母线电压幅值变化 ΔU_i 时,非故障系统换流母线电压幅值变化量 ΔU_j 。

下面以三馈入系统为例来说明求解的过程。对于三馈入直流输电系统,有:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta Q_1}{U_1} &= B_{11} \Delta U_1 + B_{12} \Delta U_2 + B_{13} \Delta U_3 \\ \frac{\Delta Q_2}{U_2} &= B_{21} \Delta U_1 + B_{22} \Delta U_2 + B_{23} \Delta U_3 \\ \frac{\Delta Q_3}{U_3} &= B_{31} \Delta U_1 + B_{32} \Delta U_2 + B_{33} \Delta U_3 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

假设系统 1 处发生某种故障导致其换流母线电压幅值改变 ΔU_1 , 为已知量。系统 2、系统 3 均未发生故障,但是受系统 1 的影响,其换流母线电压幅值也会有一定的改变,改变值为 ΔU_2 和 ΔU_3 , 为待求量。

对于系统 2 有

$$\frac{\Delta Q_2}{U_2} = B_{21} \Delta U_1 + B_{22} \Delta U_2 + B_{23} \Delta U_3 \quad (10)$$

假设 $\Delta Q_2 / U_2 = 0$, 则有

$$\Delta U_2 = -\frac{B_{21}}{B_{22}} \Delta U_1 - \frac{B_{23}}{B_{22}} \Delta U_3 \quad (11)$$

对于系统 3, 有

$$\frac{\Delta Q_3}{U_3} = B_{31} \Delta U_1 + B_{32} \Delta U_2 + B_{33} \Delta U_3 \quad (12)$$

假设 $\Delta Q_3 / U_3 = 0$, 则有

$$\Delta U_3 = -\frac{B_{31}}{B_{33}} \Delta U_1 - \frac{B_{32}}{B_{33}} \Delta U_2 \quad (13)$$

综合式 (11)、(13), 得

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_2 &= -\frac{B_{21}}{B_{22}} \Delta U_1 - \frac{B_{23}}{B_{22}} \Delta U_3 \\ \Delta U_3 &= -\frac{B_{31}}{B_{33}} \Delta U_1 - \frac{B_{32}}{B_{33}} \Delta U_2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

求解该方程组, 可得

$$\Delta U_2 = \frac{B_{23} B_{31} - B_{21} B_{33}}{B_{22} B_{33} - B_{23} B_{32}} \Delta U_1 \quad (15)$$

$$\Delta U_3 = \frac{B_{32} B_{21} - B_{31} B_{22}}{B_{33} B_{22} - B_{32} B_{23}} \Delta U_1 \quad (16)$$

式 (15)、(16) 即为三馈入系统的换流母线电压影响关系式, 其中 ΔU_1 为故障系统 1 换流母线电压幅值变化量, ΔU_2 和 ΔU_3 为非故障系统 2、3 换流母线电压幅值的变化量。

3 换相失败与临界电气距离的分析

根据式 (1)、(2), 知道对于换流站是否发生换相失败存在一个临界电压降, 用 $\Delta U_{\max}$ 表示。当换流母线电压降低的程度超过这个值时, 就会发生换相失败。多馈入直流系统中, 某条(或某几条)换流母线附近发生故障时, 与其相应的直流系统是否会发生换相失败以及其他直流系统是否会同时发生换相失败均取决于它们的换流母线电压降低的程度是否超过临界电压降 $\Delta U_{\max}$ 。因此, 可以借助上面得到的换流母线电压相互影响关系式来分析某条(或某几条)换流母线附近发生故障时, 是否会引起其他直流系统同时发生换相失败。

现以三馈入系统为例, 说明如何判断换相失败是否发生以及多个换流站同时发生换相失败时临界电气距离的求解。

假设系统 1 换流母线附近发生某种故障 (系统 2、3 未发生故障) 导致其换流母线电压幅值改变 ΔU_1 , 通过比较 ΔU_1 与 $\Delta U_{\max}$ 就可以知道直流系统 1 是否会发生换相失败。若 $\Delta U_1 < \Delta U_{\max}$, 则不会发生换相失败, 若 $\Delta U_1 > \Delta U_{\max}$, 则会发生换相失败。那么受系统 1 的故障影响, 直流系统 2、3 是否会发生换相失败呢? 根据式 (15)、(16), 可以方便地求得当系统 1 换流母线电压幅值改变 ΔU_1 时, 系统 2、3 处换流母线电压幅值的改变量 ΔU_2 、 ΔU_3 。通过比较 ΔU_2 、 ΔU_3 与临界电压降 $\Delta U_{\max}$, 就可以判断直流系统 2、3 是否会发生换相失败。

那么受系统 1 故障影响, 直流系统 2、3 发生换相失败时的临界电气距离是多少呢? 根据式 (15)、(16), 将 ΔU_2 、 ΔU_3 分别取为临界电压降 $\Delta U_{\max}$, 其对应着直流系统 2、3 是否发生换相失败的临界状态。此时有

$$\Delta U_2 = \Delta U_{\max} = \frac{B_{23} B_{31} - B_{21} B_{33}}{B_{22} B_{33} - B_{23} B_{32}} \Delta U_1 \quad (17)$$

$$\Delta U_3 = \Delta U_{\max} = \frac{B_{32} B_{21} - B_{31} B_{22}}{B_{33} B_{22} - B_{32} B_{23}} \Delta U_1 \quad (18)$$

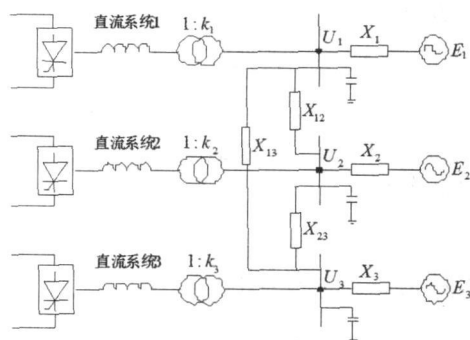


图 2 三馈入直流系统简化模型

为计算简便, 假设各支路均为纯感性, 如图 2 所示。分别求解式 (17)、(18), 可得临界电气距离如下。

$$X_{12cr} = \frac{A_1 (\Delta U_1 - \Delta U_{\max})}{B_1 \Delta U_{\max} - C_1 \Delta U_1} \quad (19)$$

$$X_{13cr} = \frac{A_2 (\Delta U_1 - \Delta U_{\max})}{B_2 \Delta U_{\max} - C_2 \Delta U_1} \quad (20)$$

其中:

$$A_1 = X_2 X_{13} X_{23} + X_2 X_3 X_{23} + X_2 X_3 X_{13}$$

$$B_1 = X_{13} X_{23} + X_3 X_{23} + X_3 X_{13} + X_2 X_{13} + X_2 X_3$$

$$C_1 = X_2 X_3$$

$$A_2 = X_3 X_{12} X_{23} + X_2 X_3 X_{23} + X_2 X_3 X_{12}$$

$$B_2 = X_{12} X_{23} + X_2 X_{23} + X_2 X_{12} + X_3 X_{12} + X_2 X_3$$

$$C_2 = X_2 X_3$$

X_{12cr} 、 X_{13cr} 分别为换流母线 1 附近发生故障时引起直流系统 2、3 换相失败时的临界电气距离。由式 (19)、(20) 可知, 临界电气距离 X_{12cr} 、 X_{13cr} 与系统自身强度 X_2 、 X_3 , 非故障系统 2、3 间电气联系强度 X_{23} , 其它非故障系统 3、2 与故障系统 1 间电气联系强度 X_{13} 、 X_{12} 及故障大小 ΔU_1 均有关系。

4 换流母线电压相互影响关系式的仿真验证

前面已经分析得到了换流母线电压相互影响关系式以及换流母线电压与换相失败的关系, 并以此为基础推导得到了临界电气距离的表达式。其中, 换流母线电压相互影响关系式是后续推导的基础, 其准确与否是后续工作的关键, 因此下面通过仿真软件 PSCAD 仿真分析换流母线电压相互影响关系式的准确性。

以标准直流输电系统 CIGRE HVDC 为基础建立三馈入直流输电系统模型, 且为计算方便各联络线均取为纯感性 $Z_{12} = jX_{12}$ 、 $Z_{23} = jX_{23}$ 、 $Z_{13} = jX_{13}$, 如图 2 所示。在此模型基础上通过 PSCAD 仿真分析在不同故障情况、不同电气距离情况下, 换流母线电压相互影响关系式的计算值和实际值之间的误差。

方案 1: 取 $X_{12} = X_{23} = X_{13} = \omega L = 15.708 \Omega$ ($L = 0.05H$), Z_1 、 Z_2 、 Z_3 为标准直流输电系统的默认值 $5.4985 + j0.4660 \Omega$ 。t=3 s 时在系统 1 换流母线处并联电感 L 引起系统无功扰动改变 U_1 的运行幅值, 根据相应的 ΔU_1 通过式 (15) 计算得出换流母线 1 故障发生后系统 2 换流母线处的电压幅值 U_2 并和实际运行值 U_2 进行比较。

将上述线路参数代入式 (15), 得

$$\Delta U_2 = 0.5828 \Delta U_1 \quad (21)$$

于是可由换流母线 1 附近故障所引起的 ΔU_1 计算出换流母线 2 电压幅值的变化量 ΔU_2 进而求得换流母线 2 的电压幅值 U_2' , 如表 1 所示。

图 3、4 表示在 t=3 s 时换流母线 1 处并联电感 L 引起系统无功扰动, 换流母线 1、2 处的电压幅值。L 取值不同引起的无功扰动大小也不同, 换流母线 1、2 处电压下降幅值也随之不同。

表 1 中, L' 为换流母线 1 处的并联电感, 表示对系统 1 的无功扰动, 代表故障; U_1 、 U_1' 为故障前后换

流母线 1 处的电压; $\Delta U_1 = U_1 - U'_1$ 为故障后换流母线 1 电压幅值的变化量; U_2 、 U'_2 为故障前后换流母线 2 处的电压; ΔU_2 为故障后换流母线 2 电压幅值的变化量, 根据式 (21) 求得; $U''_2 = U_2 - \Delta U_2$ 为故障后换流母线 2 处电压的计算值。

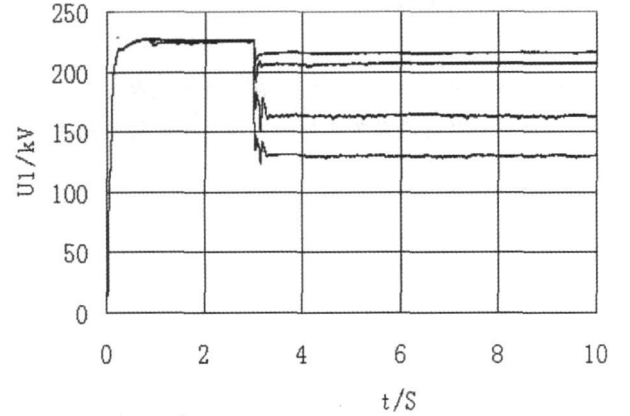


图 3 直流系统 1 换流母线电压 U_1

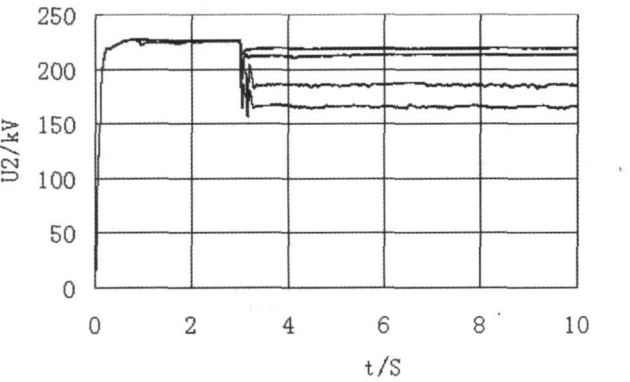


图 4 直流系统 2 换流母线电压 U_2

表 1 故障后直流系统 2 换流母线电压的计算				
L'/H	0.05	0.10	0.50	1.00
U_1/kV	226.0			
U'_1/kV	130.00	163.00	207.25	215.75
$\Delta U_1/kV$	96.00	63.00	18.75	10.25
U_2/kV	226.0			
$\Delta U_2/kV$	55.95	36.72	10.93	5.97
U'_2/kV	165.50	185.50	213.25	219.40
U''_2/kV	170.05	189.28	215.07	220.03
相对误差 ($U''_2 - U'_2$)/ $U'_2(\%)$	22.75	2.04	0.85	0.29

方案 2: 改变联络线的长度, 取 $X_{12} = X_{23} = X_{13} = \omega L = 62\,831.9\,\Omega$ ($L = 0.2\text{H}$), Z_1 、 Z_2 、 Z_3 仍为标准直流输电系统的默认值 $5\,498.5 + j20\,466.0\,\Omega$ 。其他同方案 1。根据式 (15) 计算故障后换流母线 2 处的电压 U''_2 。

将线路参数代入式 (15), 得:
$$\Delta U_2 = 0.2588 \Delta U_1 \tag{22}$$

于是可以计算得到相应的 ΔU_2 和 $\Delta U''_2$, 如表 2 所示。

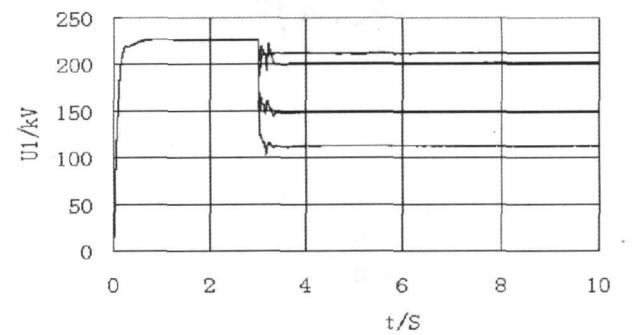


图 5 直流系统 1 换流母线电压 U_1

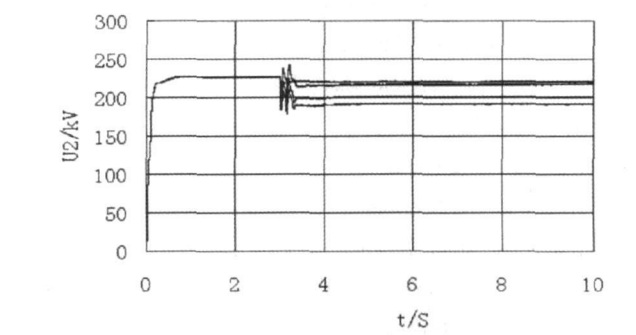


图 6 直流系统 2 换流母线电压 U_2

同样, 图 5、6 表示在 $t = 3\text{ s}$ 时换流母线 1 处并联电感引起系统无功扰动, 换流母线 1、2 处的电压幅值。L 取值不同引起的无功扰动大小也不同, 换流母线 1、2 处电压下降幅值也随之不同。

表 2 故障后直流系统 2 换流母线电压的计算				
$L'(H)$	0.05	0.10	0.50	1.00
$U_1(kV)$	226.0			
$U'_1(kV)$	112.50	149.25	201.50	212.50
$\Delta U_1(kV)$	114.10	77.35	25.10	14.10
$U_2(kV)$	226.0			
$\Delta U_2(kV)$	29.53	20.02	6.50	3.65
$U'_2(kV)$	191.60	201.50	217.30	221.00
$U''_2(kV)$	197.10	206.58	220.10	222.95
相对误差 ($U''_2 - U'_2$)/ $U'_2(\%)$	2.87	2.52	1.29	0.88

表 2 中各项的含义与表 1 相同。

从仿真结果可以看到, 换流母线电压相互影响关系式的计算值和实际值之间的误差是较小的, 且故障越小, 计算精度越高。通过仿真说明了前述推导所得的换流母线电压相互影响关系式是合理的。

5 结 论

(下转第 64 页)

了定期预防性试验的不足,但是同时也还存在一些问题;如谐波分析法的软件处理误差问题。对设备绝缘进行在线检测的最终目的是为了及时、准确地掌握电力系统运行中设备的绝缘状况,因此仅仅通过在线检测获得设备的绝缘参数的结果是远远不够的,还要对这些结果进行综合性的分析与诊断。但是,目前的在线检测方法仍往往局限于将设备的绝缘参数与单一、静态标准进行比较,没有使在线检测的优势得到充分发挥。对于对比分析同一设备高压下在线测量值与低压下停电预防性测量值的差距及影响在线检测值的因素及程度也是目前研究工作中一大问题。另外,应用于介质损耗因数分析的谐波分析法因现场各种原因而存在频谱泄漏的问题,那么如何在软件上进行改进,提高电流传感器稳定性和测量精度,采用数字信号传输,提高抗干扰能力,从而消除由于频谱泄漏

而带来的误差也是目前思考解决的课题之一。

参考文献

- [1] 朱德恒. 严璋高电压绝缘 [M]. 北京:清华大学出版社, 1992.
- [2] 严璋. 电气绝缘在线检测技术 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
- [3] 王乃庆. 绝缘在线监测技术的实用性、经济性和可靠性 [J]. 电网技术, 1995, 19(11): 54—56, 60.
- [4] 成永红. 电力设备绝缘检测与诊断 [M]. 中国电力出版社, 2001: 65—79.
- [5] 蔡国雄. 介质损耗测量的过零点电压比较法 [J]. 电网技术, 1995, 19(10): 1—5.

(收稿日期: 2009—04—27)

(上接第 15 页)

通过前面的理论分析以及仿真验证,可以得到以下结论。

(1) 分析了换流母线电压对换相失败的影响。换流母线电压变化是导致换相失败的主要原因,它主要从两方面影响换相过程:电压幅值和电压过零点相位移,得到了换相失败发生时的临界电压降。当换相电压降低的程度超过这个值就会引发换相失败。

(2) 推导得出了换流母线电压间相互影响的表达式。并以此为基础推导得到了换相失败时的临界电气距离,它与系统自身的强度、故障大小以及与其它系统间的电气联系强度等均有关系。

(3) 最后,通过仿真验证了根据换流母线电压相互影响关系式计算所得的换流母线电压与实际电压误差是较小的,且故障越小,非故障系统离故障系统电气距离越远计算精度越高。在工程上具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 林凌雪,张尧,钟庆,宗秀红. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述 [J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40—46.
- [2] 王晶芳,王智冬,李新年,胡涛,蒋卫平,王明新,向孟奇,李焕明. 含特高压直流的多馈入交直流系统动态特性仿真 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 97—102.
- [3] 林伟芳,汤涌,卜广全. 多馈入交直流系统电压稳定性研究 [J]. 电网技术, 2008, 32(11): 7—12.
- [4] 杨卫东,徐政,韩祯祥. 多馈入交直流电力系统研究中的

相关问题 [J]. 电网技术, 2000, 24(8): 13—17.

- [5] 凌晓波,刘蓓,王冲. 高压直流输电系统多落点及研究现状 [J]. 上海电力, 2008, (1): 72—74.
- [6] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京:科学出版社, 1998.
- [7] 浙江大学直流输电科研组. 直流输电 [M]. 北京:电力工业出版社, 1982.
- [8] Lidong Zhang, Lars Dofnas. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems [C]. Proceedings Power Conference 2002, 1: 51—56.
- [9] 孙志媛,梁小冰,孙艳. 基于 EMTDC 的多馈入直流输电系统仿真研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(10): 259—298.
- [10] Changchun Zhou, Zheng Xu. Study on commutation failure of multi-infeed HVDC system [C]. International Conference on Power System Technology, 2002: 2462—2466.
- [11] 诸骏伟. 电力系统分析 [M]. 北京:水利电力出版社, 1995.

作者简介:

肖俊 (1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制;

李兴源 (1945—), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作;

杨小兵 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2009—05—10)

基于衰减电流分量的双树复小波相位选线原理

周登登, 刘志刚, 符伟杰, 胡 非

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:过补偿情况下,在对小电流接地故障特征详细分析的基础上,发现故障线路与正常线路存在着衰减电流的差别,此差别电流反映在复小波变换相位上体现为相位的延迟,据此,通过采用具有时移不变性的双树复小波构造相位选线算法从而避免了实小波分解结果的不确定性,另外也对过补偿情况下相位选线失效的问题提出了一个新的解决方案。仿真实例验证了所提出的算法有效、可行性。

关键词:小电流接地;双树复小波;时移不变性;相位选线

Abstract: Based on the analysis of fault features of neutral un-effectual grounded system in the case of overcompensation, it is found that there are some differences of decaying currents between fault line and normal line. These differences are presented as the delay of phase in complex wavelet transform phase relationship. So a line selection method based on dual-tree complex wavelet which possesses the characteristics of shift invariant is proposed. As a result, the uncertainty of real wavelet analysis results can be avoided. In addition, this method proposes a new solution scheme towards line selection failure problem in overcompensation situation. At last, the simulation examples prove the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: neutral un-effectual grounded system; dual-tree complex wavelet; shift invariant; phase line selection

中图分类号: TM713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0016-04

0 引 言

小电流接地选线^[1,2]问题一直是困扰电力科技工作者的一个难题。究其原因,一方面是电流信号微弱,存在各类弧光接地^[3],信号受干扰影响大,提取困难;另一方面就是理论研究不充分。由于小电流接地选线是一种非常实用的技术,因此各类选线算法层出不穷^[4~6],但目前的算法大多是利用一种新的信号处理工具对故障信号进行处理,而并不从理论上给故障情况予以研究,虽然有的文章列出了理论基础,但是这套理论与文章所建立的模型并不吻合,以致出现结论胡乱套用的现象,严重影响了后续选线方法的正确性。针对过补偿情况下正常线路与故障线路电流流向同向,以至于传统比相关系不成立,造成选线困难的难题,下面从叠加原理出发研究小电流接地系统单相接地纯故障电流特征,发现正常线路与故障线路由于存在衰减直流或衰减震荡电流的差异,从而造成两种线路电流在复小波变换相位关系上表现为某些差别(这种差别并非是相位相反),根据这种差别可

以构成基于复小波的相位选线原理,仿真实例验证了该法的可行性。

1 复小波相位选线算法

1.1 分析工具的选择

由于故障信号是一非平稳信号,小波在分析非平稳信号方面的能力是传统信号分析工具所不能及的,因此选择小波作为信号分析的工具。而实小波存在分解系数震荡^[7],缺乏相位信息和平移敏感性^[8]三大缺点。这就导致分解的结果可信度较差,况且相位信息是信号的一大特征量。双树复小波^[8]完全克服了实小波的以上缺点,并且具有频域解析^[9,10]的功能,而其他复小波只是得到了相位信息,并不具有双树复小波的其他特点,而这些特点对于分析结果的可信度具有很大影响,因此这里选择双树复小波。

1.2 相位选线原理

图 1 为中性点经消弧线圈接地,出线条数为 n 的配电系统故障示意图。

图 1 中 U_0 为故障点故障前瞬间电压绝对值。 C_n 为出线 n 的单相对地电容, L 为补偿电感。视配电系统为一线性系统,根据叠加原理可知故障情况等

基金项目:教育部霍英东青年教师基金资助项目(101060);四川省杰出青年基金项目(07ZQ026-012)

价于电网正常运行情况与纯故障 (此时无发电电源) 的叠加。因此可以画出纯故障情况下的原理图, 见图 2。

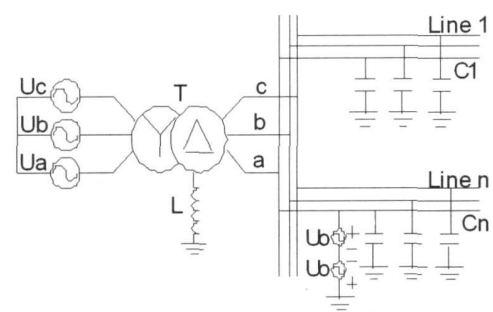


图 1 配电系统故障示意图

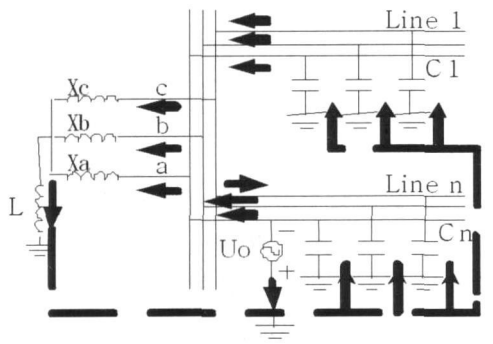


图 2 纯故障原理图

图中箭头方向为纯故障容性电流的流向 (假设欠补偿)。 X_a 、 X_b 、 X_c 分别为相应相变压器的电感。假设线路是均匀线路, 由于架空线路的电阻、感抗和变压器的感抗较线路容抗要小得多, 可以忽略, 因此图 2 又可以化简为图 3。

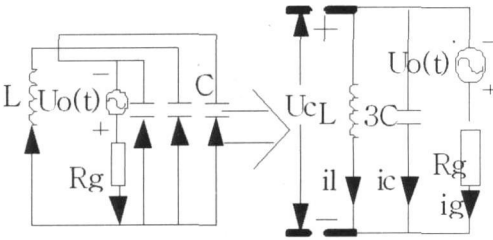


图 3 简化等效电路图

图 3 中, L 为补偿电感; C 为每相线路零序电容总和; R_g 为故障过渡电阻; $U_0(t)$ 为故障点故障前瞬间电压; U_c 为补偿电感两端电压; i 为补偿支路的纯故障电流; i_l 为各线路 (包括故障线路) 纯故障电流总和; i_g 为故障点的对地纯故障电流。

通过简化电路可知, 各条出线的电压均相等, 电流相位都相同。当过渡电阻为零欧时, 假设故障前瞬间 a 相电压为 $U_{na}=U_0$, 则 b 、 c 相分别为 $U_{nb}=\gamma U_0$, $U_{nc}=\gamma^2 U_0$, 其中, $\gamma=e^{-j120^\circ}$, 相应的 $\dot{I}_{na}=U_0 j\omega C$, $\dot{I}_{nb}=\gamma U_0 j\omega C$, $\dot{I}_{nc}=\gamma^2 U_0 j\omega C$ 。对于纯故障电路, $\dot{I}_{fa}=-$

$U_0 j\omega C$, $\dot{I}_{fb}=-U_0 j\omega C$, $\dot{I}_{fc}=-U_0 j\omega C$ 。得合成电流为

$$U_a = \frac{(\dot{I}_{fa} + \dot{I}_{fb})}{j\omega C} = 0 \tag{1}$$

$$U_b = \frac{(\dot{I}_{fb} + \dot{I}_{fc})}{j\omega C} = e^{-j150^\circ} \sqrt{3} U_0 \tag{2}$$

$$U_c = \frac{(\dot{I}_{fc} + \dot{I}_{fa})}{j\omega C} = e^{-j120^\circ} \sqrt{3} U_0 \tag{3}$$

由此可见, 该法分析故障后的稳态电压符合小电流接地系统的故障特征。正常相的电压升高来源于故障相的放电。但是由于故障电压源流经故障相的流通回路不同于它流经正常相的流通回路, 因此, 正常相与故障相的电流相位存在一定差别。

对图 3 的电路列微分方程得

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = u_0 - R_g (i_l + i_g) \\ 3C \frac{du_c}{dt} = i \\ u_c = u_0 - (i_l + i_g) R_g \end{cases} \tag{4}$$

假设故障前的电压为 $u(t)=A\sin(\omega t+\theta)$, 其中, θ 为故障初相角; ω 为电网角频率; A 为电压最大幅值。由于故障前不存在纯故障电路, 因此纯故障电路里各个电量的初始值均为零。据此可化简上式得

$$3LCR_g \frac{d^2 i}{dt^2} + L \frac{di}{dt} + R_g i = u_0 \tag{5}$$

易知, 稳态电感电流为 $i_{l(\infty)} = \frac{u_0}{R_g}$, 稳态电容电流为 $i_{c(\infty)} = \frac{-3LC\omega^2}{R_g} u_0$ 。

假设各出线每相线路总长 66 km, 当选取每相线路单位对地零序电容为 $C=C_{0\Sigma}=\frac{1}{\omega X_{0C}}=0.006\times$

10^{-9} F/m (典型值) 时, 采用 8% 补偿度, 得转折过渡电阻为 1 290 Ω , 即在中等电阻的情况下, 电感电流类型就发生了转变, 由衰减直流转变成衰减震荡。由于过渡电阻可以达到 20 000 Ω (树枝接地等), 在发生间歇性弧光接地时, 过渡电阻也可以达到很大的数值, 因此教科书里所谓的“接地电阻一般都很小”的说法与讨论均是不全面的。在选取一些权威电力参数的情况下, 反复仿真所得的结果也验证了故障电流具有两种不同的表现形态。因此, 有必要研究不同阻值情况下的电感、电容电流变化情况。

暂态电流的解按以下情况讨论。

当 $R_g < \frac{\sqrt{3}}{6} \sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 解为

$$i = \lambda_1 e^{r_1 t} + \lambda_2 e^{r_2 t} \quad (6)$$

其中, $r_{1,2} = \frac{-L \pm \sqrt{L^2 - 12LCR_g^2}}{6LCR_g} < 0$, 故此时暂

态电感电流为衰减直流分量。

此情况下的电容暂态电流为

$$\dot{i} = 3LC\lambda_1 r_1^2 e^{r_1 t} + 3LC\lambda_2 r_2^2 e^{r_2 t} \quad (7)$$

各条出线的零序电流为

$$\begin{cases} i_{n0} = \frac{i \times l_n}{3l} \\ i_{m0} = \frac{i - \dot{i} + \frac{l_n}{l} \times \dot{i}}{3} \\ i_{m0} = \frac{\dot{i} \times l_n}{3l} \end{cases} \quad (8)$$

其中, l_n 为出线 n 的长度, l 为所有出线总长, i_{n0} 为正常线路 n 的零序电流, i_{m0} 为故障线路 m 的零序电流。其他参数意义类似。通过上式可以发现, 正常线路的电容电流相位都是相同的, 只是幅值有差别。而电感电流仅通过故障线路, 通过计算可得故障线路零序电流为

$$i_{m0} = \left(\frac{1}{3LCr_1^2} - 1 + \frac{l_n}{l} \right) \dot{i} + \lambda_2 \left(1 - \frac{l_n^2}{l^2} \right) e^{r_2 t} \quad (9)$$

由于两根线路不相等, 致使故障线路的零序电流与正常线路不成比例关系, 两者相差一个衰减直流分量。这个衰减直流分量反映在复小波变换的相位关系上就体现为相位的延迟, 从而造成了故障线路的电流相位稍不同于正常线路的电流相位, 据此可以构成选线的依据。这一点与微机保护算法中衰减直流分量对傅立叶变换的影响类似, 就是借助这一影响来构成选线判据的。

图 4(a)、(b) 分别是应用复小波对正弦信号和叠加了衰减直流分量及衰减震荡分量的正弦信号分解后的各自相位信息。图中红线均表示正弦信号的复小波分解相位, 绿线表示叠加了衰减信号后的合成信号的复小波分解相位。通过图中可以看到, 衰减直流分量的加入, 使信号的复小波分解相位关系发生了延迟, 从而能明显的区别原始信号与混入衰减信号的混合信号。

当 $R_g > \frac{\sqrt{3}}{6} \sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 有两个相等的实根,

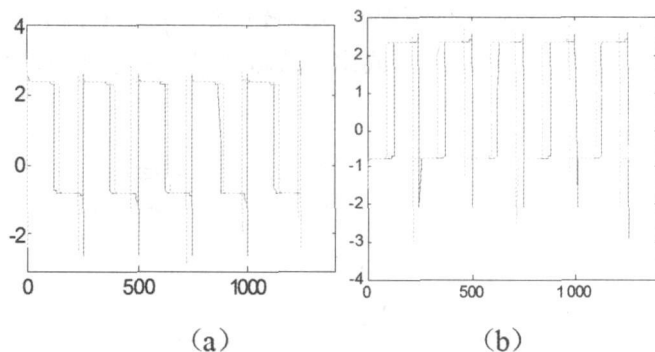


图 4 含有衰减分量的信号复小波相位检测

$$\dot{i} = (\lambda_1 + \lambda_2 t) e^{rt} \quad (10)$$

$$\dot{i} = 3LC(\lambda_1 r^2 + 2\lambda_2 r) e^{rt} + 3LC\lambda_2 r^2 t e^{rt} \quad (11)$$

其中, $r = \frac{-L}{6LCR_g} < 0$

通过计算可得故障线路零序电流。

$$i_{m0} = \left(\frac{1}{3LCr^2} - 1 + \frac{l_n}{l} \right) \dot{i} - \frac{2\lambda_2}{r} e^{rt} \quad (12)$$

可见, 此时故障线路零序电流与正常线路零序电流仍不成比例关系, 两者仍差一个衰减直流分量, 而正常线路零序电流之间相位是相等的, 故此时按照复小波分解后的相位关系仍可以区别出正常线路与故障线路。

当 $R_g > \frac{\sqrt{3}}{6} \sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 解为

$$\dot{i} = e^{\alpha t} (\lambda_1 \cos(\beta t) + \lambda_2 \sin(\beta t)) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{i} = & -\frac{1}{R_g} e^{\alpha t} [(6R_g C \alpha \lambda_1 + L \beta \lambda_2) \cos(\beta t)] \\ & + (6R_g C \alpha \lambda_2 - L \beta \lambda_1) \sin(\beta t) \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $\alpha = \frac{-1}{6CR_g}$, $\beta = \frac{\sqrt{12LCR_g^2 - L^2}}{6LCR_g}$ 。此时电感、

电容电流均为衰减震荡分量。

据式 (8) 可得故障线路零序电流为

$$\begin{aligned} i_{m0} = & \left(\frac{-1}{6C\alpha} - 1 + \frac{l_n}{l} \right) \dot{i} + \frac{L\beta\lambda_1}{6R_g C \alpha} \sin(\beta t) \\ & - \frac{L\beta\lambda_2}{6R_g C \alpha} \cos(\beta t) \end{aligned} \quad (15)$$

通过式 (8)、(15) 可以看到, 虽然过渡电阻较大时电感、电容电流呈现另一种形态, 但并不影响它们之间的相位关系。正常线路电流比例关系一定, 相位仍相同, 而故障线路电流与正常线路电流比值是时间的函数, 两者间存在震荡信号的差别, 根据图 4(b) 可以看到, 复小波变换相位关系可以明显的检测这一差别, 据此又可以将故障线路与正常线路区别开来。

1.3 基于复小波的选线算法流程

复小波相位选线流程图如图 5 所示。

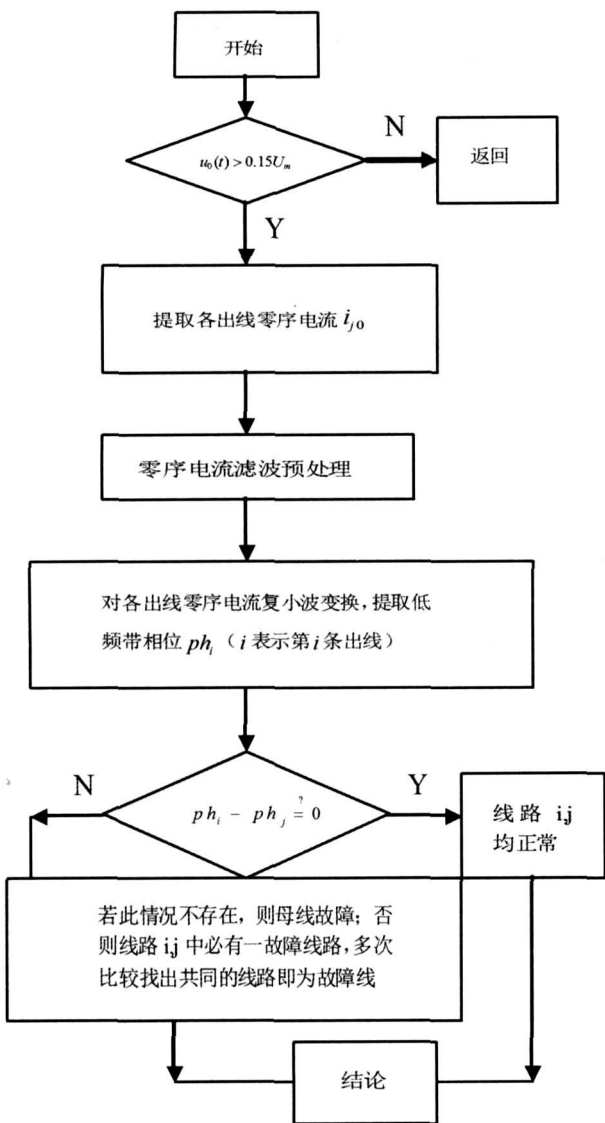


图 5 复小波相位选线流程图

2 实验验证

如图 1 所示建立四出线 10 kV 系统仿真模型, 线路参数如下: 消弧线圈 10% 过补偿, 变压器 110/10 kV; 正序参数: $R_1=0.48\ \Omega/\text{km}$, $L_1=0.9283\ \text{mH}/\text{km}$, $C_1=0.07038\ \mu\text{F}/\text{km}$; 零序参数: $R_0=0.79\ \Omega/\text{km}$, $L_0=4.2146\ \text{mH}/\text{km}$, $C_0=0.0436\ \mu\text{F}/\text{km}$; 四条出线的长度分别为 6 km、16 km、24 km、20 km, 线路 3 故障, 输电线路采用贝杰龙分布参数模型。

众所周知, 故障选线难以处理的是大过渡电阻与小故障初始合闸角的情况, 如果这两个问题解决, 其他情况的选线问题就迎刃而解了。为此, 着重研究一些极端情况。限于篇幅, 下面仅列出几个典型算例。

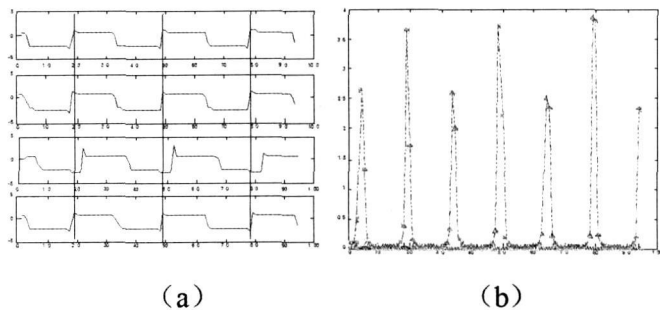


图 6 算例 1 分析结果

算例 1: 图 6(a) 是在 8% 补偿度, 故障处距母线 0.5 km, 故障合闸角 5 度, 接地过渡电阻为 20 000 Ω 情况下各条出线的复小波变换低频带相位图, 通过图中的关系可以知道, 在大过渡电阻情况下, 由于故障线路与正常线路差一衰减震荡分量, 导致该线路小波变换相位出现平移。对各出线相位两两做差可得相差关系图, 见图 6(b)。由图 6 可知, 线路 1 与 3, 2 与 3, 4 与 3 出现部分差值, 而线路 1 与 2, 1 与 4, 2 与 4 不存在相位差, 据此可以知道线路 3 出现故障。

算例 2: 图 7 是过渡电阻为 1 000 Ω , 5% 补偿, 故障合闸角为 15°, 距母线 22 km 处短路的情况, 按照上述选线原理, 也可以判断出是线路 3 发生故障。

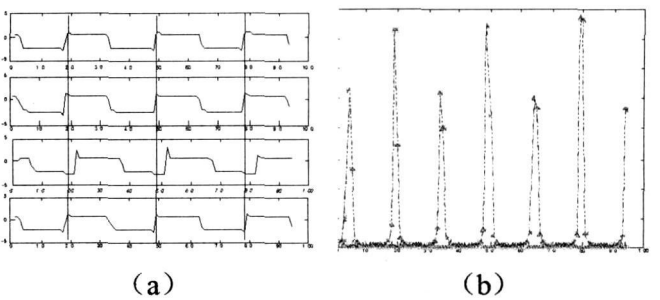


图 7 算例 2 分析结果

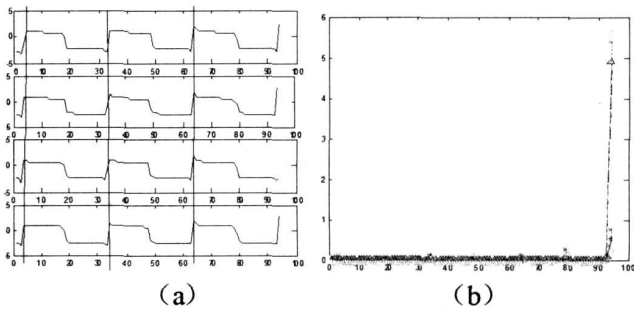


图 8 算例 3 分析结果

算例 3: 图 8 对应的是过渡电阻为 10 000 Ω , 补偿度为 8%, 故障合闸角为 5°, 母线故障的情况。通过图 8(a) 可以看到, 各出线的相位完全相同, 不存在相位之间的延迟, 图 8(b) 是各出线之间的相位差, 共 (下转第 87 页)

在一个居民小区内安装一台集中控制器,通过总线方式将该小区内所有数据采集器所采集的户表电量集中抄读并存储,通过 Modem 自动将数据传输到供电部门,实现远程无人集中抄表。

2)实现了对用户远程进行停送电操作:在居民用户的每只电能表的入户电表后接一只关断继电器,由一台停送电控制器集中控制,配接到数据采集器上实现远程控制。通过上位机软件对欠费用户发送批量停、送电或指定停、送电指令,系统自动执行远程停、送电操作。

3)实现数据冻结。将冻结数据传回供电部门,消除抄表时间误差,进行准确的线损计算,实现最基础的“分台区”线损管理。

4)实时监测。集中控制器通过对 10 kV 台变低压侧进行实时监测,定时将各种监测数据传回数据中心系统软件进行分析,形成报表供管理部门使用。

2.3 应用现状分析

截至 2002 年初,由龙泉驿供电局直抄到户的居民用户数为 3916 户,分管的用户较分散,距离供电局最远的有近 20 km。全靠人工方式,抄表人员需要 4 人,每月抄表周期至少需要 10 天;数据录入时间至少

需要 2 天。对严重拖欠电费的用户采取停电措施时,抄表人员必须到现场进行停电操作。

2002 年 10 月龙泉驿供电局逐步在新建小区开始试点推行远程集中抄表系统,先后在龙泉驿区洪河镇新建小区恋日家园 A、B 区进行试点,经过一年多的运行,基本达到预期效果;随后又将恋日家园 C、D、E、F、G、H 区、丽阳家园、金山花园等新建小区全面推广实施。

截至 2008 年底,由龙泉供电局直抄到户的居民用户数已经达到 16867 户,由于选用带远程停送电的自动抄表方式,目前抄表人员降至 3 人,每月抄表时间只需 10 天即可完成;对需要停送电的客户,可以远程进行操作。目前系统运行可靠稳定。

参考文献

- [1] 高光润,夏雪生.微处理器在电测技术中的应用[M].北京:机械工业出版社,1984.
- [2] 陆玉新.电子测量技术[M].北京:邮电出版社,1985.
- [3] 潘明惠.信息化工程原理与应用[M].北京:清华大学出版社出版,2004.

(收稿日期:2009—02—10)

(上接第 19 页)

六条曲线,而这些曲线之间相位之差均为零,表明各出线特征一样,应判为母线故障。

3 结 论

通过分析小电流过补偿接地系统单相接地故障特征,发现正常线路的零序电流仅存在幅值差别,相位完全相同,而故障线路由于电感电流的原因使之与正常线路之间存在一衰减电流的差别,通过复小波变换可以发现这一差别体现在相位上表现为相位的延迟,据此形成了一种新的选线算法,该算法对当前过补偿系统下各出线相位关系难以确定的难题给出了一种新的解决方案,通过仿真验证了该法的有效性。

参考文献

- [1] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [2] 束洪春.配电网故障选线[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [3] 靳晓东,李谦,等.配电网弧光接地过电压的仿真与分析[J].高电压技术,1994,20(3):71—75.
- [4] 毛鹏,段玉倩,等.基于相关分析的故障选线方法[J].

电网技术,2004,28(2):36—39.

- [5] 王耀南,霍百林,王辉,何晓.基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J].中国电机工程学报,2004,24(6):54—58.
- [6] 束洪春,彭仕欣,等.一种配网电缆—线混合线路故障选线新方法[J].电力系统自动化,2008,32(11):1—4.
- [7] N. G. Kingsbury. “Complex wavelets for shift invariant analysis and filtering of signals” Appl Comput Harmon Anal, vol 10, no 3, pp 234—253, May 2001.
- [8] I W. Selesnick R. G. Baraniuk and N. G. Kingsbury. “The dual-tree complex wavelet transform” IEEE Signal Process Mag, vol 22, no 6, pp 123—151, Nov 2005.
- [9] I W. Selesnick. “Hilbert transform pairs of wavelet bases” IEEE Signal Process Lett, vol 8, no 6, pp 170—173, Jun 2001.
- [10] I W. Selesnick. “The design of approximate Hilbert transform pairs of wavelet bases” IEEE Trans Signal Process, vol 50, no 5, pp 1144—1152, May 2002.

作者简介:

周登登(1981—),男,硕士研究生,研究方向为配电网故障诊断;

刘志刚(1975—),男,教授,博士生导师,研究方向为现代信号处理及其在电力系统中的应用。

(收稿日期:2009—05—10)

基于 PSCAD 的电力系统次同步谐振研究

邓 婧, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:次同步谐振 (SSR) 问题是由串联补偿输电网络形成的电气谐振回路的固有频率与汽轮发电机组轴系扭振固有频率互补时 (其和等于同步频率) 引起的。主要研究了由串补电容引起的 SSR 的频域分析方法的验证与研究, 用到的两种方法分别是电磁暂态时域仿真法 (PSCAD/EMTDC) 与基于时域仿真实现的复转矩系数法 (测试信号法)。采用的技术路线为两步: 首先在 PSCAD/EMTDC 平台上建立 IEEE 第一标准测试系统模型, 然后在所建模型上, 对所采用的频域分析方法——测试信号法和时域仿真法进行对比与校验。最后对次同步谐振的防治措施及对策做了简要介绍。

关键词:电力系统; 串联补偿; 次同步谐振; 复转矩系数法; 测试信号法; 时域仿真法

Abstract If the resonant frequency of series compensated transmission network and the natural frequency of turbine-generator shaft complement each other (the sum is equal to synchronous frequency), it may result in subsynchronous resonance (SSR). The verification and research of SSR frequency-domain analysis methods are carried out. The two methods used are electromagnetism transition condition simulation method in the time domain (PSCAD/EMTDC) and the complex torque coefficient method realized by time-domain simulation based on PSCAD/EMTDC (the test signal method), respectively. The mitigation measures of SSR are introduced in the end.

