

四川電力技術

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



ISSN 1003-6954



02>

9 771003 695005

四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

Vol.33

2010

No.1

《四川电力技术》 编辑委员会名单

主任委员 王 平

副主任委员 张 伟

刘俊勇

委 员

(按姓氏笔画为序)

方文弟 王 卓 白家棣

刘 勇 朱白桦 朱国俊

朱 康 邓亚军 郭小端

李兴源 李建明 严 平

胡 灿 徐 波 唐茂林

韩晓言 谢 舫 甄 威

秘 书 李世平

吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN 0003-6954
CN 51-1315/TM

2010年第 33卷第 1期(总 205期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力试验研究院

发行范围:公开

主 编:胡 灿

副 主 编:吴小冬 谢 舫

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力试验研究院情报室

地 址:成都市青华路 24号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传 真:(028)87314278

E-mail:cdsclj@163.com

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册 6.00元

[期刊基本参数] CN 51-1315/TM * 1978 *

b * A4 * 94 * 24 * P * ¥6.00 * 4300 * 25 *

2010-02

目 次

·四川电力职业技术学院专栏·

基于混沌理论及小波理论的短期负荷预测 李凌舟 赵华阳 席 川(1)

误差准则在负荷模型动态仿真中的应用研究 李红军 杨 茹(5)

配电网单相接地故障定位分析及其自动定位检测实现 蒋春敏 杨 力(9)

永磁同步电动机矢量控制仿真研究 邹 慧(12)

·输配电技术·

交直流系统的快速复故障过滤算法 叶晓峻 李华强 赵周芳(16)

超高压线路单相接地故障类型识别的新方法 胡亚平 吕飞鹏(20)

基于 Matlab/Simulink的直流输电系统的建模与仿真

..... 赵晓娜 方 玉 李天明(22)

高压直流输电电磁影响相关参数的计算分析 许 懿 雷 雨 马晓雷(25)

加动量项且变学习速率的 BP算法应用于变压器故障诊断

..... 许 虎 明志强 侯 勇(30)

氧化锌避雷器交流分量带电测试的应用及分析 乔明忠 倪 燕(34)

电气设备绝缘在线监测宽频带电流传感器研究 曾 伟(37)

数字化变电站过渡方案的研究 古树平 陈奇志 陈旺虎等(41)

几种自动重合闸误动作行为的分析 李立军 杨 舒 王洪梅(44)

·电网技术·

新疆电网主变压器过载的应对措施 孙立成 刘德福 樊国伟等(47)

基于改进人工鱼群算法的输电网规划 李传虎 王林川 刘 萍等(52)

基于变尺度标杆的短时电能质量分类法 李康瑞 徐方维 杨洪耕(56)

电力系统谐波分析的有效方法 周立东 滕 欢(61)

负荷凹陷敏感度最佳平方逼近估计法 涂 建 陈卫东 肖先勇(66)

一种新型孤立小受端系统的低频减载设计

..... 景 宇 巫 柯 金 勇等(70)

基于混合算法的多目标配电网重构 张海军 马万松(74)

·经验交流·

三相组合互感器两种检定方法的比较研究 刘 鹄 蒋映霞(79)

变压器用绕组温控仪原理及应用 谢崇宇 刘翔宇(82)

基于温度场的单芯电缆载流量研究 谢光彬 谢 伟(86)

110 kV主变压器中性点间隙击穿跳闸分析及对策

..... 胡晓松 陈旭峰 赵 强(89)

220 kV双母线接线倒母线操作危险点分析与防范措施 杨 兵(92)

CONTENTS

Short-Term Load Forecasting Based on Chaos Theory and Wavelet Theory	Li Lingzhou Zhao Huayang Xi Chuan(1)
Research on Application of Error Evaluation to Load Model Dynamic Simulation	Li Hongjun Yang Ru(5)
Analysis on Single-Phase Ground Fault Location and Realization of Its Automatic Location for Distribution Network	Jiang Chumin Yang Li(9)
Simulation Research on Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor	Zou Hu(12)
An Algorithm of Fast Simultaneous Fault Filter for AC/DC Power System	Ye Xiaojun Li Huaqiang Zhao Zhoufang(16)
A New Distinguishing Method of Single-Phase Ground Fault Occurred in Extra-high Voltage Transmission Line	Hu Yaping Lv Feipeng(20)
Modeling and Simulation of DC Transmission System Based on Matlab/Simulink	Zhao Xiaona Fang Yu Li Tianming(22)
Calculation and Analysis of Relevant Electromagnetic-Influenced Parameters in HVDC Transmission	Xu Yi Lei Yu Ma Xiaolei(25)
Application of BP Algorithm with Momentum and Variable Learning Rate to Fault Diagnosis of Transformer	Xu Hu Ming Zhifang Hou Yong(30)
Application and Analysis of Live Testing with AC Component for Zinc Oxide Arrester	Qiao Mingzhong Ni Yan(34)
Research on Broadband Current Transducer for Online Insulation Monitoring of Electrical Apparatus	Zeng Wei(37)
Research on Transitional Schemes of District Substation	Gu Shuping Chen Qizhi Chen Wanguo et al(41)
Analysis on Several Miss Operations of Automatic Reclosing	Li Lijun Yang Shu Wang Hongmei(44)
Countermeasures for Overload of Main Transformer in Xinjiang Power Grid	Sun Licheng Liu Defu Fan Guowei et al(47)
Transmission Network Planning Based on Improved Artificial Fish Swarm Algorithm	Li Chuanhu Wang Linchuan Liu Ping et al(52)
Classification Method of Short Duration Disturbances based on Similarity of Benchmark	Li Kangrui Xu Fangwei Yang Honggen(56)
An Effective Analysis Method for Power System Harmonics	Zhou Lidong Teng Huan(61)
Assessment Method of Voltage Sag Sensitivity Based on Best Square Approximation	Tu Jian Chen Weidong Xiao Xianrong(66)
A New Design of Under-frequency Load Shedding Scheme in Small Isolated Receiving Power System	Jing Yu Wu Ke Jin Yong et al(70)
Multi-objective Distribution Network Reconfiguration Based on Hybrid Algorithm	Zhang Haijun Ma Wansong(74)
Research on Comparisons of Two Calibration Methods of HV Three-Phase Combined Transformer	Liu Kun Jiang Yingxia(79)
Theory of Winding Temperature Indicator and Controller for Transformer and Its Application	Xie Chongyu Liu Xiangyu(82)
Study for Ampacity of Single-core Cable Based on Temperature Field	Xie Guangbin Xie Wei(86)
Analysis on Tripping Due to Breakdown Accident of Neutral Gap of 110 kV Main Transformer and Its Countermeasures	Hu Xiaosong Chen Xufeng Zhao Qiang(89)
Dangerous Point Analysis of Changeover Busbar in 220 kV Double-bus Scheme and Its Precautionary Measure	Yang Bing(92)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2010 Vol.33 No.1

(Ser. No. 205)

Bimonthly Started in 1978

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

Postcode: 610072

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Test and Research Institute of Electrical Power

Editor in chief: Hu Can

Editor & Publisher

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

四川省电机工程学会团拜会 暨常务理事会召开



2010年2月2日上午，四川省电机工程学会2010年新春团拜会在蓉召开。原四川省副省长、学会名誉理事长韩邦彦、四川省科学技术协会党组成员、副主席黄竞跃、四川省电力公司总经理、党委副书记王抒祥以及学会副理事长兼秘书长、四川省电力公司总工程师张伟等领导出席会议并发言。会议由四川省电机工程学会副理事长刘俊勇主持。



王抒祥首先代表省电力公司向省科学技术协会领导、四川省民政厅领导和学会领导以及会员致以新春祝福。他表示，四川省电机工程学会在省民政厅、省科协的关心支持下，充分发挥了党和政府科技工作者的桥梁和纽带作用，不断创新学会活动形式和内容。他希望各位领导和专家一如既往地支持关心四川电力和四川电网发展，特别是特高压电网、无电地区建设、智能电网发展等方面工作，共同推进四川电网的科学发展。



会上，张伟代表学会致新年祝辞，对所有关心、支持学会工作的各级领导、各级单位和所有会员表示衷心的感谢。要求学会会员求真务实，以更加勤奋的工作为四川电力事业发展服好务。原西南电管局党组书记、局长、四川省水电学会荣誉理事长王尊相在会上谈到，新的一年，有新的气象，西电东送所建立起的坚强平台，逐步达到全国联网、跨区联网。韩邦彦向省电力公司2009年电网建设、发电量和售电量、新能源研究和发展、低碳经济等方面工作所取得的成绩表示祝贺。他建议省电力公司做好三方面工作：一是要调整能源结构；二是要抓节能减排；三是要抓好低碳经济技术；同时做好电网规划。

会上，四川省电力公司发展策划部作了四川省500kV及以上电网发展规划简介。

与会领导、代表、专家学者回顾了过去一年，畅谈当前电力发展形势和契机，讨论了四川省电机工程学会新的一年发展方向。



下午召开了四川省电机工程学会第六届十次常务理事会，会上作了2009年学会工作总结并汇报了学会2010年的工作计划；常务理事还通过了2009年四川省电机工程学会先进集体、先进个人名单、通过了新增及变更的部分常务理事名单。

最后，四川电力公司副理事长兼秘书长张伟作了总结发言，学会要在新的电力发展形势下，全面落实科学发展观，不负重托，为建设统一、坚强的智能电网积极发挥学会的学术作用，充分发挥学会学术期刊的作用，服务于社会、服务于会员和科技工程人员，使四川省电机工程学会的各项工作更上一层楼。

基于混沌理论及小波理论的短期负荷预测

李凌舟¹, 赵华阳², 席 川¹

(1 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072;

2 中电投电力工程有限公司海阳核电项目部, 山东 海阳 265116)

摘 要:分析了多种负荷预测的方法,着重分析了负荷的混沌特性与小波特性,同时分析了小波变换能够反应负荷的变化趋势与随机因素。利用 Matlab 工具,建立了基于小波理论与混沌理论相结合的负荷预测模型,并利用该模型对四川某地区短期电力负荷进行了有效的预测。

关键词:短期负荷预测;混沌理论;小波理论

Abstract: Many load forecasting methods are analyzed and the emphasis of these analyses are the chaotic character and wavelet character of short-term load. Meanwhile, wavelet transform which can reflect the change trend and random factor in the load is analyzed. Using Matlab tool, load forecasting model based on the chaos theory and wavelet theory is established. And using this model, the short-term load of an area in Sichuan province is forecasted.

Key words: short-term load forecasting; chaos theory; wavelet theory

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0001-04

0 引 言

短期负荷预测直接影响着电力系统开停机的调控。在电力市场条件下,预测的精度直接关系到整个电力系统运行的经济效益,作为电力系统的一项基本工作,短期负荷预测一直受到广泛关注^[1]。

长期以来,人们对电力系统负荷预测,特别是短期负荷预测进行了大量的研究,提出了许多有效的方法。近年来,随着科学技术的迅速发展,预测理论技术也取得了长足的进展,新的预测方法,尤其是属于人工智能与模式识别领域的新方法不断出现,为电力负荷预测问题的研究提供了有力工具^[2]。

文献[8]应用了回归模型预测法,文献[3]应用了时间序列预测法,文献[6]应用了人工神经网络法,文献[5]应用了灰色预测法,文献[6]应用了模糊数学法,文献[7]应用了小波分析方法。各种不同方法的应用,为负荷的预测提供了多种预测手段。事实上,就现有的文献来看,中国电网的负荷记录,基本上都具有混沌特性,并且其关联维数常常为 2 点多(介于 2 和 3 之间)。

1 短期电力负荷的混沌特性

1.1 混沌特性

短期电力负荷具有很强的混沌特性。电力系统的短期负荷受到各种社会、自然因素影响,是典型的非线性系统,一般方法难于精确建模^[1]。而混沌理论,则打破以往传统分析中单一的确定性分析或随机性分析,建立将两者统一起来的有效分析方法,利用短期电力负荷的混沌特性,通过建立电力负荷的混沌模型,可以有效地进行短期电力负荷的预测。文献[1-8]已成功建立了电力负荷的混沌模型,并就长期、中长期、短期电力负荷进行了预测。

1.2 短期电力负荷混沌模型的预测方法

近年来,随着非线性系统研究的发展,基于混沌理论的非线性时间序列预测模型在短期电力负荷预测中的应用引起了人们的广泛兴趣,越来越多的基于混沌理论的预测方法应用于电力系统短期负荷预测,而且取得了较好的预测效果^[6-8]。

2 短期电力负荷小波分析和混沌模型

2.1 短期电力负荷仿真步骤

设计一个基于混沌时间序列的电力负荷预测系统,利用小波分解将电力负荷数据的高频分量与低频分量进行分解。判断分量的混沌特性,对于具有混沌特性的分量,采用混沌模型进行预测,其他分量采用

RBF网络利用样本进行训练并预测,最后进行小波重构。本程序电力负荷序列采用了四川省电力公司某供电局 30 日的电力负荷数据。短期负荷预测流程图见图 1 所示。小波分量预测流程图见图 2 所示。

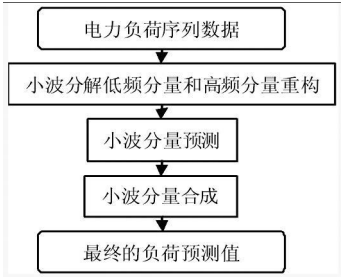


图 1 短期负荷预测流程图

2.2 电力负荷的小波分析

2.2.1 小波理论

小波理论源于傅里叶分析。经傅里叶变换处理后的信号只能在时域或者频域进行分析。经小波平移和伸缩变换处理后的信号,可在时频域对其局部细节进行多分辨分析。小波因而被形象地称为“数学显微镜”。小波变换的变换因子一般由连续小波函数见式 (1)。

$$\psi_{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{1}$$

其中, $\psi(t) \in L^2(R)$; a 为伸缩尺度; b 为平移尺度。

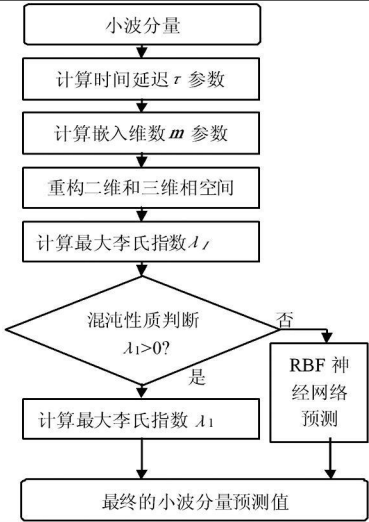


图 2 混沌模型预测流程图

若 $\psi(t)$ 满足可允许性条件, 则

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(v)|^2}{|v|} dv < +\infty \tag{2}$$

其中, $\psi(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) e^{-ivt} dt$ 即函数 $\psi(t)$ 的傅里叶变换, 那么 $\psi(t)$ 称为小波母函数, 它可以进行小波变换。对于任意 $f(t) \in L^2(R)$, 其小波变换如下。

$$w_{f(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \tag{3}$$

式 (2) 可允许性条件的重要意义在于, 如果 $\psi(t)$ 的傅里叶变换 $\psi(v)$ 在原点 $v=0$ 处连续, 则必有 $\psi(0)=0$, 即 $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt=0$ 。这说明函数 $\psi(t)$ 有“波动”的特点。又由于 $\psi(t) \in L^2(R)$, 于是 $\psi(t)$ 只在原点附近才有明显起伏, 而在远离原点的地方必将迅速向零衰减, 所以它被称为“小波”。从物理意义来看, 参数 b 决定 t 的波动时间, 参数 a 决定波动的幅度, 这体现了小波变换“时域—频域”分析的思想。

已经证明, 连续小波函数的线性组合在 $L^2(R)$ 中是稠密的, 即其线性组合可以逼近任意 $f(t) \in L^2(R)$, 这从理论上严密地保证了小波网络逼近的可靠性^[10]。

2.2.2 电力负荷的小波特性

电力负荷小波分解重构后, 得到的低频近似子序列反映了负荷本质变化趋势, 而高频细节子序列则能细致地刻画各种随机因数对于负荷波动的影响。因此, 小波分析能够揭示负荷序列在不同层次上的详细结构, 从而把握负荷波动非线性的本质。

2.3 RBF神经网络预测

由于电力系统负荷的小波分量的特性, 在进行电力负荷的小波分量分析时, 发现部分分量不具有混沌特性, 故采用 RBF 网络做为该部分分量的预测网络进行预测。

2.4 混沌模型预测

2.4.1 混沌理论

一般认为混沌 (chaos) 研究开始于 1963 年 Lorenz 关于大气运动方程的数值研究。混沌时间序列是由混沌模型生成的具有混沌特性的时间序列, 混沌时间序列分析的基础是相空间重构理论及相空间重构方法, 故相空间重构参数的选取是非常重要的。

Packard 等建议用原始系统中的某变量的延迟坐标来重构相空间, Takens 证明了可以找到一个合适的嵌入维, 即如果延迟坐标的维数, $m \geq 2d+1$, d 是动力系统的维数, 在这个嵌入维空间里可以把有规律的轨迹 (吸引子) 恢复出来。亦即在重构的 R^m 空间中的轨线上原动力系统保持微分同胚, 从而为混沌时间序列的预测奠定了坚实的理论基础。

2.4.2 电力负荷的混沌模型

在相空间重构中延迟时间和嵌入维数的选择至关重要, 这两个参数的合理选择和优化直接关系到所

逼近的吸引子的真实性和可靠性。

(1) 延迟时间的选择

在实际操作中最佳延迟时间的选取方法主要有以下几种:①互信息法;②其他信息论的方法,如冗余度法、信息熵等方法;③自相关法和复自相关法;④预报效果法;⑤真实矢量场法;⑥波动积法;⑦填充因子法;⑧累积局部变形法;⑨简单轨道扩张法;⑩奇异值分数(SVF)法和 Jacob 矩阵行列式法^[11]。

(2) 嵌入维数的选择

在实际操作时,求取最佳嵌入维数的方法主要有以下几种:①关联指数饱和法;②奇异值分解(SVD);③伪最邻近点;④改进的伪最邻近点法;⑤预测效果法;⑥映象距离法;⑦真实矢量场法^[11]。

(3) 混沌时间序列的确定性检验

混沌时间序列的复杂变化是由随机因数引起或是由自身内在的确定性动力学机制支配,可用如下方法判别:① Poincare 映射;②功率谱;③ Lyapunov 指数。

3 程序及实现

3.1 小波分解重构

小波分解重构中,需要确定小波分解的尺度,结合文献[12]提到的研究方法,根据信号奇异点检测原理,常用信号的李氏指数大于零,所以其模极大值点的幅度随尺度增大而增大。由于多尺度变换把高频信号逐步剥离,可以认为信号的主干在高尺度的低频系数上,于是分别做了 db2、db3、db4、db5 小波对原始序列的高尺度变换,当分解尺度为 4 时,可以看到低频系数 a 如图 4 所示,图 3 和图 4 为 db3 及 db4 小波变换对比图。

由图 4 可见,db4(即 4 尺度分解)低频分量 a 能很好地反应本地区的基本负荷特性,因此本研究选取了该尺度的小波分解做为小波分量相空间重构的第一步。

3.2 小波分量相空间重构

本程序对于小波分量进行了相空间重构,部分重构图分别如图 5、图 6、图 7、图 8 所示。

在该仿真中,分析了各分量的混沌特性。其中,基于最大 Lyapunov 指数法的方法被用于该部分分析中, Lyapunov 指数是判断系统混沌行为的重要指标之一,即正的 Lyapunov 指数意味着混沌,同时 Lyapunov 指数也刻画了相空间相体积的收缩与膨胀过程。

3.3 负荷预测图

按照程序设计,经过仿真,这里的负荷预测图如图 9 所示。抽取了 600 个实际负荷曲线的样本集,经过该程序预测了最后 10 个负荷的值,其中无点线代表实际负荷曲线,有点线代表预测负荷曲线。

3.4 预测误差分析

对于同一预测项目可以用均方误差的大小来衡

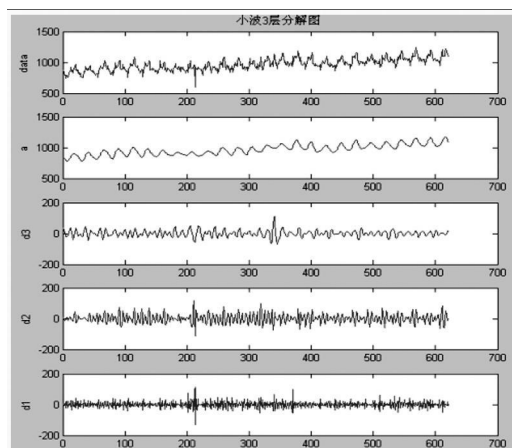


图 3 小波 3 尺度分解图

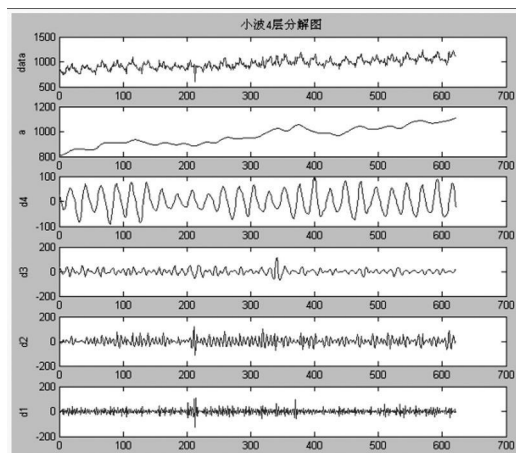


图 4 小波 4 尺度分解图

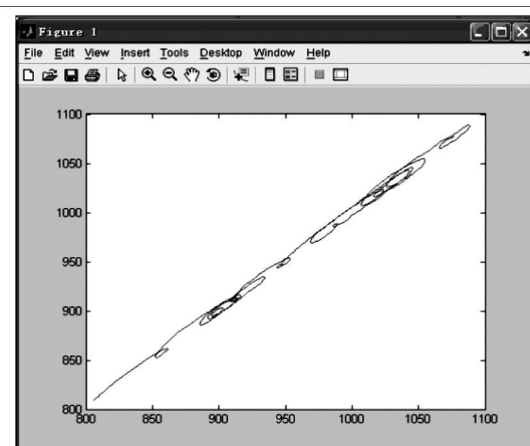


图 5 a 分量的二维相空间重构图

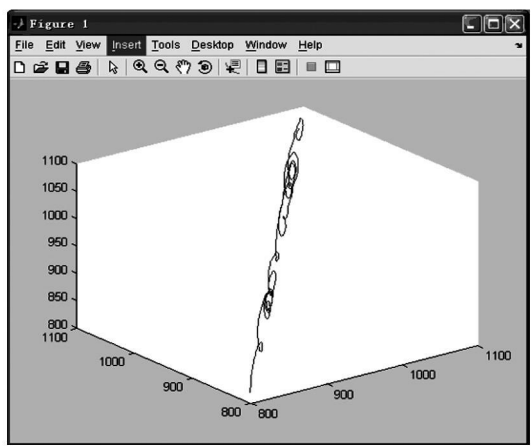


图 6 a 分量的三维相空间重构图

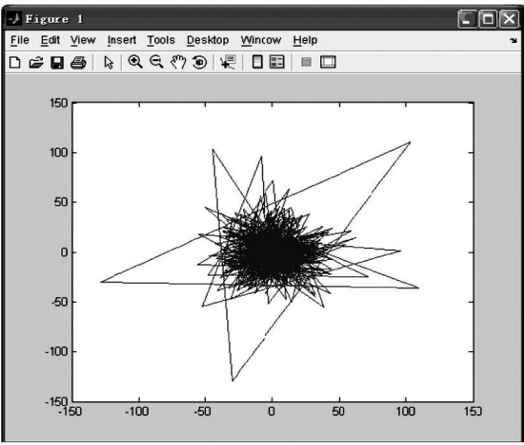


图 7 d1 分量的二维相空间重构图

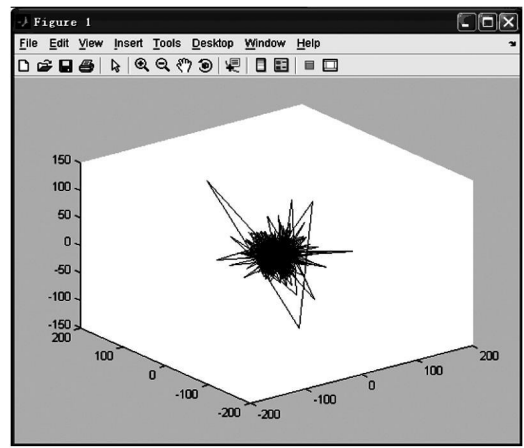


图 8 d1 分量的三维相空间重构图

量各种预测方法的好坏,但对于不同的预测项目,由于观测值不同,故只比较均方误差的大小不能说明问题。于是采用了平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error MAPE, 记其符号为 E_{MAP}) 做为比较标准。其计算公式为

$$E_{\text{MAP}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right| \times 100\%$$

经过计算,该仿真的均方根误差 (root mean

square error RMSE) 为 0.902 8%, 表明预测模型比均值预测模型好。MAPE 值为 2.610 9%, 符合高精度预测模型范围。

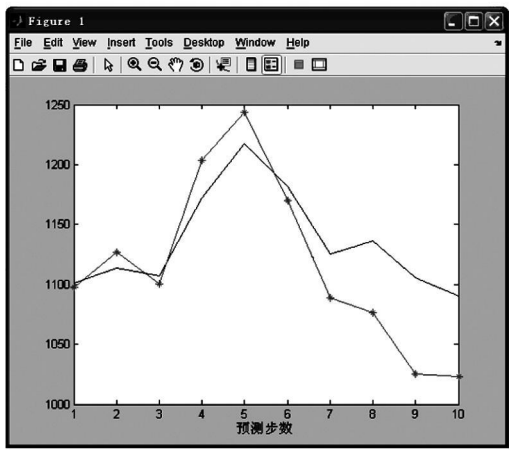


图 9 负荷预测图

4 结论及展望

本课题着重研究了电力负荷序列的混沌特性及小波特性和,并利用混沌仿真方法与小波方法相结合的仿真算法,进行了负荷预测,取得了很高的预测效果。

参考文献

[1] 郑永康,陈维荣,蒋刚,等. 基于混沌理论的短期负荷局域多步预测法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19 (4): 76—79.

[2] 杨正领,林孔元. 电力系统负荷记录混沌特性成因的探讨 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (10): 18—23.

[3] 杨正领. 时间序列中的混沌判定、预报及在电力系统中的应用 [D]. 天津: 天津大学, 2002.

[4] 李鹰,赵振江,吴松涛. 灰色模型在普通日短期电力负荷预测中的应用 [J]. 长沙电力学院学报: 自然科学版, 2003, 18 (1): 15—17.

[5] 李国辉. 基于灰色理论与 BP 神经网络的电力负荷预测 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2005.

[6] 姜勇. 基于模糊聚类的神经网络短期负荷预测方法 [J]. 电网技术, 2003, 27 (2): 45—49.

[7] 顾洁. 应用小波分析进行短期负荷预测 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15 (2): 40—44, 65.

[8] 姚李孝,刘学琴,伍利,等. 基于广义回归神经网络的电力系统中长期负荷预测 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (8): 26—29.

[9] 丁军威,孙雅明. 基于混沌学习算法的神经网络短期负

(下转第 29 页)

由谐波电流或等效干扰电流通过感性耦合在平行接近的双线电话回路中产生的杂音电动势,应按不同的运行方式进行计算。

4.2.1 双极回路运行方式

直流输电线路在双极回路运行方式下,应分别计算进入大地回路的和极导线的谐波电流在双线电话回路中产生的杂音电动势。

$$e_{mr} = \lambda_m Z_m I_{lqr} \downarrow BK_{m800} \times 10^3$$

$$e_{me} = \lambda_m Z_e' I_{lqe} \downarrow BK_{m800} \times 10^3$$

式中, e_m 和 e_{me} 分别为由大地回路的和极导线的谐波电流在双线电话回路中产生的杂音电动势, mV; λ_m 为双线电话杂音敏感系数,按实际情况取值; Z_m 为直流输电线路双极大地回路及与双线电话回路的 800 Hz 感性耦合阻抗, Ω/km ; I_{lqr} 为直流输电线路双极回路进入大地回路的谐波电流的等效干扰电流, A; $\downarrow$ 为直流输电线路与电话回路的接近长度, km; B 为电信线路传播效应的衰减系数,按实际情况计算; K_{m800} 为各种金属接地导体 800 Hz 的磁综合屏蔽系数; Z_e' 为直流输电线路双极回路极导线与双线电话回路的 800 Hz 感性耦合阻抗, Ω/km ; I_{lqe} 为直流输电线路双极回路极导线的谐波电流的等效干扰电流, A。

双线电话回路总的杂音电动势 e_m 为

$$e_m = \sqrt{e_{mr}^2 + e_{me}^2}$$

4.2.2 单极大地回路运行方式

在单极大地回路运行方式下,双线电话回路中产生的杂音电动势计算按以下公式计算。

$$e_{mr} = \lambda_m Z_m I_{lqr} \downarrow BK_{m800} \times 10^3$$

4.2.3 单极金属回路运行方式

在单极金属回路运行方式下,在双线电话回路中产生的杂音电动势按以下公式计算。

$$e_{me} = \lambda_m Z_e' I_{lqe} \downarrow BK_{m800} \times 10^3$$

直流输电线路在单极大地回路运行方式下的干扰影响为最大,在单极金属回路运行方式下的干扰影响为最小。若单极大地回路不作为一种正常运行方式,而只是在调试、试运行或当直流系统发生故障和检修时采用,由于运行时间不长,其产生的干扰影响

时间很短,可不考虑。因此可用双极回路运行方式来检验直流输电线路对电信线路是否存在干扰影响。

直流输电线路对架空明线电信线路的干扰影响较大,但对电缆电信线路的干扰影响较小。中国目前的电信线路多为电缆和光缆,特别是在发达地区,架空明线已很少了。因此只要注意将直流输电线路与电信线路离开适当距离,交越角度大于 45° ,则在一般情况下可以避免干扰影响,或采取适当的防护措施,则可不装设直流滤波器以抑止谐波电流。

5 结 论

以上对高压直流输电技术的基本问题如电晕损失、无线电干扰、导线表面电场强度的计算及其对电信线路的影响等问题做了阐述。主要对特高压直流输电线路高海拔及平原地区直流导线起晕场强、导线场强、无线电干扰的计算及分析的研究现状进行了综述,有利于中国发展高压直流输电技术。

参考文献

- [1] 张桂怀. 高压直流输电线路电场强度的计算 [J]. 内蒙古电力, 1992(4): 1—4.
- [2] 马仪, 李明. 输电线路工程导线电晕质量控制分析 [J]. 云南电力技术, 2003, 31(3): 51—53.
- [3] 鄢光旭. 超高压直流输电无线电干扰问题的探讨 [J]. 检验检疫科学, 2003, 13(3): 43—44.
- [4] 曾南超. 高压直流输电在我国电网发展中的作用 [J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 11—12.
- [5] 舒印彪. 中国直流输电的现状 & 展望 [J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 1—2.
- [6] 常卫中, 李施雄. 交直流高压输电线路并行传输时的无线电干扰特性 [J]. 电网技术 1998, 22(5): 10—13.
- [7] 马为民. 直流高压输电线路对通信线路影响的计算 [J]. 电信科学, 1996, 12(5): 25—31.
- [8] 林晓宇, 陈仕修, 张晓敏. 高压输电线路电晕放电电磁辐射影响分析 [J]. 电力环境保护, 2004, 20(3): 60—62.
- [9] 陈水明, 王磊, 何金良. 多回高压输电线路产生的无线电干扰分析 [J]. 电波科学学报, 2002, 17(6): 677—681.

(收稿日期: 2009—09—18)

(上接第 4 页)

荷预测 [J]. 电力系统自动化, 2000(1): 32—35.

[10] 冯再勇, 钟康惠, 马永旺. 小波网络和 BP 网络在负荷预测中的比较研究 [J]. 江汉大学学报, 2007, 35(2): 51—55.

[11] 雷绍兰. 基于电力负荷时间序列混沌特性的短期负荷

预测方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2005.

[12] 孙云, 李志强, 吴国忠. 电力系统短期负荷预测应用中小波函数选取的方法 [J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2007, 6(1): 35—38.

(收稿日期: 2009—08—04)

误差准则在负荷模型动态仿真中的应用研究

李红军, 杨 茹

(四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072)

摘 要:提出了以实测数据信号扰动能量为基准的动态变异率 (DVR) 来表征动态仿真的误差水平, 并对一些仿真算例误差评定给出了具体的方案。对某变电站两条出线的负荷数据仿真准确度评定, 证明所提的方法是快捷有效的。

关键词:负荷模型; 动态仿真; 误差评定; 动态变异率

Abstract: The dynamic variation ratio (DVR) based on the measured signal energy is proposed to denote the error level of dynamic simulation, and the detailed error evaluation scheme is also proposed for the vast simulation cases. The evaluation of simulation accuracy for load data of two feed lines at a substation proves that the proposed method is convenient and valid.

Key words: load model; dynamic simulation; error evaluation; dynamic variation ratio (DVR)

中图分类号: TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0005-04

0 引 言

大量研究结果表明负荷特性对电力系统仿真结果有重要影响。然而获得相对准确的负荷模型却是长期困扰电力工程界的难题。随着软硬件技术的发展, 从现场数据中得到相对准确的负荷模型成为可能。从 20 世纪 70 年代以来, 国外开展了基于统计和基于测量的负荷建模方法。中国电力学术界也从 20 世纪 80 年代以来开展了基于量测的负荷建模工作。基于量测的负荷建模采用现场电压扰动数据和相应的有功无功响应数据, 根据辨识算法在一定的模型结构基础上进行模型参数辨识。下面对辨识算法的误差准则及其改进措施进行探讨。

1 负荷模型动态仿真误差评定现状

负荷模型动态仿真的过程是模拟实际系统在扰动条件下的响应过程。典型的仿真误差评估是对负荷模型输入图 1 所示的电压, 输出功率响应变量 (虚线), 与实测功率响应变量相比较, 评定出二者的差异。

仿真和实测所得各量值, 如电压、电流以及由此折算出的有功、无功等, 是时变的量, 称为动态变量。假定动态变量的实测值为真值, 误差评定就是衡量仿真值与之偏离的程度。

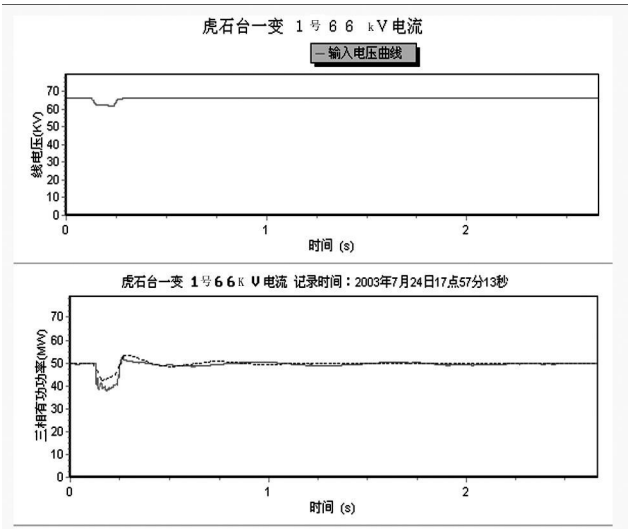


图 1 负荷建模数据

负荷模型动态仿真是负荷模型辨识算法的重要部分。辨识算法目标函数的收敛与否, 是基于对仿真变量和实测变量间误差的计算, 即误差准则所得量值的判断。

不同的辨识算法, 其误差准则有所不同。以最小二乘法为基础的辨识算法, 一般采取仿真值和实测值的差方作为目标函数, 如式 (1) 所示^[1]。

$$\min J(\theta) = \sum_k \|\hat{y}(k) - y(k)\|_R^2 \quad (1)$$

其中, $\hat{y}(k)$ 为仿真量时间序列; $y(k)$ 为实测量时间序列。

以直接法为基础的算法, 如单纯形法、遗传算法等, 其目标函数定义可以根据需要采用比较灵活的目标函数形式, 如式 (2) 和式 (3)。

$$E_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [W_M(i) - W_C(i)]^2}{N}} \quad (2)$$

式中, E_w 为辨识算法目标函数; $W_C(i)$ 为仿真量时间序列; $W_M(i)$ 为实测量时间序列; N 为采样数据点数。

$$\begin{cases} W(k) = 0.4 \frac{|U(k) - \bar{U}|}{\sum_{k=1}^n |U(k) - \bar{U}|} + \frac{0.6}{n} \\ J_i = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n W(k) [\hat{y}_i(k) - y_i(k)]^2 \right\}^{1/2} \\ J = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{J(i)}{\bar{a}_i} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $W(k)$ 为曲线拟合的权重系数; $U(k)$ 为电压采样值; $\bar{U}$ 为平均电压; $J(i)$ 为第 i 条数据曲线目标函数; J 为总目标函数; $\hat{y}_i(k)$ 仿真量时间序列; $y_i(k)$ 为实测量时间序列; m 为扰动数据条数; n 为每条数据的条样点。

式 (1) 采用实测序列点与仿真序列点的误差平方和来表示误差的大小, 只能给出一个量化的累积误差量, 而不能反映误差水平。误差评定中需要给出一个比较的基准来衡量该误差的水平。

式 (2) 反映了仿真误差的均方值, 也是绝对值误差表达式。用该式表示仿真误差除具有式 (1) 的不足外, 还易受时间长度的影响。即当稳态微小误差的时间序列选取较长时, 均值将弱化局部误差较大的时间段, 出现“小数吃大数”的情况。式 (3) 利用对稳态数据和扰动数据加权, 尽量避免长时间稳态微小误差对扰动误差的影响。但对电压稳态时间序列赋小权值可能使仿真出的有功、无功与实测数据在稳态时间段内有差异。以负荷水平的均值为基值对最后误差结果标么化, 以期对整体误差水平有一直观认识, 但负荷水平的高低不同可能使误差与实际不符。

综上所述, 目前辨识算法的目标函数需要进一步研究, 并提取合适的计算式。

2 改进误差准则的提出

基于以上分析, 表征负荷数据间误差水平的计算应解决两个方面的问题: 一是采用合适的计算式计算时变量的各时间序列点误差; 二是选择合适的误差基准值。

以仿真量和实测量的信号误差能量作为绝对误差值, 实测量的扰动能量作为比较基准。整体的误差

水平用动态变异率 (dynamic variation ratio 简称 DVR, 符号为 R_{DV}) 来表示。

$$R_{DV} = \frac{\sum_{k=1}^N |\hat{y}(k) - y(k)|^2}{\sum_{k=1}^N |y(k) - y_0|^2} \quad (4)$$

式中, $\hat{y}(k)$ 为仿真量时间序列; $y(k)$ 为实测量时间序列; y_0 为实测量稳态值; N 为采样时间点数。

此式的意义为: 分母为实测信号的扰动能量, 分子为仿真所得信号偏离实测信号的能量, 其比值反映了动态仿真信号的变异情况。当仿真结果不完全失真于实测结果时, 其比值是在 $0 \sim 1$ 间的任何一个数。当接近于 0 时, 仿真结果最优, 即和实测结果完全一致; 当接近或超过 1 时, 仿真信号的动态性能严重偏离实测信号, 属于完全失真。故在鉴定仿真准确度水平时, 可以将 1 作为误差水平的分界点。

误差计算式 (4) 的数值特点如下。

- 1) 包含两个比较量的所有时间序列点动态信息。
- 2) 具有区分能力, 能区别同一扰动下不同模型参数所得的不同动态仿真结果。
- 3) 采用差方和计算, 对于数据有自动的选择功能。在计算过程中, 可以自动地扬弃残差值较小点的影响, 凸显相对误差较大的时间序列点的作用。这减少了动态性能比较中微小误差对整体误差水平的累积效应, 同时也克服了采用均值带来的问题。
- 4) 误差计算结果直观, 符合日常的误差判别标准。由于采用实测量的扰动信息作为比较基准, 误差比较结果直接反映了仿真数据的动态拟合性能。数值的大小能使人直观地判断出误差大小。

3 误差准则应用 (动态仿真准确度的评定)

3.1 应用步骤

负荷模型动态仿真误差评定的应用可采用如下步骤进行。

- 1) 根据误差值对应的误差形式, 确定一个可接受误差水平对应的值作为参考基准, 通常 DVR 值取 1.0 作为可接受水平的临界值。
- 2) 根据可接受水平参考基值确定一定级别的误差水平。
- 3) 根据误差计算式计算出仿真误差值, 找到相应的误差水平。

4)对多次仿真,特别是多曲线辨识的多曲线仿真,可计算多次仿真的数学统计规律。对少数离散程度大的点,可以删除。

5)对多次误差仿真计算值进行统计分析,根据统计结果确定出最终的仿真准确度。

3.2 评定实例

利用上述评定步骤及误差计算式(4),对某变电站 1 号 66 kV 馈线 228 条和 2 号 66 kV 馈线 230 条实测数据及模型辨识后的仿真数据进行误差仿真评定。两条馈线分别采用多曲线辨识各获取一组模型参数,利用该模型参数在每条实测数据的电压扰动输入下进行仿真,获得仿真数据。

1)根据误差计算值情况确定可接受水平。当时,仿真动态性能失真,可选取该值作为可接受水平的分界值,如图 2 所示。

2)1.0 以下分为 5 个等级,见表 1,1 级精度最高,误差最小,往下逐次递增。

3)根据式(4)计算两条馈线的仿真数据和实测数据间误差变异率。

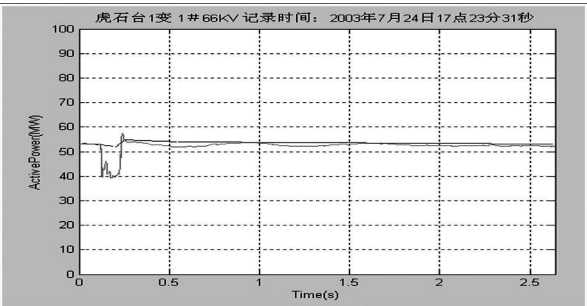


图 2 误差可接受水平分界图示 $R_{bv} = 1.034$

表 1 误差等级

等级	1	2	3	4	5
误差变异范围	0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0

4)剔除粗大误差值。粗大误差指仿真结果相对于实测结果严重失真,表现为误差指标计算结果远远大于可接受参考水平值。粗大误差率指粗大误差仿真在整个仿真样本容量中所占的比例。当粗大误差率小于一定值时,认为产生原因是原始数据的不合理造成,可以舍弃,不参与误差均值计算。如果粗大误

差率达到一定水平,则该仿真不能忽略,视为仿真模型不合理。本算例认为粗大误差率小于 10% 可忽略,大于则不能忽略。

5)计算各条数据的误差变异率均值和方差。误差均值反映了整个仿真样本平均误差水平,方差则反映了样本误差的离散程度。

6)根据步骤 2)中等级,确定对两条馈线负荷建模仿真的准确度水平。各仿真输出的误差点状图如图 3 所示。误差评定的最终结果如表 2 所示。

根据最终的误差评定结果,对两条出线负荷模型的仿真都在可接受范围之内。2 号 66 kV 无功仿真精确度最高,1 号 66 kV 最低。由于负荷模型仿真过程同时包含有功和无功的输出,仿真的总体水平应由有功和无功共同的误差水平来表示。故对 2 号 66 kV 线路的仿真精确度水平高于 1 号 66 kV 线路。

4 改进误差准则的应用二 (改进辨识算法)

基于直接搜索法的辨识算法,计算速度是编程计算需要解决的重要问题。直接搜索法尝试在解空间中寻找最优解,当数据序列较长,解空间维数较大时,所需时间比较长。多曲线辨识过程中数据较多时,耗时则很长。改进算法、提高计算速度是辨识算法需要解决的重要问题。

另一方面,原有的辨识计算程序给出的误差值不能建立很好的“误差印象”,即误差水平不能有明确的意义,在此也需要改进。笔者将误差判别准则计算式(4)加入负荷模型的辨识算法中,试图从辨识速度、精度以及最终的意义表达上得到更佳的结果。

将原有的目标函数式(3)替换为现有目标函数式(4),对 100 条原始数据进行了辨识。

更改目标函数前后,辨识时间如表 3 所示。可以看出,改进目标函数提高了辨识速度。

辨识得到 14 个参数,如表 4 所示。其中, R_s 为定子绕组电阻; X_s 为定子漏抗; X_m 为激磁电抗; R_r 为转子电阻; X_r 为转子漏抗; H 为电动机转动惯量; A 、 B 均为转矩系数; K_{pm} 为电动机初始有功比例; M_L 为

表 2 仿真评价信息

评定对象	样本容量	粗差个数	粗差率	误差均值	方差	准确度水平
1号 66 kV 有功	228	19	8.33% (可忽略)	0.446 4	0.186 9	5
1号 66 kV 无功	228	8	3.53% (可忽略)	0.208 1	0.120 9	2
2号 66 kV 有功	230	10	4.33% (可忽略)	0.284 1	0.136 7	2
2号 66 kV 无功	230	17	7.30% (可忽略)	0.099 9	0.167 0	1

表 4 负荷模型参数表

辨识类型	R_s	X_s	X_m	R_r	X_r	H	A
原有目标函数	0.282 4	0.122 0	2.444 7	0.030 9	0.136 0	1.103 9	0.868 2
改进目标函数	0.253 9	0.150 5	2.056 5	0.027 8	0.096 3	1.468 6	0.805 5

表 4 负荷模型参数表 (续)

辨识类型	B	K_{pm}	M_{lf}	P_p	P_z	Q_p	Q_z
原有目标函数	0.584 3	0.597 1	0.424 1	0.166 5	0.484 9	0.392 2	1.262 4
改进目标函数	0.756 9	0.332 4	0.293 5	0.180 2	0.501 4	2.086 3	0.971 8

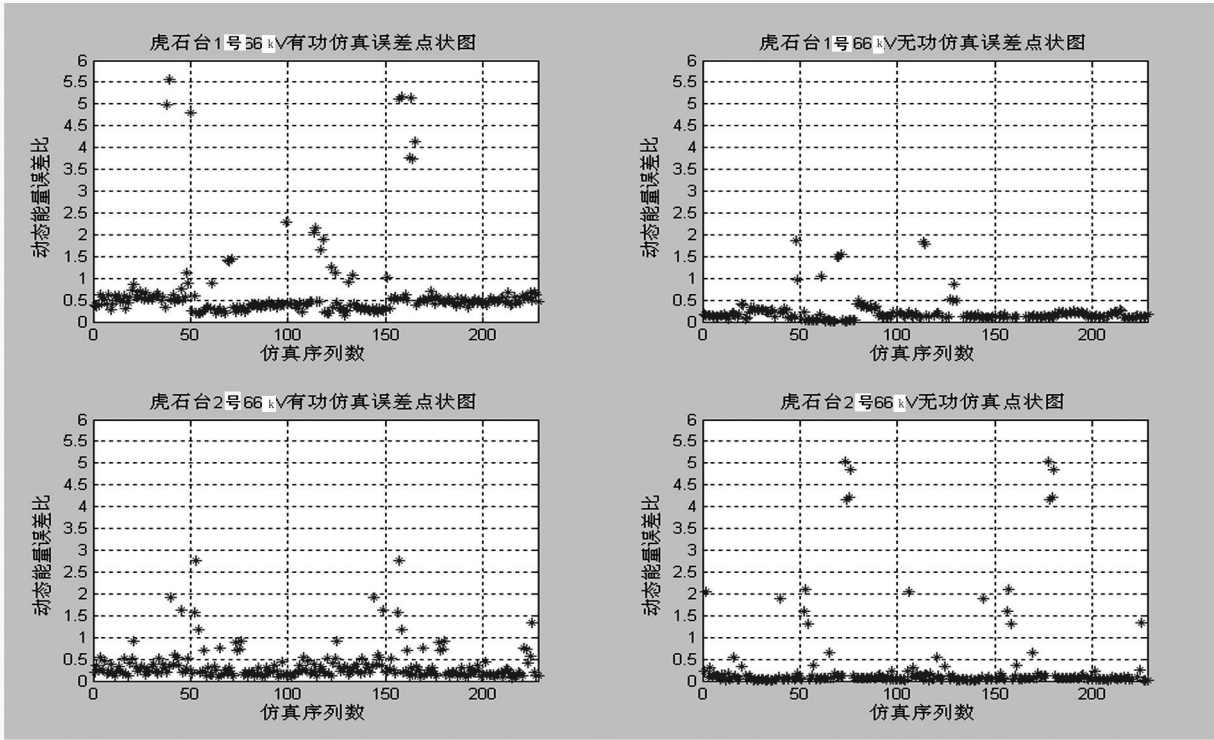


图 3 仿真误差点状图

额定初始负荷率系数; P_p 为恒功率有功负荷; P_z 为恒阻抗负荷; Q_p 为恒功率无功负荷; Q_z 为恒阻抗无功负荷。

表 3 辨识时间

辨识类型	$T/m in$
原有目标函数	138
改进目标函数	133

选取其中一条具有代表性的数据进行仿真对比计算,如图 5所示。

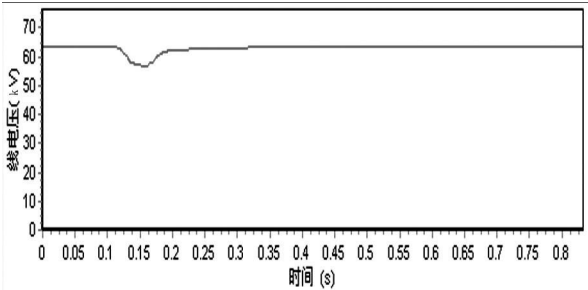


图 4 电压输入曲线

仿真数据与原实测数据结果如图 5和图 6所示。

采用所提误差计算指标得到如表 5所示结果。

表 5 动态变异率计算误差表

目标函数类型	有功动态变异率	无功动态变异率
原目标函数	0.041 3	0.096 5
改进目标函数	0.038 0	0.046 6

从表 5中可以看出,改进目标函数后误差水平有了较为明显的降低。特别是对于电压恢复至稳定稳态阶段的误差,有了较为明显的改善。

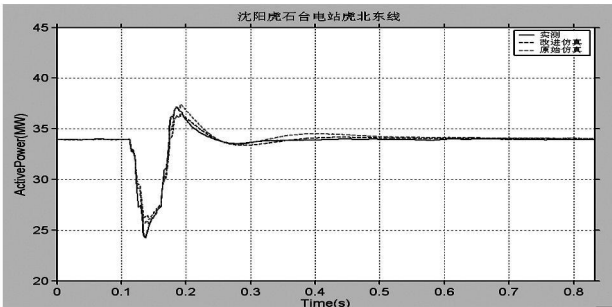


图 5 原目标函数有功曲线

(下转第 55 页)

供较大的选择余地。

4 结 语

传统的输电网规划过于关注经济性要求,而忽略了由于不确定信息带来的未来负荷变化的特点,因而适应能力较差。所建立的计及负荷不确定波动特点的输电网规划模型可以有效解决未来负荷点的长期小幅度波动以及某些区域短期大幅度波动影响,并且利用改进的人工鱼群算法通过 24 节点系统的算例进行了求解,算例分析表明了数学模型的正确性和算法的可行性及有效性。

参考文献

[1] 麻常辉,薛禹胜,鲁庭瑞,等. 输电规划方法的评述 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 97—101.