Key words power system; series compensation; subsynchronous resonance; complex torque coefficient approach; test signal method; time-domain simulation method

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0020-04

中国的能源结构有着负荷中心远离电源中心的特点, 大容量、远距离输电是中国电力工业发展的客观需求, 然而提高远距离、重载、跨区间交流输电系统的传输容量又通常受到其暂稳极限的限制。串联补偿技术是一种提高稳定极限的经济有效的手段, 在输电线中间加入串联电容器, 能减小线路电抗, 缩小线路两端的相角差, 从而获得较高的稳定裕度并传输较大的功率。串补输电技术从 19 世纪 20 年代末便开始应用^[1~3]。串补输电网络 (包括发电机、变压器、线路、串联电容器等部件) 将形成一个电气谐振回路, 如果这一电气谐振回路的固有频率与汽轮发电机组轴系扭振固有频率互补时 (其和等于同步频率), 就会因网机耦合而彼此互激, 发生次同步谐振^[1] (Subsynchronous Resonance 缩写为 SSR) 问题。中国正处在电力发展的高峰期, 大容量、远距离串补输电在不断建设当中, 能否避免串补电容所带来的次同步谐振问题, 最大限度的提高线路功率传输能力, 将直接

关系到中国电力系统运行的安全性、稳定性和经济性问题。所以这里所进行的电力系统次同步谐振分析和相关抑制措施的研究便具有重要的理论意义和实用价值。

首先阐述了次同步谐振产生的机理, 然后通过串补度及线路电阻的变化对所采用的测试信号法与时域仿真法进行对比与校验, 最后对次同步谐振的防治措施及对策做了简要介绍。

1 次同步谐振的产生机理

电气系统与轴系机械系统是相互作用的。电气系统通过电磁力矩影响机械系统, 机械系统则通过发电机转子的角位移和角速度影响电气系统。频率为 ω_e 的定子谐振电流将产生转速为 ω_e 的旋转磁场, 这一磁场相对于发电机转子的转速为 $\xi = \omega - \omega_e$ (ω 为转子的转速)。也就是说, 将产生频率为 ξ 的电磁力矩。如果此时汽轮发电机转子轴系的一个自然扭振频率 ω_m 等于 ξ 则上述电磁力矩将激起频率为 ω_m 的

基金项目: 国家重点基础研究专项经费项目 (2004CB217901); 国家科技支撑计划项目 (2008BAA13B01); 国家电网公司项目

扭振;后者又将在发电机定子中感应出频率为 ω_e 的电压、电流和电磁力矩。这时,如果系统的阻尼不够大,就会发生电气系统与机械系统振荡的相互助增现象。在这种情况下,发电机电磁力矩和轴系的扭矩将不断增长,这就是通常所说的次同步谐振现象。可见,当电气系统的谐振频率与轴系的某一自然扭振频率“互补”时,有可能发生次同步谐振,用公式表示为

$$\omega_e + \omega_m = \omega_0 = 1 \quad (1)$$

一般地讲,如果超高压输电网络中有多处装有串联电容补偿装置,而汽轮发电机组又由多个转子串接而成,则电气系统中就会有若干个次同步频率,而机械系统中就会有若干个自然扭振频率。只要前者中有一个频率与后者中的一个频率“互补”,就可能发生次同步谐振。

2 次同步谐振的特性规律

电力系统次同步谐振有多种分析方法,如扫频法、特征值分析法、复转矩系数法^[4,5,6]、时域仿真法等^[7,8]。在本章中,将结合单机串补输电工程实例,采用基于 PSCAD/EMTDC 时域仿真实现的复转矩系数法——测试信号法,以及时域仿真法,通过不同运行条件下的单机系统的次同步谐振特性分析,来研究单机串补输电系统 SSR 问题的一些具有实际意义的规律。

测试信号法和时域仿真分析法均可方便地分析含有串联补偿电容的输电系统可能引起的电力系统 SSR 问题,并且这两种方法具有各自的特点,故而采用这两种分析方法可以进行有效的相互验证和有益的补充。

采用测试信号法计算图 1 的电气阻尼系数的过程如下。

(1) 在所研究的发电机转子上施加一串与 0.5 Hz 成整数倍的小值脉动转矩,频率范围从 5~59.5 Hz 可得施加小值脉动转矩后发电机总的机械转矩;

(2) 施加脉动转矩后,仿真 30 s 截取公共周期 2 s 上的发电机电磁转矩 T_e 和发电机角频率增量 $\Delta\omega$;

(3) 将上述两个量进行 Fourier 分解,得出不同频率下的 $\dot{\Delta T}_e$ 和 $\Delta\omega$;

(4) 根据 $\frac{\dot{\Delta T}_e}{\Delta\omega} = K_D(\lambda) - j\frac{1}{\lambda} K_S(\lambda)$, 求出 $\frac{\dot{\Delta T}_e}{\Delta\omega}$;

(5) 根据 $D_e(\lambda) = \text{Re}(\frac{\dot{\Delta T}_e}{\Delta\omega})$, 求出电气阻尼系数

$D_e(f)$;

(6) 由文献[13]查得的机械模态参数和计算得到的电气阻尼系数 $D_e(f)$, 判断轴系扭振的稳定性。

采用时域仿真分析法的实现过程如下:当系统进入稳态后,在靠近电容器母线处 2 s 时加一三相短路故障,仿真时间为 7 s 通过仿真计算结果观测轴系扭矩量的变化,以确定系统在故障条件下是否会激发发电机组轴系扭振转矩不稳定。

3 系统模型及参数

在 PSCAD/EMTDC 平台上建立 IEEE 第一标准测试系统模型,进行测试信号法频域分析和时域仿真法的分析。

通过改变串补度及电阻的值先用测试信号法得出分析结果,再用时域仿真法进行验证。被测试的系统结构如图 1 所示。

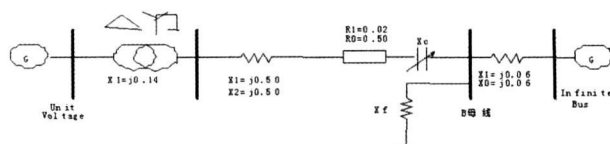


图 1 IEEE 第一标准系统模型

取基准容量 $S_B = S_{rated} = 892.4 \text{ MVA}$, $V_B = 500 \text{ kV}$, $f_{rated} = 60 \text{ Hz}$, $p = 1$ 。

计算分析时设定条件如下:机组功率因数 0.9, 机组励磁调节和调速系统简化考虑为恒定输出。

首先对图 1 中网络部分参数进行转化,把标么值转化成有名值。潮流计算时发电机可作为 PQ 节点处理,相应的有功和无功分别为

$$P_G = 892.4 \times 0.9 = 803.16 \text{ (MW)}$$

$$Q_G = 892.4 \times \sqrt{1 - 0.9^2} = 389.0 \text{ (Mvar)}$$

网络中的其余参数都归算到 500 kV 侧,500 kV 侧的基准阻抗为

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} = 500 \times 500 / 892.4 = 280.14 \text{ (ohm)}$$

因此,在图 1 中,从左至右的各阻抗的有名值分别为

$$X_1 = \frac{10^3 \times 0.5 \times 280.14}{2\pi \times 60} = 371.55 \text{ (mH)}$$

$$X_2 = 0.02 \times 280.14 = 5.603 \text{ (ohm)}$$

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times 60 \times 0.371 \times 280.14} = 25.52 \text{ (uF)}$$

$$X_3 = \frac{0.06 \times 280.14 \times 10^3}{2\pi \times 60} = 44.6 (\text{mH})$$
$$X_F = \frac{10^3 \times 0.04 \times 280.14}{2\pi \times 60} = 29.7 (\text{mH})$$

机组的轴系采用 6 段集中质量模型见图 2。
HP、IP、LPA、LPB——汽轮机的高压段、中压段、
低压段 A、低压段 B;
GEN——发电机;
EXC——励磁机。

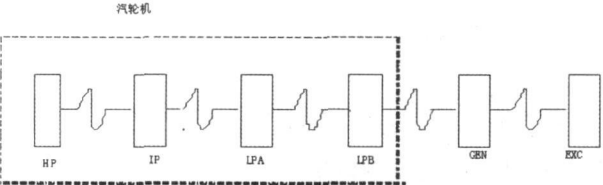


图 2 汽轮发电机组六质块弹性轴系模型

4 串补度对次同步谐振影响分析研究

4.1 测试信号法的分析结果

对于每种串补度，都在其运行条件下，待系统进入稳态后，在机组的机械转矩上注入脉动转矩，仿真得到发电机电磁转矩和转子角速度，然后取出发电机电磁转矩与转子角速度这两个量的时域仿真结果进行傅立叶分析，将时域结果变换为频域相量，可得各个方式下的电气阻尼系数计算结果。这里主要考虑 3 种串补度的变化。

- (1) $X_c = 0.3 \text{ pu}$ 串补度为 60%;
- (2) $X_c = 0.371 \text{ pu}$ 串补度为 74.2%;
- (3) $X_c = 0.4 \text{ pu}$ 串补度为 80%。

分别计算以上 3 种情况下的电气阻尼系数，综合如图 3 所示。由图 3 可以看出，串补度越高，电气谐振的频率越低（折算到转子侧），而对应电气谐振点的负阻尼越大。

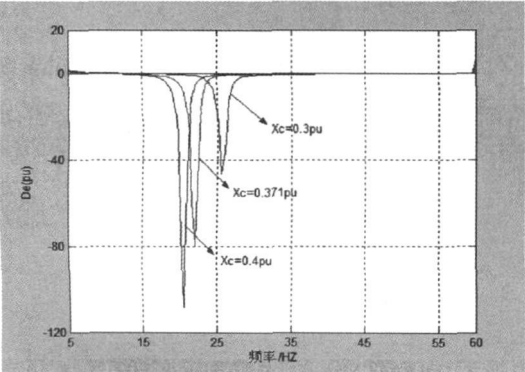


图 3 串补度变化对电气阻尼系数的影响

方式一的频域分析结果表明，在发电机的自然扭振频率 25.55 Hz 附近有明显的电气负阻尼，由此可以判定，该运行方式下系统有次同步谐振的危险。

方式二的频域分析结果表明，在发电机的自然扭振频率 20.21 Hz 附近有明显的电气负阻尼，由此可以判定，该运行方式下系统有次同步谐振的危险。

方式三的频域分析结果表明，在发电机的自然扭振频率 20.21 Hz 附近有明显的电气负阻尼，由此可以判定，该运行方式下系统有次同步谐振的危险。

4.2 时域仿真结果

用 PSCAD 软件进行仿真得出结果如图 4、图 5、图 6 所示。

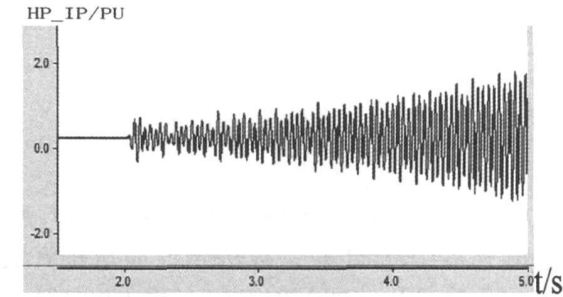


图 4 串补度为 60% 时高压缸与中压缸之间的扭振转矩

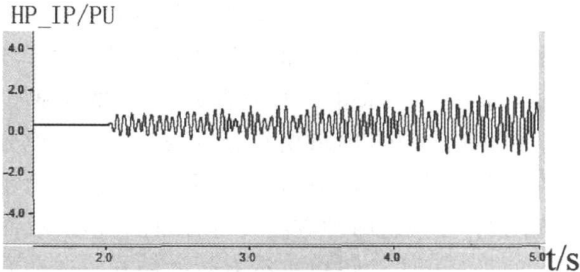


图 5 串补度为 74.2% 时高压缸与中压缸之间的扭振转矩

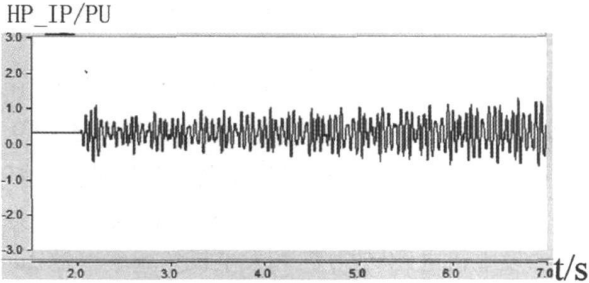


图 6 串补度为 80% 时高压缸与中压缸之间的扭振转矩

从以上 3 种方式的时域仿真结果表明，系统扰动激发了汽轮机组的轴系扭振后，各质块之间的扭矩均呈缓慢增大趋势。由此可以确定，在这 3 种运行方式下系统故障可能会引起机组轴系扭矩的放大现象。

结果与频域仿真得出的结果相同。

5 线路电阻对次同步谐振影响的分析研究

5.1 测试信号法的分析结果

研究方法与串补度变化的方法相同。
本节考虑以下 3 种运行方式。
(1) $R_c = 0.01 \text{ pu}$
(2) $R_c = 0.02 \text{ pu}$
(3) $R_c = 0.04 \text{ pu}$
分别计算以上 3 种情况下的电气阻尼系数, 综合如图 7 所示。由图 7 可以看出输电线路的电阻变化不改变电气谐振的频率, 但对电气阻尼系数有很大的影响, 电阻越大, 电气谐振点的负阻尼越小。

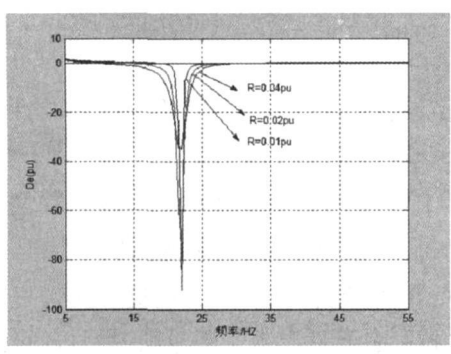


图 7 输电线路电阻变化对电气阻尼系数的影响
方式一的频域分析结果表明, 在发电机的自然扭振频率 20.21 Hz 附近有明显的电气负阻尼, 由此可以判定, 该运行方式下系统有次同步谐振的危险。

方式二的频域分析结果表明, 在发电机的自然扭振频率 20.21 Hz 附近有明显的电气负阻尼, 由此可以判定, 该运行方式下系统有次同步谐振的危险。

方式三的频域分析结果表明, 在发电机的自然扭振频率 20.21 Hz 附近有明显的电气负阻尼, 由此可以判定, 该运行方式下系统有次同步谐振的危险。

5.2 时域仿真结果

研究方法与串补度变化的方法相同。得出结果如图 8、图 9、图 10 所示。

这 3 种方式的时域仿真结果表明, 系统扰动激发了汽轮机组的轴系扭振后, 各质块之间的扭矩均呈缓慢增大趋势。由此可以确定, 在这 3 种运行方式下系统故障可能会引起机组轴系扭矩的放大现象。结果与频域仿真得出的结果相同。

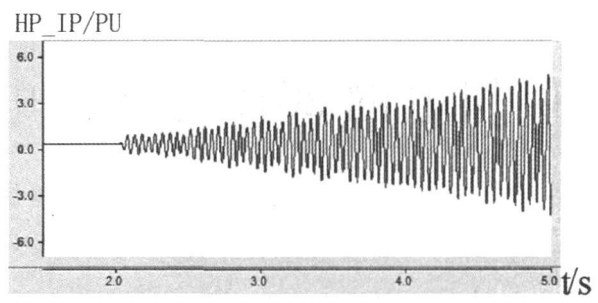


图 8 $R_c = 0.01 \text{ pu}$ 时高压缸与中压缸之间的扭振转矩

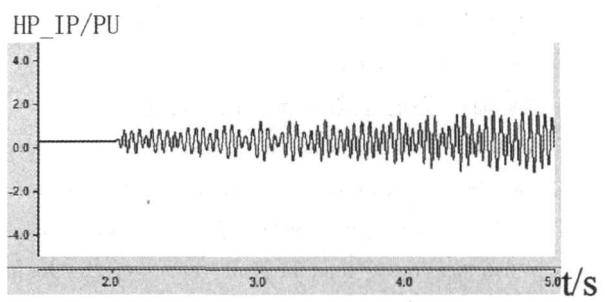


图 9 $R_c = 0.02 \text{ pu}$ 时高压缸与中压缸之间的扭振转矩

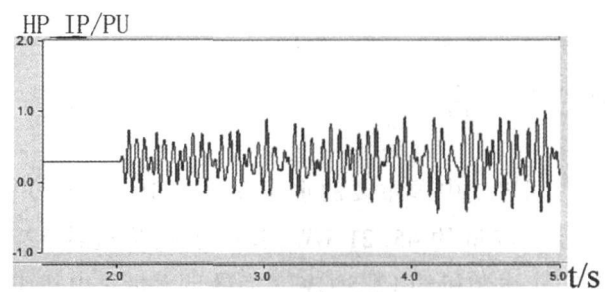


图 10 $R_c = 0.04 \text{ pu}$ 时高压缸与中压缸之间的扭振转矩

6 次同步谐振预防措施

防止次同步谐振的主要措施分为两大类^[9~12]: 一类是通过附加或改造一次设备防止次同步谐振的发生。

另一大类抑制对策是通过二次设备 (即控制装置) 来抑制 SSR。

7 研究展望

将串补输电系统的次同步谐振 (SSR) 问题作为研究重点, 对单机系统 SSR 问题的分析方法和规律特性进行了研究, 并对 SSR 的防治与抑制措施进行了简要介绍。结合实际串补输电工程, 分别采用基于

(下转第 76 页)

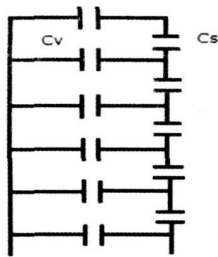


图 2 套管等值电路

套内表面凹凸不平)等因素,因此要严格把守质量关,运用现行的技术监督手段及时发现并处理设备缺陷,避免设备故障,严禁有缺陷的产品进入使用环节。当然为了减少此类故障的发生,除了要保证设计及制造工艺质量外,必须还要做到以下几点:①在进行安装时,套管内部的导线一定要拉直,并且缠绕白布以防止裸线与导电杆相碰导致发热;②加强巡视,要注意油位的变化,是否有油污、渗油、漏油情况,特别是当套管油标管脏污看不清油位时,一定要设法弄清油位;③检修时一定要彻底,发现问题要及时处理,消除隐患。要定期进行介损试验,对于相对体积较小的变压器套管来说,介损测试是行之有效的试验,不仅能反映套管绝缘的全面情况,还可以反映其中的集中性

缺陷。电容式套管介损的现场测试必须注意套管表面泄漏电流的影响。建议在晴朗干燥的条件下进行测试,湿度低于 80%,最好能在低于 65%以下进行测试。测试的套管介损值应与历次测量值(包括试验条件)相比较,尽量排除现场的干扰,以准确地判断套管的绝缘状况。

只有保证套管的设计合理、质量合格、安装正确、运行维护到位、检修彻底,才能切实减少变压器套管故障的发生,同时确保套管的安全运行,才能保证电力变压器的安全性能,使电网正常运行。

参考文献

- [1] 陈涵林,尹章圣. 变压器套管电晕放电及其处理方法[J]. 安徽电力职工大学学报, 2003, 8(3): 45—47.
- [2] 付东丰,李建明,戴玉松. 变压器绕组变形事故分析事例[J]. 四川电力技术, 2008, 31(3): 26—27.
- [3] 聂鸿宇,刘睿. 变压器套管末屏接地不良对局部放电测试的影响[J]. 四川电力技术, 2008, 31(1): 41—42.
- [4] 沈福君,温志勇. 变压器套管检修与维护[J]. 鸡西大学学报, 2007, 7(2): 50—51.

(收稿日期: 2009—02—21)

(上接第 23 页)

PSCAD/EMTDC 时域仿真实现的复转矩系数法—测试信号法与时域仿真法,分析总结了单机系统的 SSR 特性规律。通过串补度、线路电阻这两个运行条件的变化来分析了单机系统的次同步谐振特性,研究得知这两个运行条件的变化均对系统的 SSR 问题有着不同程度的影响,并结合图表对这些有价值的规律和特性进行了分析和总结,在实际的单机串补输电工程的 SSR 问题分析中要对这些运行条件进行综合考虑;但只通过串补度及线路电阻的变化来研究了对 SSR 的影响,其他方式的改变对 SSR 的影响还有待进一步的研究。

参考文献

- [1] P. M. Anderson, R. G. Farmer. Series Compensation of Power Systems. California USA: PBLSH. Inc 1996.
- [2] Jancke Gunnar and K. F. kerstn. Developments and Experience with Series Capacitors in Sweden. AIEE Trans, v. 71, n. 12, Dec. 1952, 1118—1123.
- [3] Maneatis J. A., E. J. Hubacher W. N. Rothenbuhler and J. Sabath. 500kV Series Capacitor Installations in California. IEEE Trans on PAS 1970, PAS—89, 1138—1149.
- [4] Canay IM. A Novel Approach to the Torsional Interaction and Electrical Damping of the Synchronous Machine (Part I): Theory. IEEE Trans on PAS 1982, PAS—101(10): 3630—3638.
- [5] Canay IM. A Novel Approach to the Torsional Interaction

and Electrical damping of the Synchronous Machine (Part II): Application to an Arbitrary Network. IEEE Trans on PAS 1982, PAS—101(10): 3638—3647.

- [6] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 1—4.
- [7] 陈陈,杨煜. 几种次同步振荡分析方法和工具的阐述[J]. 电网技术, 1998, 22(8): 10—13.
- [8] 徐政,罗惠群,祝瑞金. 电力系统次同步振荡问题的分析方法概述[J]. 电网技术, 1999, 23(6): 36—39.
- [9] R. G. Farmer A. L. Schwalb E. Katz. Navajo Project Report on Subsynchronous Resonance Analysis and Solution. IEEE Trans on PAS 1977, PAS—96(4): 1226—1232.
- [10] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Countermeasures to Subsynchronous Resonance Problems. IEEE Trans PAS 1980, PAS—99(5): 1810—1818.
- [11] 李录平,袁启昌,韩守木. 汽轮发电机组轴系扭振振动的原因和对策分析[J]. 汽轮机技术, 1989, 31(3): 5—9.
- [12] 陈珩. 关于汽轮发电机组轴系扭振的研究工作[J]. 东南大学学报, 1992, 22(4): 97—107.
- [13] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析.

作者简介:

邓婧(1985—),女,硕士研究生,主要研究方向电力系统稳定与控制;

李兴源(1945—),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事,IEEE 高级会员,从事电力系统稳定与控制等方面的研究工作。

(收稿日期: 2009—04—30)

四川电网 2010 年短路电流水平分析及限制措施研究

周惟婧, 杜新伟, 丁理杰

(四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘要:四川电网处于高速发展的时期,电源容量及网架结构将明显加强,在满足不断增长的电力需求的同时,短路电流水平的也日益增大,部分变电站的短路电流水平已经接近或超过其开关现有遮断容量。结合四川电网的发展规划,利用 PSASP 程序进行 2010 年四川电网短路电流计算,根据计算结果提出降低短路电流的主要技术措施,并对其有效性进行分析和评估。

关键词:短路电流;限制措施;四川电网

Abstract: With the enhancement of capacity and structure for Sichuan power grid, the short-circuit current is increasing by year. Short-circuit current of several substations have approached or even exceeded their interrupting capacity. According to the development plan of Sichuan power grid and based on the short-circuit current calculated with PSASP program, some effective measures to limit the short-circuit current are proposed, and its feasibility and validity is also analyzed and evaluated.

Key words: short-circuit current; limiting measure; Sichuan power grid

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0024-04

0 引言

四川是中国重要的水能基地,2010 年四川电网总装机容量约 45.21 GW,其中水电装机约 32.72 GW,火电装机约 12.5 GW。为满足大量水电机组上网及水电远距离传输的需要,“十一五”期间,四川 500 kV 和 220 kV 电网新建变电站及新建线路大量增加,网架结构明显加强^[1]。在满足电力需求的同时,这必然导致四川某些地区 500 kV 站点及其 220 kV 侧短路电流大幅增加,特别是一些处于负荷中心,负荷密度大,电网联系特别紧密的变电站,短路电流问题尤为突出。

鉴于此,基于“十一五”四川规划电网,对四川 2010 年电网短路电流问题进行研究。通过短路电流计算分析四川电网的短路电流水平,针对短路电流越限的情况,提出四川电网降低短路电流的措施,并对其有效性进行探讨和评估。

1 计算条件

计算采用是中国电力科学研究院开发的“电力系统分析综合程序”(Power System Analysis Software

Package PSASP)。在潮流计算中取“鄂龙泉”站作为平衡机,其余电厂、变电站依据实际情况作为 PQ、PV 节点处理,线路考虑电阻、电抗、电纳,其余元件仅考虑电抗。各元件参数选用原则遵循:现有设备采用实际参数;规划的线路参数参照现有同类型线路参数;规划的 500 kV 和 220 kV 降压变压器参数参照现有设备。川渝电网的负荷采用 40%的感应电动机和 60%的恒阻抗模型。计算方式为正常接线方式(电厂全开机)。

2 四川电网 2010 年短路电流水平分析

分别计算四川电网 500 kV 及 220 kV 电网厂站三相及单相短路电流及短路容量,计算结果如表 1、表 2 所示。

由表 1 可看出,对于三相短路电流,220 kV 系统没有超过开关最大开断电流能力的母线。短路电流在 45 kA 以上的有德阳 II 站、蜀州、谭家湾 500 kV 变电站的 220 kV 母线。对于单相短路电流,存在一些 500 kV 变电站 220 kV 侧母线以及 220 kV 变电站母线的单相短路电流超过三相短路电流,其中单相短路电流超过三相短路电流且数值超过 45 kA 的有德阳 II 站、蜀州、谭家湾、龙王、龙泉、资阳、洪沟、东坡、丹

景、尖山、绵阳。

表 1 部分 220 kV 母线单、三相短路电流及容量 (kA, MVA)

母线名	三相短路电流	三相短路容量	单相短路电流	单相短路容量
德阳 II 站 220	48.10	18 285.19	52.65	20 063.11
蜀州 220	47.54	18 117.05	52.28	19 921.87
谭家湾 220	45.58	17 207.47	51.08	19 462.19
龙泉 220	44.94	17 125.96	49.54	18 877.30
绵阳 220	42.60	16 232.72	47.48	18 091.36
龙王 220—1	42.27	16 105.80	48.75	18 577.50
龙王 220—2	42.26	16 103.96	48.74	18 573.34
资阳 220	41.46	15 798.84	46.89	17 868.69
丹景 220	41.40	15 777.27	48.07	18 316.37
隆兴 220	41.08	15 652.17	39.62	15 098.45
洪沟 220	41.04	15 637.45	46.17	17 592.49
新市 220	40.27	15 345.61	38.50	14 670.00
东坡 220	40.23	15 328.85	47.04	17 922.90
尖山 220	39.77	15 153.86	46.75	17 814.80

表 2 部分 500 kV 母线单、三相短路电流及容量 (kA, MVA)

母线名	三相短路电流	三相短路容量	单相短路电流	单相短路容量
尖山 500	52.25	45 253.55	49.72	43 058.38
龙泉 500	51.36	44 477.84	48.19	41 735.43
资阳 500	48.95	42 389.53	40.50	35 070.65
东坡 500	47.35	41 008.49	42.44	36 757.26
洪沟 500	45.46	39 323.32	40.56	35 122.07
谭家湾 500	44.75	38 695.52	42.91	37 159.62
蜀州 500	44.34	38 402.34	41.64	36 058.52
龙王 500	41.63	36 049.53	36.87	31 931.44
丹景 500	37.87	32 795.24	37.38	32 374.07
德阳 II 站 500	37.40	32 390.46	35.79	30 994.37

由表 2 可以看出,对于三相短路电流,500 kV 系统中尖山、龙泉 500 kV 侧短路电流超过了 50 kA,资阳、东坡 500 kV 侧短路电流已非常接近 50 kA。对于单相短路电流,也存在一部分 500 kV 变电站的 500 kV 母线单相短路电流超过三相短路电流,如广安、瀑布沟、二滩等。不过由于两者的短路电流数值相差不大且均在 35 kA 以下,可以不采取措施限制,只是应当按照单相短路电流来选择断路器遮断容量。

3 限制四川电网 2010 年短路电流水平措施

限制电网短路电流的技术措施^[2~14]主要有分层分区、母线分段运行、采用高阻抗变压器、采用限流电抗器、故障电流限制器、变压器经小电抗接地以及提高断路器的遮断容量等,结合四川电网现状及其发展规划,并考虑到经济性和可靠性,主要从系统运行和系统结构上考虑限制短路电流的措施。

3.1 限制 220 kV 母线三相短路电流

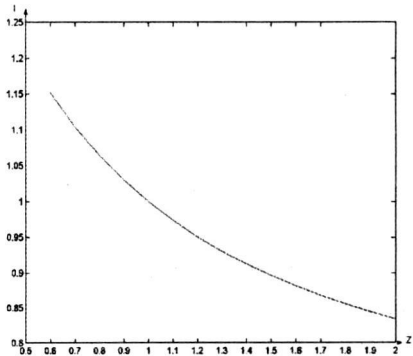
3.1.1 高阻抗参数

分别对三相短路电流均超过 45 kA 的德阳 II 站、蜀州、谭家湾采取高阻抗变压器 ($V\% = 16\%$) 限流,对比结果如表 3 所示。

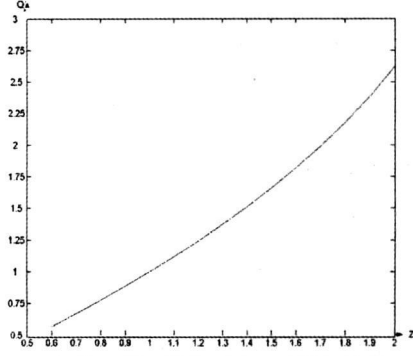
表 3 部分变电站采用高阻抗变压器前后的短路电流及降幅

变电站	普通变压器 /kA		高阻抗变压器 /kA		降幅 /%
	短路电压	电流	短路电压	电流	
德阳 II 站	12%	48.10	16%	43.99	8.54
蜀州	12%	47.54	16%	42.42	10.76
谭家湾	12.69%	45.58	16%	45.00	1.27

由此可见,采用高阻抗变压器是限制 220 kV 母线三相短路电流的有效方法;但采用高阻抗变压器会增加变压器无功消耗,影响无功平衡关系。以 500 kV 德阳 II 站变电站为例,随着高阻抗变压器阻抗的增加,220 kV 母线的短路电流单调递减,但递减的幅度逐渐降低,到一定程度后,阻抗的增加将不再减小短路电流。如图 1(a)所示。同时,随着高阻抗变压器阻抗的增加,变压器的功率损耗单调递增,且增加的幅度逐渐加大,到一定程度后,阻抗增加少许将大幅度增大变压器损耗,如图 1(b)所示。



(a) 变压器阻抗与对应短路电流关系



(b) 变压器阻抗与对应无功损耗关系

图 1 采用高阻抗变压器限制短路电流

高阻抗变压器采用适当的阻抗值可以达到“短路电流降低”和“功率损耗加大”之间的平衡。一方面,采用高阻抗变压器可降低短路电流,高阻抗变

器消耗的无功损耗需要无功补偿设备来补偿;另一方面,短路电流的增加可以通过升级断路器及开关设备以满足足够的开断能力。针对不同的情况,究竟采用高阻抗变压器并提供足够的无功补偿,还是全面升级断路器及开关以满足足够的开断能力,应该做出经济上的比较。高阻抗变压器限制短路电流的措施只能应用在新建变电站中,若已运行的变压器更换成高阻抗变压器时投资比较大。

3.1.2 分母运行

母线分母运行可以增大系统阻抗,有效降低短路电流水平,是最经济、简单、有效的一种限制短路电流的手段。对于 500 kV 变电站 220 kV 母线的分母运行,应根据 220 kV 母线出线输送功率和主变压器下送功率制定尽量均衡的母线分母运行方案。

分别对三相短路电流均超过 45 kA 的德阳 II 站、蜀州、谭家湾采取分母运行限流,对比结果如表 4 所示。

表 4 部分变电站采取分母运行前后的短路电流及降幅

变电站	不分母 /kA	分母运行 /kA	降幅 /%
德阳 II 站	48.10	44.19/44.19	8.13
蜀州	47.54	41.19/41.19	13.36
谭家湾	45.58	42.21/41.30	7.39/9.39

由表 4 分析可以得出:①德阳 II 站采用高阻抗变压器后,220 kV 母线三相短路电流可减少 8.54%;采取分母运行后,可减少 8.13%。建议德阳 II 站采用高阻抗变压器;②蜀州 220 kV 母线三相短路电流,采用高阻抗变压器后可减少 10.76%;采取分母运行后,可减少 13.36%。建议蜀州 220 kV 母线采用分母运行的方式;③谭家湾 220 kV 母线三相短路电流,采用高阻抗变压器后可减少 1.27%;采取分母运行后,谭家湾 220 kV 分母运行的两条母线短路电流分别减少 7.39%和 9.39%。建议谭家湾 220 kV 母线采用分母运行的方式。

3.2 限制 500 kV 母线三相短路电流

由于 500 kV 尖山、龙泉等变电站的 500 kV 母线短路电流已远远超过 50 kA,且随着大型电站接入 500 kV 电压等级,以及 500 kV 网络的密集化发展,四川电网 500 kV 母线短路电流有逐渐上升的趋势。建议未投运的龙泉、资阳 500 kV 变电站 500 kV 侧电气设备按 63 kA 选择。对于已经投产的尖山、东坡变电站(原 500 kV 侧电气设备按 50 kA 选择),届时可以考虑重新更换 500 kV 侧的相关电气设备或在电网设计时采用其他措施对短路电流加以限制。

尖山变电站是四川主网架中川西大量水电送出的一个重要枢纽变电站,它与系统的联系十分紧密,2010 年 500 kV 出线达到 10 回,500 kV 侧短路电流已经超过 50 kA 的开关开断电流。因此有必要针对 500 kV 变电站 500 kV 母线分母运行的可行性和有效性进行超前研究,防患于未然。

以尖山为例,研究 500 kV 母线分母运行的有效性,计算结果如表 5 所示。

表 5 尖山变电站采取限流措施前后的短路电流及降幅

变电 站名	合母运行的短路 电流 /kA	分母运行	
		短路电流	降幅 /%
尖山	52.25	47.27/47.3	9.53/9.47

由表 5 可以看出,尖山 500 kV 母线分母运行后三相短路电流明显降低,接近 10%,因此这种措施是简便有效的。但是需要进一步研究 500 kV 母线分母运行后对供电可靠性和安全性的影响。

3.3 限制 220 kV 母线单相短路电流

由于大量 500 kV 主变压器中性点直接接地后使系统零序电抗降低,导致单相短路电流超过三相短路电流。变压器中性点加小电抗接地是降低单相短路电流的有效限流措施,对限制短路电流的零序分量有明显的效果,特别是对单相短路电流大于三相短路电流的情况尤为明显。它可以显著降低 500 kV 变压器 220 kV 侧母线的单相短路电流,并且施工方便,投资较小。但是对于降低 500 kV 变压器 500 kV 侧的单相短路电流的效果并不明显。

对各站主变压器中性点接入小电抗,计算所得的单相短路电流以及相应降幅,结果如表 6 和表 7 所示。

由表 6 和表 7 可以看出,500 kV 变电站的 220 kV 母线的单相短路电流随变压器中性点所接小电抗值的增加而减小,当中性点的电抗值增大到某一值后,220 kV 母线的单相短路电流的降幅将会减小。

当接入中性点的电抗值大于 8 Ω 后,220 kV 母线的单相短路电流的降幅逐渐减小。建议 500 kV 变电站变压器中性点所接小电抗值在 8 Ω 以内。

4 结 论

随着电力系统的发展,短路电流水平不断增大成为一个突出的技术问题。通过计算分析,针对四川 2010 年 500 kV /220 kV 电网短路电流问题,有如下分

表 6 部分变电站主变压器中性点接入小电抗前后单相短路电流

母线名	单相短路电流 (kA)											
	0 Ω	1 Ω	2 Ω	4 Ω	6 Ω	8 Ω	10 Ω	12 Ω	14 Ω	16 Ω	18 Ω	20 Ω
德阳 II 站 220	52.65	50.83	49.96	49.12	48.73	48.46	48.30	48.19	48.10	48.03	47.98	47.94
蜀州 220	52.28	50.68	49.82	49.00	48.60	48.36	48.20	48.09	48.01	47.97	47.89	47.85
谭家湾 220	51.08	49.29	48.44	47.61	47.21	46.96	46.80	46.69	46.60	46.54	46.48	46.44
龙泉 220	49.54	47.64	46.73	45.84	45.45	45.15	44.98	44.86	44.77	44.70	44.65	44.6
绵阳 220	47.48	45.74	44.92	44.14	43.76	43.53	43.38	43.28	43.20	43.14	43.09	43.05
龙王 220—1	48.75	47.33	46.66	46.01	45.70	45.51	45.38	45.29	45.23	45.18	45.14	45.10
龙王 220—2	48.74	47.32	46.65	46.00	45.69	45.50	45.37	45.28	45.22	45.17	45.13	45.09
资阳 220	46.89	45.25	44.47	43.72	43.36	43.14	42.99	42.89	42.82	42.76	42.71	42.67
丹景 220	48.07	46.42	45.65	44.92	44.64	44.35	44.21	44.11	44.04	43.98	43.93	43.90
洪沟 220	46.17	44.41	43.58	42.78	42.40	42.16	42.01	41.90	41.82	41.76	41.71	41.67
东坡 220	47.04	45.67	45.03	44.42	44.13	43.95	43.84	43.75	43.69	43.65	43.61	43.58
尖山 220	46.75	45.26	44.55	43.85	43.59	43.31	43.17	43.08	43.01	42.95	42.91	42.87

表 7 部分变电站主变压器中性点接入小电抗前后单相短路电流降幅

母线名	降幅 (%)											
	0 Ω	1 Ω	2 Ω	4 Ω	6 Ω	8 Ω	10 Ω	12 Ω	14 Ω	16 Ω	18 Ω	20 Ω
德阳 II 站 220	0	3.46	5.11	6.70	7.45	7.96	8.26	8.47	8.64	8.77	8.87	8.95
蜀州 220	0	3.06	4.71	6.27	7.04	7.50	7.80	8.01	8.17	8.24	8.40	8.47
谭家湾 220	0	3.50	5.17	6.79	7.58	8.07	8.38	8.59	8.77	8.89	9.01	9.08
龙泉 220	0	3.84	5.67	7.47	8.26	8.86	9.20	9.45	9.63	9.77	9.87	9.97
绵阳 220	0	3.66	5.39	7.03	7.83	8.32	8.64	8.85	9.01	9.14	9.25	9.33
龙王 220—1	0	2.91	4.29	5.62	6.26	6.65	6.91	7.10	7.22	7.32	7.41	7.49
龙王 220—2	0	2.91	4.29	5.62	6.26	6.65	6.91	7.10	7.22	7.32	7.41	7.49
资阳 220	0	3.50	5.16	6.76	7.53	8.00	8.32	8.53	8.68	8.81	8.91	9.00
丹景 220	0	3.43	5.03	6.55	7.14	7.74	8.03	8.24	8.38	8.51	8.61	8.67
洪沟 220	0	3.81	5.61	7.34	8.17	8.69	9.01	9.25	9.42	9.55	9.66	9.75
东坡 220	0	2.91	4.27	5.57	6.19	6.57	6.80	6.99	7.12	7.21	7.29	7.36
尖山 220	0	3.19	4.71	6.20	6.76	7.36	7.66	7.85	8.00	8.13	8.21	8.30

析结论和建议。

(1)对于四川 220 kV 电网,采用分层分区、解环、高阻抗参数以及分母运行相结合是降低 220 kV 电网三相短路电流水平的有效限流方案。对于 220 kV 母线单相短路电流超过三相短路电流且数值超过 45 kA 的变电站,建议采用变压器中性点经小电抗接地的方式将单相短路电流限制到三相短路电流水平。

(2)对于四川 500 kV 电网,建议规划中的龙泉、资阳变电站 500 kV 侧电气设备按 63 kA 选择。对于已经投产的尖山、东坡变电站(原 500 kV 侧电气设备按 50 kA 选择),届时可以考虑重新更换 500 kV 侧相关电气设备或考虑采用 500 kV 母线分母运行及装设故障电流限制器等措施对短路电流加以限制。

(3)由于分层分区、解环、母线分段运行均会对整个四川电网的稳定性产生影响,在限制短路电流措施实施前还需根据电网建设实际情况对 220 kV 和 500 kV 电网做详细的“N-1”校核以及暂态稳定分析。

参考文献

[1] 四川省电力公司.四川省“十一五”电网规划优化调整报告[R].成都:四川省电力公司,2006.

[2] 叶琳,戴彦.短路电流限制技术在浙江电网的应用[J].华东电力,2005,33(5):23—26.

[3] 李明,张小青.电力系统故障限流器技术的研究[J].电气时代,2005,(4):54—56.

[4] 向铁元,王智伟,秦跃进,阚勇.湖北电网 2007 年短路电流水平及限制措施[J].电力科学与技术学报,2007,22(1):87—91.

[5] 王非,李群炬.京津唐电网限制短路电流问题探讨[J].华北电力技术,2007,(4):17—19.

[6] 陆建忠,张啸虎.加强电网规划,优化电网结构,限制短路电流[J].华东电力,2005,33(5):292—295.

[7] 叶幼君,鲍爱霞,程云志.浙江 500 kV 电网短路电流的控制[J].华东电力,2006,34(3):193—197.

(下转第 91 页)

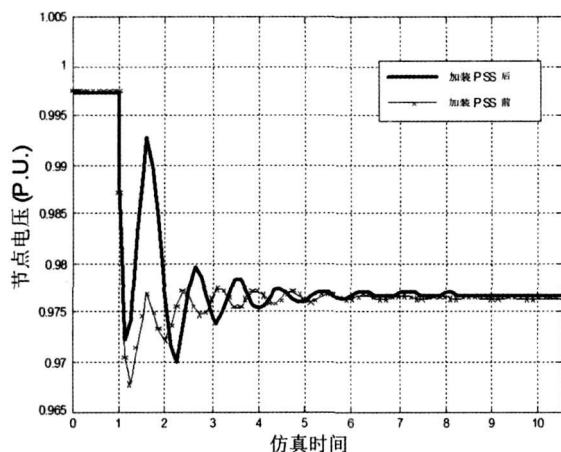


图 6 PSS 对母线电压振荡的影响

基本过渡到稳定水平,但与初值之差已超过 0.02。具体比较数据参见表 3。

图 6 显示了系统在节点 1 加装 PSS 前后,当 2 和 4 节点间断路器发生开断时,节点 4 的电压振荡情况。可以看出,有 PSS 的情况下,节点 4 电压到达一个新的稳定水平时间较快,且振荡幅度也相对较小。

4 结束语

简述了时域仿真在电力系统暂态稳定计算中的应用,对其原理和 PSS 建模进行了介绍。采用 IEEE 14 标准算例,应用基于 Matlab 的电力系统分析与计算工具 PSAT 程序包对计入了 PSS 模型的电力系统进行了时域仿真计算,定量研究了 PSS 的引入对系统暂态稳定的影响,取得了较好效果。总体而言,加装 PSS 对系统内各元件到达新的稳定水平的振荡时间、稳定质量均有积极影响。此外,基于 Matlab 的 PSAT 程序包作为开源程序具有良好的用户接口,且模型相当丰富,尤其适合电力系统运行人员使用,有利于加

强其对系统各类稳定、故障的理解。

参考文献

- [1] Kundur Prabhaskanker Power system stability and control [M]. New York, NY, USA: McGraw-Hill Companies, Inc. 1994.
- [2] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 清华大学出版社, 2001.
- [3] Kundur Prabhaskanker Digital simulation and analysis of power system dynamic performance Ph.D thesis University of Toronto 1967.
- [4] 王守相,郑志杰,王成山. 计及不确定性的电力系统时域仿真的区间算法 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 40—44.
- [5] 石恒初,严正. 基于时域仿真的暂态稳定裕度研究现状分析 [J]. 华东电力, 2008, 36(1): 76—80.
- [6] Maria GA, Tang C K in J Hybrid Transient Stability Analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems 1990, 5(2).
- [7] Tang C K, Graham C E. Transient stability index from conventional time domain simulation [J]. IEEE Trans on Power Systems 1994, 9 (3): 1524—1530.
- [8] 张帆,徐政. 电力系统稳定器抑制次同步谐振的效果 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(6): 121—127.
- [9] 王成山,石颀. 考虑时间延迟影响的电力系统稳定器设计 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 1—6.
- [10] <http://www.ucm.es/area/gsee/Web/Federico/psat.htm>.
- [11] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.

作者简介:

焦艳杰 (1982—), 男, 从事 500kV 变电站运行与监控工作。

陈 宇 (1983—), 男, 从事电力调度工作。

陈枳州 (1982—), 男, 从事配电网调度工作。

吴 曦 (1983—), 女, 从事配电网监控运行工作。

(收稿日期: 2009—02—06)

(上接第 27 页)

- [8] 周彦. 基于 TPSC 技术的短路电流限制器 [J]. 华东电力, 2005, 33(5): 326—327.
- [9] 吴荻. 限制大电网短路电流水平的措施的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [10] 胡宏,周坚. 瓶窑 500 kV 母线短路电流限制措施的研究 [J]. 华东电力, 2005, 33(5): 300—303.
- [11] 李瑞生,索南加乐. 750 kV 输电线路的特殊问题及其对线路保护的影响 [J]. 继电器, 2006, 34(3): 1—4.

- [12] 殷可,高凯. 应用串联电抗器限制 500 kV 短路电流分析 [J]. 华东电力, 2004, 32(9): 567—570.
- [13] 庄侃沁,胡宏,励刚,等. 控制和降低短路电流水平措施在华东电网的应用 [J]. 华东电力, 2005, 33(12): 917—919.
- [14] 袁娟,刘文颖,董明齐,史可琴,范越. 西北电网短路电流的限制措施 [J]. 电网技术, 2007, 31(10): 42—45.

(收稿日期: 2009—05—12)

基于原一对偶内点法的区域电网无功能力评估

张希猛^{1,2}, 李华强¹, 赵周芳¹, 方 勇¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 61541 部队, 北京 100094)

摘 要:提出了区域电网无功能力的概念, 定义了无功能力指标, 建立了评估区域电网无功能力的数学模型。模型中考虑了电压稳定性、节点电压水平、热稳定等安全约束条件, 并用原一对偶内点法求解。通过对 IEEE 30 节点和 IEEE 57 节点样本系统的仿真, 证明了该方法的有效性和正确性。

关键词:电压稳定; 区域电网; 无功能力; 无功裕度; 原一对偶内点法

Abstract: The concept of reactive capability of regional power grid is proposed, then the index of reactive capability is defined and the mathematical model to evaluate the reactive capability of regional power grid is constructed. The security constraint condition considered in this mathematical model includes the voltage stability, the node voltage profile and the thermal stable constraint. Based on the established model, the primal-dual interior point method is used to calculate the index of reactive capability of regional power grid. The effectiveness and the accuracy of this method are testified by the simulation results of IEEE 30-bus and IEEE 57-bus sample systems.

Key words: voltage stability; regional power grid; reactive capability; reactive margin; primal-dual interior point method

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0028-04

随着电力市场的不断完善和电力改革的深化, 对投资效益的追求越来越高, 在现有系统传输结构的基础上尽可能多地传送有功功率, 可以充分发挥现有传输系统的潜能, 有效提高企业的运行效率和经济效益。而提高现有传输系统的传输效率和传输能力, 使电力系统运行不断逼近极限, 进一步恶化了电力系统的不安全因素。从无功功率的平衡及补偿角度来讲, 无功是维持系统电压稳定及节点电压水平和改变潮流分布的重要因素。而电网的运行方式不断在变化, 尤其是在事故后, 所有无功能否将系统稳定在一个合理的运行水平, 是一个非常重要的问题。国内外研究表明^[1~4], 无功不足是导致系统电压失稳乃至崩溃的主要原因。电压稳定性评估是电力系统中非常重要的任务。无论是在正常运行条件下, 或是在事故后状态下, 系统都需要维持在一个合适的稳定裕度。影响电网的电压稳定性的因素是由各个控制因素和网络运行因素共同组成的^[5,6]。当对电网的电压水平以及电压稳定进行评估时, 无功能力很显然会对电压的稳定裕度产生巨大的影响^[7]。

目前, 国内外许多文献关注于无功优化方面。如文献[8]利用人工神经网络中的 Hopfield 连续模型 (HNN) 来求解电力系统中的无功优化问题。文献[9]用模拟退火法进行无功优化, 理论上可以不同时

地收敛到全局最优解。文献[10]将 Tabu 搜索方法用于电力系统无功优化, 结果表明 Tabu 搜索方法具有更强的全局寻优能力。文献[11]将原非线性规划模型分解为一系列二次规划子问题, 运用拉格朗日法能从不可行点找到原问题的最优解。文献[12]运用内点法的原一对偶路径跟踪法, 求解无功优化非标准形式的线性规划模型, 通过消除松弛变量和部分拉格朗日乘子变量, 使得在每步迭代中求解的线性方程组系数矩阵为对称矩阵。

但是, 国际和国内的论文中鲜有关于电网无功能力的报道。除了上述安全因素之外, 电网的无功能力作为辅助服务的重要组成因素, 为无功定价以及辅助服务策略提供有效的参考, 在这种情况下计算电网的无功能力显得尤为重要。

基于此, 提出区域电网的无功能力评价问题。即, 现有网络中的无功水平及其无功储备能否保证系统的电压水平、电压稳定及线路热稳定等安全约束, 并且在事故后仍然保证上述的约束条件不会被破坏。因此, 这里提出了区域电网无功能力指标, 建立了指标评价体系的数学模型, 并进行了数值仿真。

1 无功能力指标数学模型的建立

1.1 电网无功能力指标

从电网的结构和运行特性可知,电网的各种无功电气元件由发电机、并联电抗(容)器、SVC、变压器、输电线路和负荷组成,其中变压器、输电线路和负荷又是消耗无功的主要因素。伴随网络负荷的增长,在电网输送功率增加的同时,电网消耗的无功也会增加,从而导致系统功率因数降低,电压下降。为稳定电网的电压水平,电网需要大量的无功来支撑电网电压的稳定,并保证向用户输送满足负荷质量要求的电能^[13]。因此,在电网负荷增长的过程中,电网的无功储备必须要满足下式安全约束。

$$Q_z > Q_r \quad (1)$$

其中, Q_z 为电网当前装备无功容量的最大值; Q_r 为电网在重负荷情况下,电网电压可行电压水平范围边界或接近电压崩溃点处为维持电压稳定和电压水平所需的无功容量值。

式中:

$$Q_z = \Sigma Q_{gi} + \Sigma Q_{ci} \quad (2)$$

其中, ΣQ_{gi} 为发电机,同步调相机最大无功出力; ΣQ_{ci} 为本网并联电容(抗)器组, SVC 最大无功出力。

$$Q_r = \Sigma Q_{rgi} + \Sigma Q_{rci} \quad (3)$$

其中, ΣQ_{rgi} 为可行电压水平范围边界或接近电压崩溃点处对发电机的无功需求;

ΣQ_{rci} 为可行电压水平范围边界或接近电压崩溃点处对本网并联电容(抗)器组, SVC 最大无功需求。

$i \in n$ n 为本网节点数

按照区域电网无功能力的定义,无功能力应该是电网中现有的无功元件能够提供的无功容量总和与电网中支持电压水平和电压稳定裕度的所有节点的无功需求容量总和的比值(7)。

$$\eta = Q_z / Q_r \quad (4)$$

1.2 区域电网无功能力计算的制约因素

区域电网的无功能力在实际求解时要考虑许多因素的影响,如系统的运行状态、电网结构及负荷需求增长等。除此之外,它的计算还会受到许多约束的制约,如电压水平限制、电压稳定限制和线路热稳定约束等,并且这些安全约束在 $N-1$ 事故情况下仍然能够得到保证。

电压水平限制:电能流经输电线路时,通常情况下会导致线路末端的电压降落,而在输电系统中必须时时将各节点的电压维持在一个特定的范围内,以保证供电质量。电压水平限制规定了系统内各节点所能允许的最低、最高电压。

电压稳定极限:区域电网系统可靠性设计的一个基本原则就是要保证系统在发生故障时,能够继续保持可靠的运行。并且 $N-1$ 故障下系统的安全约束仍然不能被破坏。

1.3 无功能力指标数学模型

为求解无功需求值,无论是电压水平约束还是电压稳定约束,都可将其归结为非线性规划问题。

$$\begin{aligned} \min \xi(x) \\ s.t. \quad & f(x, \lambda) = \lambda y_d + h(x) = 0 \\ & G \leq G(x) \leq G \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $x \in R^n$ 为状态控制变量;

$h(x) = [h_1(x), \dots, h_m(x)]^T$ 为常规潮流方程;

$G(x) = [G_1(x), \dots, G_r(x)]^T$ 为安全约束条件;

G, G 为安全约束条件上下限;

$\xi(x)$ 为目标函数。

根据不同的安全约束限制需要建立不同的数学模型。

模型一:电压水平约束和热稳定约束优化模型

$$\begin{aligned} \min \xi(x) \\ s.t. \quad & h(x) = 0 \\ & \underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i \quad i=1, \dots, n \\ & \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \bar{P}_{Gi} \quad i \in S_G \\ & \underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri} \leq \bar{Q}_{Ri} \quad i \in S_R \\ & \underline{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq \bar{P}_{ij} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:

$\xi(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} [(f_i - f_j)^2 + (e_i - e_j)^2]$ 为系统网损。

模型二:电压稳定约束优化模型

$$\begin{aligned} \min \xi(x) \\ s.t. \quad & f(x, \lambda) = \lambda y_d + h(x) = 0 \\ & \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \bar{P}_{Gi} \quad i \in S_G \\ & \underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri} \leq \bar{Q}_{Ri} \quad i \in S_R \\ & 0 \leq V_i \leq \bar{V}_i \quad i=1, \dots, n \end{aligned} \quad (7)$$

其中, λ 代表系统一定要保持的电压稳定裕度,这里取基态情况下总负载功率的 20%。因此,考虑到系统故障前后的情况,对于所有安全约束的限制,计算区域电网无功能力指标可由式(8)表示。

$$\eta = Q_z / \max\{Q_{r,by(6)}, Q_{r,by(7)}\} \quad (8)$$

2 原一对偶内点法求解

内点法是 Kamarkar 于 1984 年提出的一种非线

性规划算法。当前这种方法已经被广泛应用于各种电力系统最优问题中,成为解决优化问题领域的强有力工具,并且实现了线性问题与非线性问题的统一规划^[14,15]。

文献 [16]、[17] 等把内点法用于求解电力系统优化问题。文献 [18]、[19] 应用原一对偶内点法来求解最优潮流,并推导出了一种新的利用降阶的修正方程式来求解最优问题的有效方法,取得了极大的计算效率。因此,可用该方法作为计算工具,以求得区域电网无功能力。以优化模型一为例,介绍原一对偶内点法的求解步骤。

2.1 原一对偶内点法计算步骤

1) 引入松弛变量,将不等式约束转化为等式约束,式 (6) 可转化为

$$\min \xi(x) \quad \text{s.t.} \begin{cases} h(x) = 0 \\ G(x) - l - G = 0 \\ G(x) + u - G = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $(l, u) \in R^r$ 为松弛变量, $(i, u) \geq 0$ 。

2) 利用拉格朗日函数法将带约束的优化问题转化为无约束的优化问题,则对应式 (9) 的拉格朗日函数为

$$L = \xi(x) - y^T h(x) - z^T [G(x) - l - G] - w^T [G(x) + u - G] - \frac{1}{2} l - \bar{w}^T u$$

式中, $(z, \bar{z}, w, \bar{w}) \in R^r$, $y \in R^m$ 为拉格朗日乘数。

3) 因 $\frac{\partial L}{\partial l} = z - \bar{z} = 0$, $\frac{\partial L}{\partial u} = -w - \bar{w} = 0$, 把 KKT 条件具体化,得到非线性方程组:

$$\begin{cases} L_x = \nabla \xi(x) - \nabla h(x)y - \nabla G(x)(z + w) = 0 \\ L_y = h(x) = 0 \\ L_z = G(x) - l - G = 0 \\ L_w = G(x) + u - G = 0 \\ L_l = l - G = 0 \text{ (互补条件)} \\ L_u = u - G = 0 \text{ (互补条件)} \\ (l, u, z) \geq 0, w \leq 0, y \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $(L, U, Z, W) \in R^{r \times r}$, 对角元素为 (l, u, z, w) 的对角阵。 $e = [1 \dots 1]^T \in R^r$ 。为避免在可行域边界出现粘滞现象,用一个扰动系数 μ 来松弛得到:

$$L_l^\mu = l - G - \mu e = 0, L_u^\mu = u - G + \mu e = 0$$

式中, $\mu = \sigma C_{\text{Gap}} / 2r$ ($C_{\text{Gap}} = \sum_{i=1}^r (l_i - u_i w_i)$ 为互补间隙; σ 为设定参数。

4) 利用牛顿法来求解方程组 (10), 得

$$\begin{cases} [\sum_{i=1}^m \nabla^2 h_i(x) y_i + \sum_{i=1}^r \nabla^2 G_i(x)(z_i + w_i) - \nabla^2 \xi(x)] \Delta x + \nabla h(x) \Delta y + \nabla G(x) (\Delta z + \Delta w) = -L_0 \\ \nabla h(x)^T \Delta x = -L_{y0} \\ \nabla G(x)^T \Delta x - \Delta l = -L_{l0} \\ \nabla G(x)^T \Delta x + \Delta u = -L_{w0} \\ Z \Delta l + L \Delta z = -L_{l0}^\mu \\ W \Delta u + U \Delta W = -L_{u0}^\mu \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\nabla^2 h_i(x)$, $\nabla^2 G_i(x)$, $\nabla^2 \xi(x)$ 为 $h_i(x)$, $G_i(x)$, $\xi(x)$ 的 Hessian 矩阵; y_i , z_i , w_i 分别为 y , z , w 的第 i 个元素。

$(L_{y0}, L_{l0}, L_{w0}, L_{l0}^\mu, L_{u0}^\mu)$ 为 KKT 条件方程的残差。

虽然可对方程组 (11) 直接进行计算求解,但是为了进一步提高计算速度,采用了对上述方程组进行降阶的计算技巧。由方程组 (11) 后 4 个方程式可得

$$\begin{cases} \Delta l = \nabla G(x)^T \Delta x + L_{l0} \\ \Delta u = -(\nabla G(x)^T \Delta x + L_{w0}) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \Delta z = -L^{-1} Z \nabla G(x)^T \Delta x - L^{-1} (Z L_{l0} + L_{l0}^\mu) \\ \Delta w = U^{-1} W \nabla G(x)^T \Delta x + U^{-1} (W L_{w0} - L_{u0}^\mu) \end{cases} \quad (13)$$

将方程组 (12)、(13) 代入方程组 (11) 可得

$$\begin{bmatrix} A & \nabla h(x) \\ \nabla h(x)^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} B \\ L_{y0} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, $A = [\sum_{i=1}^m \nabla^2 h_i(x) y_i + \sum_{i=1}^r \nabla^2 G_i(x)(z_i + w_i) - \nabla^2 \xi(x)] + \nabla G(x) S \nabla G(x)^T$

$$S = U^{-1} W - L^{-1} Z$$

$$B = \nabla h(x)y - \nabla \xi(x) + \nabla G(x) [U^{-1} W L_{w0} - L^{-1} Z L_{l0} - \mu (U^{-1} - L^{-1}) e]$$

2.2 原一对偶内点法的简要程序流程

1) 初始化

2) 计算互补间隙

$C_{\text{Gap}} = \sum_{i=1}^r (l_i - u_i w_i)$, 若 $C_{\text{Gap}} < \epsilon$, 则输出全部计算结果, 结束; 否则, 执行步骤 3)。

3) 计算扰动系数: $\mu = \sigma C_{\text{Gap}} / 2r$ 式中 σ 为设定的参数, 可影响计算收敛的速度。

4) 求解方程组 (14), 得到 $[\Delta x, \Delta y]$, 并代入式 (12)、(13) 以求解 $[\Delta l, \Delta u, \Delta z, \Delta w]$ 。

5) 确定在原一对偶空间中最大步长

$$P_{\text{step}} = 0.9995 \min \left\{ \min \left(\frac{-l_i}{\Delta l_i}; \Delta l_i < 0; \frac{-u_i}{\Delta u_i}; \Delta u_i < 0 \right), \right\}$$

$$D_{step} = 0.9995 \min \left\{ \min \left(\frac{-z_i}{\Delta z_i}, \Delta z_i < 0; \frac{-w_i}{\Delta w_i}, \Delta w_i > 0 \right), \right\}$$

6)更新原始和对偶变量

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ u \end{bmatrix} + P_{step} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta u \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} y \\ z \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \\ z \\ w \end{bmatrix} + D_{step} \begin{bmatrix} \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta w \end{bmatrix}$$

转步骤 2)。

3 算例分析

3.1 算法步骤

- 1)建立和计算基本潮流方程；
- 2)用 PDIPM 计算式 (6), 得出故障前系统在电压水平约束和热稳定约束条件下的无功需求值 $Q_r = \Sigma Q_i$;
- 3)用 PDIPM 计算式 (7), 得出故障前系统在电压稳定约束条件下的无功需求值 $Q_r = \Sigma Q_i$;
- 4) $Q_{pre} = \max \{ Q_{rby}(2), Q_{rby}(3) \}$;
- 5)用 PDIPM 计算式 (6), 得出故障后系统在电压水平约束和热稳定约束条件下的无功需求值 $Q_r = \Sigma Q_i$;
- 6)用 PDIPM 计算式 (7), 得出故障后系统在电压稳定约束条件下的无功需求值 $Q_r = \Sigma Q_i$;
- 7) $Q_{loss} = \max \{ Q_{rby}(5), Q_{rby}(6) \}$;
- 8)求解电网的无功能力水平值:
 $\eta = Q_z / \max \{ Q_{pre}, Q_{loss} \}$ 。

3.2 算例仿真

用前面的方法对 IEEE 30、IEEE 57 母线系统的仿真来验证本方法的性能。

按照 IEEE 30 系统,系统当前 $Q_z = 3.64$ 。

按照 IEEE 57 系统,系统当前 $Q_z = 6.212$ 。

在静态情况下仿真,故障前结果见表 1。

表 1 系统故障前无功需求值

考虑不同约束条件下	IEEE 30	IEEE 57
	Q_r	Q_r
电压水平约束	1.708 2	2.836 8
电压稳定约束	2.286 8	3.675 2

因此,系统故障前在 IEEE 30 母线系统下:
 $Q_{pre} = \max \{ 1.708 2, 2.286 8 \} = 2.286 8$

在 IEEE 57 母线系统下:
 $Q_{pre} = \max \{ 2.836 8, 3.675 2 \} = 3.675 2$

表 2、表 3 分别给出了发生 N-1 故障情况下,考

虑电压水平约束和电压稳定约束的仿真结果。

表 2 考虑电压水平约束的无功需求值

IEEE 30		IEEE 57	
开断支路号	Q_r	开断支路号	Q_r
5	2.113 0	8	3.481 2
1	1.997 1	53	3.437 3
2	1.951 8	25	3.085 2
4	1.951 4	15	3.075 7
9	1.871 9	1	3.005 8

表 3 考虑电压稳定约束的无功需求值

IEEE 30		IEEE 57	
开断支路号	Q_r	开断支路号	Q_r
1	2.781 1	58	4.238 5
5	2.735 0	8	4.231 8
7	2.653 2	44	4.081 3
2	2.543 3	15	4.051 2
8	2.523 6	55	4.035 6

在 IEEE 30 母线系统下:

$$Q_{r(N-1)} = \max \left\{ \begin{matrix} 5, 2.113 0 \\ 1, 2.781 1 \end{matrix} \right\} = (1, 2.781 1)$$

上式为: (开断支路编号, 无功需求值)

$$Q_r = \max \{ Q_{pre}, Q_{r(N-1)} \} = \max \{ 2.286 8, 2.781 1 \} = 2.781 1$$
$$\eta = Q_z / Q_r = 3.64 / 2.781 1 = 1.308 8$$

在 IEEE 57 母线系统下:

$$Q_{r(N-1)} = \max \left\{ \begin{matrix} 8, 3.481 2 \\ 58, 4.238 5 \end{matrix} \right\} = (58, 4.238 5)$$

上式为: (开断支路编号, 无功需求值)

$$Q_r = \max \{ Q_{pre}, Q_{r(N-1)} \} = \max \{ 3.675 2, 4.238 5 \} = 4.238 5$$
$$\eta = Q_z / Q_r = 6.212 / 4.238 5 = 1.465 6$$

4 结 论

前面提出了一种考虑电网电压水平、电压稳定及线路热稳定约束情况下求解区域电网无功能力的计算方法,建立了区域电网无功能力指标,并在各种预想的 N-1 网络故障情况下,利用原一对偶内点法进行求解,得到了在电压水平约束、热稳定约束和电压稳定约束情况下区域电网的无功能力值。通过对 IEEE 30、IEEE 57 母线系统的仿真计算,证明了此方法的准确性和有效性。因此,所提算法以及相关的计算结果,可以快速地对现有电网的无功能力进行评估。

(下转第 56 页)

[12] 段登伟,刘俊勇.基于不完全信息静态博弈论的购电商竞价策略研究[J].电力自动化设备,2003,23(7):10—14

[13] 陈星莺,李华昌,廖迎春,刘皓明.不完全信息下的供电公司最优竞价策略[J].电力需求侧管理,2006,8(4):12—15

[14] Alvarado F L. The stability of Power System Markets IEEE Trans on PWRs 1999, 14(2).

[15] 谭忠富,董福贵,刘严.博弈论在大用户与发电公司直接购电合同中的应用[J].华北电力大学学报,2004,31(3):62—64.

[16] 陈刚,王超,谢松.基于博弈论的电力大用户直接购电交易研究[J].电网技术,2001,28(13):75—79.

[17] Geeli Negotiation Models for Electricity Pricing in a Partially Deregulated Electricity Market In: IEEE PES Summer Meeting Seattle(USA). 1999.

[18] 刁勤华,林济铿,倪以信,陈寿孙.博弈论及其在电力市场中的应用[J].电力系统自动化,2001,25(1):19—23;5(2):13—18.

[19] 刘观起,张建,刘瀚.基于用户对电价反应曲线的分时电价的研究[J].华北电力大学学报,2005,32(3):23—27.

作者简介:
孙琳(1982—),女,成都人,硕士研究生,主要从事电力市场方面的研究。
刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,主要从事电力市场、分布式发电等方面的研究工作。
(收稿日期:2009—06—01)

(上接第 31 页)

参考文献

[1] Zobian A, Ilie M D. A Steady state Voltage Monitoring and Control Algorithm Using Localized Least Square Minimization of Load Voltage Deviations[J]. IEEE Trans on Power Systems 1996, 11(2): 929—938.

[2] MAO Jian-feng ZHAO Qian-chuan Christos G Optimal Dynamic Voltage Scaling in Power-Limited Systems with Real-time Constraints[A]. 43rd IEEE Conference on Decision and Control 2004, 1472—1477.

[3] 包黎昕,段献忠,何仰赞.状态空间中电压稳定性的动态分析[J].中国电机工程学报,2001,21(5):17—22

[4] Zeng Y G, Berizzi A, Marannino P. Voltage Stability Analysis Considering Dynamic Load Model[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control Operation and Management 1997, 396—401.

[5] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,王小海.电力系统电压稳定性及其控制[M].中国电力出版社.

[6] Obadina O. O, Berg G. J Determination of Voltage Stability Limit in Multimachine Power System. IEEE Trans On PWRs 1988, 3(4).

[7] 王锡凡,方万良,杜正春.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社,2004.

[8] 王永骥,涂键.神经网络控制[M].机械工业出版社,1999.

[9] Hsiao Y T, Liu C C, Chiang H D, et al A New Approach for Optimal VAR Sources Planning in Large Scale Electric Power Systems[J]. IEEE Trans On Power Systems 1993, 8(3): 1024—1032

[10] 刘玉田,马莉.基于 Tabu搜索方法的电力系统无功优化[J].电力系统及其自动化学报,2000,24(2):61—64.

[11] Burchett R C, Kapp H H, Vierath D R. Quadratically Convergent Optimal Power Flow[J]. IEEE Trans On Power Apparatus and Systems 1984, 103(11): 3267—3276.

[12] 刘明波,程劲晖,陈学军.电力系统无功综合优化的线性规划内点法[J].电力系统及其自动化学报,1999,11(5):87—92.

[13] 周双喜,姜勇,朱凌志.电力系统电压静态稳定性指标述评[J].电网技术,2001,25(1):1—7.

[14] 李亚男,张粒子,杨以涵.考虑电压约束裕度的无功优化及其内点解法[J].中国电机工程学报,2001,21(9):1—4.

[15] 刘明波,陈学军.电力系统无功优化的改进内点算法[J].电网技术,1998,22(3):24—28.

[16] 王良缘,吴政球,傅海燕等.电力市场中基于内点法的含暂态稳定约束的最大可用输电能力计算[J].电力系统及其自动化学报,2004,16(1):28—33.

[17] 袁越,久保川淳司,佐佐木博司.考虑暂态稳定约束的可用传输能力计算[J].电力系统自动化,2004,28(10):34—39.

[18] 李华强,刘亚梅, N. Yorino 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估[J].中国电机工程学报,2005,25(24):56—60.

[19] 范勇,李华强,曾勇波.基于内点法的可用传输能力计算[J].四川师范大学学报,2006,29:149—151.

作者简介:
张希猛(1976—),男,河北南皮人,汉族,在读研究生,工程师,主要研究方向电压稳定及电压无功控制;
李华强(1965—),男,教授,博士,从事电压稳定及无功优化问题研究;
赵周芳(1983—),女,硕士在读,主要从事电压稳定方面的研究;
方勇(1968—),男,博士在读,主要从事电能质量方面的研究。
(收稿日期:2009—02—23)

基于自适应粒子群算法的负荷最优分配

苏 鹏¹, 刘天琪¹, 黄 健²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 峨眉山供电局, 四川 峨眉山 614000)

摘 要: 在传统经济负荷分配模型的基础上, 结合节能调度的宗旨, 建立了综合考虑系统有功网损最小和机组发电耗煤量最小的多目标负荷分配模型, 该模型能对系统进行整体节能优化。引入了自适应权重和因子的概念, 采用了一种用于多目标负荷最优分配的自适应粒子群算法, 并对 IEEE 57 节点系统进行了仿真计算。结果表明, 该方法能降低系统网损和减少机组煤耗, 从而有效地节约能源, 同时满足系统的安全约束。

关键词: 经济负荷分配; 自适应粒子群算法; 混沌优化; 多目标优化

Abstract: Based on the traditional model of economic load dispatch (ELD), and combined with the purpose of energy conservation dispatching, a model of multi-objective load dispatch is established, where the active power loss minimization and coal consumption minimization are taken into account, and this model can optimize the energy-saving from the whole power system. Based on the factor of self-adaptive weight sum, a self-adaptive particle swarm algorithm is proposed and applied to solve load dispatch problem for IEEE 57 bus system. The simulation results show that the model is able to save energy sources effectively, and the validity of the established model and the effectiveness of the proposed algorithm are verified.

Key words: economic load dispatch; self-adaptive particle swarm algorithm; chaos optimization; multi-objective optimization

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0032-04

0 引 言

经济负荷分配^[1~5] (economic load dispatch, ELD) 是电力系统中一类典型的优化问题, 其目的是在满足负荷和运行约束的条件下, 最小化发电成本(煤耗量)。研究 ELD 问题对于提高系统运行的经济性和可靠性都具有重要的意义。2007 年国务院下发了节能调度的试行办法, 并在四川、江苏等地试运行。节能调度对火电机组影响比较大, 因其核心思想是通过火电机组按照煤耗水平从大到小排序, 让排在前面的机组尽量多发。这样既能节省一次能源, 又能减少对环境的污染。实施节能调度排序后, 小火电机组必然面临着关停, 进而采用“上大压小”的替代方案^[6]。这对局部电网的供电能力、网架结构和网损会产生一定影响, 特别是在电源结构不合理时, 关停小机组, 极大可能会增大网损, 造成线路超载或者节点电压越限情况。然而, 目前的负荷分配方法^[3~5]都是在发电侧进行出力的有效分配, 并没有考虑到由此是否会导致网损的增大和是否满足系统的安全运行约束, 网损本质上也是对能源的损耗。因此, 在传统

负荷分配模型的基础上, 提出了多目标的负荷分配模型, 以煤耗和网损最小为目标函数, 同时考虑网络约束条件, 对机组出力进行优化, 从而实现整个电力系统的节能。

处理多目标优化模型的方法通常是采用某些方法将多目标问题转化为单目标问题, 如基于权重的加权方法^[7,8]、基于模糊集理论的隶属度算法^[9,10]等, 然后结合各类优化方法进行寻优。文献[8]采用加权的方法把多目标问题转化为单目标问题, 虽然兼顾了快速性和经济性, 但对于不同的目标函数, 其物理本质不同, 量纲也不同, 权重因子的取值也十分困难。文献[9]提出模糊多目标优化模型, 通过对每个目标进行隶属度函数的归一化计算, 实现到单目标的转换, 但惩罚因子的取值往往根据经验得到, 容易受主观因素的影响, 最优隶属函数的确定也比较复杂。现将自适应权重和法与粒子群算法相结合, 将多目标优化问题组合为单一目标问题。每代种群中的多目标权重因子均利用当前种群中的一些有用信息重新调整, 使搜索方向朝着整个搜索空间的最优解方向发展。采用混沌寻优方法来克服粒子群算法陷入早熟缺陷, 将其应用到电力系统多目标负荷最优分配问

题的求解中,通过对 IEEE 57 节点系统的仿真计算表明,该算法有较好的全局寻优能力。

1 多目标负荷最优分配数学模型

1.1 目标函数

多目标负荷最优分配的数学模型是在满足系统运行约束和发电机运行约束的条件下,以系统总发电成本最小和有功网损最小为目标。其目标函数为

$$\begin{cases} \min f = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_i) \\ \min f = P_{\text{loss}} = f(P_i) \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_i 为第 i 台发电机的有功功率; N_G 为系统内发电机总数; $F_i(P_i)$ 为第 i 台发电机的耗量特性; P_{loss} 为系统总网损。 $F_i(P_i)$ 一般可以用二次函数近似表示为

$$F_i(P_i) = \alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i \quad (2)$$

式中, α_i , β_i , γ_i 为第 i 台发电机的耗量特性常数。

1.2 约束条件

发电机运行约束:

$$P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max} \quad (3)$$

式中, $P_{i \min}$ 、 $P_{i \max}$ 为发电机有功功率的上限和下限。

电力平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_i = P_L + P_{\text{loss}} \quad (4)$$

网损一般采用潮流计算或 B 系数法求得,这里采用 matpower 计算潮流得到网损,因此还需计及一些潮流计算中的约束条件。

$$\begin{cases} P_i - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_i - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$Q_{i \min} \leq Q_i \leq Q_{i \max} \quad (i \text{ 无功电源集}) \quad (6)$$

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (i=1, 2, N) \quad (7)$$

$$P_l \leq P_{\max} \quad (l=1, 2, N_L) \quad (8)$$

式中, $Q_{i \min}$ 、 $Q_{i \max}$ 为无功电源输出功率的上限和下限; $V_{i \min}$ 、 $V_{i \max}$ 为负荷节点电压幅值上限和下限; $P_{\max}$ 为线路容量上限; V_i 为第 i 个负荷节点电压幅值; N 、 N_L 为系统节点数和线路数。

2 自适应粒子群算法及其改进

2.1 基本粒子群算法

在 D 维搜索空间中有 n 个粒子,其中第 i 个微粒的位置表示为 X_i ,速度用 V_i 表示。它经历过的最好位置记为 P_{id} ,整个群体经历过的最好位置用 P_{gd} 表示。各粒子按如下公式更新自己的速度和位置^[11]。

$$\begin{aligned} V_{id}^{t+1} &= w \times V_{id}^t + c_1 \times \text{rand}() \times (P_{id}^t - X_{id}^t) + c_2 \times \\ &\text{rand}() \times (P_{gd}^t - X_{id}^t) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, t 为迭代次数; d 表示 D 维搜索空间中的第 d 维变量; c_1 和 c_2 为权重因子; $\text{rand}()$ 为 $[0, 1]$ 区间内产生的随机数; w 为惯性权重系数。由下式进行自适应调整。

$$w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) / \text{iter}_{\max} \times \text{iter} \quad (10)$$

式中, $\text{iter}_{\max}$ 是迭代最大值; iter 是当前迭代次数。

粒子群算法一般采用实数编码,由于没有选择、交叉与变异等操作,算法结构相对简单,运行速度很快。但容易陷入局部最优,即早熟收敛现象。这种情况下,应进行早熟处理。

2.2 混沌寻优方法

混沌状态广泛存在于自然想象和社会现象中,是一种非线性现象,其行为复杂且类似随机,但看似一片混乱的混沌变化过程并不完全混乱,而是存在着精细的内在规律。混沌运动能在一定范围内按其自身的“规律”不重复遍历所有状态。混沌优化算法就是利用这些混沌变量的遍历性、随机性和规律性等特点在解空间内进行优化搜索,易于跳出局部最优解,无需优化问题具有连续性和可微性。

目前混沌优化方法主要是将混沌变量线性化映射到优化变量取值空间,在搜索空间较小时效果显著,但搜索空间较大时,效果却不能令人满意。因为传统的线性载波,使得混沌运动在整个大的搜索空间中容易集中在边界寻优,影响寻优效果。针对这个问题,采用改进的二次载波混沌优化方法^[12],它在第一次载波得到的最优解双侧领域内变换尺度寻优,能逐步缩小搜索范围,加快收敛速度,从而有较高的效率。将混沌搜索空间由粒子群迄今为止搜索到的最优位置决定,以它为基础产生混沌序列。通过逆映射返回到原解空间,在原解空间对混沌变量经历的每一个可行解计算其适应值,保留性能最好的可行解,并随机取代当前群体中的某个粒子。

2.3 自适应权重和法

多目标优化问题的求解方法很多,大多数传统方法采用固定权重的加权法将多个目标变为单目标,然后采用数学规划工具处理。固定的权重值一般根据

决策者的偏好确定,但对于量纲不同的各优化子目标,决策者有时很难确定到底采用多大的权重,而且一组固定的权重因子在搜索空间中只能沿一个固定方向搜索。研究人员对此做了很多工作,提出了一些有效的改进方法。其中,Gen和 Cheng提出了一种自适应权重方法,并证明了该方法能根据当前种群在各方面的性能进行适应性调整以获得朝向正理想点(各方面性能的综合最优点)的搜索压力^[13, 14]。

为不失一般性,考虑带有 q 个目标的最小化问题:

$$\min \{z = f(x), z = f(x), \dots, z_q = f_q(x)\} \quad (11)$$
$$\text{s.t. } h_i(x) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

$$g_i(x) - b_i \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

对于给定个体 x 权重和目标函数为

$$z(x) = \sum_{k=1}^q \frac{\frac{f_k^{\max} - f_k(x)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}}}{\frac{f_k^{\max} - f_k^{\min}}{f_k^{\max} - f_k^{\min}}} \quad (13)$$

在式(13)确定的目标函数中,分式是为了将个体对应的单一目标函数归一化到 $[0, 1]$ 区间内,从而使加权后目标函数归一化到 $[0, q]$ 区间内。

应用上述方法,基于自适应权重和的多目标负荷最优分配目标函数为

$$f(x) = \frac{f_1^{\max} - f_1(x)}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} + \frac{f_2^{\max} - f_2(x)}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \quad (14)$$

2.4 约束条件的处理

若潮流计算收敛,则等式约束中的功率平衡条件式(5)可满足;若潮流不收敛,则将此个体对目标函数的适应值都指定为一较大值,使其在寻优过程中无法占优。控制变量在初始化和每次更新时均被限制在其允许范围内,因此不等式约束(3)也能满足。真正需要考虑的约束条件是式(6)~(8)。文中将其转化为一个罚函数,并作为一个最小化目标加入到目标函数中。

$$\min f = \lambda_1 \sum_{i=1}^{N_D} \left(\frac{V_i - V_{lim}}{V_{imax} - V_{imin}} \right) + \lambda_2 \sum_{i=1}^{N_G} \left(\frac{Q_i - Q_{lim}}{Q_{imax} - Q_{imin}} \right) + \lambda_3 \sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{P_i - P_{lim}}{P_{imax}} \right) \quad (15)$$

式中, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为罚因子。

V_{lim} 、 Q_{lim} 、 P_{lim} 的定义为

$$V_{lim} = \begin{cases} V_{imax} & V_i > V_{imax} \\ V_{imin} & V_i < V_{imin} \\ V_i & \text{其他} \end{cases}$$

$$Q_{lim} = \begin{cases} Q_{imax} & Q_i > Q_{imax} \\ Q_{imin} & Q_i < Q_{imin} \\ Q_i & \text{其他} \end{cases}$$
$$P_{lim} = \begin{cases} P_{imax} & P_i > P_{imax} \\ P_i & P_i < P_{imax} \end{cases} \quad (16)$$

3 求解步骤

运用基于 Pareto 解集的改进粒子群算法解决多目标经济负荷分配的具体计算步骤如下。

- 1)初始化。读入原始数据,包括电力系统数据和算法参数数据;
- 2)迭代次数 $Iter=1$,在控制变量的变化范围内随机生成 N 个解,每个粒子的个体极值和全局极值均为初始位置;
- 3)根据粒子编码的控制变量值,对整个系统进行潮流计算,并由此计算每个粒子所代表的优化方案下系统的有功网损、机组耗煤量和惩罚项;
- 4)计算每个粒子的适应值,即目标函数值,并更新个体最优值和全局最优值;
- 5)按式(9)更新粒子的速度和位置,并按一定概率对当前粒子群进行混沌寻优;
- 6)判断是否满足结束准则,达到最大允许迭代次数或最优解对应的目标函数值在给定的迭代步数内改变量小于给定值时,停止优化并输出结果,否则迭代次数 $Iter=Iter+1$,返回步骤 3)。

4 算例分析

以 IEEE 57 节点系统为算例进行分析,该系统共有 57 个节点,80 条支路,50 个负荷节点,7 台发电机,1 号机组为系统平衡机组,假设其为水电机组。算法参数设置如下:粒子种群大小为 30,最大迭代次数为 100,粒子群算法中常数 c_1 和 c_2 均为 2.05,惯性常数 $W_{max}=0.9$, $W_{min}=0.4$,最大混沌搜索次数为 40。

重复实验 50 次,得到全局最优解,各机组优化后出力见表 1。

从表 1 结果中可以看出:8 号机组和 12 号机组的煤耗率较低,发电量大,分别占自身容量的 65% 和 87% (大容量机组煤耗率低);而其他机组由于煤耗率高,发电量低,甚至存在不发电的情况。这和节能

调度核心思想是一致的,即充分利用煤耗率低的机组发电。并且该结果代入潮流计算后,各节点电压、各支路是不存在越限情况,能满足系统运行要求。

表 1 优化后的控制变量

机组序号	机组容量	优化结果
1	575.88	462.57
2	100.00	0
3	140.00	34.98
6	100.00	40.27
8	550.00	353.91
9	100.00	0.02
12	410.00	359.03

根据优化迭代结果,绘制了自适应粒子群算法的收敛特性曲线,见图 1。可以看出,自适应粒子群算法在大约 30 次的时候就已经非常接近最优解,表现很高的优化效率。

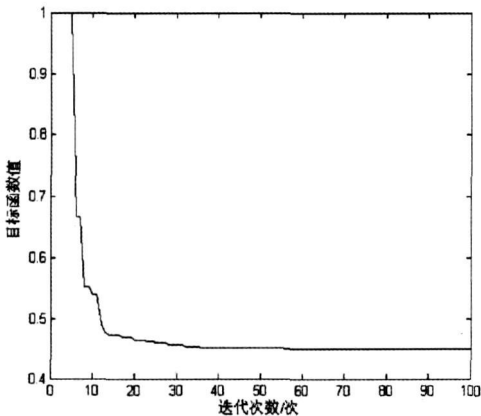


图 1 粒子群算法收敛特性曲线

传统经济负荷分配模型只是以煤耗量为目标函数进行优化求解,而忽略了该优化方案是否会导致网损的增加。表 2 给出了传统模型与本模型分别优化求解后的比较。可以看出:传统模型的煤耗是比较小,但网损却比较大;在本模型中,煤耗比传统模型多 165 t,增加了 10%,而网损比传统模型减少了 7.8 MW,减少了 23%。如果系统规模扩大,网损减少的比例会更多。足以说明,本模型是优于传统经济负荷分配模型,能够实现整个系统的节能。

表 2 IEEE57 节点系统负荷分配优化前后的结果

	网损 (MW)	煤耗 (t)
传统模型	34.0	1 503
本模型	26.2	1 668

5 结 论

研究电力系统负荷分配时,加入其对网损的影响,同时兼顾电网的约束条件,这对于电力系统总体的节能具有现实意义。用 IEEE 57 节点系统作为算例,采用自适应粒子群算法求解。计算结果表明,基于本模型的负荷分配结果可以同时降低网损,减少机组能耗,并且满足系统的安全约束。同时所提出的优化方法在求解多目标优化方面具有普遍的适用性,因此可应用于其他领域的多目标优化问题的求解。

参考文献

[1] 本刘自发,张建华.一种求解电力经济负荷分配问题的改进微分进化算法[J].中国电机工程学报,2008,28(10):100—105.

[2] 本初壮,于继来.一种计及网络约束和禁止运转区影响的经济负荷分配算法[J].电网技术,2006,30(11):21—25.

[3] 本张雪雯,李艳君.基于自调节粒子群算法的电力系统经济负荷分配[J].电网技术,2006,30(18):8—13.

[4] 蒙文川,邱家驹,卞晓猛.电力系统经济负荷分配的人工免疫混沌优化算法[J].电网技术,2006,30(23):41—44.

[5] 毛亚林,张国忠,朱斌,等.基于混沌模拟退火神经网络模型的电力系统经济负荷分配[J].中国电机工程学报,2005,25(3):65—70.

[6] 杨卫红,郭利杰,单葆国.关停小火电机组对“十一五”规划电网的影响分析[J].电力技术经济,2007,19(4):10—13.

[7] 张武军,叶剑锋,梁伟杰,等.基于改进遗传算法的多目标无功优化[J].电网技术,2004,28(11):67—71.

[8] 王治国,刘吉臻,谭文,等.基于快速性与经济性多目标优化的火电厂厂级负荷分配研究[J].中国电机工程学报,2006,26(19):86—92.

[9] Dhillon J S, Parti S C, Kothari D P. Fuzzy decision making in stochastic multiobjective short-term hydrothermal scheduling[J]. IEEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(2): 191—200.

[10] Basu M. An interactive fuzzy satisfying method based on evolutionary programming technique for multiobjective short-term hydrothermal scheduling[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 69(2—3): 277—285.

[11] Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer

(下转第 84 页)

式中, P_n ——有功功率损失;
 R ——每项输电线路的电阻 (含输电线路及变压器), Ω 。
输电线路电阻: $R=KL/A$
式中, K ——电阻系数;
 A ——导线截面积;
 L ——导线长度, m 。
变压器电阻: $R=Y_k U^2/S_n$
式中, Y_k ——变压器短路阻抗, Ω ;
 U ——系统电压, V ;
 S_n ——变压器额定容量, kVA 。
增加变压器及输电线路的利用率。
所增加的利用率为:

$(P_2 - P_1)/P_1 = [(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2) - 1] \times 100\%$
式中, $\cos\varphi_1$ ——改善前的功率因数;
 $\cos\varphi_2$ ——改善后的功率因数。
提高系统的端电压减少系统的电压降:
 $du(\%) = Q_c/S_n \times X_k(\%)$

式中, $du(\%)$ ——电压提高百分比;
 Q_c ——补偿电容器的容量, $kvar$;
 S_n ——变压器容量, kVA ;
 $X_k(\%)$ ——变压器阻抗百分比。

在低压用户侧进行就地无功补偿, 可以改善用户侧功率因数, 减少配电网传送的无功功率, 降低线路损耗。如表 2 功率因数提高后, 线损将大幅度降低。

表 2 功率因数由 1.0 下降时损耗增加情况

功率因数 λ	可变损耗 $\Delta P/\%$	功率因数 λ	可变损耗 $\Delta P/\%$
1.00	0	0.75	78
0.95	11	0.70	104
0.90	23	0.65	136
0.85	38	0.60	178
0.80	56		

在无功补偿方式上, 主要采用电容分散补偿 (在用户侧) 和集中补偿 (在变电站内) 相结合、高压补偿和低压补偿相结合的方法。同时, 对用户实行无功功

率考核和力率奖惩制度, 可以有效地改善用户侧和线路的功率因数, 减少无功损耗。但在实际工作中, 依然存在一些问题。一是由于部分用户仍然使用单向计量的无功表计, 不能计量反向无功, 无法对其功率因数进行准确的考核。为了达到考核标准, 用户人为加大了电容器的投入数量, 导致无功功率倒送回电网, 造成电压升高, 损耗增加。二是用户侧缺乏管理。由于无功电量是随着负荷变化不断改变的, 但有些用户仍然使用手动投切装置, 自动化程度低, 总体投运率不高, 功率因数不稳定。对于以上两种情况, 建议一是进行计量改造, 安装多功能电子表, 能双向记录无功电量, 同时加大考核力度, 使用户对功率因数引起足够的重视。二是加强无功补偿管理, 在配电变压器低压侧安装无功自动补偿柜, 使其可根据负荷的实际情况自动投切电容器组, 达到提高变压器功率因数、减少配电损耗的目的。

3 结 语

线损管理的好坏直接反映了供电所的管理水平。在管理上, 要做到有目标、有考核、有计划; 在技术上, 要做到有标准、有分析、有总结, 逐步形成一套较为完善的闭环管理模式, 建立常态管理, 努力降损节能, 为供电企业的进步和发展做出更大的贡献。

参考文献

[1] 鹿忠民. 小议降低农村电网线损的管理措施与技术手段 [J]. 中国科技财富, 2008, (7): 101.
[2] 高岩涛, 喻波, 郎宇宁. 农网无功就地平衡和降损的实践与探讨 [J]. 黑龙江电力, 2006, 28(5): 367—369.
[3] 李毅. 降低低压线损的技术措施 [J]. 农村电工, 2007, 15(3): 6.
[4] 王泽勇. 低压电网降损节能的几点技术措施 [J]. 农村电工, 2007, 15(3): 7.

(收稿日期: 2009—02—15)

(上接第 35 页)
[C]. Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation IEEE World Congress on Computational Intelligence Anchorage USA; 1998 69—73
[12] 郭燕, 史丽萍, 赵学华, 史治水. 一种改进的混沌优化方法研究 [J]. 平原大学学报, 2008, 25(2): 142—143.
[13] 玄光南, 程润伟. 遗传算法与工程优化 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[14] Jamshidi M, Fathi M, Pierrot F. Intelligent automation and control [M]. Albuquerque NM: TSI press 1996.
作者简介:
苏 鹏 (1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制、人工智能在电力系统中应用。
刘天琪 (1962—), 女, 博导, 教授, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化。
(收稿日期: 2009—03—01)

低频振荡预警及分析功能在新疆电网 WAMS 系统中的应用及改进

张彦军¹, 张 娟¹, 常喜强¹, 刘 冉¹, 姚秀萍¹, 乔 怡²

(1 新疆电力公司电力调度中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘 要: 对新疆电网广域测量系统高层应用中的低频振荡预警和分析功能进行了深入研究与改进。针对系统中原有的 Prony 算法分析长数据段时无法辨识出衰减快的分量而导致误差偏大的不足及视窗短的问题, 引入时域峰值识别法, 将两者有效的结合起来, 进行长短视窗分析, 有效提高了分析长数据段的准确性。同时建立了两段数据层分析方法及不同系统的数据转化分析方法, 将同系统的数据分段、分层进行分析, 将不同系统采集到的数据进行对比分析相互验证。通过实例验证了算法的可行性和有效性, 对电网运行起到了实际作用, 有利于新疆电网低频振荡分析和实时告警, 保证了电网的安全稳定运行。

关键词: 低频振荡; WAMS 系统; Prony 算法; 时域峰值识别法

Abstract: The early-warning and analysis function module of low frequency oscillation based on WAMS are studied thoroughly. Because the signal components with high attenuating speed can hardly be identified, the analysis for long data segment using Prony algorithm causes a big error. And the length of visual window of Prony algorithm is also short. Considering the above mentioned shortcomings of Prony algorithm, a algorithm called time-domain peak value is introduced which effectively improves the accuracy of analysis for long data segment. At the same time, two-stage data analysis method and analysis method based on data gathered from different system are established. The practical example result shows the feasibility and efficiency of the new method. Improved analysis function module plays an important role in operation, which ensures the safety and stability of Xinjiang power grid.

Key words: low frequency oscillation; WAMS system; Prony algorithm; time-domain peak values

中图分类号: TM712 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0036-05

0 引 言

电力系统中发电机经输电线并列运行时, 在扰动下会发生发电机转子间的相对摇摆, 并在缺乏阻尼时引起持续振荡。此时, 输电线上功率也会发生相应振荡, 由于振动频率一般较低, 为 $0.2 \sim 2.5 \text{ Hz}$ 故称为低频振荡^[1]。系统互联规模的扩大和现代大型发电机组的快速励磁调节器的使用, 使得低频振荡问题在现代电力系统中日益突出。

2007 年, 新疆电网实现了全疆联网。电网覆盖面积广, 电源与负荷中心距离远, 地区电网之间跨度大并且与主网连系薄弱。运行方式多变, 长链型大跨度松散的电网结构, 造成电网整体阻尼较弱, 抗扰动能力差。电网动态稳定性较低。系统低频振荡问题已经成为严重威胁新疆电网安全稳定的问题之一。

随着基于向量测量单元 (PMU) 的广域测量系统 (WAMS) 在新疆电网中全面应用, 大大提高了对新疆电网低频振荡问题的分析能力。新疆电网 WAMS 系统中的低频振荡预警及分析功能模块集成了多种经典的低频振荡分析算法。在深入研究原有算法的基础上, 针对 Prony 算法在分析时间长度较长的数据段时由于无法识别衰减快的分量而造成的误差偏大的问题, 研究并开发了新的算法——时域峰值识别法, 有效地提高了分析长数据段的准确性。另外, 还基于不同系统采集的数据, 开发了 WAMS 系统中低频振荡的分析功能, 它能将不同系统采集的数据进行验证分析, 并能相互校验分析结果, 从而保证了分析算法的有效性、可靠性、适应性和实用性。改进后的低频振荡预警及分析功能模块更有利于新疆电网低频振荡分析和实时告警, 为电网的安全稳定运行保驾护航。

1 新疆电网 WAMS 系统中低频振荡预警及分析功能模块中所采用的算法简介

低频振荡分析所采用的工具 Ringdown 是一个基于 MATLAB 的图形化用户交互界面,用于系统中基于动态记录的模型分析。Ringdown 中集成的低频振荡分析算法可以从系统的动态响应中估计模型成分(包括频率、阻尼等),并且根据系统的阻尼特性预计其稳定趋势。

目前低频振荡的分析方法有傅立叶变换、小波分析和 Prony 分析。傅立叶变换和小波分析需要进行大量的数值计算,难以满足在线辨识低频振荡对实时性的要求。不仅如此,这两种分析方法无法提取出信号的衰减系数,也就难以估计系统的阻尼变化趋势。Prony 分析方法能估算信号的频率、衰减因子、幅值和初相,利用 Prony 分析方法能直接提取出振荡信号的各种特征,为振荡模式的确定和阻尼分析提供基础,但是 Prony 分析方法对输入信号的要求高。在新疆电网 WAMS 系统中,综合考虑了各种算法的优缺点,开发了新疆电网 WAMS 系统低频振荡算法,快速给出低频振荡告警信息,使运行人员能够及时了解系统状况,并采取合适的措施。

1.1 低频振荡实时监测算法

算法采用线路的有功功率数据进行低频振荡运算,每隔 50 ms 从 PI 数据库取出一次数据进行运算,报警结果显示在工作站上。该低频振荡算法不需要太多的参数,而且大部分参数采用内定值,不需要现场进行整定,具有原理简单、计算快速、实时性强等特点,而且算法还具有广泛的通用性,可以通过调整参数来设置其动作的灵敏性。

1.2 Prony 分析方法

Prony 方法采用一组 P 个具有任意幅值、相位、频率与衰减因子的指数函数的线性组合来拟合等间距的采样数据,其离散时间的函数形式为

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^P b_i z_i^n, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

并使用 $\hat{x}(n)$ 作为 $x(n)$ 的近似。式 (1) 中, b_i 和 z_i 假定为复数,即:

$$b_i = A_i \exp(j\theta_i) \quad (2)$$

$$z_i = \exp[(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t] \quad (3)$$

式中, A_i 为幅值; θ_i 为相位(单位:弧度); α_i 为衰减因

子; f_i 表示振荡频率; Δt 代表采样间隔。为方便计算,此后令 $\Delta t=1$ 。

构造代价函数

$$\epsilon = \sum_{n=0}^{N-1} |x(n) - \hat{x}(n)|^2 \quad (4)$$

若使误差平方和为最小,则可求出参数四元组 ($A_i, \theta_i, \pi_i, f_i$)。通过参数四元组,可以推导得出各模式对应的其他参数,如周期、相对能量等。

由于 Prony 分析对输入信号要求高及对噪声敏感等特点,为确保分析结果的正确和计算精度在应用中一般需要满足以下几点要求。

1) Prony 分析要用等间隔的采样数据,由于 PI 数据库中的数据是采用压缩后存入的,一般数据间隔都不相同,因此从 PI 数据库取数时一定要取拟合后的等间隔数据,不要取原始数据。

2) 信号的选择:选择电压幅值、有功功率、频率、频率变换率,尽量不要选取一些变化不规则或谐波含量较大的信号。

3) 非线性的影响:由于 Prony 是用一组指数函数的线性组合来拟合采样数据,因此要分析的数据不要包含非线性部分,包括电压消顶、有功功率超过稳定极限的情况等。

4) 至少要选择 2 个完整周期的数据长度进行分析,一般要求数据长度在 10~20 s 之间。

5) 噪声对 Prony 分析的结果影响很大,当噪声较大时请适当减少要分析数据的长度以提高信噪比,并使用平滑滤波功能。

6) 由于故障时刻包含了大量的谐波成分,因此分析的数据要选择故障前或故障后的数据进行分析,不要包含故障时刻。

7) 主导模式对振荡的影响最大,请使用相对能量方式来判别主导模式。

1.3 时域峰值识别法

由于 Prony 分析至少要选择 2 个完整周期的数据长度,用等间隔的采样数据进行分析,故存在一定的局限性,因此寻找采用基于对单一频率成分的脉冲响应而采用的模态参数辨识方法——改进时域峰值法,对系统动态记录进行截取,通过求取最大正峰值序列 $X(n), n=1, 2, \dots, S$ 可以在保证计算精度的前提下实现对长数据段的分析,并且可以根据式 (5) 求取系统当前阻尼。

$$\zeta = \frac{\ln \frac{X(1)}{X(S)}}{2\pi(S-1) \sqrt{1 + \left[\frac{1}{2\pi(S-1)} \ln \frac{X(1)}{X(S)} \right]^2}} \quad (5)$$

式中, S为最大正峰值序列的长度。

改进时域峰值识别法计算精度高,能高精度地识别频率、阻尼比、幅值,有效地克服了 Prony算法对输入信号要求苛刻的缺陷。该算法是针对 WAMS低频振荡预警及分析功能模块在实际应用中的不足新开发的分析方法,实现了对长数据段的分析,并且可以对系统的阻尼趋势进行分析。克服常规低频振荡算法的数据严格要求。

将上述低频振荡分析方法取长补短,与实际系统有机的结合起来,将更有利于工程实践应用,更方便有效地对低频振荡进行分析。该算法既能有效地利用严格推导的 Prony分析方法,分析等间隔的采样数据(选择 2 个完整周期的数据长度,同时数据应具备一定的信噪比数值,不满足则不能进行分析),又能有效地克服上述分析条件的限制进行分析。

2 实例分析

实时录波数据是一个长过程数据,如果直接进行 Prony分析,则出现需要截取波形,同时受信噪比的限制,信噪比太小也不能分析,波形截取不好也会得到不同的结果,容易得出片面阶段。通过改进和增加长过程数据分析方法,阻尼分析,得出系统此时状态的总体趋势、总体阻尼特性、总体评价。对于长数据分析之后,进而进行分解细化分析,如果长数据分析结论明确的情况下,则可以选择进入细化分析和不进入细化分析过程,但是对于长数据分析结论不明确,则必须进行细化分析,同时也可以简单判断出系统分出几个阶段,这样大大提高了分析精度和分析效率,对于单一变化的长过程数据可以明确结论,大大提高了动态实时监测判断的效率,缩短了判断时间,具有很强的实用性和实效性。对于多变化数据,则达到细化分析和初步预测的结果。同时此系统也可以选择其他数据格式的波形,如区域稳控系统录波数据、离线电力系统所需分析数据(包括 BPAPSASP 数据),实用性很强。下边的算例可以更直观地说明。

2.1 WAMS系统数据分析

2007 年 8 月 10 日 13 时 21 分, WAMS 系统监测

到阿克苏变兹苏线有功功率发生波动,并发出告警。系统采集到的线路有功功率曲线及发出的告警信息提示如图 1 所示。

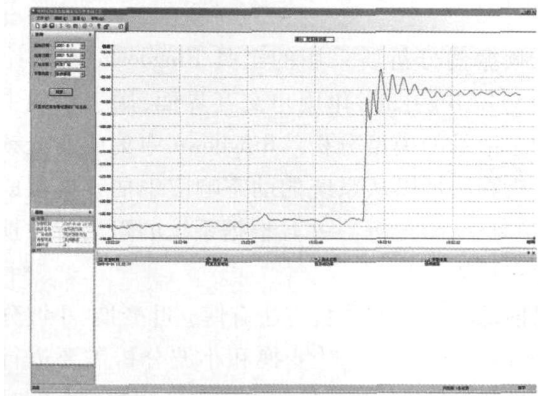


图 1 功率波动告警信息

图 1 中数据属于长过程,如果直接进行 Prony 分析,则出现需要截取波形,同时由于信噪比太小而不能分析,波形截取不好会得到不同的结果,因此先进行时域峰值识别法分析,通过峰值分析,得出阻尼特性,得出系统此时状态的总体衰减趋势。

长数据段阻尼特性分析如图 2 所示。

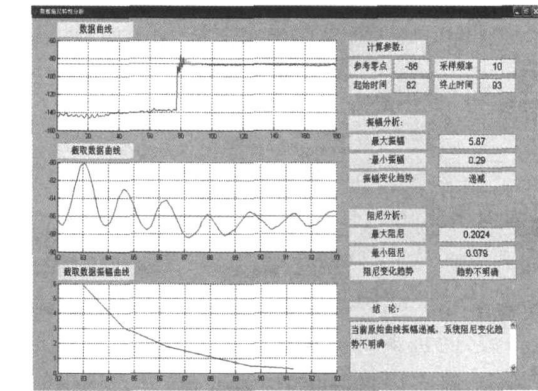


图 2 长数据段阻尼特性分析

由于得出的结论是变化复杂,需进行更进一步的细致分析。这时进入细致分析阶段:振荡阶段划分为起振阶段和平息阶段。

起振阶段分析结论如表 1 所示。

平息阶段分析结论如表 2 所示。

2.2 WAMS系统中低频振荡预警及分析系统功能离线对比分析

利用新疆电网区域稳定控制系统采集的录波数据对 2.1 中的实例进行分析。稳控系统长数据段阻尼特性分析如图 3 所示。

振荡阶段划分为起振极端和平息阶段,起振阶段分析结论如表 3 所示。

表 1 起振阶段分析结论 (WAMS)

编号	振幅	频率 /Hz	衰减因子	相位 /度
1	5.024 78	1.041 04	-0.018 12	-16.224 10
2	6.654 83	0.000 00	—	180.000 00
3	0.000 28	0.000 00	—	0.000 00
4	3.041 15	2.053 29	0.130 78	-48.321 20
5	0.168 69	2.562 32	0.021 70	164.174 80
信噪比	57.390 986 dB			
是否产生低频振荡	是			
主导振荡	主导振荡是振幅为 5.024 778, 频率为 1.041 040 的振荡模式			
振荡类型	局部振荡			
起振原因	系统大扰动致使系统的特征根发生变化, 且产生附加的负阻尼, 抵消了系统中固有的正阻尼, 导致增幅振荡			

表 2 平息阶段分析结论 (WAMS)

编号	振幅	频率 /Hz	衰减因子	相位 /度
1	2.392 19	0.000 0	—	180.000 00
2	4.099 73	0.581 1	0.032 415	57.063 62
3	0.000 01	0.000 0	—	180.000 00
4	0.256 76	1.211 7	0.055 114	46.430 70
5	0.025 95	1.981 4	-0.034 755	136.051 00
信噪比	69.560 619 dB			
是否产生低频振荡	否			
主导振荡	主导振荡是振幅为 4.099 729, 频率为 0.581 133 的振荡模式			
振荡类型	全局振荡			
平息原因	系统阻尼恢复, 致使振荡衰减			

表 3 起振阶段分析结论 (稳控)

编号	振幅	频率 /Hz	衰减因子	相位 /度
1	4.859 3	0.204 383×5	-0.026 395	-33.416 80
2	0.797 5	0.000 000×5	—	0.000 00
3	4.621 6	0.475 208×5	0.140 936	-168.398 00
4	4.118 1	0.000 000×5	—	180.000 00
5	3.688 7	0.665 034×5	0.095 433	-119.180 00
信噪比	33.394 099 dB			
是否产生低频振荡	是			
主导振荡	主导振荡是振幅为 4.859 253 (WAMS系统数据计算结论为 5.024778), 频率为 1.021 915 (WAMS系统数据计算结论为 1.041 040) 的振荡模式			
振荡类型	局部振荡			
起振原因	系统大扰动致使系统的特征根发生变化, 且产生附加的负阻尼, 抵消了系统中固有的正阻尼, 导致增幅振荡			

注: 由于南部稳控本条数据的采样频率为分析软件默认采样频率的 5 倍, 所以分析结论中各模态振荡频率乘 5。

表 4 平息阶段分析结论 (稳控)

编号	振幅	频率 /Hz	衰减因子	相位 /度
1	11.395 0	0.119 2×5	0.156 95	-73.245 1
2	4.533 9	0.000 0×5	—	180.000 0
3	1.231 6	0.218 4×5	-0.009 98	-39.114 0
4	0.087 6	0.397 2×5	-0.018 40	-113.020 0
5	0.219 0	1.009 6×5	0.029 90	33.732 8
信噪比	40.909 172 dB			
是否产生低频振荡	否			
主导振荡	主导振荡是振幅为 11.395 140 (WAMS系统数据计算结论为 4.099 729), 频率为 0.595 81 (WAMS系统数据计算结论为 0.581 133) 的振荡模式			
振荡类型	全局振荡			
平息原因	系统阻尼恢复, 致使振荡衰减			

注: 由于南部稳控本条数据的采样频率为分析软件默认采样频率的 5 倍, 所以分析结论中各模态振荡频率乘 5。由于截取数据时间段不完全一致, 所以振幅区别大。

图 3 长数据段阻尼特性分析 (稳控)

注: 仅获得 2 个正向最大振幅值时, 无法获得阻尼特征。

平息阶段分析结论如表 4 所示。

2.3 电力系统综合程序计算数据离线对比分析

理论计算模拟故障数据结果, 对同一故障长数据段阻尼特性分析如图 4 所示。振荡阶段划分为起振极端和平息阶段。

起振阶段分析结论如表 5 所示。

图 4 长数据段阻尼特性分析 (模拟故障)

表 5 起振阶段分析结论 (模拟故障)

编号	振幅	频率 /Hz	衰减因子	相位 /度
1	3. 243 938	0. 000 000	—	180. 000 0
2	5. 345 320	1. 107 596	—0. 192 107	—140. 551 0
3	18. 048 075	2. 006 844	0. 327 898	68. 634 5
4	0. 765 442	2. 330 966	—0. 138 104	—8. 216 3
信噪比	56. 234 284 dB			
是否产生低频振荡	是			
主导振荡	主导振荡是振幅为 5. 345 320 (WAMS系统数据计算结论为 5. 024 778), 频率为 1. 107 596 (WAMS系统数据计算结论为 1. 041 040)的振荡模式			
振荡类型	局部振荡			
起振原因	系统大扰动致使系统的特征根发生变化, 且产生附加的负阻尼, 抵消了系统中固有的正阻尼, 导致增幅振荡			

平息阶段分析结论如表 6 所示。

表 6 平息阶段分析结论 (模拟故障)

编号	振幅	频率 /Hz	衰减因子	相位 /度
1	47. 911 962	0. 000 000	—	180. 000 0
2	48. 351 607	1. 563 060	0. 110 243	31. 126 0
3	7. 979 992	2. 357 323	0. 233 796	—57. 971 0
4	2. 295 392	0. 000 000	—	0. 000 0
信噪比	70. 721 408 dB			
是否产生低频振荡	是			
主导振荡	主导振荡是振幅为 48. 351 607 (WAMS系统数据计算结论为 4. 099 729), 频率为 1. 563 060 (WAMS系统数据计算结论为 0. 581 133)的振荡模式			
振荡类型	全局振荡			
平息原因	系统阻尼恢复, 致使振荡衰减			

注: 由试验仿真数据得到的主导振荡与从实采数据中得到的主导振荡相差较大。

比较三种数据的主导振荡识别结果可以得到以下结论: 三种数据波形起振速度快, 平息速度慢, WAMS系统采集数据和南部稳控采集数据的分析结果几乎相同。实采数据识别的主导振荡和试验仿真识别的主导振荡之间的误差是由于时间段取的不同而造成。

3 结 论

在深入研究新疆电网低频振荡预警和分析功能模块的基础上, 针对原系统在实际应用中的不足, 引

入时域峰值识别法, 打破了对数据的限制, 提高了分析长数据段的能力。并且建立了长短数据层分析方法, 将数据分长短段、分两级进行分析, 以及不同系统的数据转化分析方法, 将不同系统采集到的数据进行对比分析相互验证。改进后的系统模块分析能力加强, 可信度提高, 对离线数据、在线数据均可分析, 也可同时对比分析, 增加了系统的灵活性, 离、在线也相互结合, 具有现实意义和工程使用价值, 在实际运行中已取得了令人满意的效果。

参考文献

[1] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[2] 王慧铮, 许勇. 基于广域测量系统的低频振荡监测分析方法研究与应用 [J]. 电网技术, 2008, 32(22): 56—61.