[2] 叶在福,单渊达. 基于多种群遗传算法的输电系统扩展规划 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 24—27, 35.

[3] 王秀丽,王锡凡. 遗传算法在输电系统规划中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 1995, 29(8): 1—9, 16.

[4] 金义雄,程浩忠,严健勇,等. 基于局优分支优化的粒子群收敛保证算法及其在电网规划中的应用 [J]. 中国电

机工程学报, 2005, 25(23): 12—18.

[5] 翟海保,程浩忠,吕干云,等. 多阶段输电网络最优规划的并行蚁群算法 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 37—42.

[6] Leeprechanon N, Moorthy S S, Brooks R D. Transmission Planning in Deregulated Systems: a Model for Developing Countries[C]. 2001 IEEE Porto Power Tech Conference Porto Portugal.

[7] Hugh Rudnick. Planning in a Deregulated Environment in Developing Countries, Bolivia, Chile, and Peru [J]. IEEE Power Engineering Review, 1996, 16(7): 18—19.

[8] 曾庆禹. 电力市场条件下的发输电规划协调与运行模式 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 1—5.

[9] ROMERO R, ROCHA C, MANTOVANI J R S et al. Constructive Heuristic Algorithm for the DC Model in Network Transmission Expansion Planning [J]. IEEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(2): 277—282.

[10] 刘耀年,李迎新,张冰冰,等. 基于人工鱼群算法的最优潮流计算 [J]. 电工电能新技术, 2006, 25(4): 30—33.

(收稿日期: 2009—08—10)

(上接第 8 页)

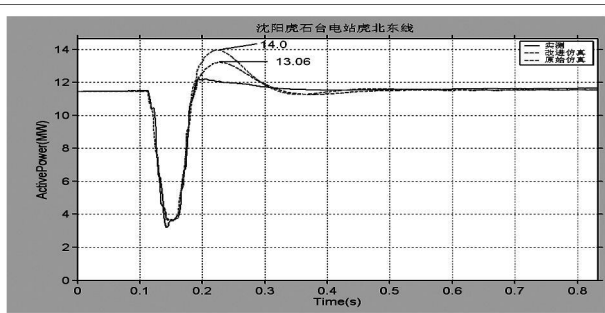


图 6 改进目标函数无功曲线

上述分析表明,将所提出的表征整体误差的动态变异率作为负荷模型的辨识函数,可以在辨识精度上有较为明显的改善,可以克服因权值处理不当而带来的电压稳态阶段超调误差。

5 结 论

1)提出了基于信号能量误差的计算式,对于整体误差具有很好的分辨及评估能力。运用所确定的误差水平评定方案,可解决批量仿真算例的误差计算

及评估。对东北电网主要负荷点的负荷数据及建模仿真数据评估表明,本方法是有效的。

2)所提出的误差计算准则对于现有的辨识算法有改善作用。

3)本方法对评估变化形式相对简单的量有效,对于其他变化形式的动态变量,相应的误差计算式可依据具体的数值特征确定。

参考文献

[1] 章健. 电力系统负荷建模方法的研究 [D]. 北京:华北电力大学, 1997.

[2] 朱守真,沈善德,郑宇辉,等. 负荷建模和参数辨识的遗传进化算法 [J]. 清华大学学报:自然科学版, 1999, 39(3): 37—40.

[3] 石景海. 考虑负荷时变性的大区电网负荷建模研究 [D]. 北京:华北电力大学, 2004.

[4] 石景海,贺仁睦. 动态负荷模型多曲线拟合参数辨 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 18—22.

(收稿日期: 2009—10—10)

永磁同步电动机矢量控制仿真研究

邹 慧

(四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072)

摘 要: 由于交流电机的非线性强耦合特性, 使得交流电机无法直接象直流他励电机独立地控制变量, 介绍了新的控制方式来实现交流电机转速和转矩的控制。

关键词: 永磁同步电动机; 矢量控制; 仿真

Abstract: Due to the nonlinear coupling characteristic of alternator, the alternator can not control the variables independently as DC separately excited generators directly. So, a new control mode to realize the control of rotating speed and torque of alternator is presented.

Key words: permanent magnetic synchronous motor; vector control; simulation

中图分类号: TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0012-04

直流他励电机之所以具有良好的静动态特性, 是因为定子励磁电流及电枢电流两个参数分别由电动机励磁回路和电枢回路独立产生, 且在空间正交, 是两个可以独立控制的变量, 只要控制定子励磁电流使磁通恒定, 则电磁转矩正比于电枢电流的大小。由于交流电机的非线性强耦合特性, 使得交流电机无法直接象直流他励电机独立地控制变量, 因此需要新的控制方式来实现转速和转矩的控制。

1 矢量控制的基本原理

矢量控制的基本思想是按照产生同样的旋转磁场这一等效原则建立起来的, 通过定转子的三相 ABC 静止坐标到两相 $\alpha-\beta$ 静止坐标再到两相同步旋转 dq 坐标变换, 用等效的两相同步旋转坐标代替三相静止坐标, 通过一系列变换和磁场定向, 交流电机的电磁转矩表达式与直流他励电机相似, 控制 d、q 轴的电流即方便地实现电机的磁场和转矩的控制, 使交流电机具有和传统直流电机同样优良的运行性能。基于转子磁场定向的矢量控制是交流伺服调速系统中使用较为广泛的一种控制方式。转子磁场定向的矢量控制的基本思想是在三相交流电机上设法模拟直流电机转矩控制的规律。在转子磁场定向的同步坐标轴系上, 将定子电流矢量分解为影响磁通的磁场电流分量 i_d 和产生电磁转矩的转矩电流分量 i_q , 并使两个分量相互垂直, 彼此独立, 而后分别进行控制,

使交流电机的转矩控制, 从原理上相似于直流电机。由于三相交流电机的实际定子电流为三相交流量, 为实现对 d、q 轴电流的控制, 必须以电机矩阵分析的思想为基础, 借助坐标变换法实现 d、q 轴系和三相实际轴系间变量的转换, 以实现 i_d 和 i_q 的控制。

2 坐标变换

1) 静止三相轴系 (ABC) 到静止两相轴系 ($\alpha-\beta$) 的相变换

图 1 为永磁同步电机静止三相实际轴系到对称的静止两相轴系的变换。其中 α 相绕组同三相中的 A 相绕组重合, β 相绕组与 α 相正交。若三相轴系为 A-B-C 相序, 则两相轴系为 $\beta-\alpha$ 相序。

相变换必须保证变换前后绕组中电流产生的磁势守恒。若三相绕组中每相绕组的有效匝数均为 N_a , 而两相绕组中每相的有效匝数均为 N_α , 则得到式 (1)。

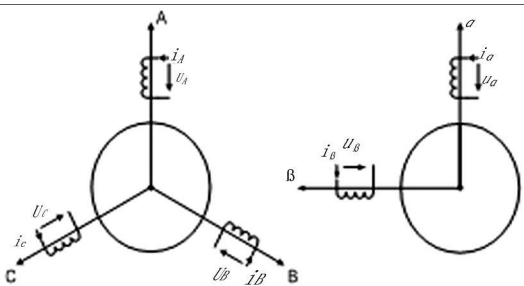


图 1 三相到两相之间的变换

$$\begin{cases} \dot{i}_k N_a = \dot{i}_k N_A - \dot{i}_b N_A \cos 60^\circ - \dot{i}_c N_A \cos 60^\circ \\ \dot{i}_p N_a = -\dot{i}_b N_A \cos 30^\circ + \dot{i}_c N_A \cos 30^\circ \end{cases} \quad (1)$$

设 $N_A = kN_a$, 则式 (1) 可变为

$$\begin{cases} \dot{i}_k = k(\dot{i}_k - \frac{1}{2}\dot{i}_b - \frac{1}{2}\dot{i}_c) \\ \dot{i}_p = k(-\frac{\sqrt{3}}{2}\dot{i}_b + \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{i}_c) \end{cases} \quad (2)$$

经过分析, 当 k 为 $\sqrt{2/3}$ 时, 三相到两相的相变换的电压电流变换矩阵相同且均为正交矩阵, 因而满足恒功率变换。得到三相到两相的相变换矩阵和两相到三相的相变换矩阵分别如式 (3) 和式 (4) 所示, 其中, 变换前的坐标用下角标表示, 变换后的用上角标表示。

$$C_{ABC}^{\alpha\beta 0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C_{\alpha\beta 0}^{ABC} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

则由三相实际轴系到两相对称轴系的电流和电压变换为式 (5), 由两相对称轴系到三相实际轴系的电流和电压变换为式 (6)。

$$\begin{cases} \dot{i}_{ABC} = C_{ABC}^{\alpha\beta 0} \dot{i}_{\alpha\beta 0} \\ u_{ABC} = C_{ABC}^{\alpha\beta 0} u_{\alpha\beta 0} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{i}_{\alpha\beta 0} = C_{\alpha\beta 0}^{ABC} \dot{i}_{ABC} \\ u_{\alpha\beta 0} = C_{\alpha\beta 0}^{ABC} u_{ABC} \end{cases} \quad (6)$$

2) 静止两相轴系 ($\alpha-\beta$) 到旋转两相轴系 ($d-q$) 的整流子变换

图 2 为从静止两相轴系到旋转两相轴系的变换。 $d-q$ 轴系同轴系 $\alpha-\beta$ 为正交轴系, 且 $d-q$ 轴系以 ω 的转速相对于 $\alpha-\beta$ 轴系旋转, 旋转正方向为由 β 相相序决定的顺时针方向。其中, θ 为 d 轴轴线同 α 轴轴线的夹角。

其中, ω 为电机转速, $\theta = \omega t + \theta_0$, θ_0 为初始时刻 d 轴与 α 轴之间的夹角。

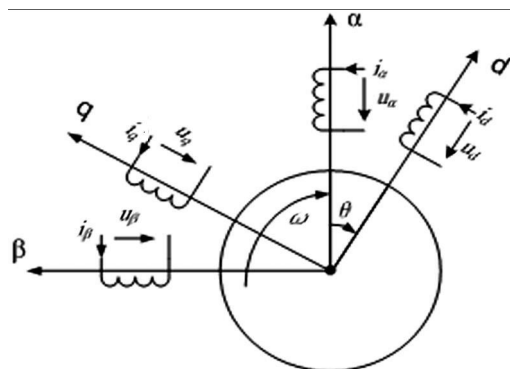


图 2 静止两相绕组到旋转两相绕组的变换

设 4 个绕组的匝数均为 N , 根据变换前后的磁势等效原理, 有

$$\begin{cases} N \dot{i}_k = N \dot{i}_k \cos \theta - N \dot{i}_p \sin \theta \\ N \dot{i}_p = N \dot{i}_k \sin \theta - N \dot{i}_p \cos \theta \end{cases} \quad (7)$$

引入零序电流项, 并写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_k \\ \dot{i}_p \\ \dot{i}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_k \\ \dot{i}_p \\ \dot{i}_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

得到 $d-q$ 轴系到 $\alpha-\beta$ 轴系的变换矩阵和其逆变换矩阵分别为式 (9) 和式 (10) 所示, 其中, 变换前的坐标用下角标表示, 变换后的用上角标表示。

$$C_{dq0}^{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C_{\alpha\beta 0}^{dq0} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

容易证明, $C_{dq0}^{\alpha\beta 0}$ 和 $C_{\alpha\beta 0}^{dq0}$ 均为正交矩阵, 故由两相旋转轴系到两相静止轴系的电流和电压的恒功率变换为式 (11), 由两相静止轴系到两相旋转轴系的电流和电压恒功率变换为式 (12)。

$$\begin{cases} \dot{i}_{dq0} = C_{dq0}^{\alpha\beta 0} \dot{i}_{\alpha\beta 0} \\ u_{dq0} = C_{dq0}^{\alpha\beta 0} u_{\alpha\beta 0} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \dot{i}_{\alpha\beta 0} = C_{\alpha\beta 0}^{dq0} \dot{i}_{dq0} \\ u_{\alpha\beta 0} = C_{\alpha\beta 0}^{dq0} u_{dq0} \end{cases} \quad (12)$$

考虑到 $d-q$ 轴系相对于 $\alpha-\beta$ 轴系旋转。结合永磁同步电机的运行特点, 可以将 d 轴轴线方向选定为转子磁场方向, 这时 $d-q$ 称为转子磁场定向的同步坐标轴系。这样, 在以上分析的基础上, 通过由 ABC 到 $\alpha-\beta$ 再到 $d-q$ 的变换, 可以将永磁同步电机在 ABC 三相实际轴系下的电压电流量变换到以转子磁场定向的同步坐标轴系下。

由式 (5)和式 (11), 有

$$\begin{aligned} \dot{i}_{dq0} &= C_{dq0}^{\alpha\beta0} \dot{i}_{\beta0} = C_{dq0}^{\alpha\beta0} C_{\alpha\beta0}^{ABC} \dot{i}_{ABC} = C_{dq0}^{ABC} \dot{i}_{ABC} \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta-\frac{4\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{13}$$

同理, 由式 (5)和式 (12), 有

$$\begin{aligned} u_{ABC} &= C_{ABC}^{\alpha\beta0} u_{\alpha\beta0} = C_{ABC}^{\alpha\beta0} C_{\alpha\beta0}^{dq0} u_{dq0} = C_{ABC}^{dq0} u_{dq0} \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta-\frac{4\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{14}$$

3 永磁同步电动机控制系统模型

永磁同步电动机和感应电动机的控制系统模型大体上相似, 永磁同步电动机通过给定转速与实际电机转速比较的 PI 调节闭环控制, 从而实现转速与给定无偏差。转速偏差经过 PI 调节后产生转矩给定信号, 而转矩给定的大小直接决定同步旋转坐标 i_q 的大小, 通过转矩方程即可以求出 i_q 的大小, 如给定 $i_q=0$ 时, 则永磁同步电动机的转矩方程为 $M=p i_q \psi_f$, 其中 p 为电机极对数, ψ_f 为永磁体产生的磁通, i_q 给定信号及 i_d 给定信号 ($i_d=0$) 和实际检测出来的三相电机电流比较再经过 PI 调节环节, 消除了给定电流和实际电流的偏差, 经过 dq 轴电压方程计算, 得出 dq 轴电压, 经过两相到三相坐标变化得出施加在电机定子的三相电压。坐标变换需要的 θ 角由转子位置传感器直接给出。

4 系统的仿真模型

利用 Matlab 里的 Simulink 的仿真模块, 对两个系统分别仿真, 并结合工程实际采用了离散仿真, 使其更接近实际系统。系统转速给定值为 200 r/min

转矩给定信号为阶跃函数, 初始值为 6 N·m, 末值为 1 N·m, 跃变时间为 0.1 s。仿真结果如下。

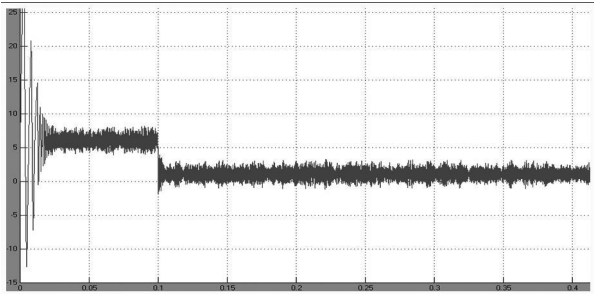


图 3 电磁转矩波形

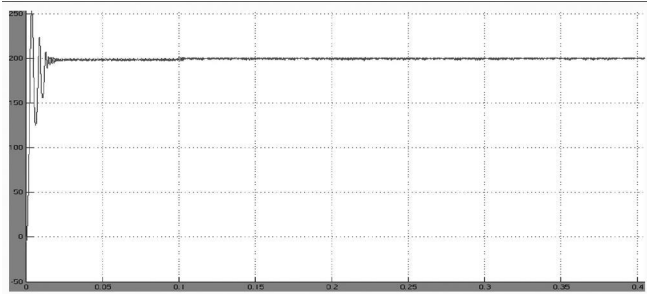


图 4 转速波形

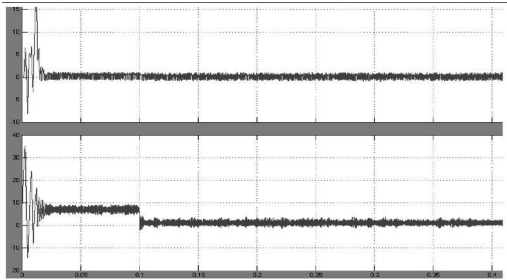


图 5 定子 dq 轴电流波形

由仿真结果的波形可以看出同步电动机启动和稳态性能都是非常好的, 与实际相吻合。

在仿真模型中永磁同步电动机采用了电压交叉解耦, 输出电压值来控制电压型逆变器, 并在解耦的基础上增设了交、直轴电流的给定值与实际值的误差 PI 调节, 可以消除定子电阻受温度变化对定子电压的影响, 同时, 对交、直轴交叉耦合电压项的补偿采用了 dq 轴电流误差的 PI 调节器输出, 其计算出的解耦电压比实际的交叉解耦电压值要大, 当解耦电压迭加到电机的控制电压端时, 加快了电机控制的响应速度, 提高了电机在高速运行的解耦效果, 增强了系统的稳定性, 这是交叉电压解耦的显著优点。

5 结 论

通过建立永磁同步电动机矢量控制仿真模型, 对

电机动态性能进行了研究,得到了符合物理规律的结果。这一事实证明基于对电机矩阵分析原理建立的模型是合理的,对研究电机的动态行为具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 周扬忠,胡育才,黄文新,等. 阻尼绕组对直接转矩控制

同步电动机动态行为的影响[J]. 航空学报, 2005, 26(4): 476—482.

[2] 扬顺昌. 电机矩阵分析[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1988.

[3] 田淳. 无位置同步电动机转矩控制理论与实践[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.

(收稿日期: 2009—09—15)

《四川电力技术》投稿须知

《四川电力技术》是四川省电力公司主管、四川省电机工程学会和四川电力试验研究院联合主办的国内外公开发行的综合性学术的电力科技期刊,主要刊登电力系统的科研、规划、生产运行、设备和系统维护等方面的研究报告、专题论述、应用研究、经验交流、技术讨论等文稿,尤其是科研创新方面的论文。本刊热诚欢迎投稿。根据科技论文规范化的要求,本刊对来稿提出以下要求。

1) 文稿内容应具有科学性、创新性和实用性;论点明确、数据可靠、说明严谨、数学推导简明;语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。学术论文请按 GB 7713—1987《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》书写,篇幅以版面不超过 6000 字(包括图表所占篇幅)为宜。

2) 文稿须写有中文摘要、关键词。摘要内容包括研究目的、方法、结果和结论四要素。摘要在 150~300 字之内。关键词是反映论文的词组,选 3~8 个。摘要及关键词、文章题目均附英文译文。

3) 文稿表格尽量采用“三线表”。表格上方写表序和表名。表注放在表底。插图应清晰,少而精,插图下方应有图序和图名。能用文字或表格描述的尽可能不用插图。

4) 来稿计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》和符号。

5) 文中或公式中外文字母符号要注明文种、大小写、上下标、正体、斜体。

6) 参考文献应尽量选用公开发表的资料,按在正文中出现的先后次序列表于文后,以 [1]、[2]……标识序号,且与正文中的指示序号一致。按《文后参考文献著录规则, GB/T 7714—2005》和《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范, CAJ-CD B/T 1—2006 修订版试行稿》的要求著录文后参考文献。

文献类型及其标识为:普通图书 [M];会议论文 [C];报纸文章 [N];期刊文章 [J];学位论文 [D];报告 [R];标准 [S];专利 [P];汇编 [G];档案 [B];古籍 [O];参考工具 [K];其他未说明的文献类型,例如可公开的政府行政管理部门编号文件、行业或大公司的技术规范或工作手册 [Z]。网上期刊 [J/OL];网上电子公告 [EB/OL]。电子文献尚需在载体标记后加上发表或更新日期(加圆括号)、引用日期(加方括号)和电子文献网址。

7) 投稿可通过 E-mail 提供电子文件,信箱为“cdscdljs@163.com”。稿件上注明详细地址、邮政编码、联系电话,并请自留底稿,本刊一律不退稿。作者在投稿 3 个月后可致电 028—87082036 或 E-mail 到编辑部了解审稿情况。

8) 本刊投稿自愿,文责自负。对录用稿件编辑部有权进行必要的删改,如不愿被删改,请在原稿上注明。

9) 本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、中国期刊网、北极星网站、万方数据库、《中国期刊全文数据库》等网站,稿件一经录用刊登,作者著作权使用费及稿酬已一次付清,如作者不同意收录,请在来稿时提出声明,本刊将作适当处理。

来稿请寄:四川省成都市青华路 24 号《四川电力技术》编辑部收

邮政编码: 610072 电话: (028)87082037, 87082036 E-mail: cdscdljs@163.com

交直流系统的快速复故障过滤算法

叶晓峻, 李华强, 赵周芳

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 高压直流输电的出现给电压稳定研究带来了新的挑战, 其中在线电压稳定分析是一项具有挑战性而又不可避免的工作。提出了系统发生鞍结分岔情况下, 以负荷裕度为排序依据的快速复故障过滤算法。在典型的直流控制方式下, 通过线性灵敏度法获得复故障时负荷裕度和电压的线性评估值。然后通过考虑潮流方程的非线性提出了非线性灵敏度算法, 并利用快速线搜索技术, 对线性评估值加以改进。通过对 IEEE 57 节点系统的仿真分析, 验证了该方法的有效性和可行性。

关键词: 交直流系统; 复故障; 鞍结分岔; 负荷裕度; 非线性灵敏度

Abstract: The emergence of high-voltage DC (HVDC) transmission brings new developing prospects for the study of voltage stability and the online voltage stability assessment is one of the most important research fields. Based on the conditions of saddle node bifurcations, a fast simultaneous fault filter algorithm is presented so as to calculate the load margin. Upon the condition of a typical DC control mode, the linear estimation values of the load margin and the voltage at the time of simultaneous fault is obtained by linear sensitivity method. Then, a nonlinear sensitivity method is proposed considering the nonlinearity of the power flow equations. By making use of the fast linear search technology, the linear estimation values are improved significantly. The accuracy and validity of the proposed method is verified by testing the IEEE 57-bus systems.