[3] 鞠平, 谢欢, 孟远景, 等. 基于广域测量信息在线辨识低频振荡 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 56—60.

[4] 肖晋宇, 谢小荣, 胡志祥, 等. 电力系统低频振荡在线辨识的改进 PRONY 算法 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2004, 44(7): 883—887.

[5] 王铁强, 贺仁睦, 徐东杰, 等. Prony 算法分析低频振荡的有效性研究 [J]. 中国电力, 2001, 34(11): 38—41.

[6] 董航, 刘涤尘. 基于 Prony 算法的电力系统低频振荡分析 [J]. 高电压技术. 2006, 32(6): 97—100.

[7] 张贤达. 现代信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[8] 谢小荣, 肖晋宇, 童陆园, 等. 采用广域测量系统信号的互联电网区间阻尼控制 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 37—40.

作者简介:

张彦军 (1981—)男, 研究生, 主要研究方向为电力系统调度自动化及高层应用。

常喜强 (1976—)男, 研究生, 主要研究方向为电力系统分析及控制。

刘 冉 (1975—)男, 工程师, 主要研究方向为电力系统调度自动化网络技术及控制。

(收稿日期: 2009—04—20)

欢迎订阅《四川电力技术》

电气化铁路谐波在公用电网的渗透研究

周小涵

(四川电力职业技术学院电气一系, 四川 温江 611130)

摘 要:详细地分析了电气化铁路(电铁)产生的谐波在电网中的渗透问题,通过构建公共连接(PCC)的系统和支路的等效谐波模型,提出使用支路系数 k_1 和渗透系数 k_2 来分析电铁谐波在PCC的传输特性。分析结果表明并联支路对PCC谐波电压具有削弱作用而且随着谐波次数的升高这种削弱将会加强。最后通过Matlab对典型系统进行建模,其仿真结果验证了使用这两个系数对电网中谐波渗透进行分析的合理性和准确性。

关键词:谐波;公共连接(PCC)点;支路系数;渗透系数

Abstract: The permeation mechanism of harmonics that generated by electrified railway system (ETS) in power grid is analyzed in detail. The branch parameter k_1 and permeation parameter k_2 are used to describe the effect of ETS on PCC through the harmonic model of PCC. The study of result shows that the parallel circuits will lower the effect of harmonic voltage of PCC and the ability will be enhanced when the harmonic order is higher. Software simulation result of the system is presented that the two parameters can analyze the harmonic penetration accurately.

Key words: harmonics; PCC; branch parameter; permeation parameter

中图分类号: TM734 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0041-03

随着中国电力市场的建立和电能需求的大量增加,电能质量日益显示出其重要性,电力部门对电能质量的关注也日益增强^[1]。另一方面,随着用电设备的更新,用户对供电系统的电能质量提出了更高的要求。自20世纪80年代初开始,中国电力专家展开大规模的电力谐波研究,相关谐波国家标准GB/T 14549-93《电能质量公用电网谐波》自1994年3月起开始实施^[2]。人们对谐波的危害性认识得越来越清楚,目前谐波渗透已经成为世界各国电力部门与用电部门共同关注的一个重要问题。因为它直接决定电力系统中各种有关谐波限制和管理法规的确定,而这些法规又直接影响着用电部门的发展。

电铁在运输能力、运输速度、运输质量、节能降耗等方面显示出很大的优越性,电力牵引已得到广泛的推广和应用,目前国家正在大力发展高速铁路。然而电铁将产生大量的谐波,并通过牵引变电所PCC处渗透到公用电网,给电网和其他用户带来了巨大的影响^[3]。传统仪器只能测量用户点的谐波,电铁产生的谐波渗透到用户处的大小目前还没有具体的量化分析,对此做了比较详细的理论分析和仿真。

1 系统结构

电铁是从高压系统直接取电,供电电压等级一般

为110 kV或者220 kV,而民用电力负荷一般通过中间传输系统与高压相连,系统结构如图1所示。

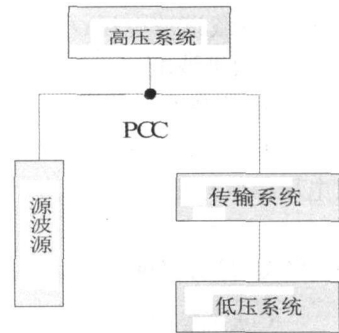


图 1 系统结构框图

一般连接牵引变电所的PCC处往往与其他的用电负荷并联。为了清楚地说明问题,这里将介绍不带支路的PCC和带有支路的PCC,进而从中说明电气化铁路产生的谐波在PCC处的传输特性。

1.1 不带支路时PCC处谐波电压

当牵引变电所PCC处没有其他支路时的电压这里称为PCC空载谐波电压,其等效电路如图2所示。

从等效图中可以看出,空载谐波电压 U_0^h 为

$$U_0^h = I_h^s \times j \cdot X_{oh} \tag{1}$$

式中, U_0^h 为PCC空载谐波电压; I_h^s 为注入系统的谐波电流; X_{oh} 为系统等效谐波阻抗; h 为谐波次数。从式(1)可见,不带支路时谐波渗透到PCC处的

电压与系统的等效谐波阻抗成正比,即系统的容量越小,牵引变电所 PCC 处谐波电压越高。

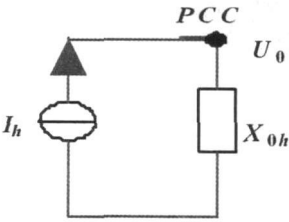


图 2 不带支路时系统等效电路图

1.2 带支路的 PCC 处谐波电压

当牵引变电所 PCC 处带有其他支路时的电压,文中称为 PCC 有载谐波电压,其等效电路如图 3 所示。

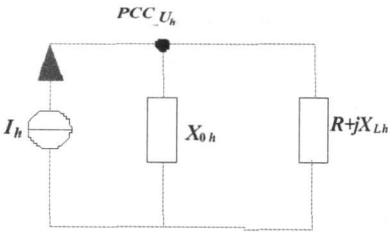


图 3 带支路的系统等效电路图

从等效图中可以看出,有载谐波电压 U_h^g 为:

$$U_h^g = I_h^g \times j \cdot X = I_h^g \times \frac{J \cdot X_{0h} \times (R + j \cdot X_{Lh})}{R + j \cdot (X_{0h} + X_{Lh})} \quad (2)$$

式中, U_h^g 为 PCC 有载谐波电压; R 为支路等效谐波电阻; X_{Lh} 为支路等效谐波电抗。

为了研究支路对 PCC 处谐波电压的影响,提出了支路系数这个概念,其定义为一条支路加入前后 PCC 处谐波电压幅值之比,即

$$k_l = |U_h^g / U_0^g|$$

从式 (1) 和式 (2) 可以推导出下式:

$$k_l = \frac{\sqrt{R^2 + X_{Lh}^2}}{\sqrt{R^2 + (X_{0h} + X_{Lh})^2}} = \frac{\sqrt{1 + b^2}}{\sqrt{1 + b^2(1 + 1/a)^2}} \quad (3)$$

式中, a 为支路谐波电抗与系统等效谐波阻抗之比,即 $a = X / X_{0h}$; b 为支路谐波电抗与支路电阻之比,即 $b = X / R$ 。

当 PCC 带有旁路时, PCC 处的谐波电压有所下降,即并联支路对 PCC 处的谐波电压有削弱作用,这种削弱程度可以通过支路系数来衡量,图 4 为支路系数随 a 、 b 的变化趋势的仿真结果。

从图 4 中可以看出,支路系数与 a 成正比,与 b 成反比。也就是说,系统的容量越大,支路的等效电阻越大,支路系数越大,即对 PCC 点的影响越小。随着谐波次数的升高,支路系数越小,对 PCC 处的影响越大。

1.3 渗透系数

当谐波从高压系统向低压系统渗透时,其等效电路图如图 5 所示。

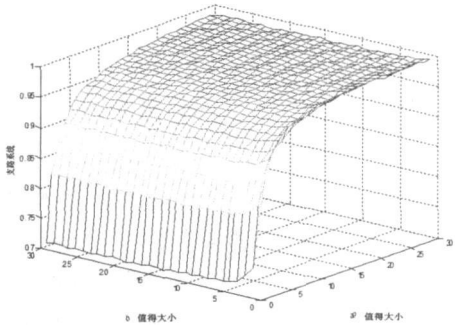


图 4 支路系数 k_l 与 a 、 b 的函数关系图

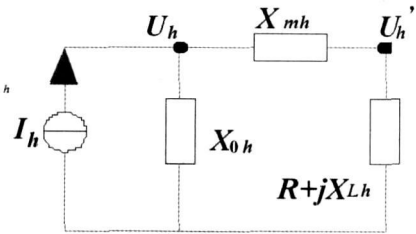


图 5 系统等效电路图

其中, U_h^g 为谐波源注入处的谐波电压, U_h^g 为下一级电压进线处的谐波电压,为了对谐波在两级电压之间进行渗透的量化,提出了谐波电压渗透系数 k_e ,从图 5 可以推导出 k_e 的计算表达式

$$k_e = \frac{\sqrt{R_L^2 + X_{Lh}^2}}{\sqrt{R_L^2 + (X_{mh} + X_{Lh})^2}} = \frac{\sqrt{1 + d^2}}{\sqrt{1 + d^2(1 + c)^2}} \quad (4)$$

式中, X_{mh} 为系统中间传输系统的等效谐波电抗; c 为传输系统的等效谐波电抗与负荷等效谐波电抗的比值,即 $c = X_{mh} / X_{Lh}$; d 为负荷等效谐波电抗与谐波电阻的比值,即 $d = X_{Lh} / R_L$ 。

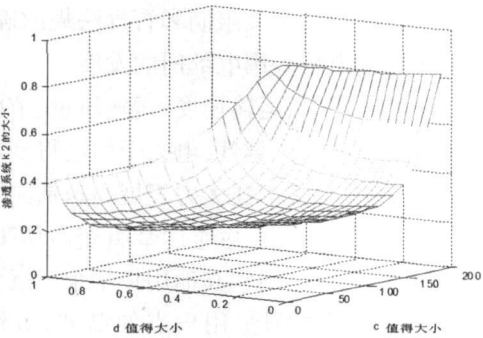


图 6 渗透系数 k_e 与 c 、 d 的函数关系图

从图 6 可以看出,支路系数与 c 和 d 都成反比。考虑到系统负荷的谐波阻抗是并联等效的,所以随着谐波次数的增加, c 值逐渐增大, d 值逐渐减小。从另一个角度来说,负荷的有功功率越大,无功功率越小,

表 1 算例计算结果

谐波次数	注入谐波电流 (I_h)	110 kV 侧			35 kV 侧	
		不带支路 PCC 谐波电压 (U_0)	带支路 PCC 谐波电压 (U_h)	支路系数 (k_i)	谐波电压 (U'_h)	渗透系数 (k_e)
3	0.023 6	0.010 6	0.009 0	0.847 5	0.008 9	0.985 5
5	0.021 2	0.015 9	0.013 4	0.844 0	0.013 3	0.991 2
7	0.011 5	0.012 1	0.010 2	0.842 9	0.010 1	0.993 7
9	0.005 3	0.007 2	0.006 0	0.842 5	0.006 0	0.995 1
11	0.003 6	0.005 9	0.005 0	0.842 3	0.005 0	0.996 0
13	0.002 9	0.005 7	0.004 8	0.842 2	0.004 7	0.996 6
15	0.002 5	0.005 6	0.004 7	0.842 1	0.004 7	0.997 0
17	0.002 3	0.005 9	0.004 9	0.842 0	0.004 9	0.997 4
19	0.002 4	0.006 8	0.005 8	0.842 0	0.005 7	0.997 7

系统的渗透系数越小,对谐波电压传输的阻碍越大。

2 算例分析

文中以一个典型的公用供电网络接线图为例,进行详细的计算分析。电铁接于 110 kV 的高压系统,工业负荷经过一条长为 60 km 的架空线路接于 110 kV 的电压母线上,具体参数如图 7 所示。

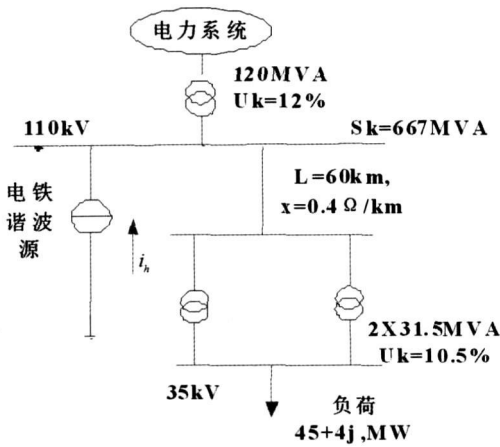


图 7 典型公用供电网络接线图

通过等效计算,可以算出基波下的参数为 $X_{01}=0.15$, $X_{m1}=X_{T1}+X_{L1}=0.167+0.198=0.365$, $R_{L1}+j \cdot X_{L1}=0.225+2.531j$ 根据以上公式可以计算出各次谐波下的支路系数和渗透系数,其值如表 1 所示。

从表 1 可以看出,增加一条并联支路对 PCC 处的谐波电压具有削弱作用。这种削弱作用主要由支路系数和渗透系数决定,随着谐波次数的升高,支路系数逐渐减少,渗透系数逐渐增加。当电路带有并联支路后,谐波电压总含有率逐渐衰减:从 2.73 变为 2.30 到 35 kV 侧变为 2.28。

3 结 论

从理论上详细说明了电铁产生的谐波对 PCC 处的谐波影响,并进一步分析了并联支路对 PCC 处谐波电压的削弱作用,这种削弱作用由支路系数和渗透系数综合决定。谐波次数越高,支路系数降低,渗透系数升高,但总体削弱作用还是加强的。并为研究电气化铁路对 PCC 点处的谐波贡献做了铺垫,对国标的修改和制定具有一定的参考意义。

参考文献

[1] 王思源. 谐波对电能计量的影响 [D]. 山东大学硕士论文, 2006. 4.

[2] 解绍锋, 李群湛, 赵丽平. 谐波国家标准有关问题的探讨 [J]. 电网技术, 2006, (13): 94—98.

[3] 解绍锋, 李群湛, 赵丽平. 电气化铁道牵引负载谐波分布特征与概率模型研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (16): 79—83.

[4] 张章, 段晓波, 梁志瑞, 等. 电气化铁路供电方案谐波评估方法 [J]. 河北电力技术, 2007, (4): 9—12.

[5] 赵乾钊, 李群湛. 世界各国电气化铁路谐波限值标准述评 [J]. 电气化铁道, 1999, (4): 5—7.

[6] 文康珍, 黎文安. 高压电力系统谐波渗透及谐波限制值的确定 [J]. 武汉理工大学学报, 2002, (4): 131—134.

[7] Pilegni D J, Chandra N H, Emanuel A E. Prediction of Harmonic Vohanes in Dislrihution Systems [J]. IEEE Trans PAS— 100, 1981(3): 1307—1313.

作者简介:

周小涵, 女, 1972. 11, 电气工程师, 主要研究方向为电力系统稳定与电能质量。

(收稿日期: 2009—02—29)

三角波移相电流控制法及其在 STATCOM 中的应用

王心琦, 张代润, 杨柳柳

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:将载波移相正弦脉宽调制 (CPS-SPWM) 电压控制法中的载波移相方法应用到三角波比较电流控制法中形成一种新的控制方法——三角波移相电流控制法。通过简化模型的 simulink 仿真结果详细介绍了三角波移相电流控制法的基本原理。通过 simulink 仿真, 论述了三角波移相电流控制法应用于 STATCOM 的可行性及优越性。对比了采用 CPS-SPWM 电压控制法和采用三角波移相电流控制法的 STATCOM 在输出电流和暂态响应上的不同。

关键词: STATCOM; CPS-SPWM 电压控制; 三角波移相电流控制

Abstract: The feasibility of CPS-SPWM voltage control applied to the carrier phase-shift current control method is discussed. Through the simulink simulation results of the simplified model, the basic principles of carrier phase-shift current control are introduced in detail. Through simulink simulation, the feasibility and superiority of the carrier phase-shift current control are discussed when being applied to STATCOM. The differences in output current and transient response are compared when CPS-SPWM voltage controlling STATCOM and when the carrier phase-shift current controlling STATCOM.

Key words: STATCOM; CPS-SPWM voltage control; carrier phase-shift current control

中图分类号: TM861 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0044-05

静止同步补偿器 (STATCOM) 与传统的电容器组、电抗器组、调相机等传统无功补偿装置及静止无功补偿装置 (SVC) 均不同, 而是按调相机原理, 由新型大功率固体电子元件构成的可调节逆变器、直流电容器组和输出变压器等组成的无转动结构的静止无功补偿装置。静止同步补偿器 (STATCOM) 较传统的无功发生装置具有响应速度快、运行范围宽、吸收无功连续、谐波电流小、损耗低等明显的优点^[1], 故其在电力系统中的应用得到广泛的关注。

目前 STATCOM 的控制策略主要分为电流间接控制和电流直接控制。

间接电流控制方法通过控制逆变器所产生的交流电压基波相位与系统侧电压相位的相位差 δ 来控制 STATCOM 发出的无功功率和吸收的有功功率。稳态时 STATCOM 发出的无功功率和吸收的有功功率分别如式 (1) 和式 (2)^[2] 所示, U_s 为相电压有效值。由式 (2) 可知当 δ 为正时 STATCOM 发出无功功率, δ 为负时吸收无功功率。由式 (1) 可知无论 δ 为正还是为负 STATCOM 都吸收有功功率。

$$P = -\frac{3U_s^2}{R} \sin^2 \delta \quad (1)$$

$$Q = -\frac{3U_s^2}{2R} \sin^2 \delta \quad (2)$$

在大容量的 STATCOM 中, 电流间接控制应用得较多, 因为受主电路结构和开关频率的制约, 在大容量的情况下直接电流控制法无法对电流波形进行精确跟踪控制。针对电流间接控制, 目前已研究出了多种主电路结构。比如多重叠加结构和多电平结构, 其中多电平结构又分为二极管钳位式多电平结构、飞跨电容钳位式多电平结构及级联式多电平结构^[3]。其中主电路结构采用级联式多电平结构, 器件级控制采用载波移相正弦脉宽调制的 STATCOM 目前正受到广泛的关注, 简称 CPS-SPWM 级联多电平 STATCOM。CPS-SPWM 技术的基本思想是 (以一相为例): 在变流器单元数为 N 的级联型逆变器中, 各逆变器单元采用共同的调制波信号 U_s , 其频率为 ω_s 逆变器单元的三角载波频率为 $k\omega_s$ 将各三角载波的相位互相错开一定的角度, 那么级联逆变器的输出电压就能得到多电平的输出波形。CPS-SPWM 技术是一种适用于大功率电力开关变流器的优秀调制策略, 能够在较低的器件开关频率下实现较高等效开关频率的效果, 不但使 SPWM 技术应用于特大功率场合成为可能, 而且在提高装置容量的同时, 有效地减小输出谐波, 提高了整个装置的信号传输带宽。除此之外, 该技术还具备输入输出线性度好、控制性能优越等一系列优点^[4]。

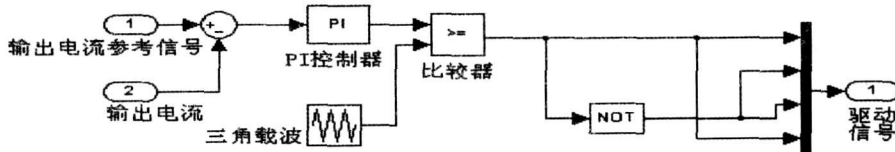


图 1 三角波比较电流控制法驱动电路

直接电流控制具有控制精度高, 暂态响应迅速的优点。但是其需要较高的器件开关频率来减小输出电流的误差范围, 开关频率越高, 输出电流误差越小, 谐波越少。目前在三角波比较电流控制法和电流滞环控制法中至少需要 50 kHz 的频率才能把 THD 限制在 5% 以下。GTO 和 IGCT 达不到这么高的开关频率。目前 IGBT 的开关频率可以达到 50 kHz。但对于大功率逆变器场合, 大功率开关器件的功率处理能力和开关频率之间往往存在着矛盾, 通常功率越大开关频率越低。因此在大容量的 STATCOM 中, IGBT 的开关频率也不可能达到 50 kHz。目前常用的单个 IGBT 的耐压值只有 600~1 500 V, 连续集电极电流 (I_c) 在 20~320 A。 I_c 越大的 IGBT 其耐压值越低。无论采用三相桥的主电路结构还是三单相桥的主电路结构, 采用直接电流控制的 STATCOM 的容量受开关器件的制约都无法达到很大的容量。综上所述, 开关频率和输出容量是限制直接电流控制的 STATCOM 发展和应用的两大瓶颈。

下面将提出一种适用于大容量 STATCOM 的直接电流控制方法, 该方法能有效减少输出电流谐波, 从而使该方法可以使用在低开关频率下。并使用 simulink 搭建仿真模型, 解释其工作原理。验证该控制方法应用于 STATCOM 的可行性, 并与 CPS-SPWM 级联式 STATCOM 进行性能对比。

1 三角波移相电流控制法

CPS-SPWM 级联多电平 STATCOM 的显著优点是等效开关频率高和输出容量大。那么把 CPS-SPWM 级联多电平 STATCOM 的主电路结构和 CPS-SPWM 控制方法中的载波移相法应用到直接电流控制中, 是否也会带来很多好处呢? 目前直接电流控制的方法有很多种, 常用的有滞环比较方式、三角波比较方式、次振荡方式、输出电流预测方式、同步采样方式等。很明显, 只有三角波比较方式中有载波这一概念。CPS-SPWM 级联多电平 STATCOM 是在每一相

把同一个系统电压作为调制波与 N 个相位依次相差 ($180^\circ/N$) 的载波比较, 结果作为 N 个串联的逆变桥的驱动脉冲^[3], 其输出电压基波就为与调制波同频率的正弦波。在三角波比较电流控制方式中, 当每相有 N 个单独的 H 逆变桥的时候, 用参考电流值与输出电流值比较, 比较的结果再去和 N 个相位依次错开一定角度的载波相比较, 结果分别用来驱动 N 个逆变桥, 使输出电流向参考电流靠近。各载波依次错开的角度为 $360^\circ/N$, 这种电流跟踪控制法称为三角波移相电流控制法。

2 用简化模型分析三角波移相电流控制法的工作过程

三角波移相电流控制法的主电路为串联了 4 个 H 逆变桥的单相逆变器, 依次命名为逆变桥 1、2、3、4。每个逆变桥直流侧为 50 V 直流电源。传统三角波比较电流控制法的主电路为 1 个 H 逆变桥, 逆变桥直流侧为 100 V 直流电源。三角波移相电流控制法的主电路中每个逆变桥采用一个如图 1 所示的驱动电路来驱动, 只是每个 H 逆变桥的驱动电路中的三角载波依次相差 90° ($360^\circ/4$)。两种控制方法均设定输出电流参考信号为幅值 50 A 的直流电流。

图 2 为三角波移相电流控制法和传统三角波比较电流控制法的仿真结果, 图 2(a)、(d) 为 0.006~0.006 5 s 这段时间内两种控制方式的输出电流和输出电压对比图, 图 2(e)、(f) 为两种控制方式的输出电流在 0~0.03 s 内的概览图, 0.03 s 后电流一直保持稳定。图 2(a) 为三角波移相电流控制逆变器的输出电流, 图 2(b) 为传统三角波比较电流控制逆变器的输出电流, 图 2(c) 为三角波移相电流控制逆变器的输出电压, 图 2(d) 为传统三角波比较电流控制逆变器的输出电压。从图 2(a)、(b) 的对比可以发现, 三角波移相电流控制法的输出电流相对于传统三角波电流控制法的输出电流有了明显的不同, 其纹波减小得非常明显。

图 2(g) 为 6.3×10^{-3} s 至 6.45×10^{-3} s 内三角

波移相电流控制法逆变器工作过程。这里详细介绍
逆变桥 1 和逆变桥 3 的工作过程, 逆变桥 2 和逆变桥
4 的工作过程类似。图 2(m) 为三角波移相电流控制
逆变器的输出电压, 图 2(k) 为三角波移相电流控制
逆变器的输出电流。输出电流纹波峰峰值在 0.1 A
左右, 较之于传统三角波比较电流控制逆变器输出
电流纹波峰峰值 2 A 减小了很多。下面就来深入分析
这种控制方法的原理。图 2(g) 为逆变桥 1 输出电流
与参考电流的差值 (曲线 1) 与三角载波 (曲线 2) 的
比较图, 图 2(f) 为逆变桥 3 输出电流与参考电流的
差值 (曲线 1) 与三角载波 (曲线 2) 的比较图, 图 2(i)
为逆变桥 1 左桥臂上开关管的开关脉冲, 图 2(j) 为
逆变桥 3 左桥臂上开关管的开关脉冲。从图中可以
看出, 在 6.4×10^{-3} s 时, 输出电流大于参考电流, 输
出电流与参考电流差值为负。因为逆变桥 1 的载波
与逆变桥 3 的载波相差 180° , 所以逆变桥 1 的载波
从下往上与差值相交, 而逆变桥 3 的载波从上往下
与差值相交, 此时必然是逆变桥 1 的载波先与差值
相交, 相交后因为载波大于差值, 逆变桥 1 输出一个
负向的电压, 且此时逆变桥 3 的前一个负向电压还
未结束, 因此, 输出电压就为逆变桥 1 和逆变桥 3
两个负向电

压相加的电压 -100 V。在很短的一段时间以后, 逆
变桥 3 的载波从上往下与差值相交, 载波小于差值,
逆变桥 3 输出正向的电压, 使输出电压为 0, 输出电
流停止变化。直到下一个载波周期逆变桥 1 和逆变
桥 3 又产生下一个脉冲电压。一个载波周期内, 逆
变桥 1 和逆变桥 3 产生的很短的那一个负电压脉冲,
使输出电流从大于参考电流变成小于参考电流, 但
是由于脉冲很短, 输出电流不会小于参考电流太多。
在载波周期的大部分时间内, 输出电流都保持在离参
考电流很接近的一个值并且不会变化, 有效地避免
了载波频率较低情况下传统三角波比较电流控制法
中每个载波周期内输出电压只有两电平致使输出电
流偏离参考电流较多的问题。由图 2(k) 和 (m) 可
以看出, 当输出电流偏离参考电流比较多时, 输出
电压的脉冲也会变宽。逆变桥 1、3 在一个载波周
期内会产生两个负脉冲输出电压, 逆变桥 2、4 在
一个载波周期内会产生两个正脉冲输出电压, 这样
在一个载波周期内输出电压的脉动频率就变成了 2
倍载波的频率, 每个逆变桥在每个载波周期内却
只动作 1 次。

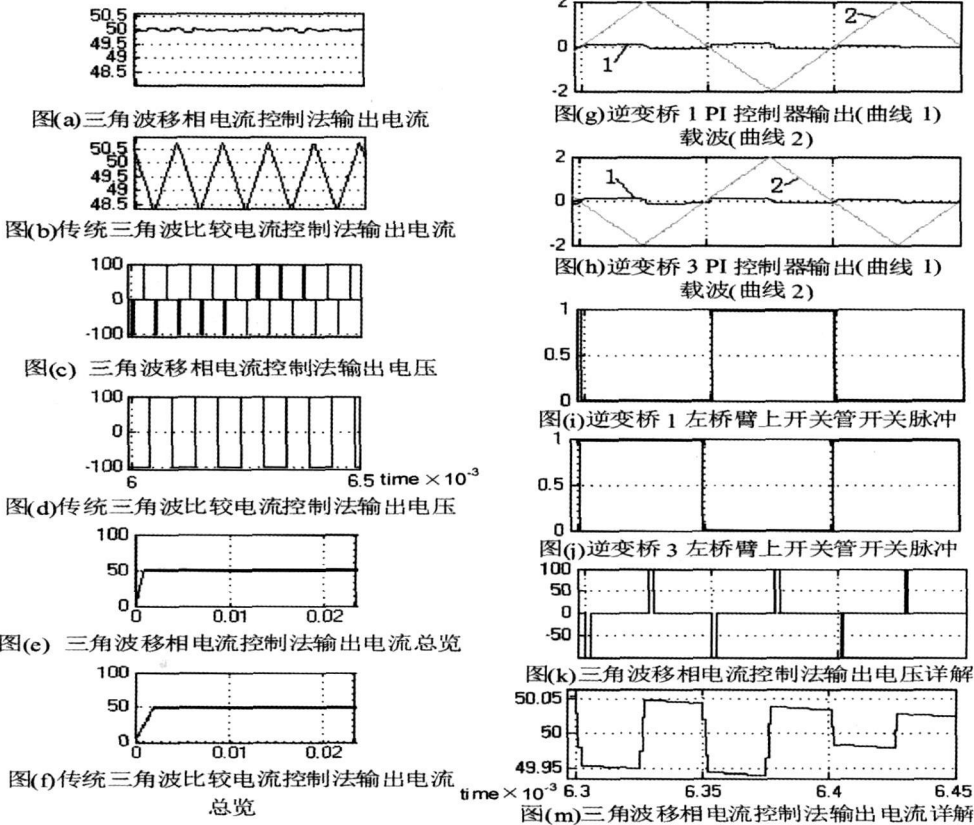


图 2 三角波移相电流控制法与传统三角波移相电流控制法输出结果比较

3 三角波移相电流控制法应用于 STATCOM

主电路采用每相 4 个 H 逆变桥,星形接线组成三相逆变器。检测负载三相电流电压,通过派克变换得到 i_d 、 i_q 、 i_0 ,把 i_q 进行派克反变换就得到参考电流。 i_q 在 0.2 s 时,从 -40 A 变成 40 A。每个逆变桥的三角载波频率都为 10 kHz,不控制直流侧电压。系统侧电压为 10 kV,STATCOM 通过 Y-Y 变压器与系统连接,变压器低压侧与系统侧变比为 1 比 7。

变压器低压侧与 STATCOM 相连,其低压侧电压有效值为 1 429 V,峰值为 2 000 V,每个 IGBT 承受的电压在 500 V 左右。当 i_d 为 40 A 时,STATCOM 输出电流峰值为 40 A,有效值为 28.3 A。输出容量为 120 kvar 左右。真实设计电路时需要考虑一定的裕度。目前, $V_{ce}=900$ V, $I_c=60$ A 的 IGBT 比较多,而且价格也很便宜,因此这种电路结构具有很大的实用性。

图 3(a)中 A 相系统侧电压和图 3(b)中 A 相输出电流始终有绝对值 90° 的相位差。0.2 s 前输出容性无功,0.2 s 之后输出感性无功。图 3(c)为 A 相电流暂态响应详图,因为是电流直接控制,其响应速度非常快,为 1 ms 左右。

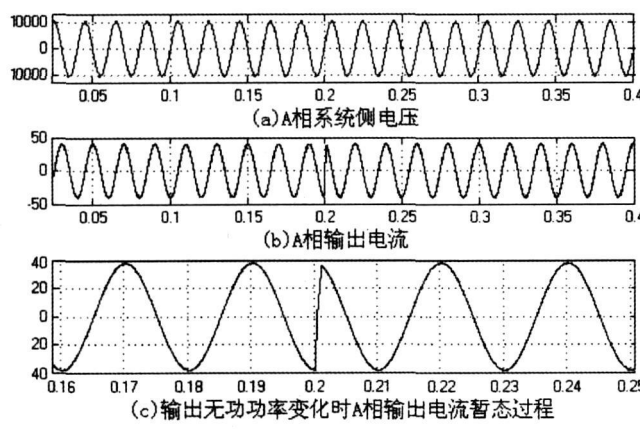


图 3 STATCOM 三相输出电流

谐波次数	谐波幅值	谐波次数	谐波幅值
399	0.05	1199	0.01
401	0.06	1201	0.01
799	0.07	1203	0
801	0.07	1599	0.01
1197	0.02	1601	0.02

图 4 为稳态时 STATCOM 的 A 相输出电流波形的傅立叶分析。傅立叶分析的范围为 0.1~0.2 s 的 5 个周期。基波未显示完全,因为基波的值超出了纵坐标的显示范围。因为载波为 10 kHz(400 次基波),因此其特征谐波在 400、800、1 200、1 600 次附近,除去 30 次以下的谐波,其他谐波主要集中在 2 倍载波频率整数倍附近的特征谐波中,这样可以很方便地设计输出滤波器。傅立叶分析图的纵坐标为谐波幅值,横坐标为谐波次数。THD=0.65%,远远低于 5%。

4 与 CPS-SPWM 级联 STATCOM 的对比

采用每相 4 个 H 逆变桥,搭建与第 3 节中相同的主电路结构的 STATCOM,采用 CPS-SPWM 控制,输出电压为 9 电平。其系统侧电压与第 3 节所讨论的电流直接控制 STATCOM 相同,载波频率也相同。在 0.5 s 时,输出无功功率从 -75 kvar 变成 60 kvar, A 相输出电流暂态响应如图 5 所示。其响应时间长达 80 ms 左右。若输出功率从 -120 kvar 变成 120 kvar 则响应时间会更长。控制方式为电压控制的 STATCOM,输出无功变化以后,输出电压的变化需要在电容缓慢放电以后才能变化,因此动态响应速度一般都较慢,且动态响应速度与电容的大小有关系。动态响应速度慢有可能导致系统失去稳定。

CPS-SPWM 控制的 9 电平 STATCOM 的输出电流经傅立叶分析其 THD 为 2.11%,虽小于 5%,但比所提出的电流控制方式输出电流的 THD 大得多。当载波频率降低或连接电抗器的电抗降低时,其输出电流 THD 会上升得比所提出的电流控制方式 STATCOM 的输出电流 THD 要快。

CPS-SPWM 控制的 9 电平级联式 STATCOM,因为采用电流间接控制,对于其主电路输出电压的研究都是在直流侧电压稳定的情况下进行的。因此,要得到理想的输出电压波形,需要直流侧电压稳定。但是

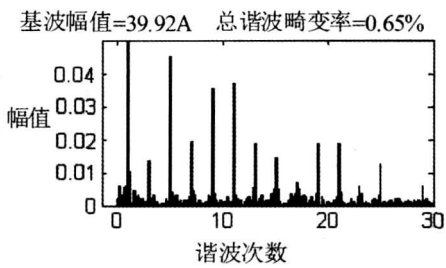


图 4 A 相稳态输出电流波形的傅立叶分析

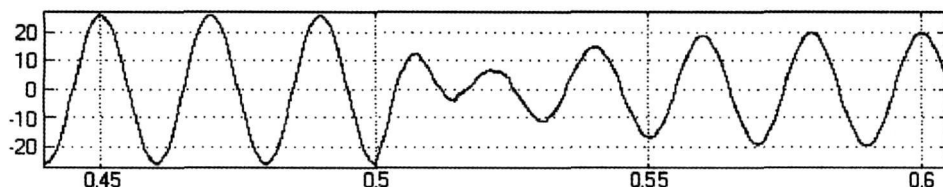


图 5 A 相输出电流暂态响应

在 STATCOM 运行的过程中,直流侧电容在不停地释放和吸收能量,因此其直流侧电压必然是一个脉动的波形。为了不至于对输出的电压波形有太大的影响,直流侧电容必须按恰当的方式选择^[5]。间接电流控制方法的 STATCOM 中,主要调节输出电压的相位与系统电压的相位差 δ 来控制 STATCOM 输出的无功功率和吸收的有功功率,调节 δ 时电容电压在暂态过程中自己达到新的稳定值,由于电容是储能元件,电压的变化需要有能量交换的过程,其动态响应较慢。也有采用同时控制 δ 和 PWM 调制比的双变量协调控制加快 STATCOM 的暂态响应速度^[6],但是会带来谐波等新的问题。在 CPS-SPWM 级联多电平 STATCOM 中,由于每个逆变桥的直流侧都有独立的电容,理想状态下稳态运行中所有逆变桥的直流侧电容电压是相同的,但是实际情况中因为每个逆变桥的开关器件的开关损耗、吸收回路的损耗及脉冲延时均有不同,会造成各个逆变桥的直流侧电容电压的不平衡^[7]。需要采取措施使每个逆变桥直流侧电容电压平衡才能使 STATCOM 输出需要的波形。而三角波移相电流控制法就不存在这些问题,从而简化了控制方法。

5 结 论

综上,采用三角波移相的电流直接控制相对于传统三角波比较电流控制法,其输出电流的改善是相当明显的。由于每相有 N 个 H 逆变桥串联,相对于传统三角波比较电流控制法的主电路,这种主电路结构使整个装置的输出容量大幅度提升了。在每相有 N 个 H 逆变桥串联的情况下,输出电压的等效波动频率为 $(N/2)f_0$, f_c 为载波频率。采用三角波移相电流控制比 CPS-SPWM 控制具有以下几个优点:①输出电流谐波畸变小;②直流侧电压波动对输出电压影响

小;③暂态响应速度快。需要注意的是,在每相串联的 H 逆变桥个数相同的情况下,其输出电压的脉动频率没有 CPS-SPWM 高,为 CPS-SPWM 法的一半。从三角波移相的电流控制法的原理可以推断出,其主电路每相必须采用偶数个 H 逆变桥串联,每两个载波相位相差 180° 的逆变桥组成一对,而 CPS-SPWM 控制法则不存在这个问题。

参考文献

- [1] 姜齐荣. 新型静止无功发生器建模及其控制的研究 [R]. 北京: 清华大学电机工程与应用电子技术系, 1997.
- [2] 罗承廉, 纪勇, 刘遵义. 静止同步补偿器 (STATCOM) 的原理与实现 [M]. 中国电力出版社, 2005.
- [3] 刘凤君. 多电平逆变技术及其应用 [M]. 机械工业出版社, 2007.
- [4] 许湘莲. 基于级联多电平逆变器的 STATCOM 及其控制策略研究 [R]. 华中科技大学, 2006. 7.
- [5] 欧开健. STATCOM 直流侧电容值对系统谐波含量和电容电压波动幅值的影响及其选择 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(6): 6-8.
- [6] 马献鸿, 同向前, 李峰. SPWM 型 DSTATCOM 的双变量协调控制 [J]. 电力电子技术, 2005, 39(1): 29-31.
- [7] 耿俊成, 刘文华, 袁志昌. 链式 STATCOM 电容电压不平衡现象研究 (一) 仿真和试验 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(16): 53-57.

作者简介:

王心琦, 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

张代润, 男, 教授, 研究方向为电能质量控制技术, 非线性电路功率理论及其应用。

杨柳柳, 女, 大学本科, 乐山电业局修试所安监科, 从事安全管理工作。

(收稿日期: 2009-04-23)

节约能源 保护环境

电弧光保护在电力系统的应用

吴志勇

(广元电业局, 四川 广元 628000)

摘 要:介绍了电弧光保护产生的背景,分析了电力系统电弧光产生的原因、影响因素和对电力系统的危害以及一种用于电弧光保护系统的方法,并介绍了该方法的原理,给出了相应的技术参数,在实际应用中表明该方法能够有效地对电弧光引起的系统故障进行有效的保护。

关键词: 电弧光; 电力系统; 技术参数; 保护

Abstract: The background of electric arc light protection coming into being is introduced. The causes of electric arc light protection coming into being, the influencing factors and the harm to power system are analyzed. A method used for electric arc light protection is proposed. The principle of the method is introduced and the relevant technical parameters are given. Its practical application shows that the method can protect the system failure caused by electric arc light effectively.