Key words: AC/DC power system; simultaneous fault; saddle node bifurcation; load margin; nonlinear sensitivity

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0016-04

0 引言

在交直流系统中, 直流输电改变了以往电力系统的结构, 从而使得系统的运行特性更加复杂。为了快速有效地进行复故障下的交直流系统在线电压稳定分析, 需要快速而精确的算法。

负荷裕度是最常用的电压稳定裕度指标。目前, 交直流系统负荷裕度求解方法主要有连续潮流法^[1]、崩溃点法^[2,3]和非线性规划法^[4]。文献[5]对不同控制方式下的交直流系统负荷裕度进行计算, 更符合实际的运行情况。由于负荷裕度的精确算法计算时间长, 很难达到在线应用的要求, 从而出现了针对事故过滤和排序的负荷裕度快速算法^[6-13], 包括迭代过滤法、曲线拟合法、特征值、线性和非线性灵敏度法。

然而, 以上算法都是针对交流系统故障分析, 而交直流系统复故障还未被充分研究。文献[9, 11]中线性灵敏度法具有计算原理简单、速度快的优

点。但是, 对于非线性较强的系统或严重故障时会产生较大的误差, 甚至使算法失效, 而文献[14]中应用非线性灵敏度法很好地解决了这个问题。

因此在文献[14]的基础上, 提出了交直流系统在典型直流控制方式(整流端定电流、逆变端定熄弧角)下, “N-2”复故障下基于负荷裕度评估的非线性灵敏度快速算法。算法的有效性通过 IEEE 57 母线系统模型的仿真得到了验证。

1 数学模型的建立

1.1 直流系统模型

交直流系统中某个节点含有换流站即关联直流端时, 如图 1 所示。

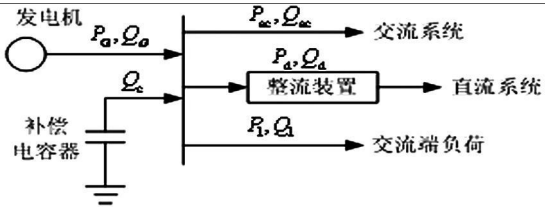


图 1 含有换流站节点的接线示意图

其中, P_1 、 Q_1 表示负荷注入的功率; P_G 、 Q_G 表示发电机注入的功率; Q_c 表示无功补偿注入的无功功率; P_{ac} 、 Q_{ac} 表示注入交流系统的功率; P_d 、 Q_d 表示注入直流系统的功率。其交流端的节点功率方程式为

$$\begin{cases} P_G + P_1 = P_{ac} + P_d \\ Q_G + Q_1 = Q_{ac} + Q_d + Q_c \end{cases} \quad (1)$$

与交流系统相比, 该节点增加了换流器转换方程, 文献 [15] 作了详细介绍, 这里不再详述。

直流系统中, 一旦控制方式确定, 则注入任意一个换流站的功率只与该换流站的交流节点电压幅值和该换流站所处的直流系统中其他的换流站交流节点电压幅值有关^[16]。因此, 从交流侧注入任意换流站的功率可看作是某些交流节点电压幅值的函数, 而与交流系统的任何一个变量无关, 即直流系统已被等值掉了。这就把交直流系统的潮流计算问题简化为具有同样交流节点个数的一个纯交流系统的潮流计算问题。

结合文献 [4] 分析可知, 在采用内点法对交直流系统故障前负荷裕度求解时, 只是需要在原交流系统的基础上, 对有直流关联的 Jacobi 和 Hessian 矩阵项进行修改, 而且计算过程中 Jacobi 及 Hessian 矩阵计算公式保持不变。

1.2 复故障的数学模型

引入负荷裕度参数 λ 和故障参数 p , 当 $\lambda=0$ 对应初始运行点时, 则 λ 的临界值即代表系统的负荷裕度。当 λ 为正时, 故障后系统保持稳定; 当 λ 为负时, 故障后将发生电压崩溃。 $p^{(k)}=0$ 代表故障 k 前的条件; $p^{(k)}=1$ 代表故障 k 后的条件; 上标 k 意味着该系数与故障相关。

支路故障: 为了表示支路故障, 引入故障参数 $p^{(k)}$ 来表达每条支路导纳 $(1-p^{(k)})y_{ij}$, 其中 y_{ij} 代表故障线路的导纳。

发电机故障: 通常情况下故障发电机被视为输出为 0 的 PQ 发电机, 因此当一台 PV 发电机发生故障, 必须把条件由 PV 转换为 PQ。然而, 这将在采用灵敏度分析时出现问题, 因为故障前、后潮流方程本身将会变化从而影响计算的快速性。故此假定所有发生故障的发电机在故障前都为 PQ 发电机, 而且故障发电机的有功功率损耗都能够通过包括平衡节点发电机的其他非故障发电机平衡。

从而得到同时包含发电机和支路故障参数的扩展潮流方程如下。

$$f(x, \lambda, p) = y_0(p) + \lambda y_d(p) - g(x, p) = 0 \quad (2)$$

其中, $x \in R^n$ 为状态参数; $\lambda \in R^1$ 为反映负荷水平的参数; $y_d \in R^m$ 为负荷变化方向; $y_0(p) + \lambda y_d(p)$ 是发电机的节点注入, 它包含表示发电机故障的参数; $g(x, p)$ 是节点功率注入, 它包含了表示支路故障的参数。因此, 式 (2) 可以同时表示发电机和支路两种故障情况。这是所提出的潮流数学模型的关键之处。

2 交直流系统事故前预处理

2.1 原始一对偶内点法求临界点

对于鞍结分岔, 在临界点处, 存在下列方程组。

$$f(x, \lambda, p) = 0 \quad (3)$$

$$\omega^T f = 0 \quad \|\omega\| \neq 0 \quad (4)$$

或

$$f_v = 0 \quad \|v\| \neq 0 \quad (5)$$

式中, w 、 v 分别是函数 $f(x, \lambda, p)$ 的对应于变量 x 的雅可比矩阵的零特征值的左特征向量和右特征向量。

利用原始一对偶内点法精确求解交直流系统的故障前电压稳定临界点^[4]。求得故障前崩溃点处直流线路的注入功率, 将直流系统换流站处理成接在相应交流节点上的一个等效 P、Q 负荷, 然后进行复故障过滤和排序。

2.2 预处理具体步骤

综上所述, 特做预处理如下。

- 1) 用内点法计算交直流系统故障前的 λ_c 、 x_c
- 2) 计算崩溃点处的直流支路两端功率作为节点注入功率, 将系统转化为纯交流系统;
- 3) 计算临界点所有发电机的无功功率输出;
- 4) 把所有的发电机节点当作 PQ 节点进行处理, 基态情况下的无功功率输出通过下式计算得到: $Q_{gi} = Q_{gi} / (1 + \lambda_c)$ 。
- 5) 计算雅可比矩阵及其最小奇异值对应的左、右特征向量 w_c 、 v_c 。

以上的预处理过程只进行一次, 所得 λ_c 、 x_c 、 w_c 、 v_c 适用于所有故障后计算。

3 基于负荷裕度的故障评估

首先, 通过线性灵敏度法获得复故障时负荷裕度和电压的线性评估值。其次, 通过考虑潮流方程的非线性提出了非线性灵敏度算法, 并利用快速直线搜索

技术得到满意的结果。

3.1 线性灵敏度评估

方程 (3)~(5)在故障前分岔点 $\lambda=\underline{\lambda}$, $\underline{x}=\underline{x}$ $\underline{p}=0$ 附近线性化,并将 $\Delta \underline{p}=1$ 代入,获得如下方程。

$$H \begin{Bmatrix} \Delta \underline{x} \\ \Delta \underline{y} \end{Bmatrix} = \underline{r}^{(k)} \tag{6}$$

其中,

$$H = \begin{bmatrix} -\underline{f}_{\underline{x}} & -\underline{f}_{\underline{y}} \\ \underline{\omega}_i^T \underline{f}_{\underline{x}} & 0 \end{bmatrix}; \underline{r}^{(k)} = \begin{bmatrix} \underline{f}_{\underline{p}} \\ \underline{\omega}_i^T \underline{f}_{\underline{p}} \end{bmatrix};$$

$\underline{f}_{\underline{x}} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\underline{f}_{\underline{p}} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\omega_i = \mathbb{R}^{1 \times 1}$ 为 ω 的第 i 个元素; n 为潮流方程 (3)的阶次。

由于有了 2.2 节的预处理,矩阵 H 成为了一个与故障无关的常系数矩阵,只是向量 $\underline{r}^{(k)}$ 与故障 k 有关。方程 (6)的阶次为 $n+1$,其解为故障后电压 $\hat{\underline{x}}$ 和负荷裕度 $\hat{\lambda}$ 。

$$\hat{\underline{x}} = \underline{x} + \Delta \underline{x} \tag{7}$$

$$\hat{\lambda} = \underline{\lambda} + \Delta \lambda \tag{8}$$

本算法中,因为 H 是常数矩阵,所以对所有故障只需要做一次 LU 分解。只有回代才会用到不同的 $\underline{r}^{(k)}$ 。

3.2 引入非线性公式

首先定义以下函数。

$$\lambda = \frac{\omega^T (g(\underline{x}, 1) - \underline{y}_0(1))}{\omega^T \underline{y}_d(1)} = F(\underline{x}) \tag{9}$$

上式由方程 (2)乘以 ω^T 后变换得到。该方程中乘子的选择不是关键,这里选取常规向量 ω 作为乘子。

3.3 线搜索技术

为了进一步改进评估,采用了引入优化乘子的线搜索技术。在得到 $\Delta \underline{x}$ 之后,用式 (10)代替式 (7)来表示电压预测值。

$$\tilde{\underline{x}} = \underline{x} + \mu \Delta \underline{x} \tag{10}$$

其中, μ 是待确定的最优乘子。将式 (10)代入式 (9),预测值的最后形式为 μ 的函数。

$$\hat{\lambda} = F(\underline{x} + \mu \Delta \underline{x}) \tag{11}$$

为了确定 μ 的优化值,考虑以下最小化问题。

$$\min_{\mu} \epsilon(\mu) \tag{12}$$

其中,

$$\begin{aligned} \epsilon(\mu) &= f(\tilde{\underline{x}}(\mu), \hat{\lambda}, 1)^T W f(\tilde{\underline{x}}(\mu), \hat{\lambda}, 1) \\ &= \mu^4 a_4 + \mu^3 a_3 + \mu^2 a_2 + \mu a_1 + a_0 \end{aligned} \tag{13}$$

3.4 计算步骤

- 1)确定初始运行点条件;
- 2)计算故障前系统的 $\underline{x}$, $\underline{\lambda}$, ω , $\underline{y}$ 和直流支路功率

进行 2.2 节的预处理;

3)计算矩阵 H 并进行 LU 分解;

4)对于每一个故障 k 重复以下步骤。

- ①计算 $\underline{r}^{(k)}$;
- ②由式 (6)计算 $\Delta \underline{x}$;
- ③用式 (13)解出式 (12)的 μ ;
- ④由式 (11)得到 $\hat{\lambda}$ 。

4 数值仿真

测试系统是由 IEEE 57 节点系统去掉原交流系统的 4—5 支路,替换为图 2 所示的直流支路 a—b,并假设母线上有两台容量相同的发电机 s—I 和 s—II 以及支路 i—I 和 i—II 都是双回线,其中 i 表示节点号。

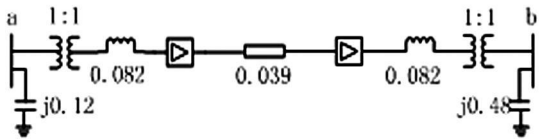


图 2 直流线路系统

直流系统运行于典型运行方式下,即整流侧定电流 (1 p.u.)、逆变侧定熄弧角 (15°)的控制方式。换流站变压器变比范围为 15% ,每挡调节量 1.5% 。系统部分直流参数见表 1。

表 1 系统部分直流参数

换流器	参数	
	θ_{min}	$I_b / p.u.$
整流器	5°	1
逆变器	15°	0.9

负荷裕度 ΔP 的标幺值可表示为

$$\Delta P = \lambda P_0 \tag{14}$$

其中, P_0 为 $\lambda=0$ 运行点的基态负荷。

下面列出 IEEE 57 母线系统 3 种复故障类型中最严重的情况,并且按照 ΔP 严重程度排序 (见表 2、3、4)。对误差进行如下定义。

$$Error\% = \frac{P_{estimate} - P_{exact}}{P_{exact}} \times 100 \tag{15}$$

其中, $P_{estimate} = P + \Delta P$ 是崩溃点处功率的估计值; P_{exact} 是它的精确值,通过内点法计算得到。

该方法编写的 Matlab 程序采用 Intel® Pentium® Dual E2160 @ 1.80 GHz 处理器进行计算。从表 2、3、4 看出,在采用新的算法之后,对于 IEEE 57 节点系统,最大误差为 -10.535% 。表 5 表明在单一故

障下,该算法所用的时间不到精确算法时间的 1/10。在保证严重事故集的负荷裕度精度的情况下有效降低误排序的可能。

表 2 IEEE 57 母线系统发电机复故障负荷裕度的估计值				
故障 (G-G)		精确值	文中方法	误差 /%
发电机 1	发电机 2			
8-I	8-II	-0.987	-0.424	5.132
12-I	12-II	2.343	1.742	-4.203
8-I	12-I	3.087	1.937	-7.644
3-I	8-I	4.951	4.001	-5.618
6-I	8-I	5.109	4.180	-5.443

表 3 IEEE 57 母线系统发电机和支路复故障负荷裕度的估计值				
故障 (G-B)		精确值	文中方法	误差 /%
发电机	支路			
8-I	1-15(I)	3.956	2.759	-7.522
8-I	8-9(I)	5.220	3.629	-9.262
12-I	1-15(I)	4.524	3.671	-5.175
8-I	1-16(I)	4.802	3.738	-6.384
8-I	2-3(I)	4.754	3.789	-5.774

表 4 IEEE 57 母线系统支路复故障时负荷裕度的估计值				
故障 (B-B)		精确值	非线性估计值	误差 /%
支路 1	支路 2			
35-36(I)	35-36(II)	-0.439	-1.240	-6.954
25-30(I)	25-30(II)	2.826	1.547	-8.651
37-38(I)	37-38(II)	4.243	2.855	-8.567
34-35(I)	34-35(II)	3.591	3.130	-2.965
36-37(I)	36-37(II)	5.061	3.268	-10.535

表 5 计算时间对比		
单一故障	精确算法 计算时间 /s	非线性灵敏度 算法计算时间 /s
IEEE 57 系统	0.345	0.025

5 结 论

在一种典型运行方式下,即整流侧定电流(1 p u)、逆变侧定熄弧角(15°)的控制方式,针对“N-2”发电机和支路复故障提出了一种快速过滤算法。通过 IEEE 57 节点系统对本算法进行了验证,最大误差不超过 11%,显而易见,该方法在大幅提高计算精度的同时满足了快速求解的要求,可用于在线计算。

参考文献

[1] Canizares C A, Alvarado F L. Point of Collapse and Continuation Method for Large AC/DC System [J]. IEEE Trans on Power System, 1993, 8(1): 1-8.
[2] 胡林献, 陈学允. 崩溃点法交直流联合系统电压稳定性

分析 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 395-398.
[3] Canizares C A, Alvarado F L, DeMarco C L et al. Point of Collapse Methods Applied to AC/DC Power Systems [J]. IEEE Trans on Power System, 1992, 7(2): 673-683.
[4] 王秀婕, 李华强, 李波. 基于内点法的交直流系统电压稳定性评估 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(6): 72-77.
[5] 王秀婕, 李华强, 李波, 等. 基于连续潮流法及内点法的交直流负荷裕度算法 [J]. 继电器, 2006, 22(34): 22-26.
[6] 邱晓燕, 李兴源, 林伟. 在线电压稳定评估中事故筛选和排序方法的研究. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 50-55.
[7] Z H, Jia B, Jeyasurya. Contingency Ranking for ON-line Voltage Stability Assessment. IEEE Trans on Power System, 2000, 15(3): 1093-1097.
[8] 冯治鸿, 刘取, 周双喜, 等. 多机电系统电压静态稳定性的特征结构分析法 [J]. 清华大学学报, 1991, 31(4): 19-27.
[9] I Dobson. Computing an Optimal Direction in Control Space to Avoid Saddle Node Bifurcation and Voltage Collapse [J]. IEEE Trans On Automatic Control 1992 (10): 1616-1620.
[10] N. Yorino, S. Harada, K. Hayashi, H. Sasaki. A Method of Voltage Stability Evaluation for Contingencies [C]. Bulk Power System Dynamics and Control IV, Santorini Greece August 1998.
[11] S. Greene, I. Dobson, F. L. Alvarado. Contingency Ranking for Voltage Collapse via Sensitivity from a Single Nose Curve [J]. IEEE Trans on Power System, 1999, 14(1): 232-240.
[12] Scott Greene, Ian Dobson. Voltage Collapse Margin Sensitivity Methods Applied to the Power System of Southwest England [D]. Madison USA: Electrical & Computer Engineering Department University of Wisconsin-Madison, 1998.
[13] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种用于预防支路型失稳故障的灵敏度方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 69-73.
[14] Yorino N, Li H Q, Harada S et al. A Method of Voltage Stability Evaluation for Branch and Generator Outage Contingencies [J]. IEEE Trans on Power System, 2004, 19(1): 252-259.
[15] 顾成华, 胡林献. 连续潮流法交直流联合电力系统静态电压稳定性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.
[16] 张梅, 刘天琪. 交直流混合系统电压稳定问题综述 [J]. 现代电力, 2005, 22(3): 15-19.

(收稿日期: 2009-10-22)

超高压线路单相接地故障类型识别的新方法

胡亚平, 吕飞鹏

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:在带并联电抗器超高压输电线路中,当发生单相接地故障,瞬时性故障时断开恢复电压中存在由于储能元件初始储能引起的自由分量,该自由分量幅值接近或高于其稳态基波分量的幅值,频率低于且接近于工频,因此断开相恢复电压呈拍频性质;而永久性故障时故障点始终存在,线路上各储能元件所储存的能量快速衰减,断开相电压中没有低频振荡分量而仅含有基波量。提出一种判别其两种波形的不同以区别故障性质的方法。该方法原理较简单,具有一定的工程应用前景。

关键词:超高压输电线路;并联电抗器;单相故障性质;振荡分量

Abstract: When single-phase ground fault occurs in extra-high voltage (EHV) transmission line with shunt reactors, the character of single-phase transient fault recovery voltage is different from the permanent fault. A method through analyzing the amplitude is developed to identify the recovery voltage, then the fault types can be distinguished according to the variation of the fault-phase voltage signals. The proposed method is simple, so it could be applied to the actual project.

Key words: extra-high voltage transmission line; shunt reactor; the property of single-phase fault; oscillation component

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0020-02

单相重合闸装置是提高电力系统运行可靠性和稳定性的重要措施,在超高压输电线路中被广泛采用。根据电网运行的经验,电力系统中大多数故障为单相接地故障,其中约 80% 为瞬时性故障。超高压输电线路广泛采用单相自适应重合闸技术以保证系统稳定和供电的连续性。如判断为瞬时性故障,则重合,如为永久性故障,则不重合,这样提高电力系统的稳定性,减少对系统的冲击^[1-9]。

在超高压长距离输电线路中,为限制工频过电压,补偿线路容性无功,一般会装设并联电抗器。所以当瞬时性故障时断开相的恢复电压中存在储能元件初始储能引起的自由分量,该自由分量幅值接近或高于其基波稳态分量的幅值,频率低于且接近于工频,所以断开相的恢复电压会呈拍频性质;而永久性故障时故障点却一直不会消失,线路对地可靠接地,线路上各储能元件所储存的能量快速衰减,因此断开相电压中仅含有基波量^[2]。文献[3]提出了识别故障性质的电压拍频判据,该判据判断结果无交叉模糊区,判断时间约为半个拍频周期。这里提出一种基于断开相恢复电压幅值的方差法新判据,本判据原理简单,且判断时间较短。

在带有并联电抗器的超高压线路上,恢复电压的瞬时值可以用下式表示^[6]。

$$U(t) = U_s \sin(2\pi f_1 t + \varphi_1) + U_f e^{-\theta t} \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2) \quad (1)$$

式中, U_s 和 U_f 为工频分量和自由分量的幅值; f_1 和 f_2 为工频分量和自由分量的频率; φ_1 和 φ_2 为工频分量和自由分量的初相; θ 为自由分量的衰减系数。

瞬时性故障断开相线路端电压的工频分量为

$$|U_s| = |U_y + 0.5U_{xL}| > 0.5U_{xL} \quad (2)$$

式中, U_y 为电容耦合电压; U_{xL} 为电磁耦合电压。

图 1 为线路中点发生单相瞬时性故障的仿真波形。根据文献[5],设定 20 ms 时单相接地故障发生,80 ms 时两侧断路器同时跳开,假设瞬时性故障 250 ms 时故障消失。

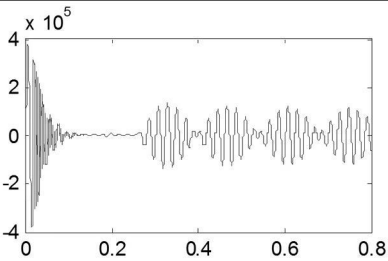


图 1 单相瞬时性故障的仿真波形

1 单相接地故障的分析

1.1 瞬时性故障

1.2 永久性故障

当线路发生单相永久性接地时,由于故障点是始终存在,线路对地电容可靠放电,导致 $U_y = 0$, 所以线

路断开相两端的电压由接地点位置、健全相负荷电流、接地电阻 R_f 以及线路的参数决定。断开相电压瞬时值可以表示为

$$U(t) = U_s \sin(2\pi f t + \theta) \tag{3}$$

图 2 为线路中点发生单相永久性故障的仿真波形。

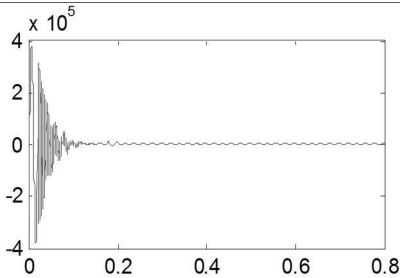


图 2 带并联电抗器输电线路单相永久性故障的仿真波形

2 判别故障性质的基本原理

电压等级为 300~500 kV 的输电线路并联补偿度一般为 70% 左右,因此可以推断出,对于超高压的瞬时性故障,并联电抗器产生的自由分量频率一般低于 45 Hz 而稳态分量频率为 50 Hz。由文献 [3] 可知,拍频周期约为 100 ms 因为其频率约为 10 Hz 即约每 20 ms 达到一次峰值,但各峰值的大小差异很大,呈正弦规律变化。而对于永久性故障,由于没有低频振荡分量而只存在频率为 50 Hz 稳态分量,所以每 20 ms 将出现一次峰值,且每次都是大小差异较小。

基于上述特征,则提出:当故障发生且断路器跳开后,分析其断开相电压,每隔 20 ms 取一个一周波的时间窗,用最小二乘法估算出这段波形的幅值,用 5 个幅值点求方差 D,并对方差 D 归一化,分母为 5 个幅值的平均。比较两种故障时方差的大小,从而确定出一个恰当的门槛值,当方差大于此门槛值时,判定为瞬时性故障,否则为永久性故障。

3 仿真模型参数和仿真结果分析

3.1 仿真模型参数

为了验证上述理论分析的正确性,采用了 Matlab 建立一系统进行仿真。实验系统为重庆市万县至龙泉 500 kV 输电系统^[4],如图 3 所示。

系统和线路参数如下。
A 侧系统 $X_{m1}=49.34 \Omega$, $X_{m0}=41.34 \Omega$;

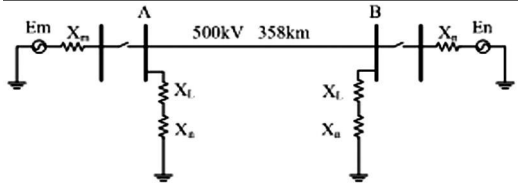


图 3 两端带并联电抗器 500kV 输电系统

B 侧系统 $X_{n1}=46.03 \Omega$, $X_{n0}=103.36 \Omega$;
线路参数 $r=0.0195 \Omega/\text{km}$, $x=0.1675 \Omega/\text{km}$, $l=0.9134 \text{ mH}/\text{km}$, $lb=2.7190 \text{ mH}/\text{km}$, $cl=14.00 \text{ nF}/\text{km}$, $cb=8.34 \text{ nF}/\text{km}$;
电抗器参数 $X_L=1680.56 \Omega$, $X_N=434 \Omega$ 。

3.2 仿真结果及分析

采用 Matlab 7.1 分别对单相接地故障发生在线路的首端 20%、50%、70% 和当发生永久性故障时经过不同的过渡电阻 (考虑金属性、100 Ω 、500 Ω) 接地等故障情况进行大量的 Matlab/Simulink 仿真实验。由表 1 的仿真结果可知,瞬时性故障时各时间段断开相电压幅值的方差明显大于永久性故障。根据实验仿真结果,确定断开相电压幅值方差的整定值为 100,若大于整定值,则判定为瞬时性故障,反之为永久性故障。从仿真结果看故障性质判别准确度很高,并且工程实现简单。仿真实验和理论分析基本一致。

表 1 仿真结果

短路位置	过渡电阻 / Ω	幅值的方差	整定值	判断结果
20%	瞬时	4 153	100	瞬时
	0	0.029 3	100	永久
	100	0.057 4	100	永久
	500	0.073 4	100	永久
	瞬时	430 1	100	瞬时
50%	0	0.063 9	100	永久
	100	0.077 4	100	永久
	500	0.080 3	100	永久
	瞬时	409 3	100	瞬时
	0	0.070 2	100	永久
70%	100	0.083 4	100	永久
	500	0.081 9	100	永久

4 结 论

针对带并联电抗器超高压输电线路中发生单相接地故障的特征,提出一种利用断开相电压幅值方差的超高压线路单相接地故障的故障类型判别方法。该判据原理清晰,算法不受接地电阻、负荷电流等因素的影响,且原理较简单,具有工程应用的前景。

(下转第 65 页)

性性质和本身良好的线性关系,使得在频域范围内的线性方程可以恰当地表示电力网络。但是谐波源的 $V-I$ 关系更加复杂,通常是非线性和时变的。为了找出合适的谐波源表示法已经做了许多努力,这也促使谐波分析不同方法的发展。目前的研究都在一个确定的框架内进行,考虑谐波产生源随机的特征仍然有许多领域去探索。需要确定与源谐波电流和电压有关的概率密度函数,需要从统计学的角度考虑网络怎么变化。随着增加的电源转换器的投运,电力网络变得更大、更复杂而且不断地变化,这些题目都会引起许多研究者的兴趣,需要做更进一步的研究。

参考文献

- [1] 张一中,宁元中,宋永华. 电力谐波 [M]. 成都:成都科技大学出版社,1992.
- [2] Wang Yifei S Chen S S Choi An Overview of Various Approaches to Power System Harmonic Analysis [J]. The 8th International Power Engineering Conference (IPEC 2007) 3—6 Dec 2007; 338 — 343.
- [3] George J W akileh 著,徐政译. 电力系统谐波——基本原理、分析方法和滤波器设计 [M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [4] GB 14549—93 电能质量 公用电网谐波 [S].

(上接第 21 页)

由于电源的电势与断开相恢复电压之间的电压差对合闸成功与否有重要影响,为了提高重合的成功率,重合闸装置可以实时测量断开相电压,以确定最佳的合闸时机,如何解决好合闸时机是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 刘浩芳,王增平,徐岩,等. 带并联电抗器的超 特高压输电线路单相自适应重合闸故障性质识别判据 [J]. 电网技术,2006,30(18): 29—34.
- [2] 商立群,白维祖,程刚,等. 带并联电抗器的线路单相自适应重合闸故障判别原理 [J]. 电力系统自动化,2008,32(6): 81—84.
- [3] 李斌,李永丽,贺永李,等. 750 kV 输电线路保护与单相重合闸动作的研究 [J]. 电力系统自动化,2004,28(13): 73—76.