Key words: electric arc light; power system; technical parameter; protection

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003—6954(2009)04—0049—03

在电力系统中, 35 kV 及以下电压等级的母线一般未装设母线保护, 但是中低压母线上的出线多, 操作频繁, 三相导线间距离与大地的距离比较近, 容易受小动物危害, 设备制造质量比高压设备差, 设备绝缘老化和机械磨损, 运行条件恶劣, 系统运行条件改变, 人为操作错误等原因, 中低压母线的故障几率比高压、超高压母线高得多。据早期国外统计资料表明, 每年每 1 000 台开关柜就有 7 台遭到损坏, 故障率 0.07%。农村配电网的概率更高, 达 1.2%。据《高压开关技术通讯》报道^[7], 单是手车柜, 中国电力系统某年就有 200 多面柜烧毁。由于各国政府的重视和有关指令性文件、规程规定, 苏联和欧美等地的开关加装电弧光保护比率, 已经超过 95%。国外著名的开关柜生产厂家, 如 Reyrolle、ABB、Siemens、Schneider、Moeller、Holec 等, 其中低压开关柜均有配套使用电弧光保护系统^[2]。

1 背 景

国外芬兰的威萨公司将电弧光保护引进开发应用于 35 kV 及以下电力系统作母线保护既用于防止电弧光短路的破坏性后果又大大提高这一系统运行的稳定可靠性, 极大地减少电力系统运行中的直接经济损失和巨大的间接经济损失; 同时中国电力系统中

箱式变电站近些年来得到了迅速的推广, 但也同样存在保护不完善的弱点, 也出现过因站内弧光短路故障没能得到及时切除使故障扩展至将整个箱站烧毁的严重恶果。若加装电弧光保护以后, 弧光短路故障可以迅速被切除而彻底避免毁灭性恶果的产生, 无论对提高系统安全性还是经济效益都是显而易见的。广元朝天供电局首次引进电弧光保护并在元坝、羊木和中子三站进行安装调试。可以相信, 这三站电弧光保护系统的引进并投入运行必将大大提高广元朝天局运行的安全和自动化水平, 其巨大的经济效益亦在不言之中。

2 电弧光产生的原因及影响因素

电弧光产生的主要因素为: ①使用了不良性能的导体; ②绝缘材料的损坏 (包括裂痕, 进水, 老化等); ③人体或其他物品意外地接触到带电的物品; ④操作过程中的失误或者设计或安装错误; ⑤元件损坏, 没有良好的维修和保养设备; ⑥过电压; ⑦电网结构的改变^[3] (系统容量增大、电缆应用增多)。

电弧光所带来的影响极其严重。首先对人的危害: ①弧光的光强约 9 000 LUX, 而人眼感受到的最大光强约 300 LUX, 很容易使人的眼睛刺伤, 使角膜上皮脱落, 出现怕光、流泪、异物感、结膜充血等症状;

②电弧爆炸造成的烧伤是最严重的伤害,主要来自于电爆时散发出大量的热能辐射和飞溅的熔化金属;再者就是衣物被点燃后燃烧和熔滴而造成的严重烧伤;

③电弧周围的空气在弧光强烈辐射作用下,还会产生臭氧、氮氧化物等有毒气体伤害呼吸系统。其次对设备的影响,弧光短路是配电网中最严重的故障,尤其是发生在中、低压开关柜内部的情形,由于电弧电阻的原因,短路电流往往达不到过流速断整定值而不能动作快速切断故障,电弧持续燃烧的结果释放出巨大的能量,从而造成灾难性的后果:开关柜被严重烧毁。开关柜的弧光短路故障,往往由于没有得到及时清除,发展为中压母线故障,其危害是非常严重的,如造成发电厂厂用电瓦解、重要用户停电,更严重的将导致多组开关柜同时烧毁的“火烧连营”事故,而近年来由于母线故障巨大的短路电流冲击造成主变压器损坏也不少见,这些事故均造成重大的经济损失^[6]。

3 电弧光保护原理及参数设置

系统依据以下工作原理^[4]可以实现不同的功能,用于保护不同的设备:当发生接地或相间短路故障时,因有弧光的产生并燃烧,光的强度将突然增加。弧光传感器内电子元件就会将光信号转换为电信号,并传递给弧光保护的辅助单元。弧光保护装置在接收到弧光信号后,经逻辑判别作用于保护装置跳闸。

1)保护动作的判据为两个故障条件:弧光和过流分量;当同时检测到弧光和过流时才能发出跳闸信号^[1]。

2)系统保护动作的判据为故障发生的一个条件:弧光分量;当检测到弧光时发出跳闸信号。

3)系统保护动作的判据为故障发生的一个条件:过流分量;当检测到过流时发出跳闸信号。

以上 3 种保护功能可在同一套电弧光保护系统中同时实现。

AMP221 电弧光保护系统是一个适用于中低压母线作主保护的模块化系统。它包括有主单元 VAMP221、从单元 VAM10L、弧光传感器 VAIDA 及模块电缆 VX001 四个部分组成。每个主单元具有 16 个弧光输入端口及相应的弧光传感器和光带,每个主单元具有 4 对电子跳闸输出,4 对快速继电器跳闸输出,可以互为备用。

主单元 VAMP221 安装在电容器开关柜的面板上,从单元可以灵活地安装在相应的开关柜中,弧光

探测器则分散安装在各个开关柜上,每柜视需要安装 1~3 个。各单元之间通过特配的专用模块电缆进行连接,用于电流的测量,开关失灵保护,电流定值的管理,跳闸出口的启动,弧光探测信号的自动采集、逻辑设置管理,对所有关联弧光传感器的持续监视,保护跳闸启动方案的选择,故障方位的精确定位,故障信息的管理。通过检测短路电流和来自弧光传感器的动作信息,并对收集的数据进行处理、判断,发出跳闸信号以切除故障。该系统只有同时检测到弧光和过流时才发出跳闸指令。在进线断路器未能动作切除故障时,它将启动断路器失灵保护逻辑,发出跳闸指令给上游断路器切除故障。此外,主单元根据辅助单元传送来的弧光传感器的动作信息和温度传感器测量的温度,提供弧光故障点的定位和温度报警信息。每个主单元最多可接入 10 个辅助单元,它采用 RS485 总线与辅助单元通信。主单元中具有二进制 I/O 接口供主单元之间交换过流和弧光传感器动作信息,以实现有选择性的切除整流系统故障。

辅助单元 10 AL 用于连接弧光保护主单元和弧光传感器。该辅助单元可连接 10 个弧光传感器、一个移动式弧光传感器、一个温度传感器。每一个连接的传感器,都可给出一个独立的地址信息,用于弧光保护系统的逻辑设置、监视所连接的弧光传感器的状态、装置故障定位等。

VAIDA 弧光传感器是一种光感应元件。安装在开关柜内相关部位,具有故障定位功能,可以监视那些脆弱而又重要部件。如开关柜母线间隔、开关柜下部 TA 和 TV 部件、电缆连接头等。在传感器的前方,其灵敏度几乎不会变。而在传感器背面,灵敏度会有所下降。传感器的光感应强度为 8 000 LUX。并且弧光信号用特制光缆传输,具有抗电磁干扰性能。

(1)主单元 VAMP221 性能见表 1。

(2)从单元 VAM10L 性能见表 2。

(3)传感器 VAIDA:

强光在传感器中转变为电信号由 VAM10L 传送到主单元;标准连接电缆长度是 6 m 和 20 m。

(4)模块电缆:

主单元—从单元连接: VX010—××; 从单元—从单元连接: VX001—××。

4 电弧光保护系统的应用

表 1 VAMP221性能

名 称	参 数
电源 U _s	220 V AC/DC
P	< 7 W
测量额定电流 I _n	1 A/5 A
额定频率 f _n	50/60 Hz
跳闸接点	4个接点 (T1~T4)
额定电压	250 V AC/DC
持续传送	5 A
最大切断电流	0.5 s 30 A
最大切断电流	3 s 15 A
报警接点	2个常开, 1个常闭
额定电压	250 V AC/DC
持续传送	5 A
最大切断电流	0.5 s 10 A
最大切断电流	3 s 8 A
当地串口	1个
接口	RS232
速率	9 600 bit/s

表 2 VAM10L性能

名 称	参 数
电源 U _s	24 V DC
传感器连接	10个弧光传感器, 1个便携式传感器
跳闸接点	1个接点
额定电压	250 V AC/DC
持续传送	5 A
最大切断电流	0.5 s 30 A
最大切断电流	3 s 15 A

解决电弧光危害的最有效方法,文献 [1]是以最快的速度切断故障电源。在开关柜内加装弧光探测保护装置,当柜内有微小弧光时,迅速切断所有运行的开关,使故障尽早发现,或将故障限定在最小范围内,尽可能减小损失^[1]。

35 kV 元坝变电站、35 kV 羊木变电站、35 kV 中子变电站电弧光保护系统安装调试完毕后,于 2006 年 8 月 27 日开始加入电网试运行,在试运行中整个系统软、硬件系统全部投入运行的情况下,对其进行了全面考查、监测和记录,运行实践证明,电弧光保护系统的运行稳定、可靠,未发生过误动、误发信号或通信中断等影响运行的现象。全部性能均已满足要求。

(1)2006 年 8 月 22 日电流测量单元测试纪录见表 3。

(2)跳闸记录见表 4。

(3)2006 年 8 月 22 日系统动作测试见表 5。测试条件:① I_a=I_b=I_c=1.6 I_n②弧光探头动作。

表 3 测试记录

序号	标准值 (A)	单元测量值 (I _n)
1	2.6	0.5
2	5.2	1.0
3	7.8	1.5
4	10.4	2.0
5	15.4	3.0
6	19.0	3.8

表 4 跳闸记录

实加电流值 (A)			主显	从显	开关动作情况	
I _a =8.0 I _b =8.0 I _c =8.0			0101	01	901号	915号
					√	√
			0201	01	901号	915号
					√	√
I _a =7.0 I _b =7.0 I _c =7.0			0101	01	901号	915号
					×	×
			0201	01	901号	915号
					×	×

表 5 系统动作测试

序号	探头号	主单元显示		从单元显示		压板出口情况 (未动作)	
						901号	915号
1	0101	01	01	01	01	√	√
2	0102	01	02	01	02	√	√
3	0103	01	03	01	03	√	√
4	0104	01	04	01	04	√	√
5	0105	01	05	01	05	√	√
6	0201	02	01	02	01	√	√
7	0202	02	02	02	02	√	√
8	0203	02	03	02	03	√	√
9	0204	02	04	02	04	√	√
10	0205	02	05	02	05	√	√
11	0206	02	06	02	06	√	√
12	0207	02	07	02	07	√	√
13	0208	02	08	02	08	√	√

备注:
① 1号从单元中 3~5号探头分别安装在 911~913号开关柜,1~2号分别与母线 1~2号对应。
② 2号从单元中 1~3号探头对应母线 1~3号,4~5号分别安装在 914~915号开关柜,6号探头安装在 PT柜,7~8号探头安装在 901号开关柜。
③ 压板出口情况中,“√”表示接通,“×”表示断开。

5 结 论

(1)当发生接地或相间短路故障时,因有弧光的产生并燃烧,光的强度将突然增加。弧光传感器内电子元件就会将光信号转换为电信号,并传递给弧光保护的辅助单元。弧光保护装置在接受到弧光信号后,

(下转第 68 页)

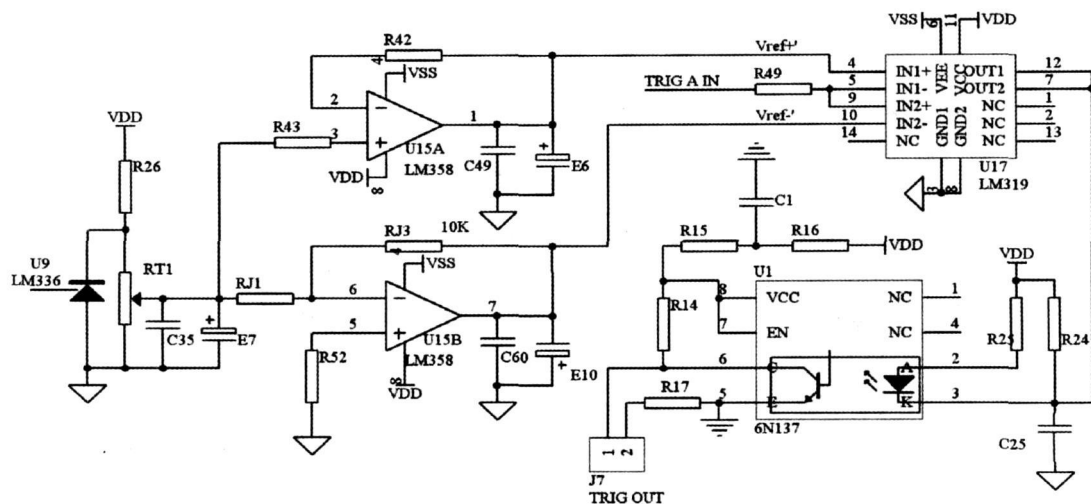


图 8 触发电路原理图

4 结 论

在总结国内外过电压在线监测领域已有研究成果,分析现有技术所存在的不足之处的基础上,针对高压电网过电压在线监测系统的关键技术进行了研究,提出了一种基于套管电容分压的高压过电压在线监测系统整体设计方案和实现方法,为进一步提高过电压信号实时监测手段做了有益的探讨。

参考文献

- [1] 孙才新,司马文霞,赵杰,等.特高压输电系统的过电压问题[J].电力自动化设备,2005,25(9):5-9.
- [2] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.

- [3] 胡学浩.美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J].电网技术,2003,27(9):1-6.
- [4] 葛睿,董昱,吕跃春.欧洲“11.4”大停电事故分析及对我国电网运行工作的启示[J].电网技术,2007,31(3):1-6.
- [5] 王梦云,薛辰东.1995~1999年全国变压器类设备事故统计与分析[J].电力设备,2001,2(1):11-19.
- [6] 关根志.高电压工程基础[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [7] 赵自刚,赵春雷.国产故障录波器现状分析及新型录波器展望[J].电网技术,1999,23(3):44-47.
- [8] 姚陈果,孙才新,王士彬,等.配电网过电压在线监测系统的设计与实现[J].电力系统自动化,2004,28(9):74-76.

(收稿日期:2009-03-10)

(上接第 51 页)

经逻辑判别作用于保护装置跳闸。电弧光保护系统由主单元、辅助单元和弧光传感器 3 部分组成。采用弧光做为主判据、过流为辅判据,能以最快速度切除故障回路,减少设备财产的损失,保护工作人员的人生安全^[7]。

(2)通过在 35 kV 元坝变电站、35 kV 羊木变电站、35 kV 中子变电站电弧光保护系统试运行,在试运行中整个系统软、硬件系统全部投入运行的情况下,对其进行了全面考查、监测和记录,运行实践证明,电弧光保护系统的运行稳定、可靠,未发生过误动、误发信号或通信中断等影响运行的现象。全部性能均已满足要求,通过在电弧光保护可应用于中低压母线保护、电缆保护、箱式变电站保护等多个领域。

参考文献

- [1] 王维俭.电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2001.
- [2] 王梅义.高压电网继电保护运行与设计[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [3] 刘介才.工厂供电(第4版)[M].北京:机械工业出版社,2004.5.
- [4] <http://www.aptechina.com/club/showtopic-64915.html>
- [5] Study and Application of Arc Protection Relay 电力勘测设计 Electric power survey Design
- [6] The Arc Protection syetem and Its Application to the Internal Fault of Switchgear and the Busbar
- [7] 王唯之.高压开关技术通讯[M].北京:中国电力出版社,2004.

(收稿日期:2009-03-09)

基于博弈均衡购电电价的分时电价

孙 琳¹, 刘俊勇²

(1. 成都电业局, 四川 成都 610041; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 电力市场改革促进发电商竞价与购电商间竞价。根据博弈理论, 将购电商与发电商看作一个两人静态博弈模型, 根据双方叫价拍卖模型, 计算贝叶斯均衡点, 确定购电电价, 寻求不同出价下的均衡电价在分时电价中的应用, 根据反应后的削峰填谷效果进行出价选择和协商, 达到双方共赢的目的。

关键词: 博弈论; 两人静态博弈; 双方叫价拍卖模型; 贝叶斯均衡; 分时电价

Abstract: With the development of power market, the competition is between the generators and the purchasers. The application of TOU (time of use) price based on game theory is presented, which takes the relationship between generators and purchasers as a two-level game model. The two-player auction model is used to compute the Bayes equilibrium, and then the purchasing price is confirmed to make the TOU price for the reaction of load under different auction. At the last, there will be a negotiated purchasing price for the two players, which will make both of them have the most incomes.

Key words: game theory; two-level static game; two-player auction; Bayes equilibrium; TOU (time-of-use) price

中图分类号: F407.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0052-05

0 引 言

电价是电力市场最有效的经济调节杠杆。电价的制定是电力工业改革与发展的关键, 分时电价作为电力需求侧管理的重要手段之一, 在世界各国电力工业经济管理中正在发挥着越来越大的作用。运用分时电价可以实现削峰填谷、移峰平谷, 减缓发电侧电力投资, 提高供电可靠性, 减少用户电费。

分时电价提出的理论基础是实时电价理论。文献 [1] 和 [2] 认为中国目前实行实时电价的条件不具备, 但实行分时电价是必不可少的。文献 [3] 主要针对江苏省实行分时电价后大工业用户的响应进行了分析, 认为实行分时电价具有一定的负荷调节效果。文献 [4] 提出了用户反应的概念来描述电价对负荷的影响, 并提出了基于 DSM 的分时电价的数学模型。文献 [5] 通过研究需求与价格的关系, 运用一元回归模型, 拟合了整个社会对电价的反应曲线, 并制定了相应的分时电价, 得到了较好的负荷调整的效果, 文献 [6] 对平时段电价的确定进行了探索性研究。提出了用 MCP 计算的平均购电电价来确定平时段电价, 但是, 由于 MCP 对平时段电价的限制, 文献 [6]

确定的分时电价不能得到使削峰填谷最优的平时段电价。影响用户用电特性最直接的因素即是电价, 分时电价一般都是在现行的全年平均电价作为平值时段电价基础上制定的。供电公司的购电成本直接影响用户的电价。电力市场的开放, 直接导致了发电商竞价上网和购电商之间的竞价购电。国内外许多学者都对发电商应用博弈论制定竞价策略进行了研究^{[7]~[11]}。文献 [12]、[13] 基于不完全信息静态博弈论, 研究了购电商的竞价策略。文献 [14] 讨论了拥有发电机的供电公司如何优化向独立发电商购电的计划。文献 [15]、[16] 应用博弈论探讨了大用户直购电时购售电双方的利益博弈。文献 [17] 在解除管制的市场中, 将发电商、供电公司和用户的利益进行协商平衡, 寻求各自利益最大的均衡点。

这里在博弈论的基础上, 将发电商看作一个协作的整体, 同购电商进行博弈, 寻求各自利益的最大化, 找到一个贝叶斯均衡点, 将此均衡电价作为基础电价制定用户的分时电价。

1 发电商与购电商博弈

在解除管制的电力市场中, 短期电力市场的电价由发电商和购电商共同决定, 市场交易管理中心根据

各发电商和各购电商上报的竞价曲线分别作出总供电曲线和总需求曲线,这两条曲线的交点即为供求平衡点,平衡点处的电价为市场清算电价 MCP(Market Clearing Price)。当发电商和购电商都在寻求各自的最大利益时,也同时在对对方的竞价策略进行估计相应制定各自的竞价目标函数。不可避免的,一方竞价成功的基础上,另一方相应会有所损失。因此,建立双方叫价拍卖博弈模型,找到满足发电商和购电商各自最大利益的均衡点。

1.1 模型假设

联营体形式下,参与者众多,若干发电公司或若干购电商可以结成联合体(coalition)去投标,也就是协作博弈(cooperative gaming),这可以比各自独立去投标取得更大的利益,所得利益在联营体内合理分配。一般在这类博弈决策时网络的输送容量是不考虑的^[18]。因此,对于各发电商,认为他们进行协作博弈,共同给出发电报价策略。

同时,针对目前中国电力市场开放程度,假设供电公司作为单一购买者,同协作的发电商进行 two-level 博弈。

1.2 双方叫价拍卖模型分析

在购电商和发电商的两方博弈中,各个时段的购电量通常由双方确定。

在双向拍卖的交易博弈中,卖者提供的商品成本为 c 这是商品对于卖者的价值。商品对买者的价值为 v 。设卖者对于商品的要价为 $p_s(v_s)$ 函数,买者对商品的买价为 $p_b(v_b)$ 函数,当 $p_s > p_b$ 时,交易成功,双方以 $(p_s + p_b)/2$ 的价格成交;如果 $p_s < p_b$, 则不发生交易。由于这里是研究该博弈均衡电价在分时电价中的应用及其影响,因此这里只考虑交易成功,即 $p_s > p_b$ 时的情况。

发电商的效用函数为:

$$u_s(p_s, p_b) = \begin{cases} \frac{p_s + p_b}{2} - c & p_s \leq p_b \\ 0 & p_s > p_b \end{cases} \quad (1)$$

购电商的效用函数为:

$$u_b(p_s, p_b) = \begin{cases} v - \frac{p_s + p_b}{2} & p_s \leq p_b \\ 0 & p_s > p_b \end{cases} \quad (2)$$

c 和 v 属于发电商与购电商的私人类型,假设 c 服从 $[c_1, c_2]$ 的均匀分布, v 服从 $[v_1, v_2]$ 上的均匀分布。由非完全信息静态博弈中的贝叶斯 Nash 均衡定理可

得,双方博弈均衡点 $(S_s^*(c), S_b^*(v))$, 需满足以下两个条件。

① $S_s^*(c)$ 满足卖者最优性。即:

$$\max_{S_b^* \geq p_s} \int \left(\frac{1}{2} (p_s + s_b^*(v)) - c \right) dF \quad (3)$$

② $S_b^*(v)$ 应满足买者最优性。即:

$$\max_{(S_s^*(c) \leq p_b)} \int \left(v - \frac{1}{2} (p_b + s_s^*(c)) \right) dF \quad (4)$$

假设买者采取一个线性叫价策略, $s_b^*(v) = \alpha_b + \beta_b v$ 。

$s_b^*(v)$ 服从 $[\alpha_b + \beta_b v_1, \alpha_b + \beta_b v_2]$ 上的均匀分布, 于是对式 (3)、(4), 由一阶导数推导可得:

$$p_s = \frac{2}{3} v_b + \frac{1}{3} (\alpha_b + \beta_b v_2) \quad (5)$$

对式 (5), 由一阶导数推导可得:

$$p_b = \frac{2}{3} v_b + \frac{1}{3} (\alpha_s + \beta_s v_1) \quad (6)$$

联立可得:

$$\begin{aligned} p_s &= \frac{2}{3} c + \frac{1}{12} (3v_2 + \alpha) \\ p_b &= \frac{2}{3} v + \frac{1}{12} (v_2 + 3\alpha) \end{aligned} \quad (7)$$

当 $p_s \leq p_b$ 时, 交易成功, 以 $(p_s + p_b)/2$ 的价格成交, 即此时 $p = \frac{1}{3} (v + c) + \frac{1}{6} (\alpha + v_2)$ 为购电商的购电价。

2 分时电价模型建立

2.1 模型的假设和参量的设定

2.1.1 基本假设

① 实行分时电价前后每天的总用电量保持不变。

② 调整到某一时段的电量按时间轴平均分配。

③ 文中只考虑了价格对用户需求的影响, 其他因素的影响需进一步研究; 同样, 文中只考虑了用户对价格的影响, 其他因素 (如燃料价格) 对价格的影响暂时忽略。

根据国外实行需求侧管理的经验, 在实行需求侧管理后, 一般用电量略有增加或基本保持不变, 因而假定实行分时电价前后用电量保持不变是合理的。假设②尤其是假设③是为了使文中的讨论得以顺利进行所作的简化性假设, 消除假设③是一个十分重要的问题, 有待进一步的研究。

2.1.2 参量的设定

(1)将一天 24 h 划分为 3 类时段: T_f 、 T_p 、 T_g , 满足:

$$T_f + T_p + T_g = 24 \tag{8}$$

其中: T_f 为峰时段; T_p 为平时段; T_g 为谷时段。
(2)电价的确定:供电公司根据博弈均衡购电电价 p_m , 制定相应的平时段电价 p_p ,

$$p_p = k p_m \tag{9}$$

其中 k 为计入输电电价、网损、辅助服务电价后的比例系数。电力网络输电价格、网损计算、辅助服务电价的确定是一个很大的学术课题, 为使研究得以顺利进行, 根据统计数据取为常数 2.8^[6]。

2.2 用户的反应

全社会对电价的综合反应曲线^[19] (不包括商业用电和居民用电)得式 (10)。

$$\begin{cases} y=0.4319x^3-0.4734x^2-0.4191x+1.4629(x\leq 1) \\ y=0.3294x^3-1.8315x^2-2.5134x-0.0111(x>1) \end{cases} \tag{10}$$

式中, x 为某时段电价与现行平值电价比值的大小; y 为某时段用电量与现行平值电价时段用电量比值的大小。

2.3 模型的经济约束

根据 DSM 的总体目标, 从供、需两方面考虑来建立分时电价的数学模型。

2.3.1 供电方获利

实行分时电价前供电方的销售收入为:

$$M_0 = Q \bar{p} \tag{11}$$

其中: $\bar{p}$ 为实行分时电价平均购电费用。实行分时电价后供电方的销售收入为:

$$M_{TOU} = Q_{fTOU} p_f + Q_{pTOU} p_p + Q_{gTOU} p_g \tag{12}$$

其中: Q_{fTOU} 、 Q_{pTOU} 、 Q_{gTOU} 为实行分时电价后峰、平、谷时段的用电量。实行分时电价后供电方通过削峰可以节约的电力建设投资为 M'_0 。供电方获利的约束条件是:

$$M_{TOU} \geq M_0 - M'_0 \tag{13}$$

2.3.2 用电方受益:

实行分时电价前用户电费支出:

$$m_0 = M_0 \tag{14}$$

实行分时电价后用户电费支出: $m_{TOU} = M_{TOU}$
用户受益即电费支出不增加:

$$m_0 \geq m_{TOU} \tag{15}$$

即:总电费不增加

$$M_0 \geq M_{TOU} \tag{16}$$

综合有:

$$(1-\delta)M_0 \leq M_{TOU} \leq M_0 \tag{17}$$

供电公司让利系数 $\delta = \frac{M'}{M_0}$ 在该模型中将 δ 控制在 10% 以内。

2.4 优化目标

尽可能减小峰负荷, 提高谷负荷, 减小峰谷差, 从而提高电力系统的负荷率、电力系统的运行效率和稳定性, 并且尽可能减少用户购电费用, 从而达到社会效益最优的目的。

以峰负荷最大和谷负荷最小及峰谷差最小为目标函数, 即目标函数为:

$$\min(L_{max}) \tag{18}$$

$$\min(L_{max} - L_{min}) \tag{19}$$

显然, L_{max} 是负荷用电量的最大值; L_{min} 是负荷用电量的最小值; $L_{max} - L_{min}$ 为负荷用电量峰谷差。采用对式 (18)、(19) 的多目标优化, 在 MATLAB 中仿真优化。

2.5 求解流程

- (1) 发电商、购电商根据自身特点估计各自的竞价方案。
- (2) 根据博弈均衡理论计算在发电商与购电商不同报价下的均衡电价。
- (3) 根据均衡电价制定相应的分时电价达到削峰填谷的效果。
- (4) 最终在各种均衡电价下的分时电价效果中选取最优作为最终分时电价方案及报价方案。

3 算例分析

采用简化模型探讨均衡协商电价的制定。

表 1 典型日负荷数据

t 负荷 (MW)		t 负荷 (MW)		t 负荷 (MW)		t 负荷 (MW)	
1	2 015.7	7	1 972.9	13	2 501.2	19	2 912.2
2	1 901.5	8	2 078.5	14	2 643.7	20	2 861.8
3	1 860.1	9	2 438.9	15	2 704.5	21	2 760.6
4	1 816.6	10	2 554.8	16	2 715.8	22	2 641.5
5	1 803.5	11	2 720.6	17	2 793.0	23	2 383.4
6	1 826.1	12	2 691.5	18	2 885.3	24	2 164.4

根据历史数据, 假设模拟得到发电商的成本 c 和购电商 (供电公司) 的电力价值 v 在电量 Q 不变下, 假设发电商和购电商的成本和价值服从均匀分布, $c \sim U(0.11, 0.14)$, $v \sim U(0.12, 0.15)$, 为简化计

算,使 ν 和 c 各取五个均匀分布点进行计算,由式 (7)、(9) 得到博弈均衡购电电价 $p_{m,i}$, $i=1, 2, \dots, 5$ 。
 $P_{mpi}=kp_{m,i}$, 取计入输电电价、网损、辅助服务电价后的比例系数 $k=2.8^{[6]}$ 。

经 MATLAB 仿真计算得如表 2 所示,不同购电电价下分时电价制定方案及优化效果。

表 2 不同博弈基础电价下分时电价效果比较

博弈基础 电价 (元 /MW)	峰平谷与 基础电价比	最大 峰荷 (MW)	最小 谷荷 (MW)	峰谷负荷 差 (MW)
0.392 0	1.470/1.093/0.300	2 866.5	1 961.2	905.3
0.401 3	1.602/1.104/0.542	2 757.2	2 001.2	756.0
0.410 7	1.501/1.078/0.554	2 722.9	2 134.4	588.5
0.420 0	1.516/1.033/0.535	2 656.7	2 099.1	557.6
0.429 3	1.151/1.031/0.587	2 722.9	1 976.1	746.8

表 2 为在购电商与发电商竞价的均匀分布中取简化模型 5 个点进行分时电价反应结果比较,其中供电公司获益为除去供电公司的输电电价、网损、服务电价等后的净收入,由比较可得,购电商可以选择博弈基础电价为 0.42 元 /MW 时,峰谷差 557.6 MW 最小,谷负荷 2 099.1 MW 较大,峰负荷 2 656.7 MW 最小,供电公司净收益 8 063.7 元最大。

表 3 不同博弈基础电价下分时电价效果比较

博弈基础 电价 (元 /MW)	峰平谷与 基础电价比	供电公司 净收 益 (元)	峰谷差 率 (%)	负荷率 (%)
0.392 0	1.470/1.093/0.300	1 946.3	26.40	88.13
0.401 3	1.602/1.104/0.542	1 366.3	38.49	83.80
0.410 7	1.501/1.078/0.554	1 958.9	27.42	87.12
0.420 0	1.516/1.033/0.535	8 063.7	20.99	90.41
0.429 3	1.151/1.031/0.587	-1 665.7	20.45	89.91

如图 1 所示,在该电价下分时电价前后的负荷曲线比较。

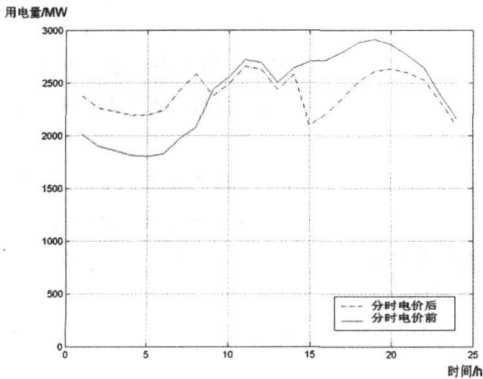


图 1 分时电价前后的负荷曲线

4 结 论

基于博弈论的原理,对购电商竞价和发电商竞价之间寻求各自利益最大化的均衡点,并根据不同竞价方案下的均衡电价应用于分时电价,观察其效果予以分析,最终确定购电出价方案。经过简化仿真计算,可以找到一个适宜的基础电价,制定分时电价方案达到削峰填谷的要求。

由于应用于分时电价调整负荷的计算较为复杂,只给出了简化计算,如何更精确计算还需进一步研究。购电商与发电商在竞价中的反应也需进一步研究。

参考文献

[1] 郑斌,王秀丽. 电力市场电价理论的分析与综述 (1): 边际成本电价理论 [A]. 全国高等学校电力系统及自动化专业第 15 届学术年会论文集 [C]. 武汉: 1999, 1202—1207.

[2] 郑斌,王秀丽. 电力市场电价理论的分析与综述 (2): 竞价机制及转运电价 [A]. 全国高等学校电力系统及自动化专业第 15 届学术年会论文集 [C]. 武汉: 1999, 1208—1215.

[3] 李扬,王治华,卢毅,等. 峰谷分时电价的实施及大工业用户的响应 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 45—48.

[4] 丁宁,吴军基,邹云. 基于 DSM 的峰谷时段划分及分时电价研究 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 9—12.

[5] 刘观起,张建,刘瀚. 基于用户对电价反应曲线的分时电价的研究 [J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(3): 23—27.

[6] 吴秋伟,汪蕾,邹云. 基于 DSM 和 MCP 的分时电价的确定与分析 [J]. 电力需求侧管理, 2003, 5(1): 24—29.

[7] Hobbs B F, Metzler C B, Pang J. Strategic gaming analysis for electric power systems: an MPEC approach [J]. IEEE Trans On Power Systems, 2000, 15(2): 638—645.

[8] Dacorato M, Minola A, Sbrizzai R. A simulation tool for studying the day-ahead energy market: the case of Italy [M/CD]. New York: Proceedings of IEEE Power Engineering Society 2002 Winter Meeting, 2002.

[9] Song H L. Decision Making of an Electricity Suppliers Bid in a Spot Market. IEEE PES Summer Meeting, Edmonton (Canada): 1999.

[10] Hobbs. Analyzing Strategic Bidding Behavior in Transmission Networks In: IEEE Tutorial on Game Theory Applications in Electric Power Market. IEEE PES Winter Meeting New York, 1999.

[11] 任玉珑,邹小燕,张新华. 发电公司的不完全信息竞价博弈模型 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 11—14.

[12] 段登伟,刘俊勇.基于不完全信息静态博弈论的购电商竞价策略研究[J].电力自动化设备,2003,23(7):10—14

[13] 陈星莺,李华昌,廖迎春,刘皓明.不完全信息下的供电公司最优竞价策略[J].电力需求侧管理,2006,8(4):12—15

[14] Alvarado F L. The stability of Power System Markets IEEE Trans on PWRs 1999, 14(2).

[15] 谭忠富,董福贵,刘严.博弈论在大用户与发电公司直接购电合同中的应用[J].华北电力大学学报,2004,31(3):62—64.

[16] 陈刚,王超,谢松.基于博弈论的电力大用户直接购电交易研究[J].电网技术,2001,28(13):75—79.

[17] Geeli Negotiation Models for Electricity Pricing in a Partially Deregulated Electricity Market In: IEEE PES Summer Meeting Seattle(USA). 1999.

[18] 刁勤华,林济铿,倪以信,陈寿孙.博弈论及其在电力市场中的应用[J].电力系统自动化,2001,25(1):19—23;5(2):13—18.

[19] 刘观起,张建,刘瀚.基于用户对电价反应曲线的分时电价的研究[J].华北电力大学学报,2005,32(3):23—27.

作者简介:
孙琳(1982—),女,成都人,硕士研究生,主要从事电力市场方面的研究。
刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,主要从事电力市场、分布式发电等方面的研究工作。
(收稿日期:2009—06—01)

(上接第 31 页)

参考文献

[1] Zobian A, Ilie M D. A Steady state Voltage Monitoring and Control Algorithm Using Localized Least Square Minimization of Load Voltage Deviations[J]. IEEE Trans on Power Systems 1996, 11(2): 929—938.

[2] MAO Jian—feng ZHAO Qian—chuan Christos G Optimal Dynamic Voltage Scaling in Power—Limited Systems with Real—time Constraints[A]. 43rd IEEE Conference on Decision and Control 2004, 1472—1477.

[3] 包黎昕,段献忠,何仰赞.状态空间中电压稳定性的动态分析[J].中国电机工程学报,2001,21(5):17—22

[4] Zeng Y G, Berizzi A, Marannino P. Voltage Stability Analysis Considering Dynamic Load Model[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control Operation and Management 1997, 396—401.

[5] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,王小海.电力系统电压稳定性及其控制[M].中国电力出版社.

[6] Obadina O. O, Berg G. J Determination of Voltage Stability Limit in Multimachine Power System. IEEE Trans On PWRs 1988, 3(4).

[7] 王锡凡,方万良,杜正春.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社,2004.

[8] 王永骥,涂健.神经网络控制[M].机械工业出版社,1999.

[9] Hsiao Y T, Liu C C, Chiang H D, et al A New Approach for Optimal VAR Sources Planning in Large Scale Electric Power Systems[J]. IEEE Trans On Power Systems 1993, 8(3): 1024—1032

[10] 刘玉田,马莉.基于 Tabu搜索方法的电力系统无功优化[J].电力系统及其自动化学报,2000,24(2):61—64.

[11] Burchett R C, Kapp H H, Vierath D R. Quadratically Convergent Optimal Power Flow[J]. IEEE Trans On Power Apparatus and Systems 1984, 103(11): 3267—3276.

[12] 刘明波,程劲晖,陈学军.电力系统无功综合优化的线性规划内点法[J].电力系统及其自动化学报,1999,11(5):87—92.

[13] 周双喜,姜勇,朱凌志.电力系统电压静态稳定性指标述评[J].电网技术,2001,25(1):1—7.

[14] 李亚男,张粒子,杨以涵.考虑电压约束裕度的无功优化及其内点解法[J].中国电机工程学报,2001,21(9):1—4.

[15] 刘明波,陈学军.电力系统无功优化的改进内点算法[J].电网技术,1998,22(3):24—28.

[16] 王良缘,吴政球,傅海燕等.电力市场中基于内点法的含暂态稳定约束的最大可用输电能力计算[J].电力系统及其自动化学报,2004,16(1):28—33.

[17] 袁越,久保川淳司,佐佐木博司.考虑暂态稳定约束的可用传输能力计算[J].电力系统自动化,2004,28(10):34—39.

[18] 李华强,刘亚梅, N. Yorino 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估[J].中国电机工程学报,2005,25(24):56—60.

[19] 范勇,李华强,曾勇波.基于内点法的可用传输能力计算[J].四川师范大学学报,2006,29:149—151.

作者简介:
张希猛(1976—),男,河北南皮人,汉族,在读研究生,工程师,主要研究方向电压稳定及电压无功控制;
李华强(1965—),男,教授,博士,从事电压稳定及无功优化问题研究;
赵周芳(1983—),女,硕士在读,主要从事电压稳定方面的研究;
方勇(1968—),男,博士在读,主要从事电能质量方面的研究。
(收稿日期:2009—02—23)

新疆电网风力发电运行对风电发展建设的启示

马锋福¹, 常喜强¹, 蔡鹏程¹, 杨永利¹, 王琳¹, 姚秀萍¹, 周悦²

(1 新疆电力调度中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2 上海交通大学, 上海 200240)

摘要:在对新疆电网风力发电研究的基础上, 分析了风力发电存在的问题, 提出了解决这些问题的建议和措施, 同时对风力发电大规模的开发应用提出了建议, 为风力发电的发展提供一定的参考和借鉴。

关键词:新疆电网; 风力发电; 解决措施; 开发利用

Abstract: Based on the investigation of wind power generation of Xinjiang power grid, the practical application and the existing issues of Xinjiang wind power plants are summarized and analyzed. Suggestions and measures of resolving these problems are put forward. At the same time, some suggestions to develop wind power on a large scale are proposed, which gives a reference for the development of wind power generation.

Key words: Xinjiang power grid; wind power generation; measures; development and utilization

中图分类号: TK81 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0057-05

新疆特有的地理环境和气候条件造就了风能资源十分丰富, 全疆共有九大风区, 风能资源总储量巨大, 理论上估算新疆全年可提供 2.77 PWh 电量, 居全国前列。风区总面积达 15.45 万平方公里, 疆内年平均风功率密度 $\geq 150 \text{ W/m}^2$ 的面积为 12.6 万平方公里, 技术开发量为 234 GW, 同时新疆的九大风区多处于戈壁上, 地形平坦, 开发面积大, 建场条件优越。

目前新疆风电已形成多家办电的建设格局, 风力发电发展迅速, 装机容量快速发展, 为风电研究提供了广阔的平台。

1 风力发电发展

1.1 风电发展的优越性

由于石化能源资源日益紧缺, 发展和应用风力发电及其他可再生能源是节约能源的重要举措。风力发电的优越性主要表现在以下几个方面: ①建设风电场的费用廉价, 比水电站、火力发电厂或核电站建造费用低很多; ②不需要火力发电所需要的煤、油等石化燃料或核电站所需要的核材料即可产生电力, 除常规保养外, 没有其他任何消耗; ③风力是一种清洁的自然能源, 没有其他发电方式所产生的环境污染问题。是国际环保组织推荐减弱地球温室效应的最成熟的方式; ④风力发电和其他发电方式相比, 它的建设周期一般较短, 安装投产快, 装机规模灵活; ⑤风力

发电运行简单, 可以完全做到无人值守; ⑥风力发电实际占地面积小, 机组与监控、变电等建筑仅占风电厂约 1% 的土地, 其余场地可作其他产业使用, 风电厂基本选址在荒漠或废弃的荒地上, 对地形要求低, 发电方式多样化, 可以独立运行也可以联网运行, 为边远地区的用电提供了实现可能性。

1.2 风电与常规电源的比较

风力发电受气候、风速和风向的变化, 风力发电机功率, 出力变动大。风力发电与常规能源发电的比较如表 1 所示。

1.3 风电普遍存在的问题

由于风力发电功率的不稳定性, 对于系统的影响是显而易见的。主要表现在: ①风电的间歇性发电特征与电网连续、可靠、稳定、经济供电相矛盾; ②风速变化的随机性造成容量可信度低, 给电网有功、无功平衡调度带来困难; ③同时还将产生电能质量问题, 并对电网稳定性产生一定影响。

1.4 新疆风电发展状况

新疆特有的三大山脉夹两大盆地的地貌, 形成了新疆风多、风大的气候特点。新疆的风能资源品质好, 风频分布较合理, 破坏性飓风十分少见。新疆多数地区风速变化规律是以春秋大、夏季次之, 冬季偏小。即 4 月、5 月风速最大, 12 月和 1 月最小, 风力资源有利于开发, 同时在新疆部分地区呈现冬春季多风, 可弥补枯水期水能资源的缺乏。

表 1 风力发电与常规能源发电的比较简表

发电类型	火电和水电	风力发电
发电机输出功率的特点	可调度——运行人员可以安排机组的出力	间歇性——机组出力随气象条件、季节和每日不同时间段而变化,不能按计划发电
发电机种类和数量	同步发电机,一般发电厂包含数台或者十几台机组	采用多种发电机技术,包括感应发电机、双馈变速发电机和同步发电机,并且有些发电系统采用多种电力电子控制技术。大型风电厂包含数百台机组
故障时的暂态响应特性	取决于反映同步发电机组机电特性的功率振荡方程	不同类型的风电机组在故障时的暂态响应不同
运行特性	由发电机组和励磁系统的特性决定	由风电机组和协调全部风电机组群运行的风电场综合控制系统决定

2007 年新疆电网风电机组装机容量达到 301 MW,同比增加了 40.63%;2008 年装机容量为 488 MW,同比增加了 37.89%。装机容量快速发展,预计到 2010 年底,总装机容量将会超过 1 000 MW。新疆电网 2001~2010 年风电装机容量一览表如图 1。

从曲线中可以看出新疆电网总发电量和风力发电量都是逐年显著增加。2008 年,风力发电总电量 777.29 MW·h,风力发电量明显增加,较 2007 年增加了 56.5%。风电的快速发展,也给新疆电网的运行带来许多问题,下面就各方面的问题逐一进行分析。

2.1 风电对电网调峰的影响

随着风力发电机组以及大容量火电发电机组、供热机组建成和投产,新疆电网的调峰压力很大。2008 年新疆电网最大发电峰谷差 1 758 MW,最小发电峰谷差 1 192 MW。电网负荷的峰谷差较大,系统调峰困难。2009 年随着农灌及空调负荷增长迅猛,新疆电网峰谷差进一步加大,预计平均峰谷差 1.51 GW,较 2008 年增长 18%,最大峰谷差 1.8 GW,较 2008 年增长 19%。2010 年新疆电网调峰缺口在 1.77~2.4 GW 之间。峰谷差的增加不利于调峰。另外,新疆电网机组结构更是加重了电网的调峰压力。

电网中水电比重小,火电比重大,水电占总装机容量的 20%,火电(含燃气和生物)比例为 75.5%。新疆电网中水电中有调节能力的水电机组较少,仅仅只有吉林台水电站、恰甫其海水电站、察汗乌苏水电站能调节,由于这三个水电站近两年来水较少,来水处于枯水期,为保证来年农灌用水,水电站冬季基本处于出力较小或者全停,调节能力有限。参与系统调峰较少。

火电机组中,供热机组所占比重大;电网中还存在大量的不参与调峰的自备电厂,2008 年其装机容量占到了全网总装机容量的 14.99%;风机比重进一步增大,2008 年新疆电网直调风电装机容量为 0.488 05 GW,风电装机容量占到最小负荷的 15.9%。如果再考虑火力发电厂供热因素,自备电厂不参与调峰等因素,系统调峰压力增大。电网调峰困

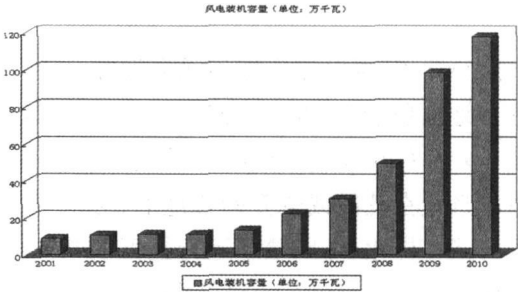


图 1 2001~2010 年风电装机容量

从上面的数据和图表可以看出,虽然新疆电网目前为独立电网,对风电发展有一定的制约,但是新疆电网开发利用风能资源的力度仍然很大,随着新疆电网与西北电网的联网,新疆电网 750 kV 网架的建设和发展,新疆风力发电,清洁能源的利用将在新疆得到更大的发展和利用。

2 新疆电网风力发电运行情况分析

2007~2008 年全网风力发电机组发电量曲线如下图 2 所示。

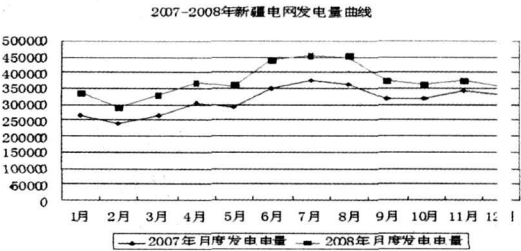


图 2 2007~2008 年全网风力发电电量

难。因此,对于目前调峰压力较大的新疆电网,风电的大量投运,如果不采取一定的技术措施,将不能保证清洁能源被充分利用,火电发电厂也将不能很好地经济运行。

新疆电网调峰困难,具体可以从下图的比较曲线中看出,2009 年 2 月 8 日,达风变风电出力与系统负荷比较如图 3、图 4 所示。

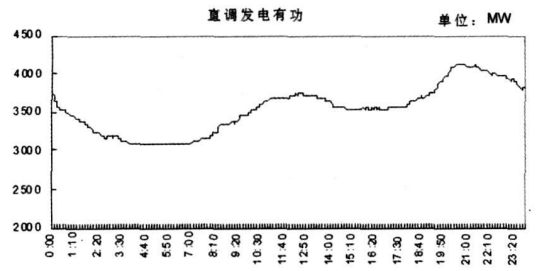


图 3 系统负荷曲线

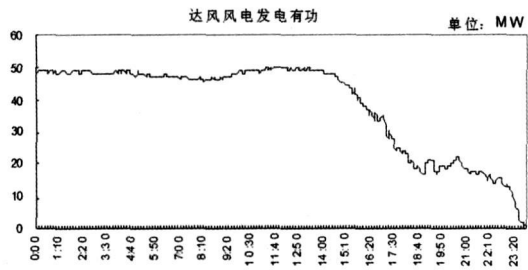


图 4 达坂城风电出力

2.2 风电对电网频率造成影响

风力发电对电网的频率调整也产生一定的影响,风电对新疆电网频率的影响包括对全网系统频率和地区电网频率的影响两个方面。

2.2.1 对系统调频的影响

新疆电网 2008 年 2~11 月,风电发电出力 15 min 内波动超过 90 MW 的次数统计如表 2 所示。

从表 2 可以看出,风电出力的剧烈波动十分频繁,系统调频机组随着频繁调整,对系统的调频压力很大,使系统频率合格率下降。

表 2 新疆电网 2008 年风电出力波动统计

月份	次数	月份	次数
2	25	7	32
3	45	8	51
4	32	9	39
5	39	10	44
6	40	11	39

目前新疆电网投产的风电机组大多不能进行有功调节,也没有功率预测系统,新疆电网峰谷差较大,后夜低谷时段负荷约 3 000 MW 左右,在风电超过 200 MW 的情况下,大量火电机组需要投油来满足系

统调频的要求。风电出力变化和频率变化频繁,给调频工作带来难度,具体可参见 4 月 30 日的风电发电出力与系统频率变化图,如图 5、图 6 所示。



图 5 全网风电发电出力

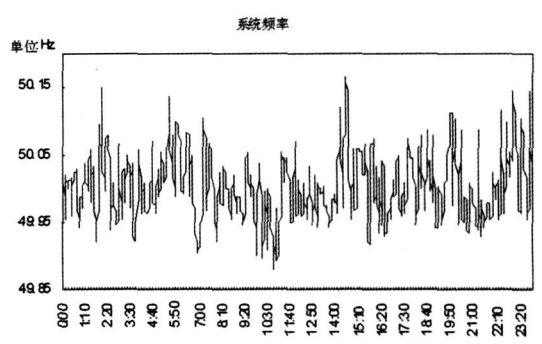


图 6 系统频率变化

2.2.2 对地区电网频率稳定造成影响

以塔城地区为例,地区电网的风电厂在小负荷时出力较大,向主系统输送功率较大,发生联络线跳闸时,易出现高频问题,给地区电网频率控制和频率稳定带来严重影响。2009 年 2 月 17 日的曲线如图 7、图 8 所示。

若在此情况下若发生系统与塔城地区联络线的跳闸等事故将造成塔城电网孤网运行,塔城电网将面临严重高频局面。

2.3 风电对电网动态电压特性产生影响

目前投产的风电机组大多不能进行有功、无功调节,对电网动态电压特性影响较大。并网时从电网大量吸收无功,造成电网电压水平降低。

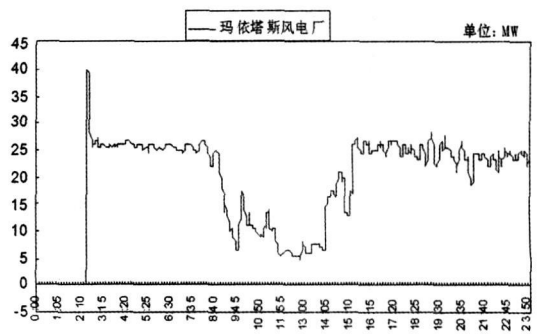


图 7 塔城地区风电出力图



图 8 塔城地区功率交换曲线

达风变电站是目前新疆电网中风电接入最多的 220 kV 变电站，35 kV 和 110 kV 电压等级均有风电接入。根据 2008 年全年和 2009 年 1、2 月的统计，达风 110 kV 母线电压最低为 109 kV，全年电压基本在 113 kV 以下。为保证 110 kV 母线电压，需要抬高 220 kV 母线电压，达风 220 kV 母线电压最高为 241 kV，全年电压基本在 238 kV 以上，同时也牺牲 35 kV 母线电压。

2.4 风电机组对电网产生电压闪变与电压波动问题

从水利厅风电场、天风风电场 10 kV 风电汇集点母线的电能质量监测中，发现风机在正常运行时会给电网带来电压波动及闪变问题。

3 发展风力积极采取的措施

虽然风电发展在新疆电网将有与别的电网不同的问题。为了更好地开发好风电，最大程度地利用风力资源，保证风电送得出、落得下，仍积极开展风力发电的研究，采取多种措施积极促进风电发展。

1) 为保证风电的送出，加快了电网建设步伐，不断改善和加强风电接入系统的网架，通过提升风电接入系统的电压等级，加强接入电网的主网架建设来减少和解决风电接入系统带来的问题。

2) 针对风电场接入系统引发的系统电压问题，不断完善无功电压补偿装置的配置，保证风电场的安全稳定运行，以提高风电场投产后地区电网的稳定性。在电网网架薄弱，系统短路容量小的系统风电接入装设可控静补等。

3) 为缓解风电发展加剧的新疆电网调峰、调频问题，充分挖掘现有火电机组的调峰潜力，增加高效大容量火电机组的利用率。要求大机组采取各种科学措施，进行深度调峰。要求装机容量在 135~150 MW 的机组具备两班制运行能力，以便在负荷较低时轮流启停调峰。

4) 针对风力发电带来的电网调峰问题，加强与气象部门联系，收集主要风区多年来风历史数据，与风电出力进行对应分析，找出来风情况和风电出力的内在关系，为风电出力预报系统提供原始数据和理论基础。开发研究风力发电预报系统，为获得较为准确的风电场发电量的预测结果，帮助风电场更合理地制定向外界提供风能的计划。

5) 积极开展风电仿真分析。模拟风电接入，建立风机和风电场仿真模型，研究新疆电网风电接入系统的频率稳定性、电压稳定性、动态稳定性、并针对风电容量、接入电压等级、风机不同类型、风机功率动态变化、风速变化进行敏感性和适应性分析。

6) 积极研究新疆风资源情况，在新疆电网风电接纳能力一定的情况下，通过概率数学方法研究，得出分散布局方式建设风电思路，总量相同，分散格局，星点接入方式，减少风电对电网的影响程度。目前，电网分别在 6 个地区建成了不同容量规模的风电场，而避开了集中在一个地区开发风电场、减少风资源对风电出力的影响。

通过分析新疆风电出力波动和新疆电网的承受能力，以及对采取的各种措施效果的分析，得出这些应对风电波动出力及保证电网安全运行的方法。实际情况证明这些方法是有效的，无论风电的等效装机、风电出力波动量及系统的调节能力和运行，电网的配合建设方面，是有一定的成效的。

风电并网运行的容量与电网的调节能力直接相关，风电并网容量与电网负荷的比例，国际上通常认为 6%~8%。而尽管新疆电网的规模不大，风电装机容量却占新疆电网 2008 年最小负荷比例约为 16%，电网后夜风电发电比例占负荷高于 10% 以上，大大超过了大型电网容纳风电的比例。几年来风电机组没有发生因电网原因限制发电的现象，基本实现了全额收购风电。新疆风电的建设与电网同步和谐展开，达到了保证风电效益和电网安全运行双赢。

4 风力发电大规模开发的建议

4.1 针对电网接纳风电进行深度分析

在研究电网接纳风电的能力时，充分考虑以下因素：电网规模，电网中不同类型电源的比例及其调节特性，负荷水平及其变化特性和风电场的地域分布、可预测性与可控性等。

4.2 针对风电的特殊性采取的分散接入方式

由于风电大规模开发后,若集中加入一点大容量接入,风电的变化对系统的稳定性、潮流分布、电压控制均产生较大的影响,由于风力的不确定性,风能的突然消失也将造成风电停运,集中接入的风电会因为风的消失而停运,造成功率变化幅度较大,而分散接入可以最大限度地减少对电网的影响。即减少风电集中送出对系统电压、功率转移造成的影响,减少风的消失对风机功率的影响,进而减少风对电网功率波动造成的影响,从而减少系统功率的波动。又可以利用各风场来风的不同时性,分布式风电较强的“错峰效应”,使全网风电总出力变化趋于平缓,减少电网调峰调频压力。

4.3 深入研究电网调峰调频

对大规模风电并网带来的电网调峰、调频能力不足等问题进行深入研究,引导水风互济、风电的发展与电网其他电源相协调的发展方式。在风电发展的同时,应建设与风力发电装机容量相当的调峰电源(如:具有调峰能力的水电站、燃气轮机组、抽水蓄能电站等),作为风电出力的反调节器,以弥补风电随机性电源造成的发电能力的不平衡,有效减少风电出力的波动对系统的不利影响。

4.4 风电场的运行控制

制定风电场运行的相关规定、并网准则、技术要求等,明确风电场并网的程序和条件,优化风电场并网管理流程;制定风电生产技术支持系统标准体系办法,适合电网安全稳定运行的风能实时监测系统的技术标准;对风电开发涉及的风速、风向、气温、气压等气象信息进行实时监测,建立风力资源共享体系和运行规则。

4.5 积极采用动态无功补偿

对于风电波动产生的电能质量问题、谐波问题,积极在风电场汇集点加装动态无功电压补偿装置,以积极跟踪风电功率变化带来的电压问题,快速适应风电功率变化,开展风电场电压控制技术研究及谐波治理,保证风电场的安全稳定运行。

4.6 积极研究气候变化对风能资源的影响

积极研究气候变化对风能资源的影响、风电建设对风电场周围气候的影响,从而更有效地掌握风能资源的变化情况。

4.7 积极研究风机类型的效果

建立不同风机模型,对不同电网结构接入不同类型的风机进行敏感性和适应性分析,以求最佳利用风电资源。

4.8 积极研究风电接入系统的各种稳定性分析

在电网仿真分析中,模拟风电接入,建立风机和风电场仿真模型,研究电网风电接入系统的频率稳定性、电压稳定性、动态稳定性,并针对风电容量、接入电压等级、风机功率动态变化、风速变化进行敏感性和适应性分析。

5 总 结

新疆的风力发电近几年发展速度越来越快,尽管风力发电在实际的开发和运行中存在一些问题,但是风力发电作为新型清洁能源,仍然有巨大的社会效益和经济效益,风力发电仍然有巨大的市场。

只要积极开展对风电的特殊性的研究,积极采取各种技术措施,如:分散接入系统;选择相对稳定的风力资源建设风电场;通过与气象部门的合作,准确预测风力发电功率;配套建设调峰调频电源,合理安排机组备用容量进行峰谷调节;积极进行谐波治理,采用动态电压补偿和控制等技术,加快建设高电压等级联络线(750 kV 电网),实现与外部电网的联系(与西北电网联网),扩大电网规模和电网的综合调节能力,就能真正充分利用清洁能源,实现风力、水电和火电等资源的优化配置。

参考文献

- [1] 孙元章,吴俊,李国杰. 风力发电对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(20): 55—62.
- [2] 耿华,杨耕,崔扬,梁之龙. 并网型风力发电系统的现状与发展[J]. 东方电气评论, 2006, (2): 1—7.
- [3] 计崔. 大型风力发电场并网接入运行问题综述[J]. 上海电力, 2008, (1): 59—63.
- [4] 靳静,艾芊. 我国风电场建设及运行现状评估与发展前景研究[J]. 华东电力, 2007, 35(8): 44—49.
- [5] 岑海堂,薛正福. 大型风电机组发展现状与关键技术[J]. 科技创新导报, 2008, (24): 78—79.
- [6] 陈树勇. 大型并网风力发电场规划方法研究[D]. 电力部电力科学研究院, 1998.
- [7] 田华,朱莉. 三门峡黄河风电场一期工程并网方案研究[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 98—103.

作者简介:

马锋福(1982—),男,硕士,主要研究方向为电力系统调度运行和控制。

常喜强(1976—),男,硕士,主要研究方向为现代电力系统分析与控制,电力系统调度运行及电力系统稳定。

(收稿日期: 2009—06—12)

电力设备介质损耗测量方法研究

曾 伟¹, 李建国²

(1. 达州电业局, 四川 达州 635000; 2. 四川电力建设二公司, 四川 成都 610051)

摘 要:对电容型设备绝缘在线检测技术进行了综述,并对通过硬件和软件实现的几种检测方法进行了比较和分析,指出了各种方法的优缺点及适用范围。

关键词:绝缘在线检测;介质损耗;正切

Abstract The different online insulation monitoring techniques of capacitive equipment are overviewed. And several monitoring methods realized by hardware and software technology are compared and analyzed. At the same time, the virtues and shortcomings of every method are given as well as the scope of its application.

Key words online insulation monitoring; dielectric loss; tangent

中图分类号: TM855 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003—6954(2009)04—0062—03

电容型设备绝缘在线检测是电力系统中开展最早的项目之一,国外在这方面的研究始于 20 世纪 60 年代初,国内也于同时期展开了早期研究工作。电容型设备绝缘在线检测方法是由离线测试方法演变而来的,早期普遍采用的带电测量介质损耗因数的西林电桥法便采用了传统停电预防性试验中测量介质损耗因数的 QS-1 型高压西林电桥的测量原理。由于这种电桥法必须另配耐压性更高的高压标准电容器,并对原有电桥进行改进等原因,难以在现场推广。随着研究的进一步深入,电容型设备绝缘在线检测技术已发展到了一个新的水平。目前,电容型设备的介质损耗因数在线检测方法基本上采用数字化的测量方法,所不同的是如何获取数字化的测量信号以及采用何种信号处理方法。由于介质损耗角 δ 就是流经试品的电流和运行电压的向量之间夹角的余角,如果能测量或计算出电流信号和电压信号之间的相位差,也就得到设备的介质损耗角正切,电流和电压两个参量都可以通过传感器在运行现场测得,因此目前电容型设备的在线检测都采用了这个原理。方框图见图 1。

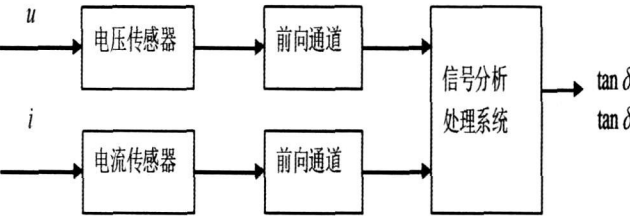


图 1 $\tan\delta$ 在线监测原理图

由于对得到的数字信号进行处理和分析等方面

的不同形成了两大分支:主要靠“硬件”实现的检测方法和主要靠“软件”实现的检测方法。

1 靠“硬件”实现的检测方法

1.1 过零点时差比较法

过零点时差比较法是一种将相位测量变为时间测量的方法。在时域中,通过过零比较电路和脉冲计数技术来测量电流、电压这两个波形的由负变正过零点的时间差 ΔT ,再换算为电流超前电压的相位差 Φ ,进而得到介质损耗角 δ 。已知正弦波的周期 T ,测得过零点时差 ΔT 后,得到

$$\begin{cases} \Phi = 2\pi(\Delta T/T) \\ \delta = \pi/2 - 2\pi(\Delta T/T) \end{cases}$$

这种方法具有测量分辨率高、线性好、易数字化的优点,但对过零点测量的要求较高,所以波形畸变对测量精度的影响很大。变电站中的各种干扰相当严重,并且在线检测大多数在露天现场进行,所以以百分之零点零几的误差稳定地检测过零点有很大的难度,限制了这种方法的可行性。

1.2 过零点电压比较法

过零点电压比较法是测量两个正弦波在过零点附近的电压差,并由电压差来计算相位差的方法。该方法在测量正弦波的相位差时,不用测量和计算两个正弦波过零点的时差,而采用在过零点附近测量两个正弦波电压差值的方法。该方法具有电路简单、对过

零点的定位要求不高的特点,有较强的抗干扰能力。但该方法也存在一些不足,如很难保持两个被测信号的幅值相等,波形畸变对测量有较大的影响等。

2 靠“软件”实现的检测方法

2.1 正弦波参数法

正弦波参数法是假设被测量的电压电流信号都是理想的工频正弦信号,因而采样得到的若干信号点必定符合三角函数关系,进而可以建立方程来推导出介质损耗角正切来。但是在现场测得的信号中,除了工频基波分量还包含有许多高频谐波分量,并不符合该方法的基本假设,因而该方法在实际应用中可能会受到一定的限制。

2.2 谐波分析法

在介质损耗因数的实际测量中,现场有各种干扰,其中电网运行中的高次谐波分量对介质损耗因数的测量影响较大。谐波分析法就是利用离散傅立叶变换对试品的电压电流信号进行谐波分析,得出基波,再求出介质损耗因数。该方法利用了三角函数的正交性,使得傅立叶变换求解电压电流的基波参数时可以有效地克服各种干扰,尤其是谐波的干扰和零漂、温漂等,因此可以达到比较高的稳定性和测量精度。但该方法容易受到频率波动的影响,并对 A/D 转换器的分辨率有较高的要求;而且,如果不能满足整周期采样,不同次谐波之间的正交性无法满足,同时离散谱线也不能对应实际各次谐波频率,将出现频谱泄漏。

2.3 相关法

依据两个同频信号的互相关函数是两个信号的幅值和相位差的函数,通过计算信号幅值和互相关函数就可求得相位差。当信号持续时间比较长,采样点较多时,如果电压与电流信号中包含随机噪声,那么由于可以认为电压中的噪声与电流中的噪声、噪声与信号之间是不相关的,因此可抑制噪声。但事实上,信号持续时间和采样点数并不能满足上述条件,而且自相关函数丝毫不能抑制噪声,因此相关法对噪声的抑制能力是很有限的。此外,相关法对滤波器的特性要求很高,且也受频率波动的影响。

2.4 正弦拟合法

用一个由各次谐波叠加而成的函数,依据均方最小原则来拟合实际信号,从而求得幅值、频率、初始相

位等未知参数,再求取相位差。该方法基本不受频率波动、谐波、直流漂移的影响,但运算量大,受随机干扰的影响也较大。

3 应用简介

用硬件法对电容型设备绝缘的介质损耗因数进行在线检测时,易受外界干扰的影响,会降低整个测试系统的稳定性和测量精度;而要使测量的性能有所提高,又将增加硬件电路设计的难度和复杂性。鉴于硬件法的这些缺点,介质损耗因数在线检测方法逐渐向着软件化的方向发展。软件法简化了硬件电路,而且还可解决一些硬件电路所不能实现的功能,如高性能的数字滤波器的设计等。另外,软件法还具有很大程度上的灵活性,算法只需修改程序即可,因此,基于软件法的在线检测方法有着较好的应用前景。软件法的典型代表是谐波分析法。谐波分析法充分应用数字化测量方法,克服了传统模拟测量方法抗干扰能力差的缺点,提高了测量精度及测量结果的稳定性。

国外目前对电容型设备介质损耗因数在线检测技术的研究主要集中在对检测方法的改善上。如澳大利亚研制的用于电流互感器及变压器套管介质损耗角在线检测装置,是利用脉冲计数法进行测试的。该装置采用了高速计数器对被测信号与标准正弦信号之间的相位差进行测量,并实时显示数字化测量结果,测量分辨率达到了 0.1 mrad 已得到实际应用;南非的研究人员采用比较的方法,以介质损耗角很小的高压电容器上的电压作为标准电压,将被试品上的电流转换成电压后与此“标准”电压信号进行相位比较,从而得出电力设备的介质损耗因数。如果用作标准电压信号的高压电容器本身具有一定的介质损耗角,则测到的设备的介质损耗因数是相对于此标准电容器的“相对”值。当采用介质损耗角近似为零的高压气体电容器充当标准电容时,则如同停电预防性试验时用的西林电桥法一样,可认为测得的是设备介质损耗角正切值的“绝对”值。所研制的这套系统也已被用于测试套管和电流互感器的介质损耗因数相对值。日本用相位比较法对电力电缆在线检测的方法,从原理上同样也可以适用于电容型试品的在线检测。

4 结 语

在线检测技术发展到现在,已经在很多方面弥补

了定期预防性试验的不足,但是同时也还存在一些问题;如谐波分析法的软件处理误差问题。对设备绝缘进行在线检测的最终目的是为了及时、准确地掌握电力系统运行中设备的绝缘状况,因此仅仅通过在线检测获得设备的绝缘参数的结果是远远不够的,还要对这些结果进行综合性的分析与诊断。但是,目前的在线检测方法仍往往局限于将设备的绝缘参数与单一、静态标准进行比较,没有使在线检测的优势得到充分发挥。对于对比分析同一设备高压下在线测量值与低压下停电预防性测量值的差距及影响在线检测值的因素及程度也是目前研究工作中一大问题。另外,应用于介质损耗因数分析的谐波分析法因现场各种原因而存在频谱泄漏的问题,那么如何在软件上进行改进,提高电流传感器稳定性和测量精度,采用数字信号传输,提高抗干扰能力,从而消除由于频谱泄漏

而带来的误差也是目前思考解决的课题之一。

参考文献

- [1] 朱德恒. 严璋高电压绝缘 [M]. 北京:清华大学出版社, 1992.
- [2] 严璋. 电气绝缘在线检测技术 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
- [3] 王乃庆. 绝缘在线监测技术的实用性、经济性和可靠性 [J]. 电网技术, 1995, 19(11): 54—56, 60.
- [4] 成永红. 电力设备绝缘检测与诊断 [M]. 中国电力出版社, 2001: 65—79.
- [5] 蔡国雄. 介质损耗测量的过零点电压比较法 [J]. 电网技术, 1995, 19(10): 1—5.

(收稿日期: 2009—04—27)

(上接第 15 页)

通过前面的理论分析以及仿真验证,可以得到以下结论。

(1) 分析了换流母线电压对换相失败的影响。换流母线电压变化是导致换相失败的主要原因,它主要从两方面影响换相过程:电压幅值和电压过零点相位移,得到了换相失败发生时的临界电压降。当换相电压降低的程度超过这个值就会引发换相失败。

(2) 推导得出了换流母线电压间相互影响的表达式。并以此为基础推导得到了换相失败时的临界电气距离,它与系统自身的强度、故障大小以及与其它系统间的电气联系强度等均有关系。

(3) 最后,通过仿真验证了根据换流母线电压相互影响关系式计算所得的换流母线电压与实际电压误差是较小的,且故障越小,非故障系统离故障系统电气距离越远计算精度越高。在工程上具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 林凌雪,张尧,钟庆,宗秀红. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述 [J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40—46.
- [2] 王晶芳,王智冬,李新年,胡涛,蒋卫平,王明新,向孟奇,李焕明. 含特高压直流的多馈入交直流系统动态特性仿真 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 97—102.
- [3] 林伟芳,汤涌,卜广全. 多馈入交直流系统电压稳定性研究 [J]. 电网技术, 2008, 32(11): 7—12.
- [4] 杨卫东,徐政,韩祯祥. 多馈入交直流电力系统研究中的

相关问题 [J]. 电网技术, 2000, 24(8): 13—17.

- [5] 凌晓波,刘蓓,王冲. 高压直流输电系统多落点及研究现状 [J]. 上海电力, 2008, (1): 72—74.
- [6] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京:科学出版社, 1998.
- [7] 浙江大学直流输电科研组. 直流输电 [M]. 北京:电力工业出版社, 1982.
- [8] Lidong Zhang, Lars Dofnas. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems [C]. Proceedings Power Conference 2002, 1: 51—56.
- [9] 孙志媛,梁小冰,孙艳. 基于 EMTDC 的多馈入直流输电系统仿真研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(10): 259—298.
- [10] Changchun Zhou, Zheng Xu. Study on commutation failure of multi-infeed HVDC system [C]. International Conference on Power System Technology, 2002: 2462—2466.
- [11] 诸骏伟. 电力系统分析 [M]. 北京:水利电力出版社, 1995.

作者简介:

肖俊 (1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制;

李兴源 (1945—), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作;

杨小兵 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2009—05—10)

通过变压器电容式套管末屏获取过电压信号的方法

明志强, 许 虎

(南充电业局, 四川 南充 637000)

摘 要: 电网过电压是影响电网安全的重要因素。对电网过电压进行在线监测, 实时获取电网过电压波形及其特征参数, 对分析电网事故原因、改进电网绝缘配合等方面具有十分重要的指导作用。现有的过电压在线监测系统多采用高压分压器来获取电压信号, 但是, 由于高压分压器自身特性, 限制了其在更高电压等级电网下的应用。针对这一问题, 提出了一种利用安装在变压器电容式套管末屏的特制电压传感器组成套管分压系统, 从电容式套管的末屏抽头处获取电压信号的过电压在线监测实现方案。

关键词: 电网; 过电压; 套管; 在线监测; 电压传感器

Abstract: Overvoltage is a critical factor influencing the security of power grid. It is necessary to carry out online monitoring of overvoltage in power grid and obtain the waveform and characteristic parameters of overvoltage which is very helpful in analyzing the power grid accident and improving the insulation cooperation. Most of the existing overvoltage monitoring systems adopt the divider to obtain signal. But for the reasons of the deficiencies of the divider, its application under higher voltage grade is limited. Aiming at this problem, the key technologies of overvoltage online monitoring system are studied systematically and a method that using a special designed voltage sensor which is installed at the tap of bushing to obtain the voltage signal from the power grid is presented. Also a new type of overvoltage monitoring system model machine based on this method is developed.

Key words: power grid; overvoltage; bushing; online monitoring; voltage sensor

中图分类号: TM531 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)04—0065—04

1 当前过电压监测存在的问题

电力系统中的过电压类型多种多样, 其产生原因和危害也各不相同。当出现过电压事故时, 虽然电力系统中安装了大量的故障录波装置, 但由于过电压信号往往幅值高、陡度大、持续时间短, 而故障录波器的电压信号通常取自电磁式电压互感器, 由于铁磁饱和, 频率特性比较差, 无法获取电网过电压的真实信息, 无法满足暂态过电压的测量要求。

由于没有有效的过电压监测手段, 难以快速准确记录电网过电压发生、发展过程, 无法获取事故发生时的过电压特征, 严重制约了对事故原因的准确分析。

目前对于电网过电压的机理研究以及系统绝缘配合的确定绝大部分都是采用电磁暂态数值仿真的方法, 仿真中的系统设备的数学模型是在一定的简化基础上建立起来的, 模型过于简单, 不能真实地反映电网实际的波过程。

2 套管电压传感器的结构和基本原理

套管是用来把电流引入或引出变压器、断路器、电容器或其他电器设备的金属外壳的设备, 也用于导体或母线穿过建筑物或墙壁 (电站用套管)。

电容式套管是目前高压、超高压系统中最常用的型式。电容式套管的绝缘采取内绝缘与外绝缘相结合的结构, 电容套管的导杆常采用铜杆或铜管。通常的油纸电容式套管的电容芯子以电缆纸浸以矿物油为绝缘, 在导杆上包以多层绝缘, 在层间按设计所要求的位置上夹有铝箔, 其等效电路为一串同轴圆柱形电容器串联, 其电容量大小主要受到环境温度、介质间绝缘强度、局部放电等因素影响, 正常情况下其值变化不大。

套管末屏电压传感器安装于变压器电容式套管末屏测量抽头处, 传感器的安装示意图如图 1 所示。

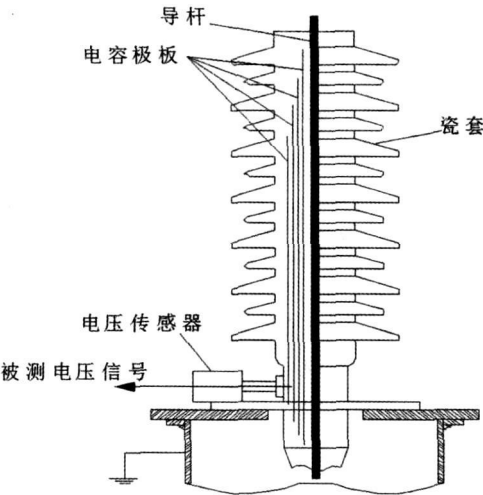


图 1 套管末屏电压传感器安装示意图

套管末屏电压传感器电路原理图如图 2 所示。图中 C_s 为分压电容, R_s 为分压电阻, R_p 为匹配电阻, PS 为保护单元。

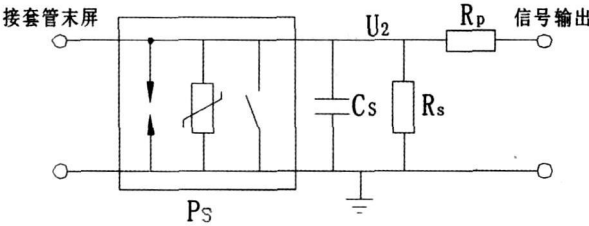


图 2 套管末屏电压传感器电路原理图

图 3 为传感器结构示意图。传感器由分压单元、保护单元以及信号传输电缆接口等几部分组成。分压单元由分压电容和分压电阻组成, 分别构成电路高频响应和低频响应通路。为了减小分压单元元件与输出回路之间的磁耦合, 最大限度地减少残余电感对传感器响应特性的影响, 传感器结构采用了同轴圆柱结构。匹配电阻穿过传感器中心与信号传输电缆接口连接。阻容分压元件并联连接, 并沿圆周对中心均匀对称排列。整个传感器最外层为金属外壳, 通过接地的金属外壳实现对核心部件的电磁屏蔽。

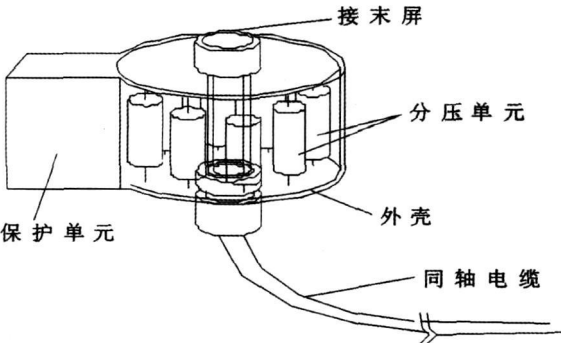


图 3 套管末屏电压传感器结构示意图

为了简化分析, 将电容式套管以纯电容来等效。图 4 为整个系统电路模型, 图中 C_1 为套管主电容, C_2 为电压传感器等效分压电容, R_1 为套管导杆对末屏绝缘电阻, R_2 为等效分压电阻, C_1 、 C_2 、 R_1 、 R_2 共同构成一个电容分压电路, 由于套管绝缘电阻 R_1 和分压电阻 R_2 通常很大, 且测量单元电路的输入阻抗为兆欧级, 为分析方便, 可采用图 5 简化电路模型。

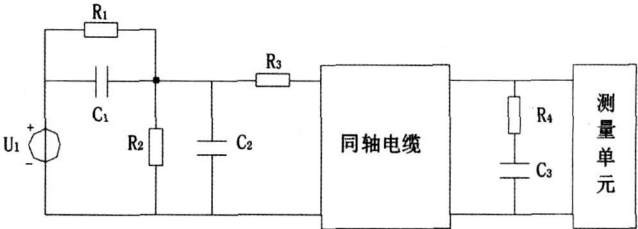


图 4 系统电路模型

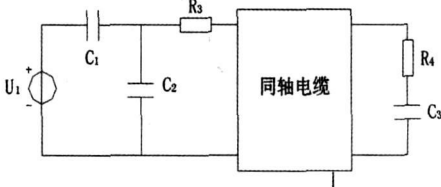


图 5 系统电路简化模型

图 5 中, 同轴电缆的匹配采用首末两端匹配。 R_3 、 R_4 为匹配电阻, 其阻值均等于电缆波阻抗 Z 。 C_e 为电缆的分布电容。由于 C_e 很小, 约几千 pF, 故可以忽略。进入电缆的波为

$$U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2} \frac{Z}{Z + R_3} = U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2} \frac{Z}{Z + Z} = \frac{1}{2} \frac{C_1 U_1}{C_1 + C_2} \quad (1)$$

同轴电缆末端连接 R_4 、 C_3 , R_4 等于电缆波阻抗 Z , $C_3 \approx C_2$, 由于进入波到达末端时不发生反射, 故初始分压比为

$$\frac{U_1}{U_2} \Big|_{t=0} = \frac{2(C_1 + C_2)}{C_1} \quad (2)$$

到达稳定后的最终分压比为

$$\frac{U_1}{U_2} \Big|_{t=\infty} = \frac{(C_1 + C_2 + C_3 + C_e)}{C_1} \quad (3)$$

电路中选择 $C_1 + C_2 = C_3 + C_e$, 可得电路的初始分压比等于最终分压比。

为保证套管末屏回路在运行中不会断开, 同时抑制系统有害过电压对二次侧系统的侵入, 为此在传感器上设计了一个保护单元电路, 保证在传感器发生故障时, 钳制测量端子上的电压保持在安全范围内, 保护单元可靠动作, 使末屏可靠接地。

保护单元采用压敏电阻、放电管和继电器共同组成的混合保护电路。

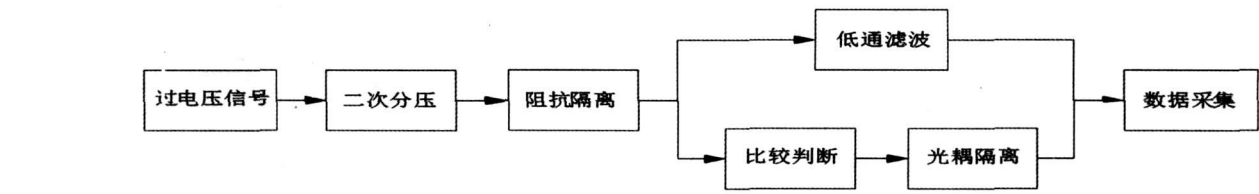


图 6 过电压在线监测数据采集系统原理框图

3 过电压采集的方法和原理

电压传感器安装于 110 kV 电容式套管末屏测量抽头处,当过电压信号到来时,首先传感器将高压的过电压信号变换为对应的低压信号,通过同轴电缆传送到信号处理前置电路,前置电路对传感器输出的信号进行必要的调理后,将输出的信号送至数据采集卡进行采集。整个过电压数据采集系统主要由信号调理电路、触发电路、保护单元控制电路、数据采集卡以及相应的采集软件组成,其组成原理框图如图 6 所示。从传感器输出的信号经过二次分压电路分压后,分成两路,一路通过阻抗隔离输入到数据采集通道;另一路进入触发电路,输入到比较逻辑电路,再通过高速光耦隔离后输入到采集单元的触发通道以便启动采样。只要有任一相电压超过预先设定的电压阈值,采集电路就开始采样。

3.1 二次分压电路

二次分压的作用是将输入的较大幅值信号按比例减小。二次分压的要求是有足够宽的幅值调节范围与频率范围、准确的分压系数和高值且恒定的输入阻抗,信号经过二次分压后不产生非线性失真。为达到上述基本要求,采用了阻容补偿式二次分压网络,其基本结构如图 7 所示。

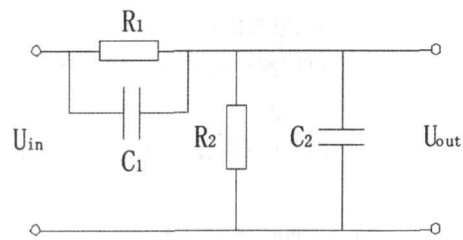


图 7 二次分压电路基本结构

图 7 中 C_1 为提升电容, C_2 为延迟电容,当 $C_1 R_1 < C_2 R_2$ 时,输出波形仍出现边沿局部变坏的现象,当 $C_1 R_1 > C_2 R_2$ 时,输出波形出现过冲,说明 C_1 的加速作用超过了 C_2 的延迟作用。如果 C_1 的数值调整得合适,则加速作用和延迟作用互相抵消,达到最佳补

偿。要得到最佳补偿效果,就必须使输出波形的初始值 $U_{out}(0^+)$ 和稳态值 $U_{out}(\infty)$ 相等。

$$U_{out}(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{in} \tag{4}$$

式 (4) 表示稳态时,电路输出表现为电阻分压的结果。输出电压初始值 $U_{out}(0^+)$ 的确定:当信号加入瞬间,电容呈短路,电流主要通过 C_1 和 C_2 并对 $U_{out}(0^+)$ 分压,因为在跳变的瞬间流过 C_1 和 C_2 的电流相等,两者所充的电荷也相等,即:

$$Q = C_1 U_1(0^+) = C_2 U_{out}(0^+) \tag{5}$$

按回路电压定律:

$$U_{in} = U_1(0^+) + U_{out}(0^+) \tag{6}$$

得

$$U_1(0^+) = \frac{C_2}{C_1} U_{out}(0^+) \tag{7}$$

于是有

$$U_{out}(0^+) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_{in} \tag{8}$$

式中, $\frac{C_1}{C_1 + C_2}$ 为电容分压比,若稳态值 $U_{out}(\infty)$

和初始值 $U_{out}(0^+)$ 相等,则必使电阻分压比和电容分压比相等,即:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \tag{9}$$

$$C_1 R_1 = C_2 R_2 \tag{10}$$

只有满足 $C_1 R_1 = C_2 R_2$ 时,二次分压后信号才可能不失真。

3.2 触发电路

触发电路是将调理电路的输出信号与预先设定的触发电平进行比较,判断电网是否出现过电压,以便能实时启动采集单元进行数据采集。由于电网过电压信号的随机性,事先无法确定发生过电压的极性,因此触发电路采用了双比较器组成窗口检测电路,实现不同极性过电压的触发判断。触发电路原理图如图 8 所示。

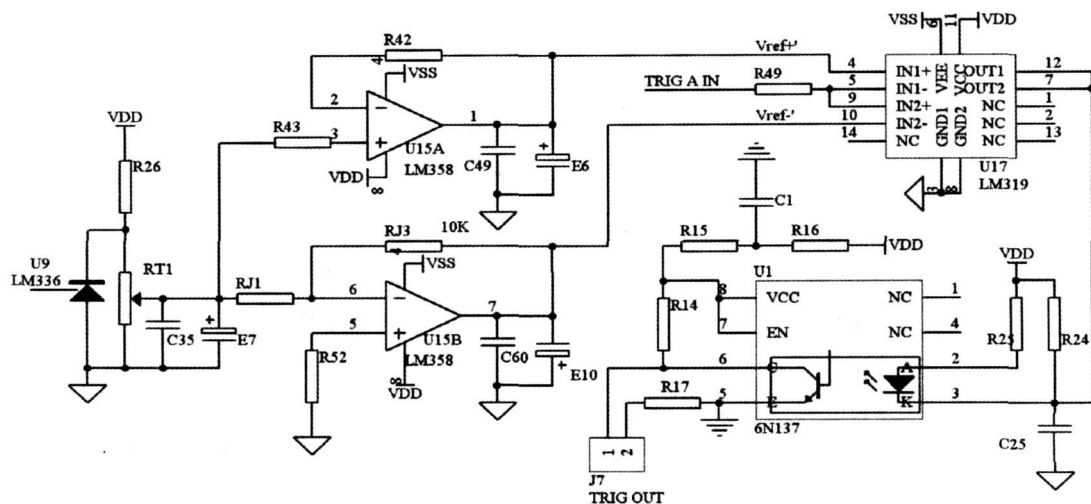


图 8 触发电路原理图

4 结 论

在总结国内外过电压在线监测领域已有研究成果,分析现有技术所存在的不足之处的基础上,针对高压电网过电压在线监测系统的关键技术进行了研究,提出了一种基于套管电容分压的高压过电压在线监测系统整体设计方案和实现方法,为进一步提高过电压信号实时监测手段做了有益的探讨。

参考文献

- [1] 孙才新,司马文霞,赵杰,等.特高压输电系统的过电压问题[J].电力自动化设备,2005,25(9):5-9.
- [2] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.

- [3] 胡学浩.美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J].电网技术,2003,27(9):1-6.
- [4] 葛睿,董昱,吕跃春.欧洲“11.4”大停电事故分析及对我国电网运行工作的启示[J].电网技术,2007,31(3):1-6.
- [5] 王梦云,薛辰东.1995~1999年全国变压器类设备事故统计与分析[J].电力设备,2001,2(1):11-19.
- [6] 关根志.高电压工程基础[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [7] 赵自刚,赵春雷.国产故障录波器现状分析及新型录波器展望[J].电网技术,1999,23(3):44-47.
- [8] 姚陈果,孙才新,王士彬,等.配电网过电压在线监测系统的设计与实现[J].电力系统自动化,2004,28(9):74-76.

(收稿日期:2009-03-10)

(上接第 51 页)

经逻辑判别作用于保护装置跳闸。电弧光保护系统由主单元、辅助单元和弧光传感器 3 部分组成。采用弧光做为主判据、过流为辅判据,能以最快速度切除故障回路,减少设备财产的损失,保护工作人员的人生安全^[7]。

(2)通过在 35 kV 元坝变电站、35 kV 羊木变电站、35 kV 中子变电站电弧光保护系统试运行,在试运行中整个系统软、硬件系统全部投入运行的情况下,对其进行了全面考查、监测和记录,运行实践证明,电弧光保护系统的运行稳定、可靠,未发生过误动、误发信号或通信中断等影响运行的现象。全部性能均已满足要求,通过在电弧光保护可应用于中低压母线保护、电缆保护、箱式变电站保护等多个领域。

参考文献

- [1] 王维俭.电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2001.
- [2] 王梅义.高压电网继电保护运行与设计[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [3] 刘介才.工厂供电(第4版)[M].北京:机械工业出版社,2004.5.
- [4] <http://www.aptechina.com/club/showtopic-64915.html>
- [5] Study and Application of Arc Protection Relay 电力勘测设计 Electric power survey Design
- [6] The Arc Protection syetem and Its Application to the Internal Fault of Switchgear and the Busbar
- [7] 王唯之.高压开关技术通讯[M].北京:中国电力出版社,2004.

(收稿日期:2009-03-09)

浅析输电线路通过综合治理取得的防雷效果

张廷碧¹, 彭力健², 刘启俊³

(1 广元电业局线路工区, 四川 广元 628000; 2 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072;
3 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:统计了广元电业局历年来输电线路雷击跳闸率, 采取的防范措施以及取得的防雷效果。

关键词:输电线路; 雷击跳闸; 综合治理; 防雷

Abstract The statistics of lightning trip-out rates of transmission line of Guangyuan Electric Power Bureau over the years are carried out. The adopted precautionary measures and the obtained effect of protection against lightning are introduced.

Key words transmission line; lightning trip-out; comprehensive control; protection against lightning

中图分类号: TM753 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0069-03

广元地区地处龙门山脉、秦岭山脉之间, 该地区山峦起伏, 系典型的高山大岭、山地地形。广元电网穿越崇山峻岭, 地质情况复杂、土壤电阻率较高, 近年来雷电活动较为频繁, 电网防雷越来越突出。输电线路防雷更是防雷工作的薄弱环节和难点, 在雷雨季节, 线路频繁跳闸, 雷击绝缘子、导线现象屡次发生。对此, 广元电业局领导高度重视防雷工作, 矢志坚持“安全第一, 预防为主, 综合治理”的方针, 前几年投入了不少精力和资金, 采取了一些相应的常规措施, 地网的测试、开挖部分杆塔接地网, 线路零、低值绝缘子的定期检测, 对部分杆塔加装了线路氧化锌避雷器。但尽管如此, 由于广元地区防雷工作特殊性, 雷电活动频繁 (见表 1) 以及资金的制约, 致使防雷效果不尽人意, 防雷现状不容乐观 (见表 2 至表 4)。

从近年来看线路雷击跳闸情况足以说明, 线路雷击跳闸率居高不下。为加强输变电设备的防雷管理工作使防雷工作管理规范化、标准化, 不断提高输

表 3 2003~2006 年 220 kV 线路雷击跳闸率统计表

年份	跳闸次数 (次)	线路长度 (km)	跳闸率 (次/百公里·年)	备注
2003	1	420.698	0.237 7	
2004	1	420.698	0.237 7	
2005	1	420.698	0.237 7	
2006	2	460.239	0.869 0	

变电设备的防雷水平, 国家电网公司制定了《国家电网公司输变电设备防雷工作管理规定》, 四川省电力公司制定了《四川电网防止雷过电压事故措施的实施意见》、《关于开展输电线路杆塔接地网专项整治工作的通知》、《输电线路专项整治工作的实施意见》的有关防雷工作规定。广元电业局积极贯彻上级有关防雷管理规定, 上报了《广元电网综合防雷研究报告》, 四川省电力公司在防雷工作中投入了大量人力、物力、资金, 广元电业局结合广元地区不同地段、地势气象条件及雷击跳闸情况, 采取了以下有针对性的防雷综合治理。

1 综合治理措施

1.1 杆塔接地电阻普查和整治

对广元电业局管辖的 35~220 kV 输电线路 1 970 基杆塔接地电阻进行了测试, 开挖检查 394 基杆塔接地网, 坚持“边普查(查)、边整改、边分析”的原则, 针对输电线路运行维护工作和普查(查)中发现的杆塔接地方面存在的缺陷, 进行了修复完善。修复整治了 220 kV 线路 244 基、110 kV 线路 498 基、35

表 1 广元地区 2003~2006 年雷电活动情况统计表

	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年
雷电开始时间	5 月 4 日	4 月 23 日	4 月 8 日	4 月 11 日
雷电结束时间	9 月 18 日	8 月 16 日	10 月 20 日	9 月 4 日
雷电日数	35	30	32	40

表 2 2003~2006 年 110 kV 线路雷击跳闸率统计表

年份	跳闸次数 (次)	线路长度 (km)	跳闸率 (次/百公里·年)	备注
2003	3	624.014	0.96	
2004	6	624.014	0.48	
2005	9	624.014	1.44	
2006	17	634.109	2.68	

kV 线路 407 基杆塔接地网 (体), 对无避雷线保护的 35 kV 线路, 全部安装了 $\Phi 12$ 圆钢从金属横担直接引下接地, 接地电阻降低在 $30\ \Omega$ 以下。对于运行时间较长的水泥杆塔, 采取了从杆顶直接采用引下线与接地体相连的办法。杆塔接地网 (体) 普查和整治工作, 达到了降低杆塔接地电阻目的, 实现了大幅降低输电线路雷击跳闸率, 提高输电线路雷雨季节安全运行可靠性, 降低了输电线路运行成本。

表 4 110~500 kV线路耐雷水平与杆塔接地电阻的关系													
电压等级 (kV)	110				220				500				
接地电阻 (Ω)	7	15	30	50	7	15	30	50	7	15	30	50	
耐雷水平 (kA)	63	41	24	16	110	76	48	32	177	125	81	55	
相对危险因素	1.0	1.8	2.8	3.5	1	2.5	5.1	7.7	1	3.9	12.1	24.1	

表 5 110 kV 及以下的输电线路杆塔接地电阻值					
名称	数值				
土壤电阻率 ≤ 100 ($\Omega \cdot m$)	100~500	500~1 000	1 000~2 000	>2 000	
接地电阻 (Ω)	10	15	20	25	30

表 6 220 kV 及以下的输电线路杆塔接地电阻值					
名称	数值				
土壤电阻率 ≤ 100 ($\Omega \cdot m$)	100~300	300~500	500~1 000	1 000~2 000	>2 000
接地电阻 (Ω)	5	10	12	15	20

表 7 110 kV 三木南线接地电阻整治前后数据统计										
序号	杆塔编号	杆塔型号	土壤类型	整治前的接地电阻值 (Ω)		整治后的接地电阻值 (Ω)				备注
1	7	耐张塔	土夹石	A: 30	C: 30	A: 2.3	B: 2.3	C: 2.3	D: 2.3	二点改四点
2	8	直路塔	土夹石	A: 20	C: 20	A: 1.5	B: 1.5	C: 1.5	D: 1.5	二点改四点
3	9	耐张杆	土夹石	A: 18	B: 18		A: 4.8	B: 4.8		
4	10	耐张塔	土夹石	A: 33	C: 33	A: 4.5	B: 4.5	C: 4.5	D: 4.5	二点改四点
5	11	直路塔	土夹石	A: 25	C: 25	A: 5.6	B: 5.6	C: 5.6	D: 5.6	二点改四点
6	12	直路塔	土夹石	A: 35	C: 35	A: 3.8	B: 3.8	C: 3.8	D: 3.8	二点改四点
7	13	直路塔	土夹石	A: 28	C: 28	A: 6.2	B: 6.2	C: 6.2	D: 6.2	二点改四点
8	15	直路铁柱	土夹石	A: 15	B: 15		A: 6.2	B: 6.2		
9	17	直路铁柱	土夹石	A: 19	B: 19		A: 2.9	B: 2.9		
10	22	直路杆	土夹石	A: 21	B: 21		A: 3.2	B: 3.2		
11	23	三连杆	土夹石	A: 26	B: 26		A: 4.5	B: 4.5		
12	25	直路铁柱	土夹石	A: 31	B: 31		A: 5.9	B: 5.9		
13	26	直路铁柱	土夹石	A: 24	B: 24		A: 6.6	B: 6.6		
14	27	直路塔	土夹石	A: 23	C: 23	A: 6.5	B: 6.5	C: 6.5	D: 6.5	二点改四点
15	28	直路单杆	土夹石		18			4.8		
16	30	直路铁柱	土夹石	A: 17	B: 17		A: 3.1	B: 3.1		
17	31	耐张杆	土夹石	A: 18	B: 18		A: 4.2	B: 4.2		
18	32	直路杆	土夹石	A: 26	B: 26		A: 5.3	B: 5.3		
19	33	直路杆	土夹石	A: 29	B: 29		A: 6.0	B: 6.0		
20	34	直路塔	土夹石	A: 27	C: 27	A: 4.7	B: 4.7	C: 4.7	D: 4.7	二点改四点

备注: 110 kV 三木南线土壤电阻率均在 $500\sim 1\,000\ \Omega \cdot m$ 范围内。

1.2 降低杆塔接地电阻

降低杆塔的接地电阻通常是提高线路耐雷性能最经济的方法。当杆塔型式尺寸与绝缘子型式和数量确定后, 影响线路反击耐雷水平的主要因素是杆塔接地电阻值。降低杆塔接地电阻是 110 kV 及以上电压等级线路基本的反击雷害措施。按照 1997 年电业行业标准 (规程) DL/T 620—1997《交流电气装置过电压保护和绝缘配合》中的 110~500 kV 线路的杆塔尺寸和绝缘子的 50% 雷电冲击绝缘水平对不同杆塔接地电阻计算出各自耐雷水平见表 4。

由表 5 可见, 对于各种电压等级而言, 线路耐雷水平随杆塔接地电阻的增加而降低, 对于三种电压等级, 接地电阻由 $7\ \Omega$ 增至 $50\ \Omega$ 时耐雷水平分别降至前者的 50%、29% 和 31%。广元电业局结合四川省电力公司防雷反措有关条款和契机, 在运行线路中做好了地质、地势调查, 测试杆塔周围的土壤电阻率、接地电阻值。如表 5、表 6 规定, 降低接地电阻值。例如: 广元电业局 110 kV 三木南线接地电阻整治前后的数据表 7、表 8 以及该线路雷击跳闸情况统计数据表 9 来看, 充分显示了通过降低杆塔接地电阻, 提高了线路耐雷水平。

1.3 加装线路避雷器

表 8 110 kV 三木南线接地电阻整治前后雷击跳闸情况统计

序号	跳闸时间	简 况	备注
1	2005. 06. 30	重合成功,通过登塔检查发现 47 号三联铁柱 C 相绝缘子遭雷击而炸裂,由于引流线作用,导线未掉地	整治前
2	2005. 07. 17	重合未成功,登塔检查发现 79 号耐张杆塔 A 相、92 号 A 相、93 号 B 相、96 号 A 相及 B 相绝缘子遭雷击。	整治前
3	2005. 07. 18	重合成功,登杆检查发现 55 号直线杆塔 C 相绝缘子遭雷击。	整治前
4	2006. 07. 03 01:22	重合成功,登杆检查发现 74 号直线杆塔 C 相绝缘子遭雷击。	整治前
5	2006. 07. 03 0:44	重合成功,登杆检查发现 76 号耐张杆塔 A 相绝缘子遭雷击。	整治前
6	2006. 07. 03 03:14	重合成功,登杆检查发现 72 号耐张杆塔 A、B、C 三相绝缘子遭雷击。	整治前
7	2006. 07. 22 01:58	重合成功,登杆检查发现 16 号直线杆塔 B 相绝缘子遭雷击。	整治前
8	2006. 07. 14 07:34	重合成功,登杆检查发现 41 号直线铁柱 B、C 相绝缘子遭雷击	整治前
9	2006. 07. 22 02:38	重合成功,登杆检查发现 21 号直线杆塔 A 相绝缘子遭雷击。	整治前
10	2006. 07. 31 05:29	重合成功,登杆检查发现 76 号耐张杆塔 A 相绝缘子遭雷击。	整治前
11	2006. 08. 28 02:44	重合不成功,通过登塔检查发现 49 号三联铁柱 B 相绝缘子遭雷击而炸裂,由于引流线作用,导线未掉地。	整治前
12		110 kV 三木南线接地电阻整治后, 2007 年未出现因雷击引起开关跳闸。	整治后

为了减少线路的雷击事故,提高供电可靠性,广元电业局从 1998 年开始安装线路避雷器,分别安装在雷电活动强烈的 35~220 kV 线路上,经过 9 年的运行,安装了线路避雷器的杆塔未因雷击开关跳闸。根据其运行经验支持的易击段、易击点、多雷区双回易击点的一回线路上,2006~2007 年安装线路避雷器 42 组,从动作次数及线路跳闸率分析,真正达到了保护线路、降低跳闸率的目的。

1.4 采用同塔双回不平衡绝缘

在同杆双回的线路中也有采用不平衡绝缘方式以达到降低双回线路同时跳闸的概率,但无法消除同时跳闸事故。同杆双回的线路因导线垂直排列,杆塔较高,线路反击耐雷水平一般比同电压等级导线水平排列的线路低,当雷电流足够大时,可能会产生同塔双回线路的绝缘子相继反击,造成双回线路同时跳闸。国内曾有研究表明:不平衡绝缘方式下双回线路同时闪络的概率较目前平衡绝缘方式均有所降低,杆塔接地电阻越小,不平衡绝缘防止双回线路同时闪络跳闸的效果越好,冲击接地电阻小于 7 Ω,同时闪络的概率可降低 86%,冲击接地电阻 30 Ω 时可降低 74%。如表 9 所示,由于目前还没有冲击电阻测试仪器,仅能以理论值校核。

表 9 雷击塔顶时线路绝缘闪络概率

冲击接地电阻 (Ω)	平衡绝缘 第 1 回第 2 回	不平衡绝缘 第 1 回第 2 回	效果 [(2)-(1)/(1)]
7	0.20 0.14	0.20 0.019	-86.4
15	0.33 0.27	0.33 0.066	-75.6
30	0.48 0.42	0.48 0.11	-73.8

研究结果显示,在同杆双回线路的一回线路上增加绝缘子确可令双回线路同时跳闸的概率降低,但无

法完全消除同时跳闸事故。广元电业局结合输电线路运行经验,在 110 kV 三木南线、三木北线同塔双回的线路中采用不平衡绝缘方式以达降低双回线路同时跳闸的概率,在 110 kV 三木北线增加了一片绝缘子,根据广元电业局 2007 年输电线路跳闸统计,110 kV 三木南线、三木北线未出现开关同时跳闸。

2 综合治理取得的防雷效果总结

2006 年底至 2007 年初,广元电业局加大人力、物力、财力对管辖的输电线路进行了综合治理,采用了杆塔接地电阻普查和整治、降低杆塔接地电阻、加装线路避雷器、不平衡绝缘针对性防雷措施,如表 10 所示。

表 10 2007 年 110~220 kV 线路雷击跳闸率统计表

电压等级 (kV)	跳闸次数 (次)	线路长度 (km)	跳闸率 (次/百公里·年)	备注
110	3	743.902	0.403	
220	1	460.239	0.217	

雷击跳闸率显著下降,充分展现了输电线路通过综合治理取得的防雷效果,降低了雷击跳闸率,提高了输电线路耐雷水平,确保了电网的供电可靠性和安全运行。

参考文献

[1] 杜澍春. 高压输电线路防雷保护的若干问题 [J]. 电力设备, 2001, (1): 40-44.
[2] DL/T 620-1997, 交流电气装置过电压保护和绝缘配合.
[3] 四川省电力公司. 四川电网防止雷过电压事故措施的实施意见 [R]. 2005.

(收稿日期: 2009-01-23)

光电互感器在变电站数字化间隔中的应用

郭先平, 李 倩, 许 诺

(自贡电业局电能计量中心, 四川 自贡 643000)

摘 要:介绍了光电式电流电压互感器的优特点与基本原理, 及其在变电站数字化间隔中的应用。

关键词:光电式互感器; 工作原理; 变电站数字化

Abstract: The strong points and characteristics of optical current transformer its basic principle and its application to digital bay of substation are introduced.