- [5] Zheng Xu Hongtao Liu The Harmonic Model and Its Algorithm for Coupled Multiphase Transmission Line [J]. Harmonics and Quality of Power 2000. Proceedings Ninth International Conference on Volume 3. Page (s): 938 — 941.
- [6] Grady WM. et al(1993). Power Factor Correction and Power System Harmonics Short Course New Mexico State University.
- [7] Task Force on Harmonic Modeling and Simulation Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks Part I: Concepts Models and Simulation Techniques [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 11, 1996.
- [8] 陈宝林. 最优化理论及算法 [M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [9] A. T. Sario M. S. Calovic M. B. Djukanovic. Fuzzy Optimization of Capacitors in Distribution Systems [J]. IEE Proceedings—Generation Transmission and Distribution, 1997, 144(5): 415—422.
- [10] K. H. Abdul-Rahman S. M. Shahidepour A Fuzzy-based Optimal Reactive Power Control [J]. IEEE Transaction on Power Systems 1993, 8(2): 662—670.

(收稿日期: 2009—12—10)

- [4] 索南加乐,孙丹丹,付伟,等. 带并联电抗器输电线路单相自动重合闸永久故障的识别原理研究 [J]. 中国电机工程学报,2006,26(11): 75—81.
- [5] 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时故障和永久故障的方法 [J]. 西安交通大学学报,1984,18(2): 23—31.
- [6] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术 [M]. 西安:西安交通大学出版社,1996.
- [7] 林湘宁,刘沛,程时杰. 超高压输电线路故障性质的复值小波识别 [J]. 中国电机工程学报,2000,20(2): 33—38.
- [8] 李斌,李永丽,曾治安,等. 基于电压谐波信号分析的单相自适应重合闸 [J]. 电网技术,2002,26(10): 53—57.
- [9] 范越,施围. 输电线路单相自动重合闸中电压判据的修正 [J]. 电力系统自动化,2000,24(6): 44—47.

(收稿日期: 2009—9—23)

基于 Matlab/Simulink 的直流输电系统的建模与仿真

赵晓娜¹, 方 玉², 李天明¹

(1 电子科技大学, 四川 成都 610054; 2 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:介绍了高压直流输电 (HVDC) 系统的结构与原理。利用 Matlab 中的 Simulink 对 HVDC 系统进行建模, 分析其稳态特性, 并对几种常见故障进行了仿真, 得出相应的仿真波形, 验证了模型的有效性。

关键词:高压直流输电系统; Matlab/Simulink; 仿真模型

Abstract The basic structure and principle of high-voltage direct current (HVDC) transmission system are introduced briefly. Then a simulation model of HVDC system using Matlab/Simulink is established. With this model, the performances of its steady state are analyzed and several common faults are studied. Simulation results show the validity of the model.

Key words HVDC transmission system; Matlab/Simulink; simulation model

中图分类号: TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0022-03

0 引 言

与交流输电相比, 高压直流输电 (HVDC) 具有线路输送容量大、造价低、损耗小、电力系统间的非同步联网能力强等优点; 而且, 直流输电不存在交流输电的稳定问题, 有利于远距离大容量送电^[1]。

自从 20 世纪 80 年代末以来, 中国高压直流输电技术的研究和发展取得了突飞猛进的提高, 目前已投运 10 个直流输电工程, 包括舟山、葛南、天广、三常等工程。为实现“西电东送”的战略规划, 中国正在积极推进包括 ±660 kV、±800 kV、±1 000 kV 特高压 HVDC 工程的建设。近期中国规划发展的 HVDC 工程主要包括内蒙及陕甘宁地区的煤电通过高压直流或特高压直流向京津塘、山东等地输电, 四川水电向华东、华中地区特高压直流输电等。

值得一提的是, 德阳-宝鸡 ±500 kV 直流输电工程为四川电网与西北电网的联网工程, 已作为国家电网公司支援四川灾后重建的重点项目, 预计在

2009 年单极投运, 线路工程在 2009 年完工。
可以看到, 直流输电将成为中国电网的重要组成部分^[2]。在此背景下, 研究 HVDC 的结构、运行原理及控制方法, 对 HVDC 进行建模与仿真, 分析系统的稳态、动态特性等显得非常重要。下面利用 Matlab 中的 Simulink 对 HVDC 进行建模, 并在此模型基础上进行了系统的稳态、直流线路故障、逆变器交流侧 a 相接地故障及 a、b 两相接地故障仿真, 得出相应的仿真波形, 验证了 HVDC 模型的有效性。

1 HVDC 的结构与原理^[3]

HVDC 自 1954 年诞生以来, 其基本的工作原理变化不大, 如图 1 所示的简单两端 HVDC 输电系统包括两个换流站、直流输电线路及两端交流系统 I 和 II。当系统 I 向系统 II 送电时, 换流站 1 运行于整流状态, 把系统 I 送来的三相交流电变换成直流电, 经直流线路送到换流站 2。换流站 2 则运行于逆变状态, 把直流电变换为三相交流电送入系统 II。直流输

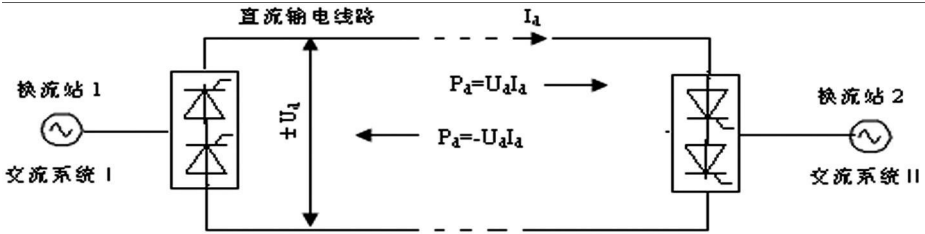


图 1 HVDC 输电的基本原理

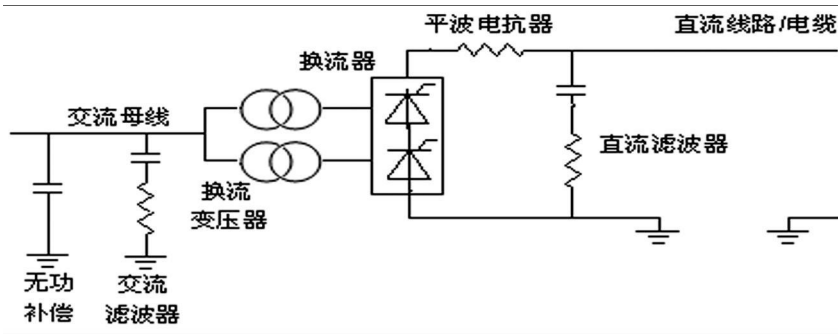


图 2 基于晶闸管换流站的基本结构

电两端的直流电压及其间的直流电流可以通过控制换流站内的换流器来进行快速调节,通常是由逆变站控制直流电压,整流站控制直流电流(或功率),从而实现可控的输送功率。直流输电线路不传输无功功率,但基于晶闸管的整流器和变换器在进行换流时,均需一定量的无功功率。

换流站是 HVDC 输电系统的核心部分,图 2 所示为一个基于晶闸管换流站的基本结构,主要包括以下几个部分。

(1)换流器:由晶闸管组成,用于整流或逆变。换流器一般采用三相桥式(有单、双桥两类)电路,每桥有 6 个桥臂(即 6 脉冲换流器),如天生桥—广州±500 kV HVDC 系统晶闸管块的额定电压为 8 kV,用 78 个块串联组成阀体。

(2)换流变压器:将送端交流系统电压变为整流桥所需要的电压,将逆变器输出的电压变为受端交流系统所需要的电压。

(3)平波电抗器:减小直流电压、电流的波动,受扰时抑制直流电流的上升速度。

(4)滤波器:交流侧滤波器一般装在换流变压器的交流侧母线上,主要作用是抑制换流器产生的注入交流系统的谐波电流,同时部分补偿换流器吸收的无功功率。直流侧滤波器一般并联接于直流极线上,主要

作用是抑制换流器产生的注入直流线路的谐波电流。

(5)无功补偿:通常由静电电容器(包括滤波电容)、静止无功补偿器供给,为直流线路提供无功补偿。

无论是整流器还是逆变器,适当地控制整流器的触发延迟角 α 和逆变器的触发超前角 β 便可以得到各种电压、电流特性。HVDC 系统中可通过调节 α 和 β 来控制线路上的电压、电流和传输的功率。一般情况下,换流站的控制方式是整流侧采用定直流电流控制方式,逆变侧采用定关断超前角控制方式和定直流电压控制方式^[4]。

2 HVDC 系统仿真模型

在 Matlab/Simulink 环境下,利用电力系统模块(power system block PSB)中的仿真模块对 HVDC 系统及控制器建立仿真模型。这里用 12 脉冲晶闸管变换器实现对 HVDC 系统的建模^[5],模型如图 3 所示。

图 3 中,500 kV、5 000 MV·A、50 Hz 的交流系统通过 1 000 MW 的直联联络线与 345 kV、10 000 MV·A、50 Hz 的交流系统相连。两个交流系统相角均为 80°,基频为 50 Hz 并带有 3 次谐波。两个变换器通过 300 km 的线路和 0.5 H 的平波电抗器连接起

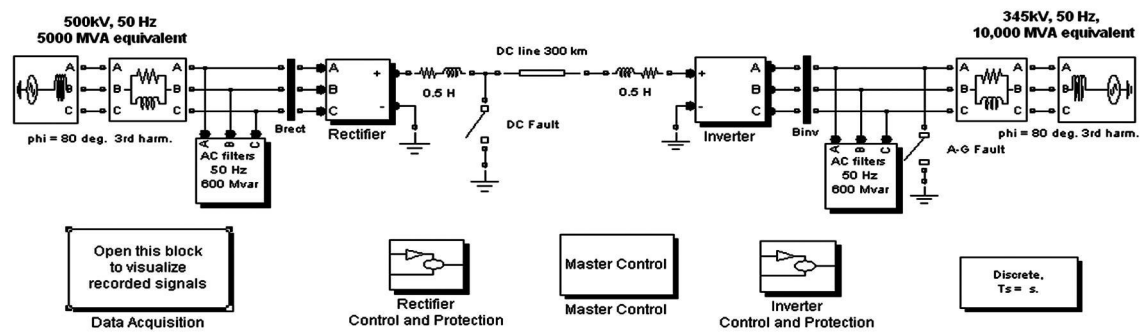


图 3 HVDC 仿真模型图

来,两个断路器模块分别用来模拟整流器直流侧故障和逆变器交流侧故障。打开图 3 中的“滤波器”子系统,如图 4 所示。交流滤波器电路由 150 Mvar 的无功补偿设备、高 Q 值 (100) 的 11 次和 13 次单调谐滤波器、低 Q 值 (3) 的高通滤波器 (24 次谐波以上) 组成。

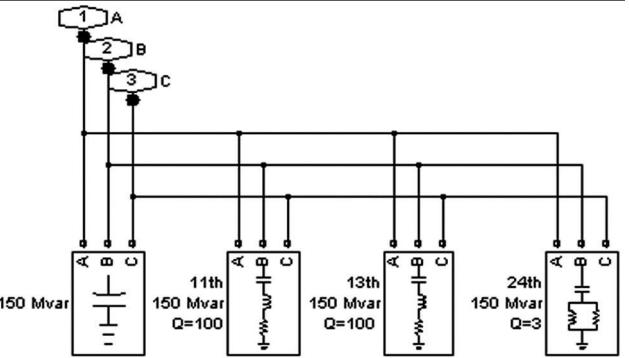


图 4 交流滤波器模型

3 仿真结果分析

基于图 3 所示的模型,分别对系统稳态、直流线路故障、逆变侧 a 相接地故障和 a、b 两相接地故障的情况进行仿真,仿真结果如下。

3.1 稳态系统波形

仿真后的电压和电流波形如图 5 所示。图中 V_{dl} 表示直流侧线路电压, I_d 和 I_{dref} 分别表示直流侧线路电流和实际参考电流,均为标么值, α 为整流器的触发延迟角。可见,系统经过一段时间后能够稳定运行。稳态后,直流电压为 1.0 pu,直流电流为 1.0 pu。

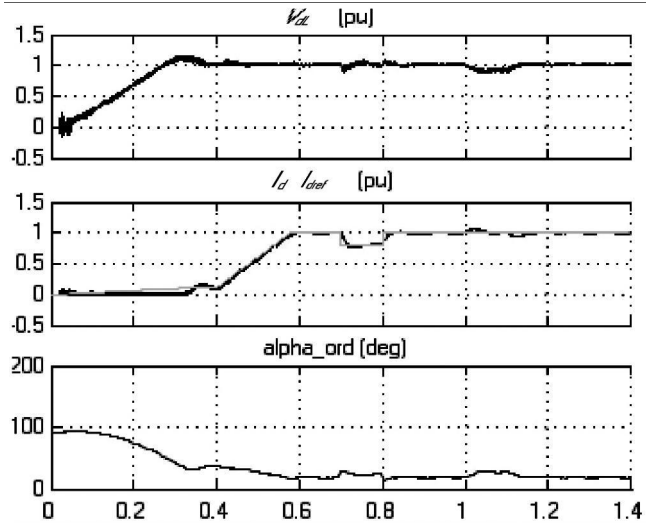


图 5 稳态仿真直流侧波形

3.2 直流线路故障

打开直流侧断路器模块,使其在 0.7 s 时导通,

0.75 s 时断开,接地时间为 0.05 s。整流侧相关波形,逆变侧交流电压和电流波形分别如图 6、7 所示。可见,故障时直流侧电流激增到 2.2 pu,直流侧电压降到 0 值。通过 VDCOL 子系统的调制,参考电流下降到 0.3 pu,因此故障发生后,直流侧仍有电流流通。t=0.77 s 时,触发延迟角被强制设为 166°,整流器运行在逆变状态。直流侧线路电压变为负值,将线路上的能量反送入交流系统,导致故障电流在过零点时快速熄灭。t=0.82 s 时,解除触发延迟角的强制值,额定直流电压和电流在 0.5 s 后恢复正常。

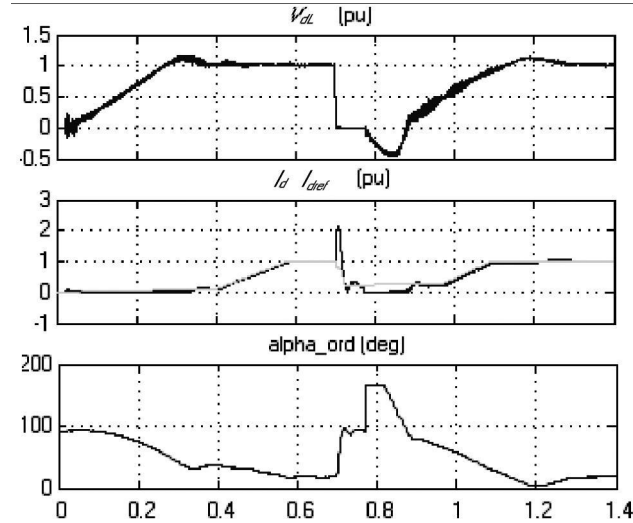


图 6 直流线路故障时整流侧波形

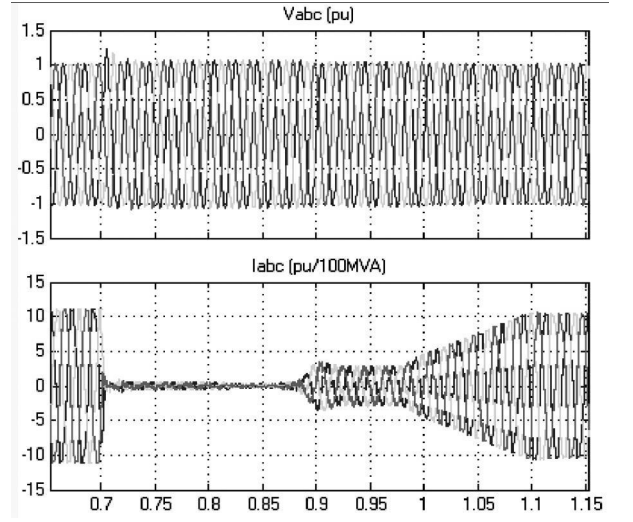


图 7 直流线路故障时交流部分波形

3.3 逆变侧 a 相接地故障

取消直流侧断路器导通动作,使逆变器断路器在 0.7 s 时导通,0.8 s 时断开,接地时间为 0.1 s。逆变侧的相关波形如图 8 所示。可见,故障导致直流电压和直流电流出现了振荡,故障开始时,逆变器两个阀

(下转第 33 页)

利电力企业管理协会, 1987.

[2] 王财胜, 孙才新, 廖瑞金. 变压器色谱监测中的 BPNN 故障诊断法 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(5): 322—325.

[3] 黄鞠名, 胡明华, 朱子述, 等. BP 网络在基于 DGA 变压器故障诊断中的应用 [J]. 高电压技术, 1996, 22(2): 21—23.

[4] 史忠植. 神经网络计算 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1993.

[5] 张萍萍, 姚万业, 杨明玉, 等. 基于改进 BP 算法的发电机组振动故障诊断技术 [J]. 华北电力大学, 2003, 30(6): 34—37.

[6] Rumelhart D E, et al Learning Representation by BP Errors [J]. Nature(London), 1986(7): 149—154.

[7] R. A. Jacobs Increased Rates of Convergence through Learning Rate Adaptation [J]. Neural Networks 1998, 1(4): 295—308.

(收稿日期: 2009-10-22)

(上接第 24 页)

进行换相时,因预计关断的阀关断后,在反向电压期间未能恢复阻断能力,当加在该阀上的电压为正时,又重新导通,即出现了换相失败现象,直流电流激增到 2 pu。t=0.8 s 时清除故障, VDCOL 将参考电流调节到 0.3 pu,经 0.35 s 后系统恢复。

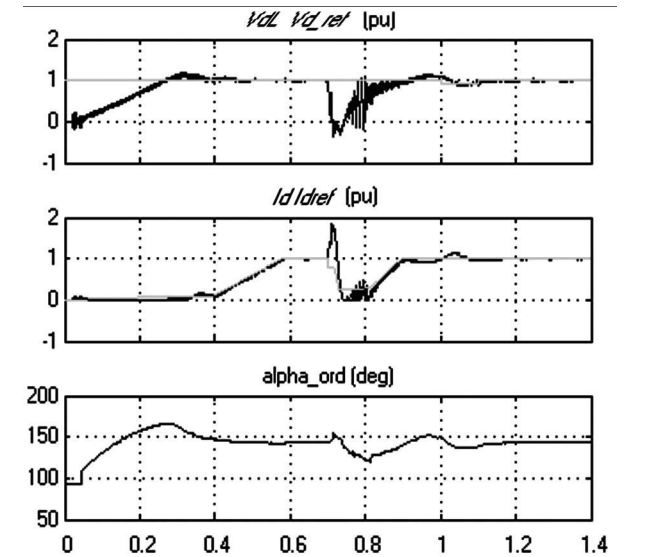


图 8 a 相接地故障波形

3.4 逆变侧 a b 两相接地故障

打开断路器模块,使其在 0.7 s 时导通, 0.8 s 时断开,整流侧交流电压和电流波形如图 9 所示。可见,两相接地故障使整流侧交流电压和电流发生了一定的扰动,交流电流的波动频率和幅度比较大。故障时,交流电流值迅速增加,之后逐渐下降为 0。故障清除后经过小幅度波动恢复稳态。同样,交流电压值在故障时有所增加,但增加的幅度要小一些,故障清除后也能够恢复稳态。

4 结 论

直流输电已成为中国电网的重要组成部分,所以

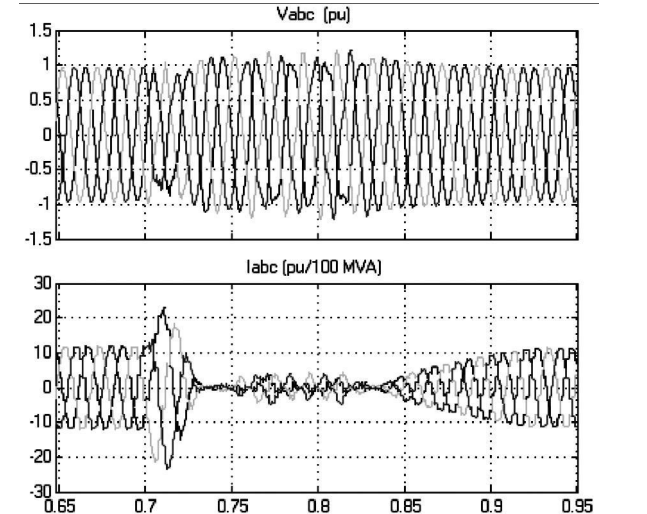


图 9 整流侧交流部分波形

HVDC 系统的暂稳态仿真对电力系统的研究、规划、设计和运行等起着重要作用。前面利用 Matlab 的 Simulink 及 PSB 对高压直流输电系统建模,并进行了稳态和一系列故障的仿真,得出相应的波形。可见,在 Matlab 环境下,可以进行 HVDC 系统的建模与仿真等工作,为今后实施德阳—宝鸡 ±500 kV 直流输电工程换流站仿真系统工作奠定了基础。

参考文献

[1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[2] 韩民晓, 文俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[3] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[4] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.

[5] 王晶, 翁国庆, 张有兵. 电力系统的 MATLAB/SIMULINK 仿真与应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.

(收稿日期: 2009-10-28)

加动量项且变学习速率的 BP 算法 应用于变压器故障诊断

许 虎, 明志强, 侯 勇
(南充电业局, 四川 南充 637000)

摘 要: BP 神经网络具有自学习和自适应能力, 非常适合于变压器故障诊断。分析了加动量项 BP 算法和变学习速率 BP 算法存在的不足, 给出了加动量项且变学习速率的 BP 算法的原理和优点, 减轻了网络训练过程中的振荡, 加速了网络的收敛。构造了适合于变压器油中溶解气体分析故障诊断的神经网络, 并将训练所得的神经网络用于变压器故障诊断, 结果表明了该算法的有效性。

关键词: 变压器; 故障诊断; 油色谱; 神经网络; BP 算法

Abstract: BP neural network has the self-learning and adaptive ability, so it is very suitable for fault diagnosis of transformer. BP algorithm with momentum can smooth out the oscillations in the network training trajectory, and BP algorithm with variable learning rate can change the learning rate adaptively according to network error surface. Every algorithm can speed up the convergence, but the principles of these two algorithms are different. The two algorithms are combined to become a BP algorithm with momentum and variable learning rate. The modified BP algorithm has the merits of the two algorithms, so it can smooth out the oscillations and speed up convergence of the network training. The artificial neural network for fault diagnosis of transformer is constructed, and is trained by the modified algorithm. The results verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: transformer; fault diagnosis; chromatogram of transformer oil; neural network; BP algorithm

中图分类号: TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0030-03

0 前 言

大型电力变压器是电力系统中至关重要的电气设备, 搞好变压器的故障诊断对于电力系统安全稳定运行具有重要意义。油中溶解气体分析方法是诊断电力变压器故障的有效手段^[1], 它对诊断变压器内部故障十分有效。BP 神经网络由于具有形成非线性映射、自学习、自适应、鲁棒性等优点, 在基于油中溶解气体分析的变压器故障诊断中得到了广泛的应用^[2-3]。BP 神经网络广泛使用的标准 BP 算法是一种按照梯度规则下降的算法, 它存在着收敛速度慢、容易陷入局部极小点等缺点。

针对 BP 算法的这些缺点, 人们提出了各种改进算法, 加动量项 BP 算法和变学习速率 BP 算法就是其中的代表。加动量项 BP 算法能够平滑网络的学习曲线, 变学习速率 BP 算法能根据网络误差曲面的情况自适应调整网络的学习步长, 这两种算法都能加

速网络的收敛, 但是它们的原理是不同的。通过结合了这两种算法, 形成的 BP 算法不仅加入动量项而且学习速率自适应变化, 该算法在避免网络训练振荡的同时提高了网络的收敛速度。

1 加动量项 BP 算法和变学习速率 BP 算法

1.1 BP 算法的原理及存在的不足

BP 神经网络的结构如图 1 所示。

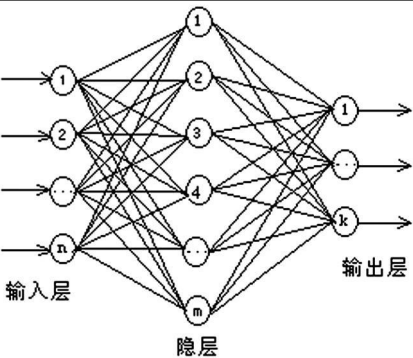


图 1 BP 神经网络的结构

BP神经网络由输入层、隐层和输出层组成。网络的隐层可以为一层或多层,但是含有一个隐层的BP网络已经能以任意精度完成任何连续函数的映射,故一般只采用一个隐含层^[4]。网络可变参数由层间神经元的连接权值和神经元的偏置组成,网络的学习过程由信号的正向传播和误差的反向传播构成,学习的最终目的是通过修改网络的可变参数使网络能满足要求。在信号的正向传播过程中输入层的信号经过计算得到隐层的输出信号,此后信号逐层向前传播到达输出层;如果输出层的信号未能达到指定的误差要求,则输出信号的误差将沿网络的连通路经反向传播至输入层,沿途修改网络各层间的连接权值和神经元的偏置。BP算法每次迭代网络可变参数的调整量如下。

$$\Delta w_{ij}(k) = -\eta \cdot \frac{\partial e}{\partial w_{ij}}(k) \quad (1)$$

式(1)中, η 是学习步长; $\frac{\partial e}{\partial w_{ij}}(k)$ 是可变参数对网络误差的一阶偏导数; k 是迭代次数。