Key words: optical transformer; working principle; substation digitalization

中图分类号: TM76 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)04—0072—03

随着科学技术的发展, 网络技术的普及, 数字化技术成为当今科学技术发展的前沿, 变电站数字化对进一步提升变电站综合自动化水平将起到极大促进作用, 是未来变电站建设的发展方向。把光电互感器用于变电站改造, 使传输信号向数字化、微机化发展, 提高信号传输的抗干扰性已经成为人们关注的热点话题。光电互感器的出现, 克服了传统互感器绝缘复杂; 重量重、体积大; TA 动态范围小、易饱和; 电磁式 TV 易产生铁磁谐振; TA 二次输出不能开路等诸多缺点。光电互感器体积小、重量轻; TA 动态范围宽、采取光学传感原理; 无铁心、无二次线圈、无磁饱和; 绝缘子采用干式结构, 内置光纤, 真空灌注绝缘硅脂, 固化后绝缘子内部无气隙; 数字化输出, 满足数字化变电站的要求。光电互感器传输中用光缆代替了电缆, 从根本上解决了互感器在电流、电压信号传输过程中所产生的附加误差, 有利于变电站实现数据共享, 能够满足更高程度变电站自动化需求。因此, 光电互感器代替传统的电磁互感器, 对实现数字化变电站的建设和改造具有深远意义。

1 光电互感器的基本原理

1.1 光电电流互感器工作原理和结构

根据高压部分有无供电电源, 可将光电互感器分为有源式和无源式两种。由于技术及材料限制, 目前广泛采用的是有源式光电互感器。

有源式光电电流互感器是利用空心线圈或带铁心的线圈采样电流信号, 然后通过光纤把采样到的信

号传送到低压侧的数据处理系统, 由于带铁心的线圈的固有缺点, 所以现在通常采用空心 Rogowski 线圈作为电流采样线圈, 被测电流从线圈中心穿过, 由电磁感应二次线圈中得到电压信号, 这种传感器可达到 0.1% 的测量精度。由于没有铁心, 不存在铁磁饱和问题, 测量范围几乎不受限制, 图 1 为 Rogowski 线圈的结构示意图。

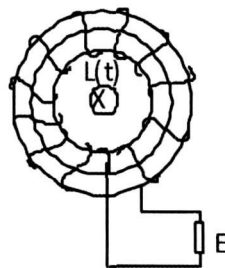


图 1 Rogowski 线圈

另外, Rogowski 线圈是靠电磁感应原理来测量电流的, 较强的外磁场将对其二次绕组和测量回路产生干扰, 故需要屏蔽罗氏线圈, 以减小测量误差。

1.2 光电电压互感器的原理

光电式电压互感器采用电阻分压方式, 由高压臂电阻、低压臂电阻、屏蔽电极、过电压保护装置组成。如图 2 所示。

通过分压器将一次电压转换成与一次电压和相位成比例的小电压信号。采用屏蔽电极则可改善电场分布和杂散电容的影响; 在二次输出端并联一个过电压保护装置, 是为了防止二次输出端开路时的二次侧电压升高, 对人身和连接设备造成损害。光电式电压互感器也可采用电容 (阻容) 分压原理的方式, 在

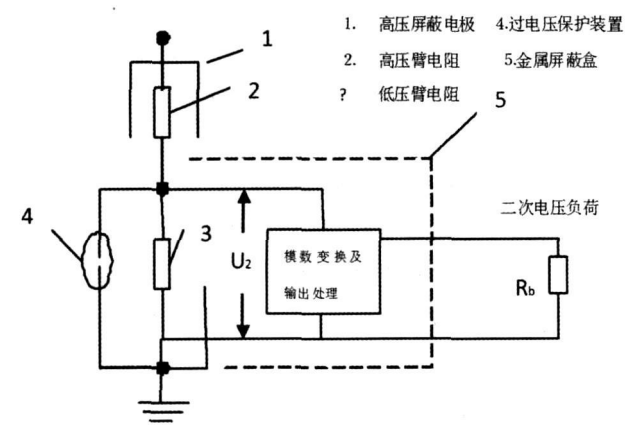


图 2 光电式电压互感器原理

结构上主要将高压臂电阻换成特殊的高压电容。

光电式电压互感器是一种全电压、单晶体的光学互感器,通过电极直接把高压加到晶体两端,区别于采用分压方式的部分光学电压互感器,也不同于利用测量电流来间接测量电压的互感器,是一种合理全新的高压测量方式。

2 光电互感器在变电站数字化间隔中的应用

国际上数字化变电站的建设思路已经得到了广泛的认可,数字化的测量设备光电互感器已进行了多年的研究和应用,并且国际电工委员会以 IEC 60044—7 (1999) 电子式电压互感器和 IEC 60044—8 (2002) 电子式电流互感器正式颁布标准。国际电工委员会通过多年的努力制定出整套数字化变电站的统一建模协议 IEC 61850。

中国也在数字化变电站的发展领域内做了很多

尝试和大量实质性工作。目前,中国的光电式互感器和智能化开关设备已在高电压等级的变电站进入了应用研究阶段,并经过一定时间的挂网运行检验。国内电力设备制造行业(特别是二次设备)的数字化研制工作也进入了研究应用阶段,因此,已有条件进行全数字化变电站建设。

2.1 自贡电业局光电互感器的应用

2008 年,自贡电业局 220 kV 舒平变电站和 500 kV 洪沟变电站两端之间的 220 kV 洪舒南线路上将实施变电站数字化间隔。整个项目实施方案由一条 220 kV 输电线路两侧的两个数字化间隔及光纤通讯组成。图 3 为数字间隔框架。

该数字间隔可分为 3 个部分:传感器部分,负责对电流、电压的测量并以数字形式输出,本项目采用能够全保真反映一次被测量的光学电流、电压互感器;合并单元部分,首先负责对同一间隔内各传感器进行统一协调、控制,完成间隔内的同步采样,其次对间隔内各采样信息进行整合、排队,间隔数据帧通过以太网传递给二次设备,大大简化了过程层与间隔层二次设备间的接口;数字二次设备部分,通过网口接收来自合并单元的本间隔信息,包括数字计量装置、数字保护装置、数字录波装置。项目中涉及到的所有设备须经过有关部门的测试。

改造工作在不影响系统运行和保证安全的前提下进行,施工应具备完善的组织、技术及安全措施。并满足各项技术及反措要求,采取并列运行的方式,即不改变原间隔的所有配置,新增设备独立于原系统之外,微机保护只发信号而不跳闸。项目完成

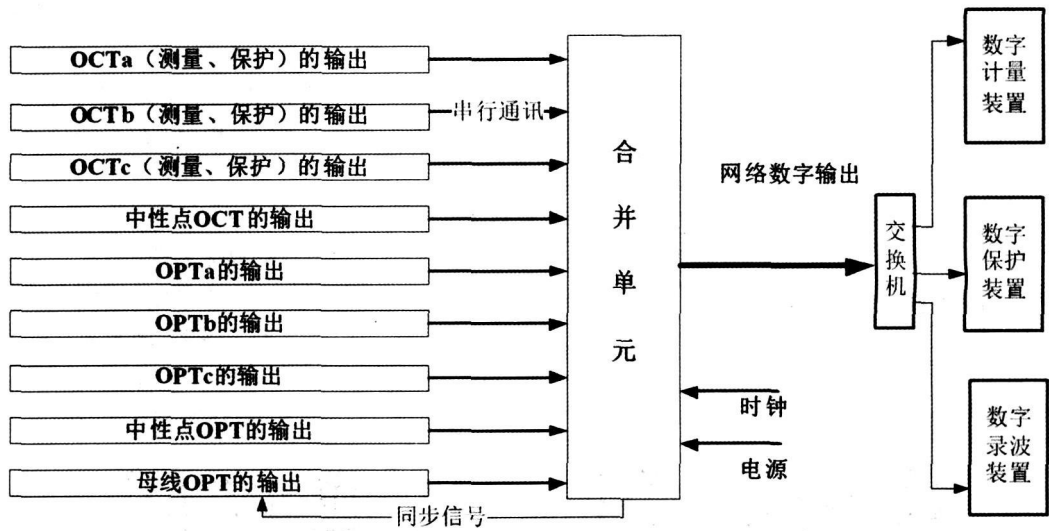


图 3 数字化间隔框架

后,该数字间隔与将来应用到数字化变电站的数字间隔相比,一没有建立与变电站层的垂直通信;二没有建立不同间隔间保护等二次设备间水平通信;三没有引入开关设备的相关信息。所以称之为相对比较完整的数字间隔。

2.2 应用中遇到的问题及解决方法

变电站数字化研究采用光电式电流互感器、光电式电压互感器,并通过在原有一次设备上加装智能单元,使变电站的信息采集、传输、处理、输出过程全部数字化。并按 IEC61850 协议建模,实现运行状态数字化的全数字化变电站。因此,光电互感器试验阶段及挂网运行的初级阶段中难免会遇到一些技术问题。

(1)温度的影响:当温度发生变化时,由于传感头内晶体、粘胶和电极受热膨胀系数不同,从而会影响光电互感器的温度稳定性,进而会影响光电互感器的测量精度。目前的解决办法包括提高传感头的加工工艺,选择没有热光效应的晶体,以及采用双光路检测等工艺和技术手段。

(2)电源供给:有源光电电流互感器需要有电源供应才能够正常运行。因此,如何解决高压侧的电源问题是有源光电电流互感器的一个难点。目前,主要

有 3 种解决的方法:①由母线电流的电磁感应产生;②由低压侧将电能表转换成光能,然后通过光纤将能量传输到高压侧;③在高压侧用电池解决。

2.3 方案实现

2.3.1 一次系统实施方案

根据项目方案,项目最终实施结果见图 4。

其中一次部分包括:三相光学电流互感器、三相电压互感器、连结控制屏与互感器之间的 48 芯通讯光缆一根。

2.3.2 二次系统实施方案

二次部分包括:光学电流互感器二次信号处理箱、光学电压互感器二次处理箱、合并单元与数字计量装置箱、数字保护箱、数字录波箱和辅助电源、屏柜 1~2 个,视具体情况而定。

3 结束语

通过光电互感器的应用,给电力系统的测量、保护领域带来巨大的变革,全面提升智能化水平。尽管光电互感器存在着加工工艺高、干扰等问题,但是,随着科学技术的进步,随着生产工艺的提高以及电力生产自动化的需要,光电互感器必定取代传统互感器,并为中国变电站设备迈进数字化提供宝贵的实践经验。

参考文献

- [1] Chris D. Reinbold application of optical current and voltage sensing. Electric Utility Conference Subject VII - 1, 1997.
- [2] Las H. Christensen Design and test of a passive optical prototype high voltage instrument transformer IEEE Trans PD, 1995, 10(3): 1332
- [3] 刘晔,王采堂,苏彦民,等.电力系统适用光学电流互感器的研究新进展[J].电力系统自动化,2000,24(17): 60-64.

作者简介:

郭先平(1974—),女,从事电能表校验工作。

李倩(1981—),女,从事互感器校验工作。

许诺(1978—),男,从事电能表校验工作。

(收稿日期:2009-01-05)

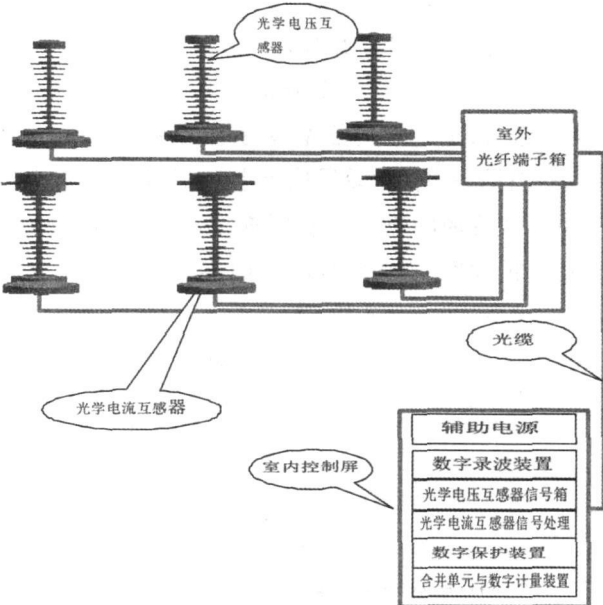


图 4 项目最终实施结构图

欢迎投稿

欢迎订阅

变压器套管事故的分析及预防

欧居勇, 付东丰, 陈 芃

(四川省电力公司资阳公司, 四川 资阳 641300)

摘 要:近年来由变压器套管的原因而引发的变压器故障时有发生, 由套管制造质量不良导致变压器发生喷油的一起事故加以分析, 希望能够减少由套管引发变压器故障的发生。

关键词:变压器; 套管

Abstract: In recent years there are lots of accidents of transformer initiated by bushing now and then. The accident of oil spray of transformer caused by the poor quality of bushing is analyzed in order to reduce the accidents of the kind.

Key words: transformer; bushing

中图分类号: TM406 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0075-02

套管是变压器的重要组件之一, 是将变压器内部的高压线引到油箱外部的出线装置, 套管不但起着引线对地的绝缘作用, 而且还起着固定引线的作用。运行中的变压器要长期承受工作电压、负荷电流以及在故障中出现的短时过电压、大电流的作用, 因此往往会由于各种原因而导致事故, 据统计, 110 kV 及以上变压器套管事故在变压器事故总数中也占相当的比例, 在附件中, 仅次于有载分接开关引发的故障。由于套管制造工艺及质量的问题在一些地区发生了多起变压器运行(试运)事故, 下面就一起事故加以说明, 以期能够引起注意。

1 事故经过

2008 年某变电站启动投运过程中, 1 号主变压器处发出“砰”声异响, 1 号主变压器高压侧 A 相套管喷油, 1 号主变压器三侧开关跳闸, 主变压器多重保护动作信号相继发出。故障发生后, 1 号主变压器外观检查, 高压侧 A 相套管油枕与上瓷套之间脱落、喷油; 上瓷套与法兰盘之间脱落。本体瓦斯继电器内约有 420 m³ 气体。紧急将主变压器转检修后, 关闭本体油枕供油阀门, 止住了套管喷油。A 相套管经拆卸检查发现, 油枕压板上盖一固定螺栓孔有烧灼痕迹; 油浸电缆纸损坏, 底座法兰铁件与下瓷套结合部有放电痕迹, 均压球有放电烧伤痕迹。变压器经吊罩检查后发现套管下瓷套(短尾端)已经炸碎, 下瓷套内表面凹凸不平, 有爬电痕迹, 充分证明制造工艺上存在的固有缺陷。所幸没有造成绕组损坏, 如图 1。

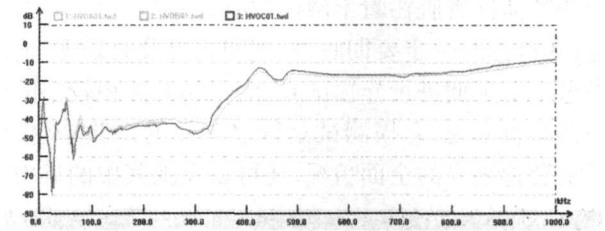


图 1 1号主变压器高压侧的绕组频响曲线

2 原因分析

套管的等值电路如图 2, C_v 代表单位面积电容, C_s 代表单位面积的表面积电容, 套管表面凹凸不平会导致等值电路图中 C_v 和 C_s 大小, 同时改变了电压的分布情况, 绝缘状况也发生了改变, 当发生放电后, 导电杆内的热量累积使得油纸绝缘老化累积击穿, 导致局部电场畸变, 从而引起电容屏间绝缘进一步恶化击穿。随着被击穿的电容屏数目的增加, 油质也迅速地劣化, 当套管中电容屏击穿数目较多时, 套管无法承受工作电压, 强大的短路电流使油质迅速劣化产生大量气体(420 m³)。由于套管空间较小, 大量瓦斯气体使套管下瓷套爆裂, 主变压器发出异响, 差动保护、重瓦斯保护等相继动作。从上面的分析来看, 套管的制造质量问题是导致这次事故的主要原因。

3 总 结

由于生产套管的厂家以及生产的型号众多, 难免出现良莠不齐、设计不合理(油标密封钢圈与窥视玻璃的膨胀系数不匹配)以及套管的制造工艺(如下瓷

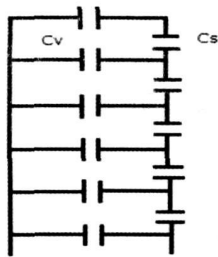


图 2 套管等值电路

套内表面凸凹不平)等因素,因此要严格把守质量关,运用现行的技术监督手段及时发现并处理设备缺陷,避免设备故障,严禁有缺陷的产品进入使用环节。当然为了减少此类故障的发生,除了要保证设计及制造工艺质量外,必须还要做到以下几点:①在进行安装时,套管内部的导线一定要拉直,并且缠绕白布以防止裸线与导电杆相碰导致发热;②加强巡视,要注意油位的变化,是否有油污、渗油、漏油情况,特别是当套管油标管脏污看不清油位时,一定要设法弄清油位;③检修时一定要彻底,发现问题要及时处理,消除隐患。要定期进行介损试验,对于相对体积较小的变压器套管来说,介损测试是行之有效的试验,不仅能反映套管绝缘的全面情况,还可以反映其中的集中性

缺陷。电容式套管介损的现场测试必须注意套管表面泄漏电流的影响。建议在晴朗干燥的条件下进行测试,湿度低于 80%,最好能在低于 65%以下进行测试。测试的套管介损值应与历次测量值(包括试验条件)相比较,尽量排除现场的干扰,以准确地判断套管的绝缘状况。

只有保证套管的设计合理、质量合格、安装正确、运行维护到位、检修彻底,才能切实减少变压器套管故障的发生,同时确保套管的安全运行,才能保证电力变压器的安全性能,使电网正常运行。

参考文献

- [1] 陈涵林,尹章圣. 变压器套管电晕放电及其处理方法[J]. 安徽电力职工大学学报, 2003, 8(3): 45—47.
- [2] 付东丰,李建明,戴玉松. 变压器绕组变形事故分析事例[J]. 四川电力技术, 2008, 31(3): 26—27.
- [3] 聂鸿宇,刘睿. 变压器套管末屏接地不良对局部放电测试的影响[J]. 四川电力技术, 2008, 31(1): 41—42.
- [4] 沈福君,温志勇. 变压器套管检修与维护[J]. 鸡西大学学报, 2007, 7(2): 50—51.

(收稿日期: 2009—02—21)

(上接第 23 页)

PSCAD/EMTDC 时域仿真实现的复转矩系数法—测试信号法与时域仿真法,分析总结了单机系统的 SSR 特性规律。通过串补度、线路电阻这两个运行条件的变化来分析了单机系统的次同步谐振特性,研究得知这两个运行条件的变化均对系统的 SSR 问题有着不同程度的影响,并结合图表对这些有价值的规律和特性进行了分析和总结,在实际的单机串补输电工程的 SSR 问题分析中要对这些运行条件进行综合考虑;但只通过串补度及线路电阻的变化来研究了对 SSR 的影响,其他方式的改变对 SSR 的影响还有待进一步的研究。

参考文献

- [1] P. M. Anderson, R. G. Farmer. Series Compensation of Power Systems. California USA: PUBLSH. Inc 1996.
- [2] Jancke Gunnar and K. F. kerstn. Developments and Experience with Series Capacitors in Sweden. AIEE Trans, v. 71, n. 12, Dec. 1952, 1118—1123.
- [3] Maneatis J. A., E. J. Hubacher W. N. Rothenbuhler and J. Sabath. 500kV Series Capacitor Installations in California. IEEE Trans on PAS 1970, PAS—89, 1138—1149.
- [4] Canay IM. A Novel Approach to the Torsional Interaction and Electrical Damping of the Synchronous Machine (Part I): Theory. IEEE Trans on PAS 1982, PAS—101(10): 3630—3638.
- [5] Canay IM. A Novel Approach to the Torsional Interaction

and Electrical damping of the Synchronous Machine (Part II): Application to an Arbitrary Network. IEEE Trans on PAS 1982, PAS—101(10): 3638—3647.

- [6] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 1—4.
- [7] 陈陈,杨煜. 几种次同步振荡分析方法和工具的阐述[J]. 电网技术, 1998, 22(8): 10—13.
- [8] 徐政,罗惠群,祝瑞金. 电力系统次同步振荡问题的分析方法概述[J]. 电网技术, 1999, 23(6): 36—39.
- [9] R. G. Farmer A. L. Schwalb E. Katz. Navajo Project Report on Subsynchronous Resonance Analysis and Solution. IEEE Trans on PAS 1977, PAS—96(4): 1226—1232.
- [10] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Countermeasures to Subsynchronous Resonance Problems. IEEE Trans PAS 1980, PAS—99(5): 1810—1818.
- [11] 李录平,袁启昌,韩守木. 汽轮发电机组轴系扭振振动的原因和对策分析[J]. 汽轮机技术, 1989, 31(3): 5—9.
- [12] 陈珩. 关于汽轮发电机组轴系扭振的研究工作[J]. 东南大学学报, 1992, 22(4): 97—107.
- [13] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析.

作者简介:

邓婧(1985—),女,硕士研究生,主要研究方向电力系统稳定与控制;

李兴源(1945—),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事,IEEE 高级会员,从事电力系统稳定与控制等方面的研究工作。

(收稿日期: 2009—04—30)

配电网中的矩阵故障定位方法

陈文业

(广东电网集团佛山三水供电局, 广东 佛山 528000)

摘 要:故障定位是配网自动化的一个重要研究方向,介绍了故障定位统一矩阵算法的方法和物理意义。针对统一矩阵算法的不足之处,结合三水地区配电网的具体特点,引入另一种简化矩阵算法,并通过具体算例证明了该算法的正确性。最后对改进矩阵算法进行分析并提出改进之处。

关键词:配电网;故障定位;矩阵算法

Abstract: Fault location is an important research in distribution automation. The method for fault location based on unified matrix algorithm is introduced as well as its physical meaning. Aiming at the short points of the unified matrix algorithm and combined with the detailed situation of distribution network in Sanshui district, another simplified matrix algorithm is introduced and its validity has been proven. Finally, the improved matrix algorithm is analyzed and the improvement is proposed.

Key words: distribution network; fault location; matrix algorithm

中图分类号: TM711 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003—6954(2009)04—0077—03

配电网自动化的一个重要研究方向是故障定位,根据配电网的运行特点以及故障类型,故障定位需要解决以下情况下的问题,包括辐射状网故障、树状网故障、环网开环运行故障、环网闭环运行故障、多电源多重故障、末端故障等。

针对故障定位目前已经有多种算法和解决方法,各种算法都有其可行性,但是在涵盖各种故障情况的通用性方面未能尽人意。传统的定位方法有阻抗法、行波法等,近年来随着计算机技术的发展涌现出神经网络、小波包分析等新方法。矩阵定位方法吸取了传统方法的经验,并和计算机技术结合起来,利用计算机数学工具的强大功能,成为配电网故障定位研究方法的重要分支。

1 矩阵判据的统一矩阵方法

配电网故障定位矩阵算法的基本原理是生成网络描述矩阵和故障信息矩阵,通过某种运算方式形成判别矩阵,判别矩阵反映网络的拓扑结构与故障点的信息,不同的算法对判断矩阵进行采取不同的运算,结合实际物理意义定位故障区间。网络描述矩阵描述配电网的网络拓扑信息,配电网一经确定即固定,反映网络的基本结构;故障信息矩阵则描述配电网的实时信息,根据配电网实际发生故障的各种不同情况

而变化,两个矩阵具体的生成方法如下^[1]。

网络描述矩阵 D 是将馈线上的断路器、分段开关和联络开关进行编号。设 N 有个节点,则可以构造一个 N 维方阵。若节点 i 和节点 j 之间存在一条馈线,则位于第 i 行第 j 列的元素和第 j 行第 i 列的元素均置 1,并称这两个节点为相邻节点;反之在不存在馈线连接的节点所对应的元素均置 0。可见 D 是一对称方阵。

故障信息矩阵 G 的定义为:先给馈线确定一个正方向,即假设配电网仅由一个电源供电(该电源可任选),馈线的正方向是由该电源向全网供电的功率方向。如果节点 i 的开关经历了超过整定值的故障电流,并且其方向与网络正方向相同,则故障信息矩阵的第 i 行第 i 列的元素置 0,对不能同时满足上述两个条件的节点 i 将第 i 行第 i 列的元素置 1。故障信息矩阵的其他元素均置 0。实际上 G 为一对角矩阵,非对角线元素为 0,对角线元素当为故障点且故障电流方向与假设方向一致时 $G_{ii} = 0$,否则 $G_{ii} = 1$ 。

将网络描述矩阵 D 和故障信息矩阵 G 相乘之后得到矩阵 P' ,再对 P' 进行规格化就得到故障判断矩阵 P ,即 $P = g(P') = g(DG)$ 。其规格化的操作如下:

若 D 中的元素 D_{mj} , D_{nj} , ..., D_{kj} 为 1,并且 G 中的 $G_{jj}=1$ 时,需对 P 的第 j 行和第 j 列的元素进行规格

化处理,做法是若 $G_{mm}, G_{nn}, \dots, G_{kk}$ 至少有两个为 0,需将 P 的第 j 行和第 j 列的元素均置 0 否则 P 中的相应的元素值不变。从故障判断矩阵 P 中定位出故障区段的方法如下:若 P 中元素 $(P_{ij}) \text{XOR} (P_{ji}) = 1$,则故障在馈线上第 i 节点和第 j 节点之间。

对于树状网,故障区段显然位于从电源到末梢方向第一个未经历故障电流的节点和最后一个经历了故障电流的节点之间。根据网络描述矩阵和故障信息矩阵的定义以及故障判断矩阵的得出方式,如果一条馈线段的一个节点经历了故障电流而另一个节点未经历故障电流,则在故障判断矩阵中这两个节点对应的两个元素必然不相同;而若该馈线段的两个节点均经历了故障电流或均未经历故障电流,则在故障判断矩阵中这两个节点对应的两个元素必然相同。为此在根据故障判断矩阵进行故障区段判断时,必须采用异或算法。

规格化实际上反映的是这样的物理含义^[2]:假设故障是单一的,若一个未经历故障电流的节点的所有相邻节点中至少存在两个节点经历了故障电流,则该节点不构成故障线段的一个节点。

2 简化后的矩阵算法

上述的统一算法虽然有其优点,但是在解决某些情况下的故障时还是显得不够完整,特别是需要进行矩阵的相乘运算,为防止误判还要进行规格化处理,计算量大而且处理时间长。在三水配电网多年的运行经验基础上,根据对该电网的特点分析,可以对故障情况做部分简化,从而可以在运算量和完整性方面加以改进。这里的算法是基于以下事实和假设。

(1)三水地区配电网线路基本上都是单电源供电,即使是重要负荷的双电源供电也是通过备自投装置联系,在任一运行时刻相当于单电源供电;

(2)三水地区配电网线路不长,节点不多,构建的网络矩阵比较简单,运算量小;

(3)三水地区配电网自动化系统建设未及完善,所假设配电线路故障点信号均能在自动化系统得到充分完善的情况下获得。

2.1 构建配电网的拓扑结构矩阵

根据配电网的特点,网络在拓扑结构上可以看成一棵“树”,电源为树根,馈线为树枝,是以分支关系确定的层次结构^[3]。利用有向树模型,以线路为单位将线路上各监控点(分段开关、断路器、联络开关)按顺序编号,如果节点 i 有子节点 j 则 $D_{ij} = 1$,否则

$D_{ij} = 0$ 。对于网络终端开关对应的节点,因在网络中无节点,则该节点对应行元素为 0。

2.2 引入故障电流信息矩阵

配电网发生故障时,根据各节点是否有故障过电流通过来得到故障信息,从而形成网络的故障信息矩阵 F 。一个具有 n 个节点的网络对应的故障信息矩阵,是一个 $n \times n$ 对角矩阵,其元素形成规则如下:若第 i 节点存在故障过电流,则该节点对应的对角元素 $F_{ii} = 1$, 否则 $F_{ii} = 0$ 。

2.3 故障定位的判断依据

引入故障区间判断矩阵,定义^[4]为:

$$S = D + F$$

故障判断规则为故障区间对应的父节点有故障电流,而所有的子节点电流均没有故障电流,引入判断规则:当 $S_{ii} = 1$ 时,则计算

$$A_i = \sum_{j \neq i} S_{ij} \mid_{S_{ij}=1}$$

如果,结果 $A=0$, 则以 i 为父节点的馈线区间为故障区间,反之,结果 $A \neq 0$, 则以 i 为父节点的馈线区间为非故障区间。

3 应用实例

以三水地区 110 kV 范湖变电站 10 kV 出线 713 赤岗线为例,该线路的简化模型如图 1 所示。

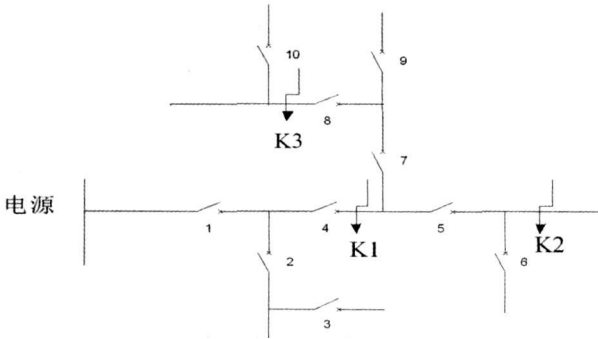


图 1 110 kV 范湖站 713 赤岗线简化模型

根据结构矩阵的生成方法,可得网络矩阵 D 为

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

考虑单重故障的情况,当 K1 点发生故障时,

$$F = \text{diag} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$A_1 = S_{22} + S_{44} = 1; A_1 = S_{55} + S_{77} = 0$,可见线路故障发生在以节点 4 为父节点的区间上。

考虑配电网发生多重故障的情况,当 K2 和 K3 点同时发生故障时,D 不变,

$$F = \text{diag} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$A_1 = S_{22} + S_{44} = 1; A_1 = S_{55} + S_{77} = 2; A_5 = S_{66} = 0; A_7 = S_{88} + S_{99} = 1; A_8 = S_{10} = 0$,可见故障发生在以节点 5 和节点 8 为父节点区间上,为双重故障。

4 算法分析与改进

通过算例分析,知道该算法适合于配电网单电源供电的线路,对于比较复杂的供电情况,需要对算法作进一步的改进,因此提出以下几点分析意见。

(1)由于在配电网中一般不允许环网运行^[5],因此对于多电源供电的线路,在某一时刻,实际上相当于解列的单电源供电。

(2)故障区间定位的准确性和快速性取决于各监控点反馈的故障信号,从理论上监控点越多定位就越快速和越准确,考虑到投资成本和算法运行时间,

需要对监控点的分布作科学规划。

(3)由于故障可能发生在整个网络中的任何地方,因此在图 1 所示的网络中,有可能会出现节点 1 后的区间和节点 4 后的区间同时出现故障的情况,在此情况下,节点 4 不会出现故障电流,根据其反馈信息得到的故障矩阵便不能正确反应网络当时的故障情况,对故障区间的定位会造成一定的影响。不过在实际的生产运行中,这样的情况出现的机会是相当小的,而且可以通过故障区间的二次定位来补充。

(4)从算例可以看出,一条线路上两条支路的故障等价于两条不同线路的单重故障。这为计算变电站中同一母线的所有 10 kV 出线的故障定位提供了方法。按照单条线路的方法,依靠强大的数学软件例如 Matlab 等,可以快速地完成数学运算,达到故障定位的准确、快速。

5 结束语

配电网故障区域定位的矩阵算法着眼于馈线区域和节点的关联拓扑联接关系,通过建立配电网结构拓扑矩阵和故障矩阵,经过矩阵运算,得到故障区间的判定矩阵,可直观地定位出故障区域,借助功能强大的数学运算工具,完全可满足在线应用的要求。

以上介绍的矩阵算法是基于三水地区配电网特点的基础上简化改进而来,能够适合目前三水配电网的要求,对于更复杂和庞大的配网,需要作进一步的分析改进。

参考文献

- [1] 朱发国,孙德胜,等.基于现场监控终端的线路故障定位优化矩阵算法[J].电力系统自动化,2000,24(15):42—44.
- [2] 刘健,倪建立,杜宇.配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J].电力系统自动化,1999,(1):31—33.
- [3] 严蔚敏,吴伟明.数据结构[M].北京:清华大学出版社,1999.
- [4] 吴薛红,郑梅等.配电网故障区间定位的新型矩阵算法[J].南京师范大学学报(工程技术版),2003,3(2):54—56.
- [5] 张钊.配电网故障定位的通用矩阵算法[J].电力自动化设备,2005,25(5):40—43.

(收稿日期:2009—02—01)

农村电网线损管理研究

周 轩¹, 邹 未², 尚茂黎¹, 康 驰¹, 潘可佳¹

(1. 乐山电业局, 四川 乐山 614000; 2. 自贡电业局, 四川 自贡 643000)

摘 要:主要针对目前农村电网线损管理中存在的问题进行分析, 提出了一套比较详尽的线损管理办法和降损的技术措施, 在现有的电网状况下最大限度地降低农村电网线损, 从而进一步提高供电所的线损管理水平。

关键词:线损管理; 技术措施; 农村电网

Abstract: The current problems which exist in line loss management of rural power grid are analyzed. A set of relatively comprehensive technical measures is put forward for line loss management and loss reduction, which can reduce the line loss of rural power grid to the full extent and enhance the line loss management level of power supply bureau.

Key words: line loss management; technical measures; rural power grid

中图分类号: TM714.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003—6954(2009)04—0080—05

线损管理是农村供电所在生产技术管理、经营管理中的关键环节, 直接影响到供电企业的经济效益, 是供电企业的一项重要经济指标。随着农网改造和新农村电气化建设改造工程的深入开展, 农村电网状况已经得到了很大的改善, 农村线损也大幅度降低, 但与此同时, 供电所的线损管理也出现了滑坡、放松的现象。如何在现有的电网状况下最大限度地降低农村电网线损, 进一步提高供电所的线损管理水平, 是当前摆在每一个农电工作者面前的重要课题。

1 问题提出

目前农村电网线损管理中存在的主要问题如下。

(1)农村配电变压器分布不合理。虽然通过农网改造和新农村电气化建设改造工程, 农村电网新安装了许多大容量的变压器, 解决了部分地区电压低、供电能力不足的问题, 但许多老式的变压器仍然在坚持运行。再加之农村用电负荷受季节性影响变化大、且用电负荷集中不易调配, 从而形成了有些地区变压器超负荷运行, 有些地区变压器大马拉小车的现象。

(2)农村用户管理不够规范。在农村, 100 kVA 以上的专用变压器用户基本上都没采用自动无功补偿装置, 也没有进行地方调度电费考核, 在管理上存在漏洞。由于用户未进行无功补偿, 线路无功电流太大, 线损增加。

(3)农网改造虽然改善了农村电网的状况, 但仍

然有相当一部分低压线路供电半径过大, 末端负荷较重, 依然存在用电高峰时末端电压过低不合格的情况。

(4)供电所对抄表管理上不规范, 抄表人员责任心不强。供电所对抄表人员的抄表质量缺乏有效的监控, 抄表人员的随意性很强, 在抄表中经常出现错抄、漏抄、估抄的现象, 供电所也没有及时发现更正。

(5)抄表时间不统一。由于内部管理问题, 呈现出大宗用户、10 kV 关口表计、台区关口表计和居民表计抄表时间上的不统一, 致使线损受时间差影响较大, 不能准确地进行线损分析。

(6)线路巡视不到位。线路巡视人员责任心不强, 没有很好地履行定期巡线制度, 供电所也缺乏相应的监督机制, 线路出现漏电情况后不能及时地发现处理。

(7)用电检查工作开展不到位。供电所往往忽略了用电检查的重要性, 再加之农村面广, 用户法律意识不强, 村电工怕得罪人, 供电所检查不到位, 用户经常通过一些比较简单的窃电方式进行窃电。

(8)三相负荷不平衡。由于农网多采用三相四线制供电方式, 农村点多, 面广, 在电网规划设计上没有很好地考虑到农村负荷的增长, 在业务扩充受理时也没考虑到变压器三相负荷合理分布, 导致农村台区变压器三相负荷不平衡, 中性线中有电流通过时增加中线电能损耗。

(9)线损分析不深入。供电所往往忽略了对农

村线损的分析,分析的原因也主要是从客观的电网状况上去分析,而没有在现有电网状况的基础上开展技术分析。而且大部分地区都没有安装电压监测仪、数据采集仪等设备,对线路的运行状况不了解。

2 具体措施

加强线损管理,就是要从管理和技术两个层面来加强,建立一套系统化的线损管理体制,再配以技术做支撑,实现线损管理的规范化、常态化管理。

2.1 管理措施

2.1.1 加强考核力度,建立线损管理档案

制定和完善《线损工作目标及考核办法》,把线损率高低列入供电所和农村电工考核目标之中,直接与其工资、奖金挂钩,实行奖惩分明,使各级人员充分意识到线损考核的危机感和紧迫感,从而变“要我降损”为“我要降损”,主动地想办法工作;通过理论计算能够找出电网中的薄弱环节,突出降损重点,实施降损措施。供电所建立健全纵向到底、横向到边的线损管理网,形成自上而下的管理网络,使线损管理工作在组织上有最可靠的保证。建立线损管理责任制,实现线损的常态管理。

2.1.2 定期召开线损分析会,完善线损统计分析

每月进行一次分压、分线、分台区线损统计、分析工作,每季度召开一次线损分析会议,对下达的指标及完成情况逐月分析,对存在问题提出解决措施,布置今后任务,实现“有指标、有考核、有措施、有兑现”的闭环管理。对于线损高的要认真查找原因,对症下药,提出下一步解决的办法;对于线路运行良好,线损稳中有降的线路,要善于总结经验加以推广,以达到相互学习、相互促进之目的。在下一一次线损分析会上进行对照检查,看其措施是否落实,效果如何。

2.1.3 规范抄表管理,加强计量管理

(1)抄表要到位,杜绝估抄、漏抄及错抄等现象。一是在抄表时应了解用户的生产经营状况,二要将用户抄表卡的有关数据,例如:表号、生产厂家、电表容量、电表指数等,与现场认真核对,力争抄表率达 100%,减少电量损失,保障线损的平稳。

(2)按规定的日期进行抄表,严禁提前或滞后,必须做到抄表同步。杜绝因抄表时间差而造成线损波动。坚持同步抄表制度,消除时间差线损,减少线损误差率。

(3)对用户电能表要实行统一管理,建立台帐。统一按周期进行修、校、轮换,提高表计计量的准确性。此外,要积极推广应用新型电能表或长寿命电能表,坚决淘汰高能耗电能表。加强计量装置的配置管理,根据客户的设备容量、负荷性质和变化情况,科学地配置计量装置,提高计量准确性。利用农网改造,对农村居民生活的计量装置采用集中管理,移至屋外安装,将多户电能表集中在计量箱内,这样既便于管理又防止窃电。

2.1.4 强化线路的巡视管理制度

加强所辖 10 kV 线路巡视工作。要对所辖 10 kV 线路不定期组织巡视工作,并且考核到人。在巡视工作中,巡视人员要逐杆进行,检查线路有无杆歪担斜,绝缘子有无损伤、污秽现象,跳线是否牢固,有无打火现象,10 kV 线路通道有无树障,拉线是否完整等。巡视中发现的隐患、缺陷要及时处理,及时消除。加强配电设备、配电线路维护,减少泄漏电。清扫绝缘子,测量接头电阻,及时消缺。合理安排设备检修。做到计划性,减少临时检修,尽可能做到供、用电设备同时检修、试验。

2.1.5 定期开展营业普查工作

针对线损分析中发现的典型台区,定期不定期地开展营业普查,尤其是对高损线路或是有窃电记录的用电客户作为打击窃查的重点对象。营业普查以查偷漏电、查电能表接线和准确度,查私增用电容量为重点。大力开展电力法规政策的宣传,使用电客户享受到用电的权力和交费的义务。严重杜绝私拉乱接和窃电现象,让农民群众携起手来打击犯罪,保护电力设施的完好率。对新装的专用变压器用户,应配备和改进专用高压计量箱,合理匹配电流互感器变比,提高计量准确度。对用电量波动较大的用户,应定期对其进行各种参考量(产量、产值、单耗等)的对比分析,发现问题及时处理。

2.1.6 加强专业培训,实行动态管理

农村电工面向千家万户,接触乡里乡亲,工作不易开展,“人情电”、“权力电”现象时有发生,致使线损升高。可利用座谈会、广播、报纸等大力宣传用电政策,做好用户和农村电工的思想工作。让农村电工打开情面,端正工作态度,避免计量装置误装、电能错算现象,树立“人民电业为人民”的思想,把线损降下来。同时在管理形式上,实行装表到农户,抄表开票到户。加强农电人员线损管理培训工作,全面掌握线

损管理所需要的基本方法,并能从技术线损和管理线损两方面入手,提出有效的降损措施。加大指导和督促供电所开展线损管理力度,帮助总结上阶段工作情况,查找存在问题,进行分析、研究,制定整改措施,实现线损管理的闭环控制。开展末位淘汰制的动态管理。每年根据各项考核指标重点是低压线损完成情况,并结合民主测评,对完成指标的责任人进行奖励,对未能完成指标的责任人进行待岗、转岗处理。

2.2 技术措施

2.2.1 合理选择节能型配电变压器,提高配电变压器的负载率

一是对新装的变压器要尽量采用节能型配电变压器,而且在方案设定时应考虑 5~10 年的负荷状况。对原有的变压器,利用农网改造的时机,尽量采用节能型配电变压器,淘汰老型号变压器。二是通过变压器间的合理调配,实现配电变压器的经济运行。负载率在额定容量 50%~70%时,配电变压器处于经济运行状态,效率高,损耗低。农村电网负荷率低,铁损占农网线损的比重加大,一般负荷在配电变压器容量 65%~75%时效率最高,低于 30%就属于“大马拉小车”。

2.2.2 提高配电电压,降低可变损耗

在负荷比较大的情况下,在额定电压的上限范围内适当提高运行电压可以显著地降低线损。

配电变压器的铁损(固定损耗)是与电压的平方成正比。

$$\Delta P_0 = (U/U')^2 P_0 \tag{1}$$

式中, U——运行电压, kV;

U'——运行分接头电压, kV;

P₀——变压器空损, kW。

可见: $\Delta P_0 \propto U^2$ 。

配电变压器的铜损(又称变损)是与电流的平方成正比。

$$\Delta P_k = (I/I_n)^2 P_k \tag{2}$$

式中, I——通过变压器的电流, A;

I_n——变压器额定电流, A;

P_k——变压器短损, kW。

可见: $\Delta P_k \propto I^2$ 。

而在配电线路的损耗为

$$\begin{aligned} \Delta P_L &= 3 I^2 R \times 10^{-3} \\ &= (S^2/U^2) R \times 10^{-3} = [(P^2 + Q^2)/U^2] R \times 10^{-3} \end{aligned} \tag{3}$$

式中, R——线路电阻, Ω;

S, P, Q——通过线路的视在、有功和无功功率, kVA, kW, kvar;

可见: $\Delta P_L \propto I^2$ 。

因此,在负荷和元件电阻不变条件下,适当提高配电网的电压后,可以减少通过电网元件的电流,从而降低电网的可变损耗(ΔP_k+ΔP_L)。下面以电压提高后线路可变损耗的降低进行分析。

表 1 农村电网电压提高后的降损效果

电压提高	可变损耗降低	不变损耗增加	总损耗降低
1	2.0	2.0	0.8~1.0
3	5.7	6.0	2.2~2.8
5	9.0	10.0	2.5~3.0
7	12.4	14.5	4.3~5.7
10	17.4	21.0	5.9~7.7

2.2.3 调整网络结构,缩短供电半径

制定按期发展建设的电网规划,确保电网的安全与经济运行。利用农网改造和新农村电气化建设的契机,有针对性地解决供电半径过长的问题。通过架设新的输配电线路,改造原有线路,加大导线截面,调节变压器档位等方式,缩短供电半径,提高末端电压,消除“卡脖子”现象。

线路可变损耗 $\Delta P_L = 3 I^2 R \times 10^{-3}$,在输送相同容量负荷情况下,较粗的导线损耗较少。目前农网改造中,新架设的 10 kV 主干线一般采用 LGJ-95 和 LGJ-120(电缆为 YJV₂₂ 3×240),分干线采用 LGJ-50(电缆为 YJV₂₂ 3×150);低压干线一般采用 BVV-95(电缆为 VV₂₂ 3×240+120),分干线采用 BVV-70 和 BVV-50(电缆为 VV₂₂ 3×120+70)。部分农村线路线径截面小、负荷重、高损耗设备多,致使农网线损电量占整个损失电量比例大。根据这些情况,除抓紧网架建设、强化电网结构外,还应按农村配电网发展规划,有计划、有步骤地分期分批进行农电设施的技术改造,而第一步工作就是更换农网残旧线路和小截面线路。

2.2.4 实行黄绿红管理模式,保证三相负荷平衡

所谓黄绿红管理模式,是指在农网改造的设计之初,就把台区负荷按黄绿红三相均衡分布,并标注黄绿红三色,并对已改造的台区开展负荷测试,对台区负荷及时调平,从而减少台区变压器损耗。

农村台区管理一直存在线路负荷分配不平衡、台区计量装置配置不合理、用户用电相序不清等问题。因此,在农网改造项目的设计之初,就要将负荷均衡分布纳入线路设计中。经过对用户年用电能量的统

计和分析, 施工设计人员在线路设计图上准确地将每一条线路、每一个用户的用电相序用“黄、绿、红”三色清楚地标注在设计图上, 并明确要求施工人员照图施工, 保证供电台区的负荷分配合理、平衡。

农村电网目前一般采用的配电变压器为 Y/Y₀-12 接线方式, 中性点直接接地, 由于低压用户负荷变化较大, 容易造成配电变压器三相电流不平衡, 在中性线上产生电流。三相负荷不平衡度越大, 产生的中性线电流也越大, 电能损耗也随之增加。一般要求配电变压器低压出口电流不平衡度不超过 10%, 低压干线及主要支线始端的电流不平衡度不超过 20%, 超过此限则应进行迁移调整负荷工作, 使不平衡度降下来。在农网改造中, 重新调整部分低压台区负荷, 使三相负荷趋于平衡; 在日常运行中, 应定期进行公用配电变压器的三相负荷测定, 并根据低压负荷季节性变化较大的特点, 在换季和负荷高峰期严密监测, 对三相不平衡线路及时进行调整和转移负荷工作。

2.2.5 抓漏电保护器安装, 杜绝线路漏电损耗

农村高低压电网大规模的改造工程, 对电网结构进行了重新规划和布局, 农村低压网络的设施设备状况得到了明显改善, 电网健康水平、供电能力、供电可靠性和网络绝缘强度等均得到了大大提高。同时, 农电体制的改革, 也为电网的安全、稳定、经济运行提供了强有力的组织保证。但是, 随着农村经济的迅速发展和农民生活用电的急剧增长, 对供电可靠性、安全性的要求愈来愈高, 特别是农村人身触电伤亡事故和由漏电引起的电气火灾及家用电器、设备烧坏事故时有发生。客观上要求漏电保护方式不能因一户发生故障或事故而造成部分或全网停电。因此, 在农村电网中, 漏电保护器在低压配电系统中被广泛采用。

在现行采用的三相四线制中性点直接接地系统和单相制工作零线 N 线与保护地线 PE 线合一的接零系统的低压电网中, 必须全面推广配电变压器负载侧、主干(分支)线路侧、用户末端侧三级分级漏电保护。

(1) 配电变压器负载侧保护。它应作为变台供电的总保护(一级保护), 安装在配电变压器的低压总电源侧。宜采用带分励脱口器的低压断路器。保护器的额定动作电流应尽量选小, 但也应能躲过低压电网的正常泄漏电流。一般选用额定动作电流 75 mA、100 mA、15 mA 三档可调式为好, 其最大动作(分断)时间不应超过 0.2 s。

(2) 主干(分支)线路侧保护。它是防止主干(分支)线路到用户末端侧保护器之间直接接触的触电伤亡事故的二级保护(中级保护), 也可作为末级保护器的后备保护。安装在主干(分支)线路集装箱配电箱内电源刀闸的电源侧。宜采用剩余电流、短路及过负荷保护功能的保护器。保护器的额定动作电流应小于总保护额定动作电流值, 并界于总保护和末级保护器动作电流之间, 一般选用额定动作电流 45 mA、60 mA、75 mA 三档可调式为好, 其最大动作(分断)时间应大于 0.1 s 不超过 0.2 s。

有条件的还可在分支线路侧设置分支侧保护。它是防止分支线路到用户末端侧保护器之间直接接触的触电伤亡事故的细分保护, 这样, 保护更细、更可靠, 最大好处是能更好地缩小停电范围。只是在整定额定动作电流和分断时间上增加了一定难度。

(3) 用户末端侧保护。它是作为城乡家庭单相用电内用于家人直接接触带电线路和带电家用电器的触电伤亡事故的三级保护(终极保护)。一般与单相刀闸配合使用, 并先接保护器, 再接室内总刀闸, 分支后接插家用电器。宜采用高灵敏度、快速型并具备带漏电、过压、过载短路保护功能的保护器。保护器的额定动作电流应小于主干(分支)线路侧保护额定动作电流值, 一般选用 30 mA 及以下额定动作电流, 特别潮湿、阴雨如浴室、卫生间等, 只能选用额定动作电流为 6 mA 的漏电保护器, 其最大动作(分断)时间不应大于 0.1 s。

2.2.6 实行就地补偿, 减少无功损耗

对于电力系统而言, 无功补偿有高压侧补偿和低压侧补偿两种方式。相比而言, 在低压侧进行补偿, 既可以减少变压器、输电线路等的损耗, 又可提高变压器、输电线路的利用率及提高负载端的端电压, 对用户而言更能获取较大的经济效益。

在低压侧装设补偿电容器, 用电负荷所需的无功功率由电容器直接提供, 可降低电网的总电流, 从而改善负荷侧的功率因数, 大大节省变压器及输电线路的投资。对于已有的电网, 也能够提高电网的出力。

$$i = \sqrt{I_p^2 + I_c^2}$$

式中, I ——视在电流, A;

I_p ——有功电流, A;

I_c ——电容电流, A。

减少输电线路及变压器的损耗:

$$P_n = 3I^2 \cdot R = 3I_p^2 \cdot R + 3I_c^2 \cdot R$$

式中, P_n ——有功功率损失;
 R ——每项输电线路的电阻 (含输电线路及变压器), Ω 。
输电线路电阻: $R=KL/A$
式中, K ——电阻系数;
 A ——导线截面积;
 L ——导线长度, m 。
变压器电阻: $R=Y_kU^2/S_n$
式中, Y_k ——变压器短路阻抗, Ω ;
 U ——系统电压, V ;
 S_n ——变压器额定容量, kVA 。
增加变压器及输电线路的利用率。
所增加的利用率为:

$(P_2 - P_1)/P_1 = [(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2) - 1] \times 100\%$
式中, $\cos\varphi_1$ ——改善前的功率因数;
 $\cos\varphi_2$ ——改善后的功率因数。
提高系统的端电压减少系统的电压降:
 $du(\%) = Q_c/S_n \times X_k(\%)$

式中, $du(\%)$ ——电压提高百分比;
 Q_c ——补偿电容器的容量, $kvar$;
 S_n ——变压器容量, kVA ;
 $X_k(\%)$ ——变压器阻抗百分比。

在低压用户侧进行就地无功补偿, 可以改善用户侧功率因数, 减少配电网传送的无功功率, 降低线路损耗。如表 2 功率因数提高后, 线损将大幅度降低。

表 2 功率因数由 1.0 下降时损耗增加情况

功率因数 λ	可变损耗 $\Delta P/\%$	功率因数 λ	可变损耗 $\Delta P/\%$
1.00	0	0.75	78
0.95	11	0.70	104
0.90	23	0.65	136
0.85	38	0.60	178
0.80	56		

在无功补偿方式上, 主要采用电容分散补偿 (在用户侧) 和集中补偿 (在变电站内) 相结合、高压补偿和低压补偿相结合的方法。同时, 对用户实行无功功

率考核和力率奖惩制度, 可以有效地改善用户侧和线路的功率因数, 减少无功损耗。但在实际工作中, 依然存在一些问题。一是由于部分用户仍然使用单向计量的无功表计, 不能计量反向无功, 无法对其功率因数进行准确的考核。为了达到考核标准, 用户人为加大了电容器的投入数量, 导致无功功率倒送回电网, 造成电压升高, 损耗增加。二是用户侧缺乏管理。由于无功电量是随着负荷变化不断改变的, 但有些用户仍然使用手动投切装置, 自动化程度低, 总体投运率不高, 功率因数不稳定。对于以上两种情况, 建议一是进行计量改造, 安装多功能电子表, 能双向记录无功电量, 同时加大考核力度, 使用户对功率因数引起足够的重视。二是加强无功补偿管理, 在配电变压器低压侧安装无功自动补偿柜, 使其可根据负荷的实际情况自动投切电容器组, 达到提高变压器功率因数、减少配电损耗的目的。

3 结 语

线损管理的好坏直接反映了供电所的管理水平。在管理上, 要做到有目标、有考核、有计划; 在技术上, 要做到有标准、有分析、有总结, 逐步形成一套较为完善的闭环管理模式, 建立常态管理, 努力降损节能, 为供电企业的进步和发展做出更大的贡献。

参考文献

[1] 鹿忠民. 小议降低农村电网线损的管理措施与技术手段 [J]. 中国科技财富, 2008, (7): 101.
[2] 高岩涛, 喻波, 郎宇宁. 农网无功就地平衡和降损的实践与探讨 [J]. 黑龙江电力, 2006, 28(5): 367—369.
[3] 李毅. 降低低压线损的技术措施 [J]. 农村电工, 2007, 15(3): 6.
[4] 王泽勇. 低压电网降损节能的几点技术措施 [J]. 农村电工, 2007, 15(3): 7.