BP神经网络的误差函数是一个以网络可变参数为自变量、网络误差为因变量的非线性多元函数,它是多维空间中的一个形状极为复杂的曲面。网络的误差曲面随可变参数变化十分剧烈,有些区域误差曲面非常平滑,此时应该选择较大的学习步长;有些区域误差曲面非常陡峭,此时应该选择较小的学习步长。但是标准BP算法在训练中的学习步长是恒定的,从而导致了学习步长选择困难,学习步长过大则网络容易振荡;学习步长过小则每次网络可变参数调整量过小,也会导致网络收敛速度变慢。而且网络误差曲面上存在着很多局部极小点,在局部极小点上网络误差距全局极小点上网络误差较大,但可变参数对网络误差的一阶偏导数接近于0。由于每次迭代网络可变参数的调整量是可变参数对网络误差的一阶偏导数与学习步长的乘积,而学习步长是某一较小的常数,它们的乘积仍然是一个较小的值。因此,在局部极小点上网络可变参数的调整量很小,这使网络虽然经过多次训练仍不能跳出局部极小点,训练不收敛^[5]。

1.2 加动量 BP算法

加动量项的BP算法^[6]是将网络可变参数上一次调整量乘以一个系数作为网络可变参数本次调整量的一部分,这个增加的部分人们通常将它称为动量项。此时网络可变参数的调整量变为

$$\Delta w_{ij}(k+1) = \beta \cdot \Delta w_{ij}(k) - \eta \cdot \frac{\partial e}{\partial w_{ij}}(k+1) \quad (2)$$

式(2)中, β 是动量项因子; w 是网络可变参数; $0 < \beta < 1$, 可取 0.9; k 是网络训练迭代次数。

当本次的 $\frac{\partial e}{\partial w_{ij}}(k)$ 与上一次同符号时,其加权求和值增大,使 $\Delta w_{ij}(k)$ 较大,从而在稳定调节的同时增加了 w 的调节速度;当本次的 $\frac{\partial e}{\partial w_{ij}}(k)$ 与上一次符号相反时,说明有一定的振荡,此时加权和结果使 $\Delta w_{ij}(k)$ 较小,起到了稳定的作用。动量项的引入平滑了网络的训练路径,提高了网络的收敛速度,而且网络训练的计算量增加很少。

1.3 变学习速率 BP算法

标准BP算法在训练过程中学习步长始终保持不变,这未必是最好的选择。当神经网络误差曲面比较平滑时,网络的学习步长应该较大以使网络能尽快收敛;当网络的误差曲面较陡时,网络学习步长应该较小以使网络可变参数的调整量不会过大。变学习速率BP算法^[7]网络可变参数的调整量如下。

$$\Delta w_{ij}(k) = -\eta(k) \cdot \frac{\partial e}{\partial w_{ij}}(k) \quad (3)$$

$$\eta(k+1) = \begin{cases} \alpha_+ \cdot \eta(k), & \text{当 } e(k+1) < e(k) \\ \alpha_- \cdot \eta(k), & \text{当 } e(k+1) > b \cdot e(k) \\ \eta(k), & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, α_+ 取 1.05, α_- 取 0.7, b 取 1.04。

当网络误差增加时说明调整量过大,网络学习步长变短;当网络误差减少时说明调整量过小,网络学习步长变长;当网络误差不变时,学习步长同样保持不变。所以该算法能根据网络误差曲面的情况实现学习步长的自适应调整,比BP算法具有更好的收敛性能,同时网络训练计算量的增加很少。

2 结合加动量项和变学习速率的 BP算法

加动量项BP算法由于加入了动量项减轻了网络训练过程中的振荡现象,变学习速率BP算法根据网络误差曲面的情况自适应地调整网络的学习步长,这两种方法都能加速网络的收敛。但从上面的分析中可以看出这两种算法也存在各自的不足:加动量项BP算法不能根据误差曲面的情况自适应调整学习步长;变学习速率BP算法并没有利用动量项来减轻网

络学习曲线中的振荡。将这两种方法结合起来形成既加入动量项又变学习速率的 BP 算法,能结合这两种方法的优点,舍弃它们的缺点。新算法的网络可变参数调整公式如下。

$$w_{ij}(k) = w_{ij}(k-1) + \Delta w_{ij}(k-1) \tag{5}$$

$$\Delta w_{ij}(k) = \beta \cdot \Delta w_{ij}(k-1) - \eta(k) \cdot \frac{\partial e}{\partial w_{ij}}(k) \tag{6}$$

式中的各个变量的意义和取值同式 (2) 中相应变量相同。

该算法的计算步骤如下。

- 1) 用较小的随机数对网络可变参数进行初始化,确定动量项因子 β 和初始学习步长 $\eta(0)$, $k=0$, 计算 $e(0)$;
- 2) 计算网络可变参数对网络误差的一阶偏导数 $\frac{\partial e}{\partial w_{ij}}(k)$;
- 3) 根据式 (6) 计算网络可变参数的调整量 $\Delta w_{ij}(k)$, 根据式 (5) 调整网络的可变参数;
- 4) $k=k+1$, 根据式 (4) 调整学习步长 $\eta(k)$;
- 5) 计算网络误差,如果误差小于目标则训练结束;否则跳至步骤 2) 继续训练。

3 神经网络应用于变压器故障诊断

3.1 训练性能比较

采用结构为 5-20-4 的三层前馈神经网络对故障变压器油色谱样本进行训练,输入层 5 个神经元分别表示 5 种气体,即 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 占气体总浓度的比值;网络的输出层 4 个神经元分别表示网络能诊断的 4 种故障类型,即低温过热、高温过热、低能放电和高能放电。样本数目为 54 个,允许最多训练代数为 40 000,误差目标为 4。分别采用加动量项 BP 算法、变学习速率 BP 算法和结合加动量项和变学习速率的 BP 算法训练,3 种算法的收敛速度如图 2 所示。

加动量项 BP 算法训练了 40 000 次仍不能收敛于误差目标,最终训练误差在 8 附近;变学习速率算法训练了 3 万多次网络收敛了,但学习曲线振荡严重;改进算法在训练进行到 10 000 次左右收敛到误差目标,而且学习曲线平滑,是 3 种方法中最好的。

3.2 故障变压器实例诊断

将加动量项 BP 算法、变学习速率 BP 算法和动

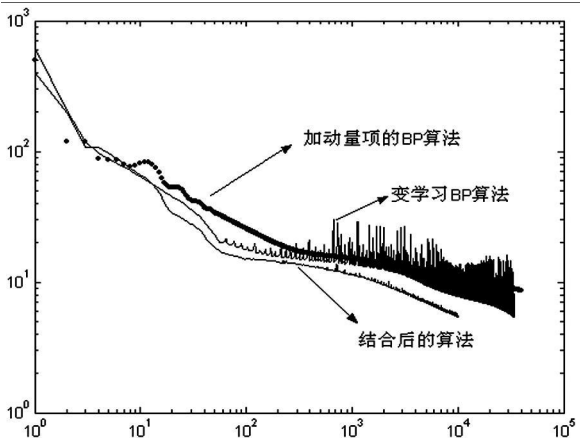


图 2 不同训练算法收敛速度比较
量项和变学习速率的 BP 算法训练所得的神经网络分别用于两个变压器油色谱故障诊断,色谱数据如表 1 所示。

表 1 变压器油中溶解气体数据

	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2
1 号	278.10	354.10	169.40	486.30	0.57
2 号	271	95	22	162	183

3 种算法训练神经网络的诊断结果如表 2 所示。

表 2 神经网络的诊断结果

	低温过热	高温过热	低能放电	高能放电
1 号	0.903 1	-0.097 9	0.070 4	0.107 9
2 号	-0.117 0	0.023 2	0.236 3	0.843 0

1 号变压器吊罩检查故障原因为变压器铁心下夹件工艺螺钉过热、高压 B 相组合导线一股导体开焊和油枕油囊破裂;神经网络诊断为低温过热。2 号变压器吊罩检查故障原因为低压 10 kV 相引接片靠铁心侧一片未接在套管上,引起对上铁轭放电造成电弧闪络,单相对地电流较大,放电时被烧毁一片约 16 mm,10 kV 侧线路另一相短路时造成较大电流;神经网络诊断为高能放电。两个故障变压器实例神经网络均诊断正确。

4 结 论

将加动量项和变学习速率的 BP 算法应用于基于油中溶解气体分析的变压器故障诊断,从训练和诊断情况可以看出,改进后的 BP 算法减轻了网络的振荡、加快了网络的收敛速度,可以准确诊断变压器油中溶解气体分析故障。

参考文献

[1] 操敦奎. 变压器油中气体分析与诊断 [Z]. 北京: 中国水

利电力企业管理协会, 1987.

[2] 王财胜, 孙才新, 廖瑞金. 变压器色谱监测中的 BPNN 故障诊断法 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(5): 322—325.

[3] 黄鞠名, 胡明华, 朱子述, 等. BP 网络在基于 DGA 变压器故障诊断中的应用 [J]. 高电压技术, 1996, 22(2): 21—23.

[4] 史忠植. 神经网络计算 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1993.

[5] 张萍萍, 姚万业, 杨明玉, 等. 基于改进 BP 算法的发电机组振动故障诊断技术 [J]. 华北电力大学, 2003, 30(6): 34—37.

[6] Rumelhart D E, et al Learning Representation by BP Errors [J]. Nature(London), 1986(7): 149—154.

[7] R. A. Jacobs Increased Rates of Convergence through Learning Rate Adaptation [J]. Neural Networks 1998, 1(4): 295—308.

(收稿日期: 2009-10-22)

(上接第 24 页)

进行换相时,因预计关断的阀关断后,在反向电压期间未能恢复阻断能力,当加在该阀上的电压为正时,又重新导通,即出现了换相失败现象,直流电流激增到 2 pu。t=0.8 s 时清除故障, VDCOL 将参考电流调节到 0.3 pu,经 0.35 s 后系统恢复。

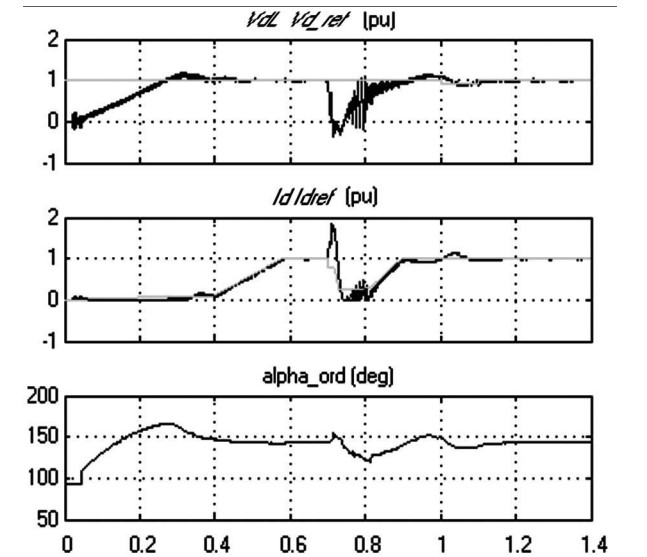


图 8 a 相接地故障波形

3.4 逆变侧 a b 两相接地故障

打开断路器模块,使其在 0.7 s 时导通, 0.8 s 时断开,整流侧交流电压和电流波形如图 9 所示。可见,两相接地故障使整流侧交流电压和电流发生了一定的扰动,交流电流的波动频率和幅度比较大。故障时,交流电流值迅速增加,之后逐渐下降为 0。故障清除后经过小幅度波动恢复稳态。同样,交流电压值在故障时有所增加,但增加的幅度要小一些,故障清除后也能够恢复稳态。

4 结 论

直流输电已成为中国电网的重要组成部分,所以

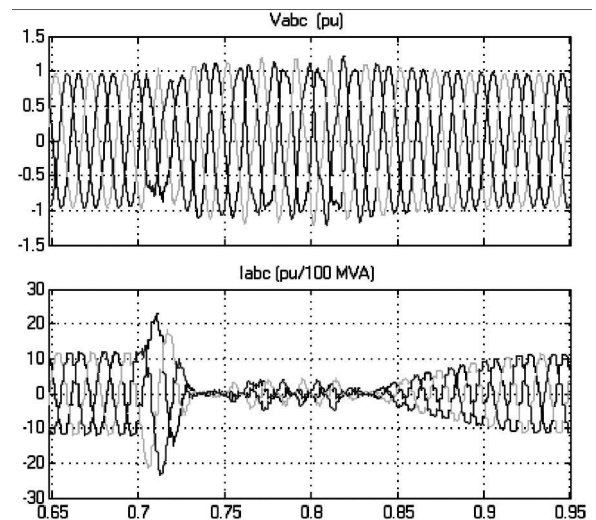


图 9 整流侧交流部分波形

HVDC 系统的暂稳态仿真对电力系统的研究、规划、设计和运行等起着重要作用。前面利用 Matlab 的 Simulink 及 PSB 对高压直流输电系统建模,并进行了稳态和一系列故障的仿真,得出相应的波形。可见,在 Matlab 环境下,可以进行 HVDC 系统的建模与仿真等工作,为今后实施德阳—宝鸡 ±500 kV 直流输电工程换流站仿真系统工作奠定了基础。

参考文献

[1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[2] 韩民晓, 文俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[3] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[4] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.

[5] 王晶, 翁国庆, 张有兵. 电力系统的 MATLAB/SIMULINK 仿真与应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.

(收稿日期: 2009-10-28)

氧化锌避雷器交流分量带电测试的应用及分析

乔明忠, 倪 燕
(攀枝花电业局, 四川 攀枝花 617067)

摘 要:近年来氧化锌避雷器的带电测试得到广泛运用,对考察避雷器的绝缘缺陷起到积极作用。根据原理及实际经验总结分析了氧化锌避雷器带电测试的应用及注意事项。

关键词:氧化锌避雷器;交流分量;带电测试

Abstract In recent years the live testing of zinc oxide arrester (referred to as MOA) has been widely used which plays a positive role in the inspection of insulation defects of arrester. According to the theory and the practical experiences the application and the points needing attention in the live testing of MOA are summarized and analyzed.

Key words zinc oxide arrester; AC component; live testing

中图分类号: TM866 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2010)01—0034—03

0 引 言

金属氧化物避雷器俗称氧化锌避雷器(简称 MOA),由金属氧化物(主要成分是氧化锌)阀片串联组成,没有火花间隙与并联电阻。在工频运行电压下,阀片相当于一个很高的电阻,阀片中流过很小的电流;而当雷电流流过时,它又相当于很小的电阻维持适当的残压,从而起到保护设备安全的作用。

MOA 避雷器无串联间隙,在运行过程中长期承受工频电压作用,阀片易老化,因此需要定期测量泄漏电流,以保证其安全运行。

带电测试就是在运行电压下,测量流过 MOA 阀片的交流泄漏电流(全电流及阻性电流分量)。全电流及阻性电流的变化可以反映出 MOA 的内部受潮、内部元件接触不良、阀片严重老化等缺陷。在运行电压下,可实现微机的自动监测,也可采用专门仪器不定期的测量,都能够真实地反映避雷器在运行条件下的绝缘状况。

1 带电测试的原理性分析

目前,很多单位采用类似 MOA—RCD—4 型的氧化锌避雷器阻性电流测试仪,测试 MOA 避雷器在运行电压下的泄漏电流,如图 1 所示。

电压信号从母线 TV 的二次侧取得,输入线的红

色线夹接 TV 二次绕组的首端(a),黑色线夹接二次绕组中性点(n);电流信号从避雷器的放电计数器两端取得,红色线夹接放电计数器的高压端,黑色线夹接放电计数器的接地端;电流、电压信号经放大单元进入 A/D 转换器,经过傅里叶变换得出被测避雷器在运行电压下的泄漏电流及有功分量(阻性电流)、无功分量(容性电流)、功率损耗等。

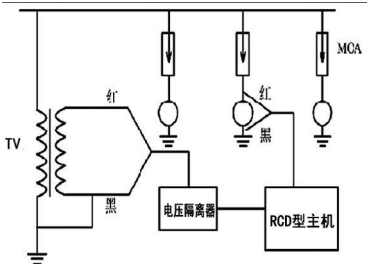


图 1 带电测试原理接线图

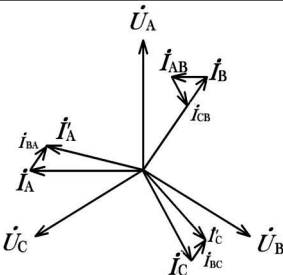


图 2 电流干扰相量图

2 带电测试中的注意事项

(1)试验应在天气良好时进行,避雷器表面应干燥,雷雨天气严禁进行带电测试;

(2)在 TV 二次端子箱内取电压信号时应防止二次侧短路;取电流信号时,信号夹及引线高度不得超过避雷器底座法兰;

(3)TV 上所取电压与所测量的 MOA 一定要同相,接线时先接中性点 (n),测量完最后拆中性点 (n),取电流信号必须保证接地夹及信号夹均接触良好;

(4)工作中注意与带电部位保持足够的安全距离。

3 校正角的讨论

3.1 校正角的产生

110 kV 及以下系统的 MOA 相互作用较弱,可不考虑校正;而 220 kV 及以上系统由于相互干扰较大,所以在做带电测试时,需要考虑校正。

当 A、B、C 三相呈三角形排列时,任两相对第三相的干扰基本不改变第三相的角度,此时校正角 $\Phi_0 = 0^\circ$ 。而 A、B、C 三相呈直线排列时,由于避雷器相间电容耦合等原因,其阻性电流与有功损耗 P 将出现明显差异。

A、C 相一般为两个边相,相间距离较远,相互干扰较小,所以可以认为 A、C 相所受到的干扰主要来自于 B 相;而 A、C 相对 B 相的分布情况几乎相同,因此 A、C 相对 B 相的干扰只改变 B 相电流绝对值的大小,几乎不改变角度。而 B 相对 A、C 相的影响,使得 A 相电流向后, C 相电流向前位移一定的角度,造成 A 相 Φ 减小,阻性电流增大; C 相 Φ 增大,阻性电流减小甚至为负; B 相基本不变,如图 2 所示。

$\Phi'_A < \Phi_A$, 而 $\Phi'_C > \Phi_C$ (Φ_A 、 Φ_C 为 A、C 相避雷器自身功率损耗角; Φ'_A 、 Φ'_C 为干扰状态下的功率损耗角)。

3.2 校正角的计算

例如, A 相 MOA 的校正角:电压取 A 相 TV 二次信号,电流取 C 相 MOA 信号,读取 Φ_{I-U} 记为 Φ_C , 然后电压仍然取 A 相 TV 二次信号,电流取 A 相 MOA 信号,读取 Φ_{I-U} 记为 Φ_A , 此时仪器上的读数均为 A 相 MOA 未校正的读数。

由于三相电压为对称相量,相位互差 120° ;在 B 相对 A 和 C 相的干扰电流大小相等的情况下,造成 A 相电流滞后和 C 相电流超前的角度是基本相等的。令 A、C 相避雷器自身的功率损耗角为 Φ_{A1} 、 Φ_{C1} , 假

定 $\Phi_{A1} = \Phi_{C1}$, 则有

$$\Phi_C = \Phi'_C + 120^\circ = \Phi_{C1} + \Phi_0 + 120^\circ, \Phi_A = (\Phi_{A1} - \Phi_0)$$

$$\text{可得: } \Phi_0 = (\Phi_C - \Phi_A - 120^\circ) / 2$$

则 A 相的校正角为 Φ_0 , 而 C 相的校正角为 $-\Phi_0$ 。

3.3 实测损耗角大于 90° 的分析

避雷器在运行中是要产生损耗的,其自身功率损耗角肯定小于 90° ,一般情况下, MOA 避雷器在持续运行电压下的 Φ_{I-U} 为 $81^\circ \sim 86^\circ$,但是实际测量中出现了 B 相角度大于 90° 的情况,而 B 相角度在实际测试时不进行校正,下面就其产生的可能原因做具体分析。

前面已做过介绍,当干扰电流 $I_{AB} = I_{CB}$ 时, B 相的角度不会被改变。

但当干扰电流 $I_{AB} < I_{CB}$ 时,如图 3 所示,此时 Φ'_B 会比自身功率损耗角偏小,可能只有 80° 左右;

而当干扰电流 $I_{AB} > I_{CB}$ 时,如图 4 所示,此时 Φ'_B 会比实际损耗角偏大,可能超过 90° ,某局在 2003 年、2004 年对 500 kV 某变电站 500 kV I 母避雷器做带电测试时就出现过此类情况,数据如表 1 所示。

在 2004 年结合停电检修,对三相避雷器进行测试,结果正常。2005 年、2006 年的带电测试数据与 2004 年的带电测试数据相比无明显变化。但在 2007 年新投运 2 号主变压器及 500 kV 二回线路后,系统运行方式发生变化,带电测试结果出现变化,但仍然不正常,数据如表 2。

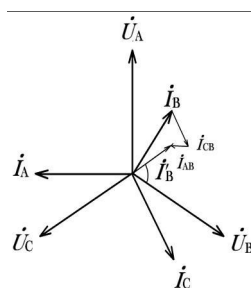


图 3 干扰电流 $I_{AB} < I_{CB}$

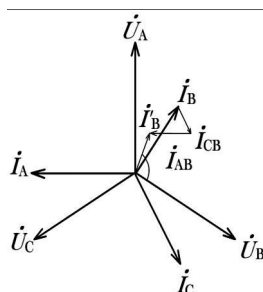


图 4 干扰电流 $I_{AB} > I_{CB}$

表 1 2004年避雷器带电测试数据

项目	相别		
	A	B	C
U /kV	308. 51	307. 63	306. 22
I_k / μ A	2 121	1 732	1 754
I_{k1P} / μ A	481	- 57	387
Φ_{I-U} / $^{\circ}$	80. 73	91. 35	80. 93
Φ_0 / $^{\circ}$	0. 96	0	- 0. 96

表 2 2007年带电测试数据

项目	相别		
	A	B	C
U /kV	304. 50	304. 10	302. 60
I_k / μ A	1 883	1 592	1 709
I_{k1P} / μ A	410	38	356
Φ_{I-U} / $^{\circ}$	81. 12	89. 01	81. 47
Φ_0 / $^{\circ}$	1. 20	0	- 1. 20

在 2008年 3月的停电预试中,三相避雷器试验结果与 2004年的试验数据相比无明显变化,经分析认为是由于系统运行方式发生变化后干扰电流情况发生变化,导致带电测试时的夹角出现变化。

校正角的计算是假定在一定的理想条件下进行的,本身并不是绝对准确。因此,为减少带电测试时的工作量,对运行方式固定的避雷器也可不进行校正,而是比较历年数据的变化情况,然后进行综合分析、判断。

4 表面泄漏的影响及对策

避雷器瓷套表面泄漏电流将引起总电流 I_k 和阻性电流 I_{k1P} 增大,特别是在避雷器瓷套表面潮湿或脏污时, I_{k1P} 将会明显偏大,因此,环境条件会对带电测试结果产生较大影响。为了准确地对历次测试数据进行对比,测量宜在避雷器瓷套表面干燥时进行,同时,应准确记录环境相对湿度。

表 3为某局 220 kV银江变电站 110 kVⅡ母避雷器历年带电测试数据(均未加屏蔽),可以看出,2007年 2月 9日早上三相避雷器 I_{k1P} 的测试结果与其他时候相比,增加了很多,且 Φ_{I-U} 角度明显偏小,为准确分析设备状况,在第二天下午天气干燥后再次进行测试,结果 I_{k1P} 明显减小,趋于正常,试验合格。

测试时的环境条件往往难以控制,因此,为排除表面泄漏电流的影响,最好的办法是结合停电检修,在避雷器最下裙瓷瓶与下法兰间加装屏蔽环直接接地(屏蔽环与计数器高压端应绝缘),以保证带电测

试结果的准确性。

表 3 某局 110kVⅡ母避雷器带电测试数据

项目	测试时间	相别			
		U /kV	I_k / μ A	I_{k1P} / μ A	Φ_{I-U} / $^{\circ}$
A	2006. 04. 05	64. 72	525	73	84. 26
	2007. 02. 09早上	66. 28	569	138	79. 85
	2007. 02. 10下午	66. 16	523	75	84. 12
	2008. 04. 20	67. 27	543	92	83. 08
	2009. 03. 11	67. 12	528	79	83. 87
B	2006. 04. 05	64. 58	524	55	85. 71
	2007. 02. 09早上	64. 39	577	104	82. 03
	2007. 02. 10下午	64. 26	520	48	86. 23
	2008. 04. 20	67. 69	545	76	84. 32
	2009. 03. 11	67. 42	530	63	85. 17
C	2006. 04. 05	64. 7	526	28	87. 76
	2007. 02. 09早上	66. 15	564	71	84. 07
	2007. 02. 10下午	66. 36	525	30	87. 66
	2008. 04. 20	67. 31	547	46	86. 57
	2009. 03. 11	67. 15	534	33	87. 44

5 新动向

目前,随着带电测试技术的发展完善,带电测试成了氧化锌避雷器的一个重要试验项目,如果发现全电流特别是阻性电流有较大增长时应引起注意,并增加运行中的带电测试次数,必要时采用红外成像仪对运行中的避雷器进行温度及温差测量,明显异常的应及时申请停电进行检查。随着变电站电压等级提高,现场场地非常开阔,取电压信号往往在很远的地方,测试工作量大,且配合受到限制,为便于工作,部分厂家开发了不取电压信号直接进行测试的方式(原理是默认 B相的功率损耗角为一固定值,一般为 83° ,然后其他两相按照互差 120° 来进行分析)。

6 结 语

社会对电力供应的可靠性要求越来越高,设备停电检修受到越来越多的限制,因此,在运行条件下,采用合理的技术手段对设备运行参数进行实时、准确的测量,特别是在电网中起着重要作用的避雷器,对于保证电力设备的安全、可靠、稳定运行有着非常重要的作用。

参考文献

[1] 西南电业管理局试验研究所. 高压电气设备试验方法 [M]. 北京:水利电力出版社, 1984.
[2] 陈化钢. 电力设备预防性试验方法及诊断技术 [M]. 北京:中国科学技术出版社, 2001.