(收稿日期: 2009—02—15)

(上接第 35 页)
[C]. Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation IEEE World Congress on Computational Intelligence Anchorage USA; 1998 69—73
[12] 郭燕, 史丽萍, 赵学华, 史治水. 一种改进的混沌优化方法研究 [J]. 平原大学学报, 2008, 25(2): 142—143.
[13] 玄光南, 程润伟. 遗传算法与工程优化 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[14] Jamshidi M, Fathi M, Pierrot F. Intelligent automation and control [M]. Albuquerque NM: TSI press 1996.
作者简介:
苏 鹏 (1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制、人工智能在电力系统中应用。
刘天琪 (1962—), 女, 博导, 教授, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化。
(收稿日期: 2009—03—01)

自动抄表系统的现状及应用

杨 娟

(成都电业局, 四川 成都 610021)

摘 要:介绍了各种应用方式的自动抄表系统的构成,并对其特点和适用性进行了分析和比较,结合笔者参与建设和运行维护的居民户表应用实例,对自动抄表系统的现状进行了剖析,并提供了可供借鉴的居民户表自动抄表解决方案。

关键词:自动抄表系统;现状;应用

Abstract: The structures of automatic meter reading systems in different application ways are introduced and their characteristics and applicability are analyzed and compared. In accordance with the projects for residential meter in which the author has joined, the current situation of automatic meter reading systems is analyzed. Then, the solution schemes for automatic meter reading system used in residential meter are proposed for reference.

Key words: automatic meter reading systems; current situation; application

中图分类号: TM933 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0085-03

自动抄表 (automatic meter reading—AMR) 是集计算机技术、通信技术、用电及计量技术于一体,利用微电子和计算机网络,采集、传感、传输等技术自动读取和处理表计数据,将城市居民的用水、电、气信息加以综合处理的系统。具有抄收速度快、计算精度高、抄表同时性好、可直接与营业计算机联网等突出的优点。采用自动抄表系统可以缓解抄表人员的劳动强度、降低人为因素造成的抄表误差,从根本上解决了入户抄表收费给用户和抄表人员带来的麻烦,避免了许多不必要的纠纷,不但能提高管理部门的工作效率,也适应现代用户对用水、用电、用气缴费的需求。

1 自动抄表系统的种类

最常见的远程自动抄表系统是采用分线制集中抄表方式,即由数据采集器采集单只或多只计量表计的数据进行处理、存储,各数据采集器之间采用总线方式连接,最后连接至集中控制器上,通过 Modem 方式远程传输至计算机。系统结构如图 1 所示。

然而在实际应用过程中,并非千篇一律,从中派生出许多种应用方式。主要有以下几种。

1.1 红外抄表系统

系统由计算机管理主站、红外手持抄表器、数据采集器和电能表构成,数据采集器完成对某一表箱中

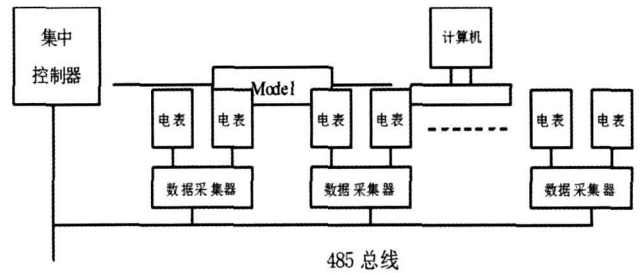


图 1 系统结构

的所有电表的电量采集,不需要集中控制器,也不需要通信线路,抄表时由工作人员到现场,用手持抄表器抄收数据采集器中存储的电能表数据,然后返回计算机管理主站,将手持抄表器中已抄收的电能表数据通过 RS232 口,传送到主站计算机。

该方式的特点:①组网简洁、投入成本低,一般在居民楼道的一个单元只安装一台数据采集器即可;②一台手持抄表器可以抄读多台数据采集器;③无其他运营费用;④如果加上集中控制器,可以直接实现远程自动抄读。

该方式的不足之处就是,抄表工作人员需要到数据采集器跟前抄读。

1.2 无线抄表系统

这里所说的无线,主要指近距离(通讯距离一般在几十米到几百米)无线抄表系统,其组成、应用方式与红外抄表系统几乎相同,唯一差别就是手持抄表器是通过近距离无线方式从数据采集器中读取数据,

而红外抄表方式是通过红外方式而已。

无线抄表系统和红外抄表系统一样,省去了集中控制器,抄表工作人员需要到集中表箱跟前或附近才能抄表,实现的是半自动抄表。

1.3 低压载波抄表系统

该系统利用四通八达的低压电力线路实现载波信号传输,其最大的优点就是充分利用电力线资源,无须重新布线,实施简单、方便。

低压电力载波传输最大的缺点表现在:①高频载波信号只能在一个低压台区内传输,无法跨台区传送信号;②电力网络的阻抗特性及其衰减,制约着信号的传输距离;③噪声干扰,决定着数据传输的质量。

低压载波抄表方式分为:单表载波模块抄表方式和多表一个采集器的载波抄表方式。

1.4 485 总线抄表系统

485 总线抄表系统的组成与多表一个采集器的载波抄表方式相同,唯一不同之处就是数据采集器与集中控制器之间采用的是总线作为传输通道。

该方式的显著特点就是:①传输可靠性高、传输速度快;②可以不受台区变压器的限制(可跨台区变压器集中抄录)。

其缺点也很明显:需要敷设专用的 485 总线,实施难度更大;需要采取防雷击措施。

1.5 Modem 和 GPRS 远程自动抄表系统

Modem 远程自动抄表系统和 GPRS 远程自动抄表系统,只是基于集中控制器与数据管理计算机中心之间远程传输数据的方式,它可以分别与上面介绍的低压电力载波、485 总线抄表方式进行搭配,派生出更多的应用方式。

1.6 光纤传输远程抄表系统

光纤传输采用光纤作为传输介质,应用于远程抄表有一个显著的特点:传输可靠性和稳定性更高、传输速率更快。缺点是成本高、施工难度大。

1.7 其他特殊自动抄表系统

1.7.1 超窄带 (UNB) 载波抄表系统

该方式可以实现跨台区载波抄表。

1.7.2 工频抄表系统

工频抄表系统类似于超窄带抄表系统,不过它使用的是通过工频过零点进行调制的载波通信技术,与超窄带抄表系统相比,易受谐波干扰的影响,且需要较大的注入功率,但传输速率比超窄带抄表系统高。

2 居民户表应用实例

龙泉驿供电局采用 485 总线抄表系统,以 Modem (电话调制解调拨号)的方式实现远程集中管理和控制,主要对集中居民户表进行自动抄表。系统具有数据冻结功能,满足线损管理的需要;具有远程自动停送电控制功能,为解决拖欠电费现象的发生提供强有力的手段;系统具有“两率”监测功能,满足供电质量管理的需要等等。

2.1 主要设备构成

2.1.1 集中控制器

用途:负责集中控制所管辖的数采器。

1)通过总线方式,按照设定的任务自动从数据采集器中提取电能表的各种数据,并予以存储;

2)通过 Modem 通道方式向数据采集中心传递数据;

3)接受来自管理控制中心的各种操作指令(如立即抄读当前数据、冻结数据、台变供电质量、台变供电可靠率、停送电操作指令等),并向数据采集器或关断控制器传达指令,向控制中心返回执行结果。

2.1.2 数据采集器

用途:负责集中采集电能表的各种数据,传达和执行各种操作指令。

1)自动采集电能表的各种数据,包括实时数据、冻结数据、各种事件记录等;

2)接受来自控制中心的停送电操作指令,并进行解码和纠错,将执行结果予以存储和传递;

3)通过总线方式向集中控制器传输电能表的各种数据信息。

2.1.3 停送电控制器

用途:与数据采集器配套使用,接受来自控制中心的停送电操作指令,进行解码和纠错,向关断继电器传送指令对电能表执行分合闸控制,并将执行结果返回控制中心。

2.1.4 停送电继电器

用途:与停送电控制器配套使用,对电能表进户电源线执行停、送电控制。

2.2 实现的功能

1)实现了集中抄读电能表的数据,提高了抄表效率;在居民楼道的每一个单元内安装一台数据采集器,以完成对整个单元内的所有户表进行集中采集;

在一个居民小区内安装一台集中控制器,通过总线方式将该小区内所有数据采集器所采集的户表电量集中抄读并存储,通过 Modem 自动将数据传输到供电部门,实现远程无人集中抄表。

2)实现了对用户远程进行停送电操作:在居民用户的每只电能表的入户电表后接一只关断继电器,由一台停送电控制器集中控制,配接到数据采集器上实现远程控制。通过上位机软件对欠费用户发送批量停、送电或指定停、送电指令,系统自动执行远程停、送电操作。

3)实现数据冻结。将冻结数据传回供电部门,消除抄表时间误差,进行准确的线损计算,实现最基础的“分台区”线损管理。

4)实时监测。集中控制器通过对 10 kV 台变低压侧进行实时监测,定时将各种监测数据传回数据中心系统软件进行分析,形成报表供管理部门使用。

2.3 应用现状分析

截至 2002 年初,由龙泉驿供电局直抄到户的居民用户数为 3916 户,分管的用户较分散,距离供电局最远的有近 20 km。全靠人工方式,抄表人员需要 4 人,每月抄表周期至少需要 10 天;数据录入时间至少

需要 2 天。对严重拖欠电费的用户采取停电措施时,抄表人员必须到现场进行停电操作。

2002 年 10 月龙泉驿供电局逐步在新建小区开始试点推行远程集中抄表系统,先后在龙泉驿区洪河镇新建小区恋日家园 A、B 区进行试点,经过一年多的运行,基本达到预期效果;随后又将恋日家园 C、D、E、F、G、H 区、丽阳家园、金山花园等新建小区全面推广实施。

截至 2008 年底,由龙泉供电局直抄到户的居民用户数已经达到 16867 户,由于选用带远程停送电的自动抄表方式,目前抄表人员降至 3 人,每月抄表时间只需 10 天即可完成;对需要停送电的客户,可以远程进行操作。目前系统运行可靠稳定。

参考文献

- [1] 高光润,夏雪生.微处理器在电测技术中的应用[M].北京:机械工业出版社,1984.
- [2] 陆玉新.电子测量技术[M].北京:邮电出版社,1985.
- [3] 潘明惠.信息化工程原理与应用[M].北京:清华大学出版社出版,2004.

(收稿日期:2009—02—10)

(上接第 19 页)

六条曲线,而这些曲线之间相位之差均为零,表明各出线特征一样,应判为母线故障。

3 结 论

通过分析小电流过补偿接地系统单相接地故障特征,发现正常线路的零序电流仅存在幅值差别,相位完全相同,而故障线路由于电感电流的原因使之与正常线路之间存在一衰减电流的差别,通过复小波变换可以发现这一差别体现在相位上表现为相位的延迟,据此形成了一种新的选线算法,该算法对当前过补偿系统下各出线相位关系难以确定的难题给出了一种新的解决方案,通过仿真验证了该法的有效性。

参考文献

- [1] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [2] 束洪春.配电网故障选线[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [3] 靳晓东,李谦,等.配电网弧光接地过电压的仿真与分析[J].高电压技术,1994,20(3):71—75.
- [4] 毛鹏,段玉倩,等.基于相关分析的故障选线方法[J].

电网技术,2004,28(2):36—39.

- [5] 王耀南,霍百林,王辉,何晓.基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J].中国电机工程学报,2004,24(6):54—58.
- [6] 束洪春,彭仕欣,等.一种配网电缆—线混合线路故障选线新方法[J].电力系统自动化,2008,32(11):1—4.
- [7] N. G. Kingsbury. “Complex wavelets for shift invariant analysis and filtering of signals” Appl Comput Harmon Anal, vol 10, no 3, pp 234—253, May 2001.
- [8] I W. Selesnick R. G. Baraniuk and N. G. Kingsbury. “The dual-tree complex wavelet transform” IEEE Signal Process Mag, vol 22, no 6, pp 123—151, Nov 2005.
- [9] I W. Selesnick. “Hilbert transform pairs of wavelet bases” IEEE Signal Process Lett, vol 8, no 6, pp 170—173, Jun 2001.
- [10] I W. Selesnick. “The design of approximate Hilbert transform pairs of wavelet bases” IEEE Trans Signal Process, vol 50, no 5, pp 1144—1152, May 2002.

作者简介:

周登登(1981—),男,硕士研究生,研究方向为配电网故障诊断;

刘志刚(1975—),男,教授,博士生导师,研究方向为现代信号处理及其在电力系统中的应用。

(收稿日期:2009—05—10)

计及 PSS 的电力系统时域仿真计算

焦艳杰¹, 陈宇², 陈枳州³, 吴曦⁴

(1. 德阳电业局, 四川 德阳 618000; 2. 宜宾电业局, 四川 宜宾 644000;
3. 绵阳电业局, 四川 绵阳 621000; 4. 成都电业局, 四川 成都 610021)

摘要:随着电网规模日益增大, 电力系统动态安全问题愈发受到重视, 其中, 时域仿真是研究电力系统动态特性的重要方法。综述了暂态稳定分析中时域仿真的方法, 并利用时域仿真对计入电力系统稳定器 (PSS) 的系统进行仿真计算与分析, 利用 Matlab 通过 IEEE 14 仿真算例定量研究了引入 PSS 对电力系统暂态稳定特性的影响。

关键词:电力系统; 暂态稳定; 时域仿真; 动态安全; 电力系统稳定器

Abstract With the rapid increase of power grid, more attention is paid to the dynamic security of power system. In this aspect, time domain simulation is one of the most important methods to research the dynamic characteristics of power system. The time domain simulation used in transient stability analysis is reviewed, and the simulation calculation and analysis of the system including power system stabilizer (PSS) is carried out using time domain simulation. By using Matlab IEEE 14 simulation example is presented to quantitatively illustrate the effect of PSS on transient stability.

Key words power system; transient stability; time domain simulation; dynamic security; PSS

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0088-04

电力系统暂态稳定分析的主要目的是检查系统在出现如故障、切负荷、切机等大扰动时, 各发电机组间能否在可接受电压与频率水平下保持同步运行^[1]。暂态稳定计算与系统的故障类型、运行状态、电网结构、元件模型选择、参数设定等方面有着紧密联系^[2]。随着电网规模迅速增大, 暂态稳定特性分析愈发受到重视, 是系统动态安全评估的主要内容之一, 也是电网运行人员的重要任务。

电力系统暂态稳定分析方法主要有两种: 时域仿真法 (Time Simulation) 与暂态能量函数法 (Transient Energy Funtion)。前者通过系统拓扑关系建立基于联立微分与代数方程组的系统模型, 在给定扰动下利用数值积分法, 如隐式积分法、改进欧拉法、龙格-库塔法等, 逐步求取系统状态量和代数量随时间的变化曲线, 由此判断系统的暂态稳定性^[3]。文献 [4] 采用泰勒级数法进行区间微分方程组求解, 实现了计及不确定性的时域仿真方法, 探讨了模型参数不确定性对仿真结果的影响。文献 [5] 对基于时域仿真法的暂态稳定裕度研究进行了综述。文献 [6] 较早地提出了结合时域仿真与能量函数两者优点的混合法 (Hybrid Method) 来获取系统稳定程度的定量信息。文献 [7] 利用 PEBS 思想改进了文献 [7] 对势能边界点的

线性搜索方法以适应更复杂的系统模型。下面利用时域仿真方法定量研究计及 PSS 时电力系统的暂态稳定特性。

1 PSS 建模

1.1 电力系统稳定器概述

电力系统稳定器 (Power System Stabilizer PSS) 的基本功能是通过产生与转子速度偏差同相的电气转矩分量, 从而生成附加稳定信号控制励磁对发电机转子振荡提供阻尼, 使得系统模式特征值实部向负方向系统。从当前技术经济条件来看, PSS 是抑制电力系统振荡、提高系统动态稳定性的最好方法之一。目前对 PSS 的研究主要集中在其参数的识别、优化与控制效果分析等方面^[8,9]。

1.2 接入系统的 PSS 数学模型

根据计算要求与目的, 通过自动励磁调节器 AVR 接入系统的 PSS 随模型简化程度不同而具有差异。无论采取何种模型均应满足式 (1)~(2)。即

$$v_{ss} = g_s(x, y) \tag{1}$$

$$v_{ss} = v_{ref} - v_{ref0} \tag{2}$$

式 (1) 表示了决定 PSS 输入信号 v_{ss} 的控制量与状态

量,式(2)揭示了其提供阻尼分量的特性。这里选用的 PSS数学模型如下。

$$\dot{v}_1 = -(K_{\omega} \, v_{s1} + v_1) / T_{\omega} \tag{3}$$

$$\dot{v}_2 = ((1 - \frac{T_1}{T_2})(K_{\omega} \, v_{s1} + v_1) - v_2) / T_2 \tag{4}$$

$$\dot{v}_3 = ((1 - \frac{T_3}{T_1})(v_2 + \frac{T_1}{T_2}(K_{\omega} \, v_{s1} + v_1)) - v_3) / T_1 \tag{5}$$

$$\dot{v}_4 = (v_3 + \frac{T_3}{T_1}(v_2 + \frac{T_1}{T_2}(K_{\omega} \, v_{s1} + v_1)) - v_4) / T_4 \tag{6}$$

$$v_{out} = \frac{sK}{1 + sT_{\omega}} \frac{(1 + sT_1)}{(1 + sT_2)} \frac{(1 + sT_3)}{(1 + sT_4)} \Delta \omega \tag{7}$$

文中 PSS输入信号取发电机转子转速偏差,式(3)~(6)中变量为增益、信号过滤、相位补偿等环节的 PSS参数,包括时间常数、稳定增益等,其传递函数如式(7)所示。

2 电力系统时域仿真方法

电力系统是复杂的高维非线性控制系统,因此非线性时域仿真最常用的分析手段,常见求解方法的是改进欧拉法和梯形隐式积分法这两种数值积分方法。这两种方法的共同点在于运用稳定规则和雅可比来判定每一步状态变量的变化方向。设 t 为当前时间, Δt 为仿真时间步长,通过求解以下方程进行迭代^[2]。

$$\begin{cases} f_i(x(t+\Delta t), y(t+\Delta t), f(t)) = 0 \\ g(x(t+\Delta t), y(t+\Delta t)) = 0 \end{cases} \tag{8}$$

式(8)中, f 与 g 代表描述系统动态与静态过程的微分与代数方程, f_i 是一个与所选数值积分方法有关的函数,具有非线性的式(8)通过牛顿-拉夫逊算法交替迭代计算状态变量和代数变量增量 Δx^i 和 Δy^i ,同时通过式(9)~(10)不断更新当前实际变量值。

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = -[A_c^i]^{-1} \begin{bmatrix} f \\ g \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} x^{i+1} \\ y^{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \tag{10}$$

式(9)中, A_c^i 依赖于系统状态量与代数量的雅可比矩阵,式(10)为两类量迭代式,结束条件为达到最大迭代次数或增量满足指定精度 ϵ_0 。矩阵 A_c^i 和函数 f_i 一般可通过前向欧拉法或梯形法求取。

2.1 前向欧拉法

前向欧拉法是一阶分析法,与梯形法相比通常具有更快的运算速度,但计算精度稍差。当迭代到第 i

次,矩阵 A_c^i 和函数 f_i 由以下两式可求得。

$$A_c^i = \begin{bmatrix} I_n - \Delta t F_x^i & -\Delta t F_y^i \\ G_x^i & G_y^i \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$f_i = x^i - x(t) - \Delta t f^i \tag{12}$$

式中, I_n 是单位矩阵,其他矩阵是代数微分方程的雅可比矩阵,如 $F_x = \nabla_x f$ 等。

2.2 梯形法

与前向欧拉法相比,梯形法的计算结果更为准确可靠,在电力系统分析计算中用途更为广泛。梯形法求取矩阵 A_c^i 和函数 f_i 的一种较为简单的模型如以下两式所示,符号含义与式(11)~(12)相同。

$$A_c^i = \begin{bmatrix} I_n - 0.5\Delta t F_x^i & -0.5\Delta t F_y^i \\ G_x^i & J_{LFV}^i \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$f_i = x_i - x(t) - 0.5\Delta t (f^i + f(t)) \tag{14}$$

3 仿真算例

采用 IEEE 14节点标准利用基于 Matlab的 PSAT 程序包[10]进行计及 PSS的系统时域仿真,接线图如图 1。算例中元件的具体参数可参见文献[11]。将节点 1 设为松弛节点,发电机 1和 2为汽轮机,5台发电机自动励磁调节装置(为保持简洁图中未标出)采用同一类模型,模型各参数见表 1,均为标么值。

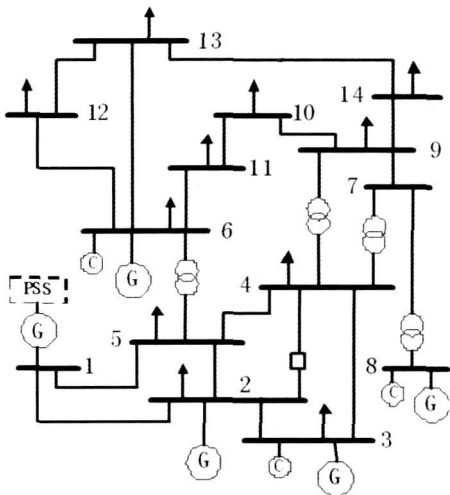


图 1 包含 PSS 的 IEEE 14 节点接线图

将发电机 1 的励磁系统中安装 PSS PSS数学建模如式(3)~(7),选用转子转速偏差为 PSS输入信号,模型参数如表 2 所示。将所有 PQ 节点设定为恒定阻抗模型,首先初始化所有线路与元件模型,并利用 Newton-Raphson 法进行潮流计算。选用梯形法进行系统时域仿真,仿真时间补偿设定为 0.125 s 仿

真时限为 20 s 扰动为在 $t=1$ s 时节点 2 和 4 之间的断路器被断开。

表 1 发电机中 AVR 模型参数

编号	$R_{un\max}$	K_a	T_a	K_f	T_f	T_d	T_r
AVR1	7.32	200	0.02	0.002	1.0	0.2	0.001
AVR2	4.38	20	0.02	0.001	1.0	1.98	0.001
AVR3	4.38	20	0.02	0.001	1.0	1.98	0.001
AVR6	6.81	20	0.02	0.001	1.0	0.7	0.001
AVR8	6.81	20	0.02	0.001	1.0	0.7	0.001

表 2 仿真算例中 PSS 模型参数

参数	$Output_{\max}$	$Output_{\min}$	K_w	T_w
	0.1	-0.1	5	10
PSS	T_1	T_2	T_3	T_4
	0.38	0.02	0.38	0.02

3.1 仿真结果

利用 PSAT 程序包调用 Matlab 中的 Simulink 画出系统接线图, 设置相关参数后加入扰动进行系统的时域仿真, 发电机用自动调压的二阶模型来表示。图 2 显示了 5 台发电机前 10 s 的转子角速度振荡形态。励磁系统安装有 PSS 的 G1 振荡较为平缓, G6 与 G8 振荡最为剧烈, 其中 G8 在 $t=1.125$ s 时其 ω 下降到 0.998 26, 随后在 $t=3.375$ s 时上升到 1.000 63。图 3 显示了 5 台发电机接入母线在扰动后电压波动形态, 可以看出在 $t=5$ s 以后各节点电压达到一个新的平衡状态。图 4 显示了扰动后非基准转角机组的相对角位移变化, 曲线形态表明机组间相对角位保持基本稳定, 稳定性较好, 不会发生机组失步。

3.2 对比分析

为定量分析加装 PSS 对电力系统暂态稳定的影响, 本节对比在 G1 中加装 PSS 前后的暂态稳定性。图 5 显示了系统加装 PSS 前后 G2 与 G6 角速度振荡形态差异。其中 A、B 两图为系统加装 PSS 前后 G2 转子角速度在扰动后的暂态稳定过程, 从图中可

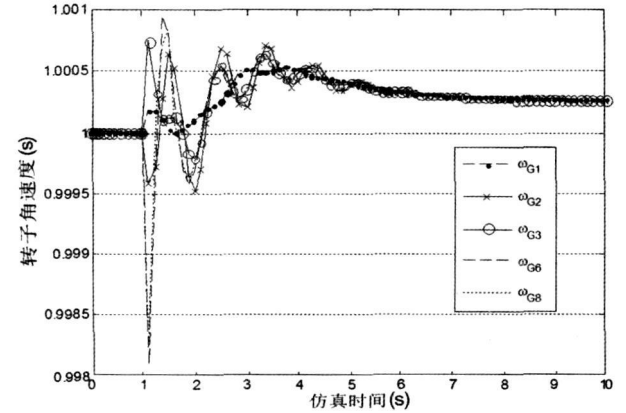


图 2 扰动后发电机转子角速度振荡形态

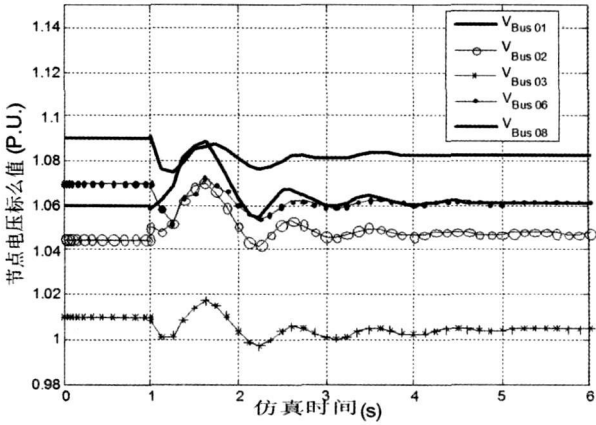


图 3 发电机接入母线电压波动形态

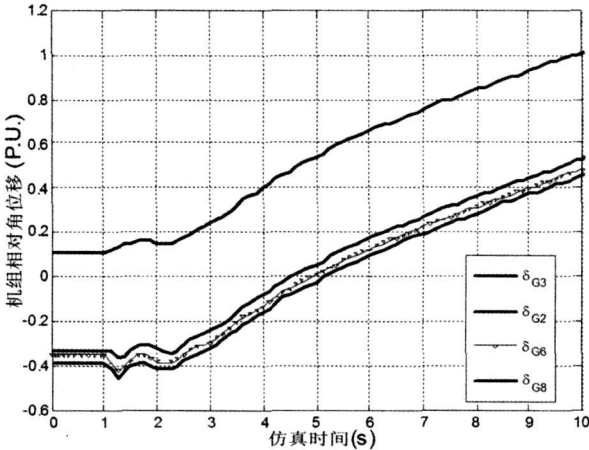


图 4 扰动后发电机 G2、G3、G6、G8 相对角位移变化

以看出, 加装 PSS 后 G2 转子角速度在扰动产生后经过 4 s 振荡在 $t=10$ s 时基本稳定, 与扰动前角速度之差仅为 0.000 2, 而无 PSS 时, 虽然在 20 s 内也

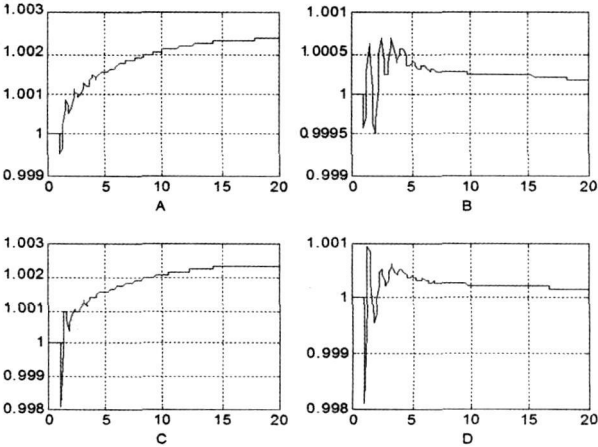


图 5 加装 PSS 前后 G2 与 G6 角速度振荡形态差异

表 3 加装 PSS 前后 G2、G6 转子角速度振荡比较

	初值	振荡峰值	振荡谷值	时间 (s)	稳定值
G2	前	1.0	1.002 3	20	1.002 3
	后	1.0	1.000 53	11	1.000 24
G6	前	1.0	1.002 3	20	1.002 3
	后	1.0	1.000 94	12	1.000 25

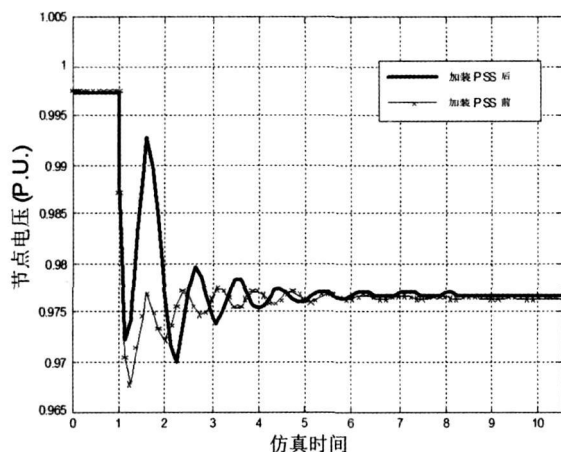


图 6 PSS 对母线电压振荡的影响

基本过渡到稳定水平,但与初值之差已超过 0.02。具体比较数据参见表 3。

图 6 显示了系统在节点 1 加装 PSS 前后,当 2 和 4 节点间断路器发生开断时,节点 4 的电压振荡情况。可以看出,有 PSS 的情况下,节点 4 电压到达一个新的稳定水平时间较快,且振荡幅度也相对较小。

4 结束语

简述了时域仿真在电力系统暂态稳定计算中的应用,对其原理和 PSS 建模进行了介绍。采用 IEEE 14 标准算例,应用基于 Matlab 的电力系统分析与计算工具 PSAT 程序包对计入了 PSS 模型的电力系统进行了时域仿真计算,定量研究了 PSS 的引入对系统暂态稳定的影响,取得了较好效果。总体而言,加装 PSS 对系统内各元件到达新的稳定水平的振荡时间、稳定质量均有积极影响。此外,基于 Matlab 的 PSAT 程序包作为开源程序具有良好的用户接口,且模型相当丰富,尤其适合电力系统运行人员使用,有利于加

强其对系统各类稳定、故障的理解。

参考文献

- [1] Kundur Prabhaskanker Power system stability and control [M]. New York, NY, USA: McGraw-Hill Companies, Inc. 1994.
- [2] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 清华大学出版社, 2001.
- [3] Kundur Prabhaskanker Digital simulation and analysis of power system dynamic performance Ph.D thesis University of Toronto 1967.
- [4] 王守相,郑志杰,王成山. 计及不确定性的电力系统时域仿真的区间算法 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 40—44.
- [5] 石恒初,严正. 基于时域仿真的暂态稳定裕度研究现状分析 [J]. 华东电力, 2008, 36(1): 76—80.
- [6] Maria GA, Tang C K in J Hybrid Transient Stability Analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems 1990, 5(2).
- [7] Tang C K, Graham C E. Transient stability index from conventional time domain simulation [J]. IEEE Trans on Power Systems 1994, 9 (3): 1524—1530.
- [8] 张帆,徐政. 电力系统稳定器抑制次同步谐振的效果 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(6): 121—127.
- [9] 王成山,石颀. 考虑时间延迟影响的电力系统稳定器设计 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 1—6.
- [10] <http://www.ucm.es/area/gsee/Web/Federico/psat.htm>.
- [11] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.

作者简介:

焦艳杰 (1982—), 男, 从事 500kV 变电站运行与监控工作。

陈 宇 (1983—), 男, 从事电力调度工作。

陈枳州 (1982—), 男, 从事配电网调度工作。

吴 曦 (1983—), 女, 从事配电网监控运行工作。

(收稿日期: 2009—02—06)

(上接第 27 页)

- [8] 周彦. 基于 TPSC 技术的短路电流限制器 [J]. 华东电力, 2005, 33(5): 326—327.
- [9] 吴荻. 限制大电网短路电流水平的措施的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [10] 胡宏,周坚. 瓶窑 500 kV 母线短路电流限制措施的研究 [J]. 华东电力, 2005, 33(5): 300—303.
- [11] 李瑞生,索南加乐. 750 kV 输电线路的特殊问题及其对线路保护的影响 [J]. 继电器, 2006, 34(3): 1—4.

- [12] 殷可,高凯. 应用串联电抗器限制 500 kV 短路电流分析 [J]. 华东电力, 2004, 32(9): 567—570.
- [13] 庄侃沁,胡宏,励刚,等. 控制和降低短路电流水平措施在华东电网的应用 [J]. 华东电力, 2005, 33(12): 917—919.
- [14] 袁娟,刘文颖,董明齐,史可琴,范越. 西北电网短路电流的限制措施 [J]. 电网技术, 2007, 31(10): 42—45.

(收稿日期: 2009—05—12)

PSS/E 在四川电网的应用研究

李红军¹, 杨 茹¹, 王电钢¹, 章志刚¹, 扬天波²

(1 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072; 2 成都电业局修试所, 四川 成都 610041)

摘 要: 电力系统仿真软件 PSS/E 是国际通用的先进仿真软件。引进、消化、吸收和推广使用 PSS/E 对提升四川电网安全稳定分析水平具有重要意义。开发 BPA 到 PSS/E 格式数据转换软件是获得数据的便捷途径, 仿真校验可确保所转换模型的有效性和数据的正确性。

关键词: PSS/E; 仿真; 四川电网; 应用研究

Abstract: Power system simulator for engineering (PSS/E) is an international advanced simulation software. The introduction, digestion, absorption and application of PSS/E are of great significance to upgrade the analysis level of security and stability in Sichuan power grid. Developing software to convert BPA-format data to PSS/E-format is a quick way to obtain grid data. Power system simulation can ensure the validity of converted models and the accuracy of grid data.

Key words: PSS/E; simulation; Sichuan power grid; research on application

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0092-03

具有重要的意义。

1 引进 PSS/E 软件的必要性

电力系统计算机数字仿真已成为研究整个电力系统动态特性不可替代的工具。它是电力系统设计、规划、运行的基础。在目前的电力系统调度规划中都是以数字仿真的结果为依据, 数字仿真结果的准确度直接影响运行和规划决策的正确性^[1, 2]。

调度运行、规划设计和科学研究中, 使用单一的仿真软件作为解决问题的工具, 常常遇到这样的问题, 即现有的软件可靠性如何? 其计算精度和有效性可信吗? 为了解决这一问题, 很多单位在实践中引入第二套仿真软件进行计算校验。电力系统仿真软件 PSS/E 正是在这样的背景下被引入中国。华东电网公司率先于 1997 年引进 PSS/E 软件, 并进行了应用研究, 现已经成为华东各省市电网运行分析的主要工具^[3]。国内其他各网省公司、电力规划部门、高校、科研院所都在积极地参与引进 PSS/E 分析软件, 并研究其在本研究领域电网的应用^[4]。

随着三峡工程的竣工, 特高压工程的启动和全国电网联网的进一步推进, 四川电网作为“西电东送”的枢纽网络, 其安全稳定水平重要性日益凸显。在此形式下, 追踪世界先进技术, 引进电力系统仿真软件 PSS/E 对提升四川电网的安全稳定分析和决策水平

2 PSS/E 软件功能特点

电力系统仿真软件 PSS/E (Power System Simulator for Engineering) 是由美国电力技术公司 (Power Technologies Inc 简称 PTI 现已被西门子公司并购) 开发的商业软件, 主要用于电力系统仿真和计算。此软件自 20 世纪 70 年代推入市场后, 不断得到修改和完善。到目前为止, 世界上已经有超过 123 个国家, 1000 多家公司和研究单位在使用该软件。

与同类软件相比, PSS/E 有如下几个特点: ①仿真容量大; ②数据的国际通用性较强; ③程序模型库的完整性; ④用户自定义模型功能和程序接口功能; ⑤分析计算功能的多样性; ⑥计算方法的透明性与文档的完整性等。

3 PSS/E 基础数据的研究

3.1 四川电网数据的特点

现阶段, 四川电网以 500 kV 交流电网为骨干电网。目前正开工建设 ±500 kV、±800 kV 直流输电。1 000 kV 交流输电系统也即将开工建设。省级电网运行方式分析计算, 目前主要考虑 500 kV, 220 kV 交

流电网。但从规划和投产准备方面看,还需要将进行交流超高压、特高压混合电网的计算分析。

四川电网电源点以水电机组多,火电机组相对较少。水电电源主要集中在西南部地区,负荷集中在中东部地区。线路长距离,重负荷输电现象较严重。部分送出回路存在低频振荡的威胁。稳定计算中,详细考虑大型水电机组的发电机模型、励磁模型、调速器模型和 PSS 模型,有助于得到更为准确的结果。

此外,500 kV 骨干网架初具规模,但仍较薄弱,部分地区仍存在 500 kV/220 kV 电磁环网。

结合上述数据特点,建成四川电网 PSS/E 基础数据后,可以开展低频振荡、交直流混合输电、柔性输电等课题的研究,并可对现有仿真软件的研究结果进行验证。

3.2 电网基础数据的建立思路

建立电网基础数据是应用电力系统仿真软件的前提。

建立电网基础数据可采用原始数据统计的方法。在电网发展初期首次采用仿真软件时,一般采用此方法。但对四川电网这样的大电网,对新引进软件进行原始数据统计来建立基础数据较为费时费力,且不利于软件间性能的相互考核。

较之前述方法,比较方便的途径是从现有软件基础数据通过转换得到。进行数据转换首先需要研究新引进软件 and 原使用软件数学模型间的对应关系。根据对应关系,编制相应软件,实现数据的自动转换。此方法在前期可能比较费时,但只要模型间的对应关系一旦确定,编制软件和转换的工作量就非常简洁方便了。在转换得到的基础数据上,可较为方便地实现软件间地相互考核。

目前,四川各级电力调度部门的计算主要采用的是综合程序 (PSASP)。综合程序数据基于数据库进行管理,实现数据的自动转换较繁琐。而省内科研、规划部门则使用中国版 BPA 较多。BPA 软件的计算数据基于文本文件,文本文件中各模型数据采用数据卡方式,数据具有较好的规律性。此外,中国版 BPA 软件和综合程序 (PSASP) 很多模型基本一致。

由于中国版 BPA 和 PSS/E 开发商发布的软件包没有包含相互转换数据的软件。故前期建立四川电网 PSS/E 基础数据比较便捷的思路是实现模型数据从 BPA 格式到 PSS/E 格式的转换。PSS/E 数据相对于 BPA 的数据转换结果及其分析结论可适用于综合

程序 (PSASP)。

3.3 BPA 和 PSS/E 的数据内容

BPA 数据主要以潮流数据文件 (* . dat) 和稳定数据文件 (* . swi) 两个文本文件形式出现。潮流数据包含了基本的分区控制、母线节点、线路支路、变压器支路、直流支路等信息。稳定数据则包含了发电机动态模型、励磁动态模型、调速器 原动机动态模型、负荷静态和动态模型、序网模型等数据信息^[6,7]。

PSS/E 数据主要以潮流数据 (* . raw) 和稳定数据 (* . dyr) 两个文本形式出现。潮流数据内容和 BPA 潮流数据内容相同。但在处理某些模型上略有差异,如 PSS/E 潮流数据中只有 PV、PQ、V θ 三种类型节点,而 BPA 根据计算中约束条件的需要,设置了 13 种类型节点;对三绕组变压器模型, BPA 主要用三个双绕组模型来等值,而 PSS/E 能处理直接处理三绕组模型^[3]。这些模型间的差异,可能导致某些电网数据不能获得完全一致的对应关系,并使仿真结果出现某些偏差。

PSS/E 稳定数据中不包含序网模型,其稳定模型种类和 BPA 大致相同。但在相关动态模型的表达和处理上仍有差异,如 PSS/E 现有模型库不能直接处理发电机四阶模型,不能处理 $X_d'' = X_q''$ 情况,而 BPA 有现成的各阶发电机模型。

对序网模型, PSS/E 专门使用一个序网数据文件 (* . seq) 来描述负序和零序网络。

由于 BPA 数据模型多,而四川电网 BPA 数据所涉及的模型有限。故早期的研究主要针对四川电网数据特有的潮流模型和稳定模型,开展 BPA 和 PSS/E 仿真模型的对比分析,并实现数据的转换。

3.4 数据转换软件的主要功能

数据转换软件从功能上讲,应能提供如下功能。

(1) BPA 与 PSS/E 数据的转换软件应根据软件现有模型对应关系正确转换数据。

(2) 对于某些特殊的功能,不便于转换时能做出提示。如 BPA 中的故障卡,在 PSS/E 中就没有对应项,这些功能需要做出提示。

(3) 软件能具有较好的可扩展性。早期消化阶段,针对现有电网,只能转换有限的电网模型。随着电网的发展,新的设备投入,新模型建立后,应能对新模型进行相应转换。

4 PSS/E 数据模型的校核

通过数据转换方式得到 PSS/E 数据后,进行模型有效性校核(或验证)非常必要,它是其应用研究项目的前提之一。校核的内容包含潮流模型和稳定模型。校核思路如图 1 所示。

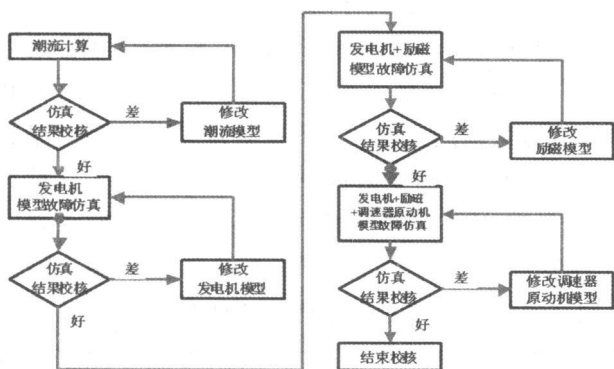


图 1 仿真校核示意图

4.1 对潮流数据的校核

对相同运行方式下的同一网络进行潮流计算,考核全网功率损耗、关键节点的电压有效值、电角度、有功功率和无功功率。用这些指标进行相互比较,得出考核结论。

4.2 对稳定数据的校核

对稳定模型的考核主要基于对同一故障进行两种软件的仿真,考察主要发电机的功角响应、主要节点的电压响应、出力响应等。用两种软件得出的功角响应和电压响应的动态曲线进行比较。

动态仿真中,参与动态过程的模型较多,为了具体确定某类模型的有效性,采取逐一比对,逐次增加的方式。首先考核只有发电机模型情况。获得较好的比对效果后,加上励磁模型,考核发电机+励磁模型的动态仿真;获得好的效果,再加调速器模型,直至获得较为满意的结果。

5 结 论

PSS/E 具有先进的仿真功能,是进行科研、运行和工程实践不可多得优秀软件。建立有效的四川电网 PSS/E 基础数据,是引进和应用该软件所必须的基础研究。获得 PSS/E 基础数据后,进行电网规划、日常运行方式制定和低频振荡、交直流输电等专题研究,并对现有软件的计算结果提供有力验证,这对提升四川省电网安全运行分析水平具有重要意义。

但目前仍有一些因素制约其推广应用,如 PSS/E 还没有推出汉化版本,仍是英文界面,故障仿真步骤较繁琐,初学者上手较慢等。相信这些问题随着国内各研究单位深入研究,会得到妥善解决。

参考文献

- [1] 贺仁睦. 电力系统动态仿真准确度的探究 [J]. 电网技术, 2000, (12): 1—4.
- [2] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展 [J]. 电力系统自动化, 2002, (17): 66—70.
- [3] 祝瑞金, 傅业盛. 电力系统高级仿真软件 PSS/E 的消化与应用 [J]. 华东电力, 2001, (2): 8—11.
- [4] PSS/E 中国用户情况, www.pti-us.com.
- [5] PSS/E31 users manual PTI 2008.
- [6] PSD—BPA 暂态稳定程序用户手册 [S]. 中国电力科学研究院, 2007 年 5 月.
- [7] PSD—BPA 潮流程序用户手册 [S]. 中国电力科学研究院, 2007 年 5 月.

作者简介:

李红军 (1978—), 男, 讲师, 硕士, 研究方向为电力系统及其自动化。

杨 茹 (1982—), 女, 讲师, 硕士, 研究方向为电力系统及其自动化。

王电钢 (1973—), 男, 博士, 研究方向为计算机应用。

章志刚 (1971—), 男, 副教授, 研究方向为电力系统及其自动化。

扬天波 (1980—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统及其自动化。

(收稿日期: 2009—04—21)

强化电网建设

确保供电安全

四川省电机工程学会第六届九次理事会 秘书长工作会议暨2008年学术年会

2009年7月31日上午，四川省电机工程学会召开2008年学术年会，会上学术论文评审组工作人员全面介绍了2008年学术论文的征集工作以及论文评审工作。四川省电机工程学会副理事长刘俊勇作了智能电网的主旨报告，全面介绍了智能电网的特点和特征，研究的技术路线、国外发展近况及我国的发展思路等。四川电力试验研究院的甘德刚作了《四川省电力公司输变电设备状态检修工作介绍》，西南电力设计院的肖汉、武云霞等分别作了《四川电网强直弱交问题研究及对策》、《四川电网调度自动化发展及其展望》的专题报告。学术报告结束后，与会代表积极向报告者提出相关技术问题，进行了技术交流。

2009年7月31日下午，四川省电机工程学会召开了第六届九次理事会、秘书长工作会议，会上四川省电机工程学会副秘书长朱国俊传达了陆元昌理事长在中国电机工程学会第九次会员代表大会上的讲话。同时，四川省电机工程学会对2009年上半年的工作进行了总结，对下半年的工作计划进行了安排。同时，全体理事讨论通过了《四川电力技术》期刊编委会的改选事宜。表彰了2008年四川省电机工程学会先进集体及先进个人并颁发了获奖证书。《四川电力技术》期刊编辑部荣获2008年先进集体称号。



四川省电机工程学会六届九次理事会、秘书长工作会议暨2008年学术年会





乐山电力股份有限公司



四川省委副书记、省长蒋巨峰，省电力公司总经理朱长林视察公司多晶硅项目建设



营业厅服务人员



多晶硅项目建设鸟瞰图

乐山电力股份有限公司(简称“乐山电力”)是于1988年3月8日由乐山市财政局和境内9家法人企业联合发起成立的中国第一家电力股份制企业。1993年4月26日，公司股票在上海证券交易所挂牌交易。截止2008年末，公司总股本达32648.0131万股，其中无限售条件的流通股21749.3744万股，总资产23.69亿元。

乐山电力拥有自成体系的电网系统，公司电网上电站（厂）、用户分布在乐山市和眉山市的8个区、市、县。公司自身拥有水电站14座，火电厂1座，发电装机容量9.8万kW。公司电网上共有电站（厂）80座，总装机容量为27.9万kW。公司电网有110kV变电站5座，变电容量26.5万kVA；35kV变电站22座，变电容量22.7万kVA；110kV输电线路355.8公里，35kV输电线路437.3公里。公司电网于1990年投运，于2007年3月30日正式并入国家电网。

乐山电力拥有6个分厂、分公司，10个控股企业。乐山市中区生活、商业、部份工业用水和乐山市中区、五通桥区生活、商业、部份工业用气分别为自来水、燃气这两个控股公司提供；乐山电力还拥有四星级宾馆1个、三星级宾馆1个。公司与天威保变公司共同投资组建、由公司控股的乐电天威硅业科技有限责任公司开工建设的3000吨/年多晶硅项目正在按计划进行，争取2009年底项目早日建成投产。

乐山电力创建21年来，以“电力为主，建设公用事业”为宗旨，积极发挥人才、技术管理等方面的优势，以科学发展观统领全局，推进公司实现可持续发展。公司大力开发电源，加强电网建设和经营管理，加强燃气、自来水、煤业、宾馆业市场拓展和优质服务，不断提高公司的经济效益；公司积极推行现代企业制度，严格按照股份制规范化运作，不断加强内部规范管理，使乐山电力实现了全面、协调、可持续发展。2008年公司全年实现营业收入85863万元，比上年增长30.01%；利润总额10887万元，比上年增长28.48%，净利润8547万元，比上年增长39.48%。上缴国家各种税费13337万元，比上年增长了39.07%。

公司近年来先后获得中国电力学会“中国电力企业200强”、“全国电力企业经营业绩安全信用AAA级单位”、中国水利协会“全国优秀水利企业”、“全国先进劳动争议调解组织”、“全国和谐劳动关系优秀企业”、“全国文体活动先进单位”、“全国模范职工之家”、“全国安康杯竞赛活动优胜企业”、水利部“地方电力先进企业”、“四川省水电系统先进单位”、省地电系统“行业文明服务示范单位”、四川省“重合同守信誉企业”、“四川省先进法人单位”、“栋梁工程扶贫助学先进单位”等诸多荣誉称号，为乐山经济社会发展，做出了应有的努力和贡献。



乐山电力办公大楼



110KV峨眉夏荷变电站



电网技改夯实电力发展基础



大堡电站



自来水厂水处理车间



天然气储配站