(收稿日期: 2009—09—30)

数字化变电站过渡方案的研究

古树平¹, 陈奇志^{1, 2}, 陈旺虎¹, 杨俊¹, 揭海宝¹, 陈可¹

(1 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2 成都交大光芒实业有限公司, 四川 成都 610031)

摘 要: IEC 61850 标准研究的逐步深入与电子式互感器等智能电子设备的发展, 使变电站实现全数字化成为可能。分析了传统变电站与数字化变电站的区别, 阐明了 IEC 61850 与原有协议的差异, 并结合现有变电站自动化系统的实际情况, 提出了过渡期数字化变电站的解决方案。

关键词: IEC 61850; 数字化变电站; 电子式互感器; 通信协议

Abstract: The digital substation can be realized with the development of IEC 61850 and intelligent electronic device such as electronic transformer. The differences between traditional substation and digital substation are discussed, and the distinctions between IEC 61850 and the existing protocols are also presented. Based on the actual situation of the existing automation system in substation, the transitional schemes of digital substation are proposed, which are feasible at the present stage.

Key words: IEC 61850; digital substation; electronic transformer; communication protocol

中图分类号: TM76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003—6954(2010)01—0041—03

0 引 言

新一代变电站自动化标准 IEC 61850 的推广和应用给变电站数字化奠定了基础, 计算机技术、网络通信技术以及电子式互感器等智能电子设备的发展为实现数字化变电站提供了有力前提。经过十余年的发展, 传统变电站自动化系统的弊端越来越明显, 数字化变电站的发展成为趋势, 但受电子式互感器、智能断路器等关键技术发展和应用不成熟的制约, 期间必然存在一个过渡期。因此, 现阶段对传统变电站进行数字化改造具有实际意义, 可为将来实现变电站全数字化积累宝贵的经验。

1 传统变电站与数字化变电站的比较

1.1 传统变电站存在的问题

随着变电站自动化技术的发展, 传统变电站的局限逐渐显现出来, 传统变电站主要存在以下问题: 在结构上, 一次设备和二次测控保护装置的连接需要大量电缆, 设计施工和运行维护都要耗费大量人力物力, 设备可靠性差, 占地面积大。在运行上, 二次接线的复杂使系统结构庞大, 自动化功能独立、堆砌, 缺少集成应用和协同操作, 数据缺乏有效利用。在通信

上, 早期的变电站自动化系统采用的是 RS-422/RS-485 通信接口, 其通信方式多为查询方式, 通信效率低, 难以满足较高的实时性要求, 且整个通信网上只能有一个主节点对通信进行管理和控制, 一旦主节点出现故障, 整个系统的通信将无法进行。后来发展为现场总线, 再到以太网, 在通信效率上有了很大提高, 但是各厂家在已有通信规约的语义理解上存在差异, 导致采用的应用层协议不同, 不同厂家的设备之间只有采用协议转换器才能解决不兼容, 无法从根本上解决设备间的互操作问题^[1, 2]。此外, 传统变电站还存在诸如安全性、可靠性不能满足电力系统发展的需求, 供电质量缺乏科学的保证, 不利于提高运行管理水平等问题。这些问题大多是由于变电站整体数字化、信息化水平不高, 缺乏能够完备实现信息标准化和设备之间互操作的变电站通信标准造成的。

1.2 数字化变电站的特点

与传统变电站相比, 数字化变电站的特点可简单归纳为: 智能化的一次设备、网络化的二次设备和变电站的信息化。图 1 对传统变电站和数字化变电站在结构、功能和通信方式上做了简单的比较。

数字化变电站具体表现为以下特点: 采用电子式互感器等非常规互感器, 直接输出数字信号, 在传输过程中避免了电磁干扰^[3]。简化二次接线, 取消传统的硬接线, 系统采用功能分布式结构, 各功能之间

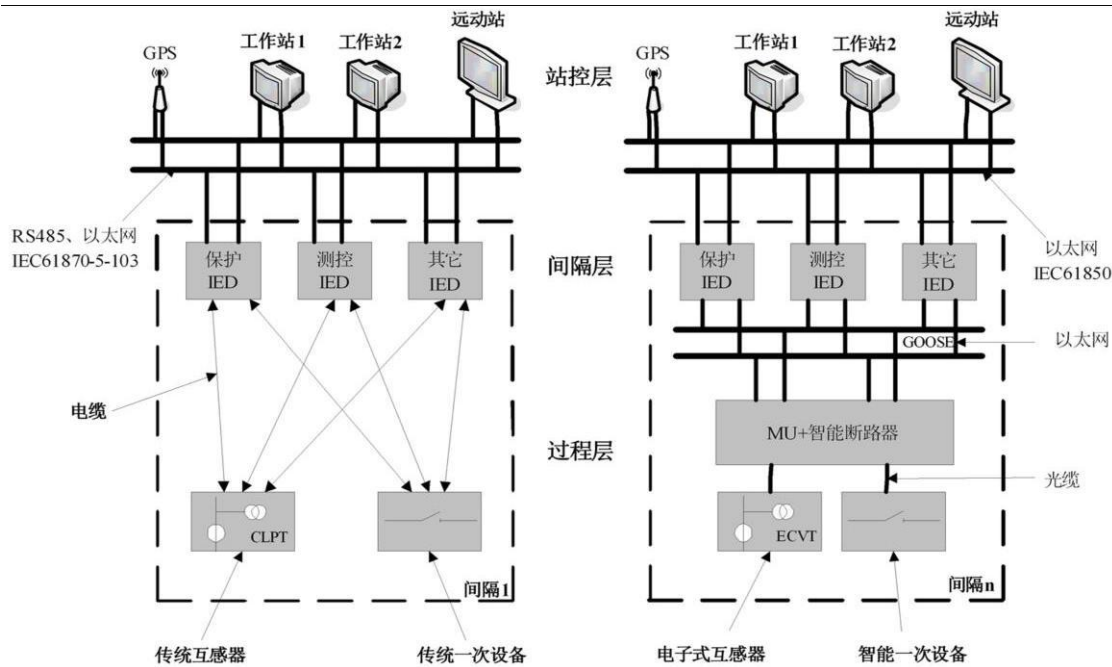


图 1 传统变电站与数字化变电站比较示意图

的逻辑配合关系建立在信息交换的基础上。电子式互感器、智能一次设备的测量信息和状态信息通过合并单元传输至过程总线，测控保护装置通过过程总线实现信息共享。由于采用 IEC 61850 做为站内统一的通信标准，符合 IEC 61850 的智能电子设备间能方便地实现互操作，变电站内实现无缝通信，同时变电站为远方控制中心提供一次设备监测信息、二次设备监测信息、电网运行状态信息、电网故障信息、计量信息等丰富数据，与控制中心之间真正达到信息共享。此外，数字化变电站实现了自动化的运行管理^[4, 6]，运行时发生故障时，能及时找出故障原因和处理意见，系统能自动发出变电站设备检修报告，即常规的变电站设备“定期检修”改为“状态检修”。

2 IEC 61850与原有协议的应用比较

2.1 IEC 60870—5—103规约的特点和局限

传输规约 IEC 60870—5—103(以下简称 103 规约)继电保护设备信息接口配套标准是 IEC TC—57 技术委员会在 IEC 60870—5 系列标准的基础上制定的，在 IEC 61850 标准颁布之前，通常采用 IEC 60870—5—103 规约作为变电站内通信标准，该标准使变电站内不同继电保护设备和测控装置达到互换，提高了变电站通信的实时性。103 规约与国际标准化组织 (ISO) 的开放系统互联 (OSI) 7 层参考模型相比，是一种简化的通信协议，网络模型为增强性能结构，

只有物理层、链路层和应用层 3 层。103 规约采用非平衡传输，工作站、远动站组成主站，继电保护设备(或间隔单元)为从站(子站)。配套标准描述了两种信息交换方法：一种是基于严格规定的应用服务数据单元 (ASDUs) 和“标准化”提出报文的传输应用过程的方法；另一种是使用通用分类服务可以传输几乎所有可能信息的方法。该协议的特点是详细地描述了遥测、遥信、遥脉、遥控、保护事件信息、保护定值、录波等数据传输格式和传输规则，可以满足变电站传输保护和监控的信息^[7, 8]。虽然 103 规约被广泛用于系统内部通信，但规约对通用分类服务的语法没有详细说明，容易引起歧义，且为面向信号的协议，只强调数据格式而对传输过程的说明不够详细，这也导致不同设备制造商在理解上存在差异，各厂家设备之间的互操作性也就难以实现。

2.2 IEC 60850标准的特点

变电站内通信网络与系统标准体系 IEC 61850 的应用，使不同厂家的设备间达到信息共享并可实现互操作性。与 IEC 60870—5—103 相比，IEC 61850 标准具有以下特点：使用面向对象的建模技术，使用分布分层体系，应用层传输协议是面向对象自我描述的，数据对象是分层的，定义了收集这些信息的方法、数据对象、逻辑结点和逻辑设备的代号，并规定了名字的造句法，使任何对象的标识成为唯一的。IEC 61850 使用抽象通信服务接口 (ACSI)、特殊通信服务映射 SCSM 和 MMS 技术，可根据电力系统的特点来

归纳所需的服务类^[9-11]。此外, IEC 61850 涵盖了 IEC 60870-5-103 的数据对象, 具有互操作性, 是面向未来的、开放的体系结构。

IEC 61850 标准在逻辑上将变电站自动化系统分为变电站层、间隔层、过程层 3 层, 并将功能分解成相互联系的几个部分, 通过以太网实现数据及资源共享, 如图 2 所示。

各接口含义为: ①、⑥间隔层和变电站层之间的数据交换; ②间隔层与远方保护之间的数据交换; ③间隔层内部的数据交换; ④、⑤过程层与间隔层之间的数据交换; ⑦变电站与远方工程师办公地的数据交换; ⑧间隔层之间的数据交换; ⑨变电站层内的数据交换。

IEC 61850 标准的颁布解决了同一厂商或者不同厂商的多个 IED 之间的互操作性问题, 该标准必将成为变电站自动化系统的统一标准, 它的推广和应用为变电站自动化系统实现全数字化奠定了基础。

3 数字化变电站过渡期解决方案

实现变电站全数字化是一个长期的过程, 国内 IEC 61850 标准的应用研究还需不断深入探索, 非常规互感器的稳定性还需要一段时间的实际检验^[12], 智能断路器技术发展尚不成熟, 期间必然存在一个过渡期。在过渡期内, 可采用进入实用化阶段的电子式

互感器和智能断路器控制装置, 结合现有系统的实际情况, 同时考虑新型智能电子设备与常规设备的兼容, 提出了过渡期内可行的解决方案。

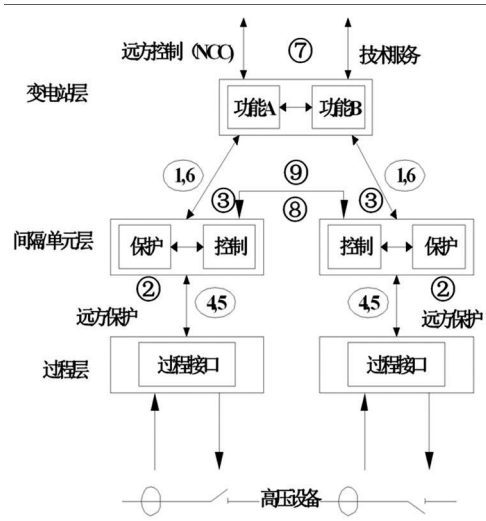


图 2 数字化变电站系统接口模型

本方案对传统变电站进行了两种不同的数字化改造。如图 3 所示, 方案中间隔 A 采用支持 IEC 61850 的测控和保护装置, 在目前相对成熟的变电站层和间隔层之间实现 IEC 61850 通信, 实现了不同厂家 IED 之间的互联和互操作。常规断路器等开关设备仍采用硬接线形式与测控保护装置连接, 采用电子式互感器与常规互感器相兼容的方式达到优势互补, 并通过合并单元把数据上送至测控保护装置。相比原有系统, 间隔 A 方案只是进行了简单的数字化改

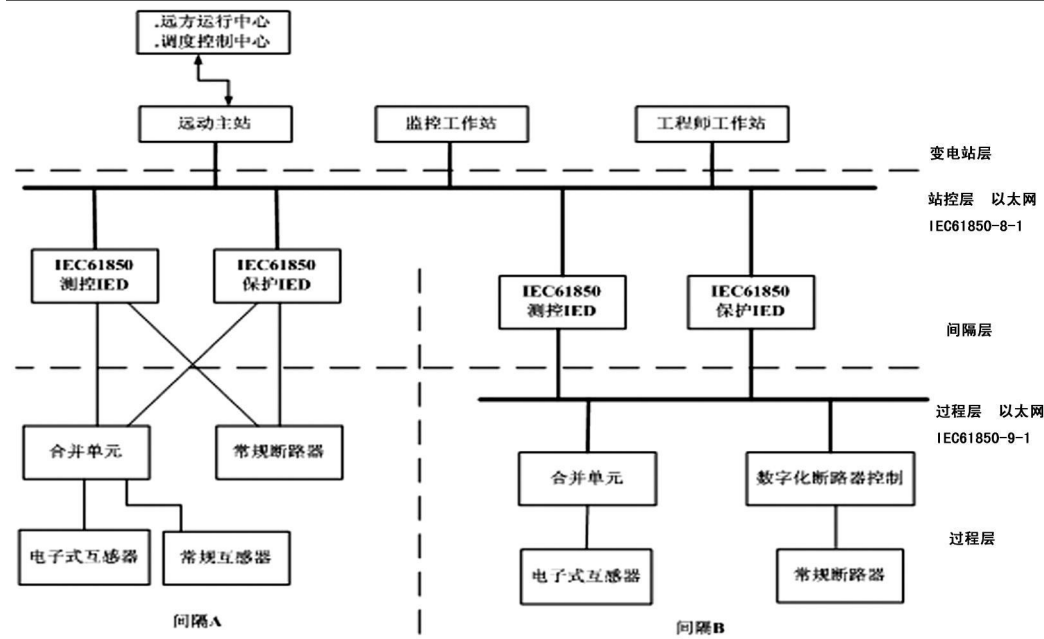


图 3 数字化变电站过渡期解决方案

(下转第 78 页)

[5] 张步涵,沙立华,曾次玲.基于随机生成树的配电网重构模拟退火算法[J].华中科技大学学报:自然科学版,2005,33(6):76—79.

[6] Nara K, Shiose A, Kitagawa M, et al. Implementation of Genetic Algorithm for Distribution Systems Loss Minimum Reconfiguration[J]. IEEE Trans on Power systems 1992, 7(3): 1044—1051.

[7] 黄健,张尧,李绮雯.蚁群算法在配电网重构的应用[J].电力系统及其自动化学报,2007,19(4):59—64.

[8] Hirotaka Yoshida, Kenichi Kwata, Yoshikazu Fukuyama. A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems 2000, 15(3): 1232—1239.

[9] 夏媚珠.基于改进遗传算法的配电网重构的研究[D].南宁:广西大学,2004.

[10] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[C]. IEEE international Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995.

(收稿日期:2009—12—10)

(上接第 43 页)

造,但相比传统变电站系统,数字化程度高,运行维护工作量大大减少,此方案为后一步增设过程总线做了一定准备,在过渡期采用这种方案是可行的也是较容易实现的。

间隔 B 方案为采用 IEC 61850 协议和电子式互感器的实用型数字化变电站方案。站控层和间隔层实现 IEC 61850—8—1 通信,过程层采用 100 M 以太网,实现了 IEC 61850—9—1 通信,并达到了信息共享。方案采用电子式互感器,通过光纤接入合并单元,合并单元处理后再将数据上送至过程总线,常规断路器则通过数字化断路器控制单元将自身状态信息送至过程层。支持 IEC 61850 标准的测控保护装置再收集来自过程总线的数据送至站级总线。相比间隔 A 方案,该方案数字化程度更高,且过程层、站控层均实现 IEC 61850 新标准通信,真正实现了数据共享和智能电子设备间的互操作。

上述方案考虑了基于 IEC 61850 的新系统与基于传统技术的现有系统之间的兼容,通过改造,变电站数字化程度明显提高。随着变电站数字化改造经验的积累以及数字化关键技术研究 and 应用的逐步成熟,基于 IEC 61850 标准的完全数字化变电站必将实现。

4 结 语

IEC 61850 标准体系的应用研究,为变电站自动化技术带来了重大突破。数字化变电站特点为一次设备的智能化、二次设备的网络化和变电站的信息化,实现变电站全数字化是一个长期过程,需要不断从实际中积累经验,在现阶段推广切实可行的数字化变电站工程方案有助于推动变电站数字化技术的发展。非常规互感器、智能断路器技术的应用实践是实

现数字化的有力前提,实现变电站全面数字化将是电力系统发展的必然趋势。

参考文献

[1] 黄益庄. 变电站综合自动化技术 [M]. 北京:中国电力出版社,2000.

[2] 高鹏宇,游大海,刘国民.符合 IEC 61850 标准的数字化变电站内部通信的实现 [J].继电器,2006,34(12):69—72.

[3] 李九虎,郑玉平,古世东,等.电子式互感器在数字化变电站的应用 [J].电力系统自动化,2007,31(7):94—98.

[4] 高翔,张沛超.数字化变电站的主要特征和关键技术 [J].电网技术,2006,30(23):67—71.

[5] 丁书文,史志鸿.数字化变电站的几个关键技术问题 [J].继电器,2008,36(10):53—56.

[6] 曾庆禹,李国龙.变电站集成技术的发展——现代紧凑型变电站 [J].电网技术,2002,26(8):60—67.

[7] 廖泽友,蔡运清. IEC 60870—5—103 和 IEC 60870—5—104 协议应用经验 [J].电力系统自动化,2003,27(4):36—38.

[8] 李东江,李明,李斌,等. IEC 61850 标准的网络通信及其特定服务映射分析 [J].电网技术,2007,31(增刊 1):151—153.

[9] 谭文恕.变电站通信网络和系统协议 IEC 61850 介绍 [J].电网技术,2001,25(9):8—11.

[10] 吴在军,胡敏强.基于 IEC 61850 标准的变电站自动化系统研究 [J].电网技术,2003,27(10):61—65.

[11] 张结. IEC 61850 目标内涵分析 [J].电网技术,2004,28(18):76—80.

[12] 钱政,李童杰,张翔.电子式互感器校验方法的设计与实现 [J].北京航空航天大学学报,2006,32(11):1116—1119.

(收稿日期:2009—10—13)

几种自动重合闸误动作行为的分析

李立军, 杨 舒, 王洪梅
(德阳电业局, 四川 德阳 618000)

摘 要: 电网中运行的线路保护装置重合闸误动作会引起人身以及电网事故。对几种保护装置重合闸的原理及电气设计图进行综合分析, 找出断路器误动合闸的原因, 并提出避免发生类似事件的措施。

关键词: 断路器位置; 自动重合闸; 控制回路断线

Abstract: The miss operation of line protection reclosing in the operation of power grid will result in personal injuries and system accidents. The event causes are found by analyzing the principle and the electrical design of the reclosing. And the measures are put forward in order to avoid the events of the kind.

Key words: switchgear position; automatic reclosing; off state of wire in secondary circuit

中图分类号: TM732 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2010)01-0044-03

自动重合闸装置的安全可靠性将影响电网的安全经济运行。由于近年来电网中大量的变电站实行设备的部分综合自动化改造, 使得一部分保护装置的重合闸控制回路和逻辑判断回路与断路器的配合之间存在一定的缺陷; 断路器处于断开状态时, 当值班人员重新给上控制电源 (未断开装置电源), 或者把断路器由“就地”状态切换至“远方”状态时, 保护装置将会发出“重合闸”命令, 将断路器合闸, 这对电网的稳定运行和人身安全带来了极大的隐患。因此, 在这里对几种保护装置的重合闸回路和其在分闸状态下的自动重合闸行为进行了详细分析。

1 重合闸回路分析

重合闸由充电回路、放电回路、重合闸启动回路、重合闸方式选择回路、手动同期合闸回路和重合闸出口回路构成。下面分别对充电回路、启动回路和出口回路进行分析, 分析在所述状况下重合闸误动作的原因。

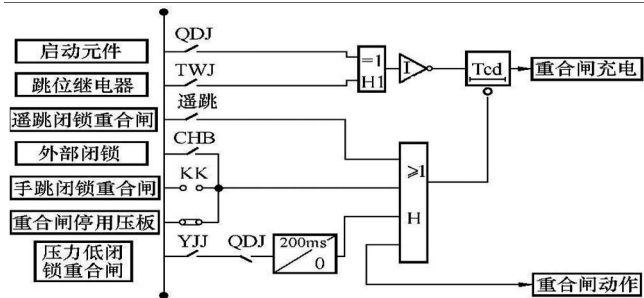


图 1 重合闸充电逻辑回路图

1.1 充电回路

图 1 中 QDJ 为保护启动节点, TWJ 为断路器跳闸位置继电器节点, CHB 为外部闭锁重合闸节点, KK 为变电站分合闸把手, YJJ 为断路器操作压力低闭锁重合闸节点。重合闸的充电条件是 TWJ 常开节点打开, 启动元件 QDJ 不动作, 表明断路器在合位, 线路工作正常, 重合闸即充电, 15 s (Tcd 延时) 后充电完毕。当断路器在跳位, 或保护启动, 或任一外部闭锁条件满足, 重合闸装置立即放电失压。

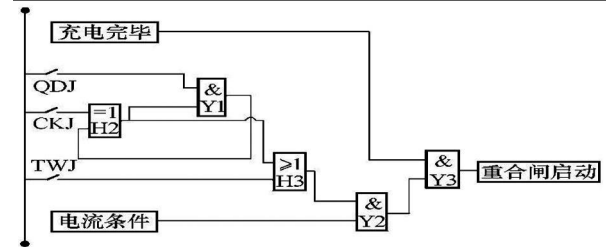


图 2 重合闸启动逻辑回路图

1.2 启动回路

重合闸的启动有 2 种方式, 见图 2。一种方式为保护启动方式, 装置启动元件 QDJ 动作, 同时保护出口继电器 CKJ 动作, 重合闸经 Y1—H2—H3 启动; 第二种方式为 TWJ 启动方式, 认为断路器偷跳, 经门 H3—Y2—Y3, 重合闸启动。

1.3 出口回路

重合闸方式有非同期、检无压、检同期 3 种方式, 见图 3。①检无压方式: 当重合闸方式为检无压方式时, 若此时线路有压, 则自动转为检同期方式, 经延时

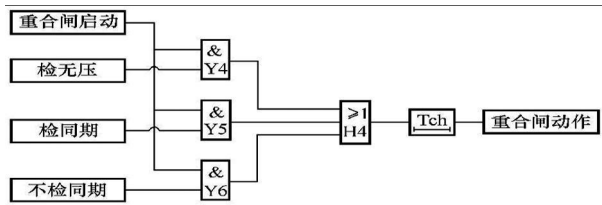


图 3 重合闸出口逻辑回路图

重合闸出口;若线路无压,则直接经延时重合闸出口。
②检同期方式:当重合闸方式为检同期方式时,若检测到线路有压,符合重合条件时,则经延时重合闸出口;若线路停用或其他情况检测到线路无压时,则重合闸启动但不出口。③非同期方式:当重合闸方式为非同期方式时,重合闸不检查电压条件,经延时直接出口。

2 几种重合闸误动作行为分析

2.1 重合闸误动作一

此为断路器与保护装置不能有效配合造成的重合闸误动作。

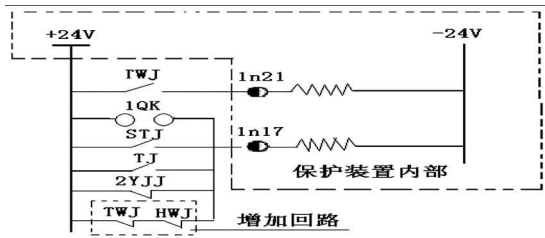


图 4 重合闸部分接线简易原理图

图 4 是 CSL-160 系列保护重合闸部分接线原理图 (CSL 系列保护重合闸充电回路不采 KK 合后位置开入), 1n21 是不对应启动重合闸开入, 接跳闸位置 (TWJ); 1n17 是重合闸闭锁开入, 接有低气压 (2YJJ)、手跳 (STJ)、投退断路器 (1QK)、母差保护 (TJ) 等闭锁信号。在此仅分析外部启动重合闸。第一次合闸后, 1n21 由低变高电平; 此时若 1n17 无闭锁, 且满足其他重合条件 (同期、无压等)。经规定时限后, 重合闸动作出口, 断路器合闸。外部启动保证了发生断路器偷跳时能重合, 1n21 同时还兼有启动手合后加速保护功能。在这一过程中, 重合闸的投入 (充电完成) 及动作都是依赖 1n21 的不同变位实现的, 装置只判断是否有跳位, 而不判断合位, 这是产生问题的关键。

现假设断路器在跳位, 但 TWJ 因某种原因返回, 即断掉操作电源或发生控制回路断线, TWJ 位置继电器失磁, TWJ 接点返回, 而 1n17 又无闭锁信号, 则

装置认为断路器合闸, 满足充电条件, 重合闸充电。经一定时限后, 重合闸充电完成并开放, 此时再合上操作电源, TWJ 位置继电器励磁, 保护则误判断断路器偷跳, 通过不对应启动重合闸使断路器合上。

在保护与断路器的配合中, 由于断路器机构中已将低气压闭锁接入跳合闸回路, 设计中不再使用保护操作箱的低气压闭锁功能, 2YJJ 长期励磁, 当气压低时操作箱中的压力低闭锁重合闸触点不动作。当气压低导致控回断线, TWJ 触点断开, 保护装置认为断路器在合位, 其闭锁重合闸功能不能起到闭锁作用, 重合闸充电。当气压低消失, 控回断线恢复时, 不对应启动重合闸, 重合出口, 使断路器在缺陷处理时突然自动合闸。

由于设备更新换代, 到目前为止各电力公司已将绝大部分少油式或多油式断路器更换为弹簧储能式的 SF₆ 断路器, 而且目前的断路器都具有“就地”电动合闸功能, 当把断路器由“远方”切至“就地”时, 断路器与保护装置操作箱之间就切断了联系, 保护装置将不能采集到 TWJ 跳位开入而使重合闸充电, 当将断路器由“就地”切换至“远方”时, 保护装置也会通过不对应启动重合闸使断路器误合闸而发生事故。

2.2 重合闸误动作二

此为操作上的不规范使保护装置与断路器控制回路间不能有效配合而造成的重合闸误动作。运行上有这样一条规定:“断路器处于检修或冷备用状态时, 要断开断路器的操作电源 (即控制电源)”。当运行人员将断路器转运行时, 要先将两侧刀闸合上后再给上操作电源, 然后进行断路器操作。目前, 各地方对保护装置和断路器设备每隔 1~2 年都要进行一次检验、测试, 当维护人员在做断路器传动试验和断路器跳闸时间测试时, 都是要求运行人员先将断路器合上, 而他们做完相应的试验后, 检查断路器确在断开状态后就离开了现场。运行人员按照相应的操作要求, 合完两侧刀闸后再给上操作电源, 由于 KK 合后位置未返回而且 TWJ 位置未采入保护装置, 保护装置重合闸回路早已充好电, 此时位置不对应启动重合闸将使断路器误合闸。此现象主要是由于试验人员和运行人员都没有将 KK 断路器操作把手试验后相应复位, 同时又断开操作电源造成。目前如 LFP-941 系列等早期微机保护, 软件上没有相应的“控制回路断线”对重合闸放电逻辑, 常常因上面原因误动作重合闸。

©1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

新疆电网主变压器过载的应对措施

孙立成¹, 刘德福², 樊国伟¹, 常喜强¹, 杨永利¹, 王琳¹

(1 新疆电力调度中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2 新疆电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830008)

摘要: 2009 年迎峰度夏期间, 新疆电网负荷快速增长, 电网部分 220 kV 变电站主变压器下网负荷较大, 超过单台主变压器的 150% 以上, 不满足电网安全稳定运行要求。为保证电网安全稳定运行和设备的安全, 对主变压器过负荷问题及解决措施进行了深入研究分析, 提出了解决措施方案及应注意的问题, 希望通过探讨, 能够对其他的此类系统有所借鉴。

关键词: 主变压器; “N-1”原则; 过负荷; 稳定

Abstract: During the summer of 2009, the load of Xinjiang Power Grid is increasing rapidly, the loads of some 220 kV main transformers are as big as its 150% capacity, the situation does not satisfy the safe and stable operation of power grid. For safe and stable of power grid, especially for the safety of equipment, it is necessary to analyze the methods deeply to solve the overload problem of main transformer. The countermeasures are put forward as well as some problems which should be concerned which may be helpful for the power system whose main transformers are overloaded.

Key words: main transformer; “N-1” principle; overload; stable

中图分类号: TM712 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0047-05

0 引言

随着新疆电网负荷的快速增长, 部分 220 kV 变电站双主变压器变电站的负荷已超过单台主变压器容量的 150%。如发生一台主变压器跳闸或一条母线跳闸, 若不采取相关措施则运行主变压器将过载 150% 以上。特别是在迎峰度夏大负荷期间或在地区电网中受端系统的主力机组停运期间, 如果达到主变压器的过流保护动作定值, 满足主变压器跳闸条件的话, 运行主变压器也将跳闸, 将造成 220 kV 变电站所接带的地区电网 110 kV 无源变电站失压, 严重威胁电网安全稳定运行和设备安全^[1, 2]。

主变压器过负荷问题在任何电网快速发展时期, 均会出现, 为保证电网安全稳定运行, 同时为了最大限度地满足电网的供电需要, 对双主变压器变电站出现单台主变压器故障跳闸后工作主变压器过载问题进行深入研究分析, 找出优化的解决措施。

在电网网架建设过渡期, 常见的方法有转移负荷、调整受端系统运行方式、加装过载联切负荷控制装置、通过主变压器的继电保护中的有关保护功能等。避免运行主变压器严重过负荷, 超过主变压器过负荷运行条件, 保障电网设备安全, 保证主要用户供

电^[3]。下面就新疆电网网架结构、电网运行状况, 对电网采取的过负荷措施进行了分析, 对运行中主变压器过负荷问题研究了相应的措施及注意要点。

1 主变压器运行存在的问题

1.1 主变压器过负荷情况

截止到 2009 年 8 月, 新疆电网 220 kV 降压变电站 40 座, 变压器 69 台, 总变电容量为 8 996 MV·A。进入 2009 年迎峰度夏大负荷时期, 新疆电网部分主变压器存在过载, 严重威胁电网安全稳定运行、设备安全和重要用户供电。

1.1.1 正常运行方式的过载问题

在正常方式下, 累计 9 座变电站主变压器在正常方式下满载或过载, 分别为吉木萨尔变电站、头屯河变电站、皇宫变电站、交河变电站、龟兹变电站、达风变电站、米泉变电站、金鹿变电站、钢东变电站。

其中龟兹变电站在地区电源——克孜尔电厂出力较小情况时发生。达风变电站在风力电厂大发的时候发生。米泉变电站在众和电厂机组停运的时候发生。钢东变电站主变压器在八钢冲击负荷时发生。

1.1.2 “N-1”运行方式的过载问题

220 kV 吉木萨尔变电站、皇宫变电站、龟兹变电

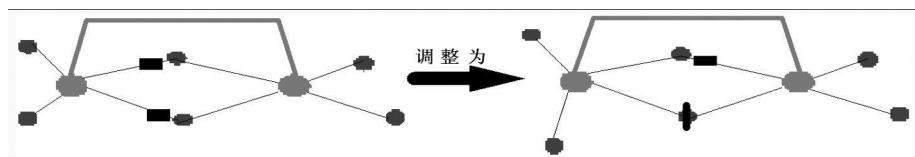


图 1 主变压器过载解决方案一示意图

站、达风升压站在“N-1”方式下运行主变压器严重过载达 200%~230%; 220 kV 头屯河变电站、钢东变电站、米泉变电站、宁远变电站、瑶池变电站、托克逊变电站在“N-1”方式下运行主变压器过载 150%~190%。

(备注: 220 kV 奇台变电站投运后, 吉木萨尔变电站主变压器过载问题得到有效缓解。220 kV 博乐变电站投运后, 皇宫变电站主变压器过载问题将得到有效缓解。220 kV 龙岗变电站建成投运后, 米泉变电站主变压器过载问题将得到有效缓解。钢东变电站主变压器在 4 号主变压器投运后主变压器过载问题将得到有效缓解。)

2 主变压器过负荷消除实施方案

为保证电网安全稳定运行、设备安全和重要用户供电, 在新设备未投产的电网过渡期, 经过对新疆电网过负荷主变压器所在网架结构深入分析研究的基础上, 采取以下 4 种技术措施来缓解主变压器过负荷。

方案一: 调整运行方式, 转移负荷, 见图 1。

由图 1 可见: 通过调整与两个 220 kV 变电站联络的 110 kV 变电站的运行方式, 将其由满载 220 kV 变电站供电调整为由另一个不过载 220 kV 变电站的供电运行方式, 将负荷转移, 从而避免主变压器过载, 损害设备, 具体如下。

220 kV 老满城变电站在过负荷达到一定程度时, 将 110 kV 仓房沟变电站、110 kV 公园变电站的负荷转移至红雁池电厂接带。

220 kV 头屯河变电站在过负荷达到一定程度

时, 将 110 kV 铁西变电站、110 kV 西郊变电站的负荷转移至 220 kV 昌吉变电站接带。

220 kV 米泉变电站在过负荷达到一定程度时, 将 110 kV 城西变电站、110 kV 腾飞变电站、铝厂变电站负荷转移至 220 kV 三宫变电站接带。

220 kV 莎车变电站在过负荷达到一定程度时, 将 110 kV 牌楼变电站、刀郎变电站负荷转移至 220 kV 金鹿变电站接带。

上述措施简单易行, 不需要增加新的装置, 能够充分利用电网现有的设备, 经济性好且供电可靠性高。但需具备转移的条件 (网架具备接线转供相对灵活的条件), 各自投装置需进行相应的调整配合。110 kV 变电站的供电可靠性有所降低, 如仓房沟变电站、公园变电站、铁西变电站、西郊变电站各自投方式均有母联各自投转为线路各自投, 如果各自投和重合闸装置不动作, 则造成全站失压, 而调整前的运行方式出现上述问题时只造成变电站一半负荷失压。

方案二: 调整运行方式, 采取 220 kV 主变压器中低压侧分列运行, 同时相应的 110 kV 变电站调整对端运行方式和接线 (特别是双回线运行的变电站)。

由于新疆电网 220 kV 变电站的 110 kV 母线为双母线的居多, 通过调整母线接线相对灵活的 220 kV 变电站的母线接线形式, 将 220 kV 变电站的中低压侧 (110 kV 侧、35 kV 侧) 分列运行, 同时将 220 kV 主变压器所接带的通过 110 kV 双回线并列运行的变电站高、中、低压侧全部分列运行, 使 220 kV 主变压器中低压侧所接带的负荷均为辐射型负荷, 在主变压器跳闸后, 跳闸主变压器多接带的负荷全部失去, 而不会转移到运行主变压器所接带, 这样将不会造成运

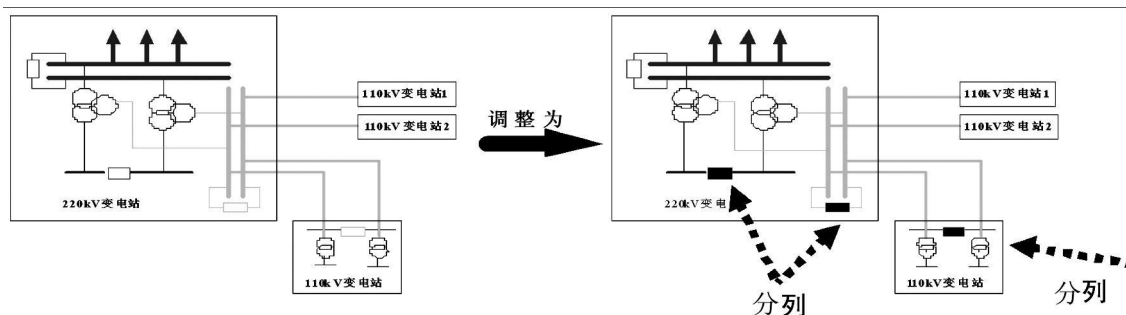


图 2 主变压器过载解决方案二示意图

行主变压器严重过载, 损害设备。并且变更相应的安全自动装置(退出相应的备自投), 见图 2。

具体如下。

220 kV 米泉变电站主变压器在过负荷达到一定程度时, 在采取将 110 kV 城西变电站、腾飞变电站、铝厂变电站负荷倒至 220 kV 三宫变电站带后仍过载, 将 35 kV 母线、110 kV 母线分列运行, 同时将众和电厂分列运行, 即 110 kV 米众一、二线分别运行在 110 kV I、II 母线上, 众和电厂 4 台机组均匀分别在不同母线上运行, 调整其余负荷均匀分布在两个母线上。

220 kV 皇宫变电站在过负荷达到一定程度时, 在采用将部分负荷通过 110 kV 精百线转移至 110 kV 奎百线接带后仍过载, 将 35 kV 母线、110 kV 母线分列运行, 同时将 110 kV 皇精线和皇三线接于一条母线上运行, 110 kV 皇达线在另外一条母线运行, 解开博州电网 110 kV 环网(即断开 110 kV 博达线)。

220 kV 莎车变电站在过负荷达到一定程度时, 在采用将部分负荷转移至金鹿接带后, 将中压侧分列运行, 一莎线、莎泽线在 110 kV I 母运行, 莎西线、莎北线在 110 kV II 母运行。

采取此种措施简单易行, 不需要增加新的设备, 能够充分利用电网现有的设备, 经济性好, 同时降低相关设备故障对系统的影响, 有一定操作性。但此种措施运行方式调整较大, 110 kV、35 kV 系统(220 kV 变电站的 110 kV 母线、35 kV 母线, 110 kV 双回线供电变电站)供电可靠性降低, 同时采用辐射型网络供电, 在局部地区末端变电站电压偏低, 对于负荷分布不均衡的变电站, 易增加损耗, 运行方式长期适应性较弱。

如众和电厂供电可靠性降低, 在联络线跳闸后,

机组与系统解列, 博州电网 110 kV 环网被打开, 末端地区电压低。

莎车地区的卡群一级水电站、塔西南石油电厂、亚斯墩电站、泽普电站、110 kV 泽普变电站、叶城变电站在主变压器故障后将与系统分网运行,

方案三: 调整 220 kV 主变压器中继保护的过负荷保护方式和定值, 同时调整 220 kV 变电站中、低压侧运行方式及相应的 110 kV 变电站的运行方式。

通过利用变压器相间故障后备保护中的主变压器过流保护中的一种方案, 采取整定控制, 调整 220 kV 主变压器中继保护的过负荷保护方式和定值, 主变压器不论何种原因, 过载时, 不经过复合电压闭锁, 跳 110 kV 母联开关。调整 220 kV 变电站中、低压侧运行方式, 将低压侧分列运行, 同时调整双回线并列运行的变电站相应的运行方式, 使所接变电站负荷成为辐射型负荷。

采取主变压器过流保护联切 110 kV 母联开关后, 相当于联切负荷, 避免相关负荷转移到运行主变压器所接带, 这样将不会造成运行主变压器严重过载而损害设备, 见图 3。

具体如下。

220 kV 头屯河变电站在过负荷达到一定程度时, 调整站内接线方式, 即 110 kV 头西一、二线、头钢一线、头郊线在 110 kV I 母运行, 其他 110 kV 出线在 110 kV II 母运行, 采用策略为主变压器跳闸后联切 110 kV 母联 1150 断路器, 35 kV 母线分列运行。

220 kV 瑶池变电站在过负荷达到一定程度时, 调整站内接线方式, 即 110 kV 池泰一线、池高一线、池甘线、甘吉线在 110 kV I 母运行, 池泰二线、池高二线、阜池线在 110 kV II 母运行, 采用策略为主变压器

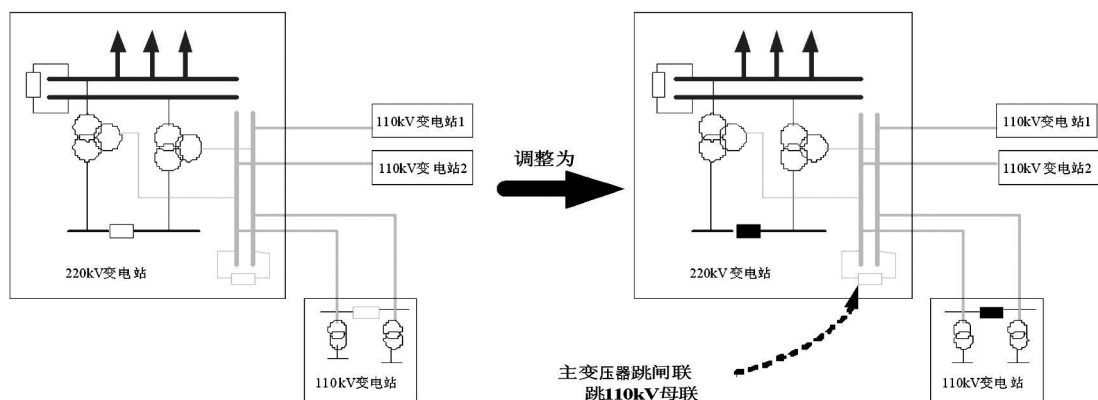


图 3 主变压器过载解决方案三示意图

跳闸若达到保护动作定值后联切 110 kV 母联 1150 断路器, 35 kV 母线分列运行。

220 kV 吉木萨尔变电站达到一定程度时, 调整站内接线方式, 即 110 kV 吉奇一线、吉北线、吉南线在 110 kV I 母运行, 110 kV 吉奇二线在 110 kV II 母运行, 采用策略为主变压器跳闸若达到保护动作定值后联切 110 kV 母联 1150 断路器。35 kV 母线分列运行, 35 kV 吉有线、吉新线接 35 kV II 母运行。

此种措施简单易行, 不需要增加新的设备, 能够充分利用电网现有的设备, 经济性好。但在继电保护定值计算上应与变压器原有保护功能相配合, 如配合不当存在误动的可能, 影响电网的正常运行。该方案供电可靠性降低, 长期适应性差, 末端用户电压偏低。

如瑶池变电站分列运行后, 110 kV 无母联备自投, 跳闸后失压变电站较多。

吉木萨尔变电站分列运行后, 110 kV 无母联备自投, 跳闸后失压变电站较多; 如 2 号主变压器跳闸, 北庭变电站、南郊变电站失压, 110 kV 吉奇二线严重过载, 末端电压严重偏低, 并有可能造成线路跳闸, 奇、坎、木变电站失压。分列运行后, 变电站无功补偿装置将不能得到合理利用。

方案四: 在 220 kV 变电站装设安全稳定控制装置——主变压器过载联切的装置。

通过在 220 kV 变电站装设主变压器过载联切负荷装置, 实现主变压器过载自动切负荷功能。避免变电站主变压器跳闸造成运行主变压器过载, 避免重要用户停电的安全风险, 按照负荷性质和重要性确定切负荷顺序。过载联切装置自动检测变电站运行变压器的运行状态、接带负荷大小和运行容量, 对主变压器额定容量自动进行计算和比较分析, 确定切负荷量, 按照负荷的重要性, 依次进行负荷切除 (自动发

出切负荷的线路开关跳闸脉冲), 保证重要用户的供电和运行主变压器的安全性, 见图 4。

具体如下。

220 kV 龟兹变电站、宁远变电站在过负荷达到一定程度时, 通过检测龟兹变电站、宁远变电站运行主变压器过载情况, 自动进行计算和比较分析, 确定切负荷量, 按照事先规定的切负荷次序, 依次进行负荷切除, 直到主变压器达到运行要求。

此种措施提高了重要用户的供电可靠性, 长期适应性较高, 并且能进行精确切负荷, 根据负荷性质灵活调控, 但投资增大, 过多依赖安全自动装置, 需要增加新的二次装置, 同时需构成系统, 通信通道要求较高, 涉及设备较多, 工作量大, 需对原有的变电站进行部分改造。

上述 4 种不同的技术方案, 均各有利弊, 不能从根本上解决主变压器“N-1”过载问题, 根本措施需要不断加强电网建设, 从电网本身网架结构上进行加强, 一次系统上根本解决此类问题, 同时从安全性和经济性综合优化考虑, 避免过多考虑安全性造成设备闲置, 过多考虑经济性造成安全问题突出, 运行压力和隐患增大的双重矛盾。

3 结论及相关建议

电网建设过渡期, 在不同时段、时期均会出现主变压器“N-1”过载问题, 在实际中, 根据各变电站的不同运行情况, 选择适合的切实可行的方案来消除 220 kV 主变压器过负荷, 同时电网规划部门应不断优化电网网架, 为电网互供创造条件, 以最大程度地适应负荷变化, 减少负荷变化对电网的安全稳定运行、设备安全的影响, 构建电网的智能化。

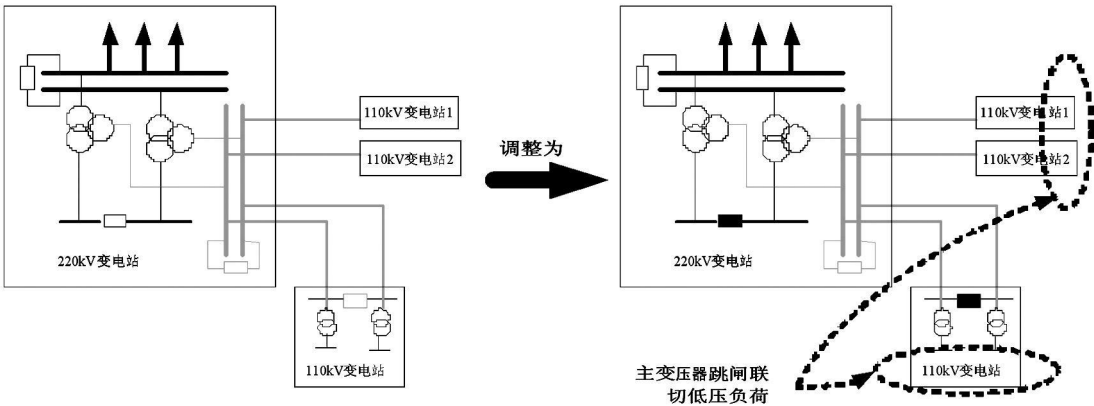


图 4 主变压器过载解决方案四示意图

为了保证新疆电网的安全稳定运行,提出了几点建议。

1)随着新疆负荷逐年增加,新疆电网 220 kV、110 kV 部分变电站的主变压器接近满载,尤其在夏季高峰负荷时期,主变压器运行的油温普遍较高,需要变电站值班人员在运行中加强监视,研究主变压器过负荷能力,制定相应的技术措施。

2)在部分电网中负荷波动将越来越大,变压器容载比的综合分析、变压器的经济运行、设备的安全可靠供电,需要进一步深化研究,不断重视主变压器“N-1”过载问题。

3)规划部门进一步优化网架,从电网建设消除

主变压器过载问题,但是应仔细研究新投运第 3 台主变压器还是新建设变电站,立足电网发展,优化研究,避免消除主变压器过载又出现新的问题。

参考文献

[1] 骆亮. 装设变压器过负荷自动减负荷装置的建议 [J]. 上海电力, 2006, 12(1): 97-99.
[2] 孙谊嫔,常喜强,吴高磊,等. 新疆电网 2009 年度运行方式 [Z]. 乌鲁木齐:新疆电力公司, 2008: 42-51.
[3] 李建彬. 调度运行中的几个安全预控点 [J]. 农村电工, 2005, 12(12): 20-21.

(收稿日期: 2009-11-04)

(上接第 40 页)

阻和电容的影响,等效电路接近理想电流传感器,具有极为平坦的幅频特性和相频特性曲线,对完整反映局部放电波形,减小波形振荡,提高脉冲分辨率有极大的改善。

4 结 论

在分析普通 Rogowski 电流传感器电路模型的基础上,提出了改进型电流传感器电路模型,通过仿真和实测表明,改进型电流传感器电路模型具有更好的幅频、相频特性。同时针对改进型电流传感器电路的不足,提出了实用的改进措施。

参考文献

[1] 李常禧. 电力设备诊断技术概论 [M]. 北京:水利电力出版社, 1994.
[2] 电力部电力科学研究院. 1984~1986 年 110 kV 及以上等级变压器事故统计分析 [R]. 1987.
[3] 电力部电力科学研究院. 1990 年全国 110 kV 及以上电压等级变压器类设备事故统计分析 [R]. 1991.
[4] 王玉川. 微电流传感器及 MOA 阻性电流在线智能化监测的研究 [D]. 重庆:重庆大学, 1995.
[5] 成永红. 电力设备测量——传感与测控技术 [M]. 北京:中国电力出版社, 2003: 155-160.
[6] 王微乐,李福祺,谈克雄. 测量介质损耗角的高阶正弦拟合算法 [J]. 清华大学学报:自然科学版, 2001, 41(9): 5-8.
[7] 王琦,秦娟英,周伟. 用 RS-485 构成总线型多点数据采集系统 [J]. 计算机自动测量与控制, 2000, 8(6): 45

-47.

[8] 饶运涛,邹继军,郑勇芸. 现场总线 CAN 原理与应用技术 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2001: 21-31.
[9] 姚文冰,马治亮,黄盛洁,等. 变电站一次设备绝缘在线监测系统研究 [J]. 高电压技术, 1996, 22(3): 27-29.
[10] 夏国盛,文远芳. 高电压绝缘的 $\lg\delta$ 数字测量方法 [J]. 高压电器, 2002, 36(2): 38-40.
[11] 王玉川. 微电流传感器及 MOA 阻性电流在线智能化监测的研究 [D]. 重庆:重庆大学, 1995.
[12] 贺景亮. 无源介损传感器的稳定性分析 [J]. 高电压技术, 1995, 21(4): 39-41.
[13] Zhengkao Zhang and M. R. Raghuvveer On-line Insulation Condition Monitoring Technique for High Voltage Apparatus [C]. 10th ISH'97.
[14] 王昕. 变电站高压电容型设备绝缘在线监测系统的研究 [D]. 北京:华北电力大学, 2003.
[15] Songlin Qin The Integrating Method for Tand Measurement ISH '97.
[16] Dulin Sun Caixin Liao nuijin Transducers for Electrical Apparatus Insulation Online Monitoring [C]. Proceedings of ISEI 2001, 2001.
[17] 高文胜,桂俊峰,谈克雄,等. 局部放电信号在电力变压器绕组传播过程中的畸变 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 31-36.
[18] Greg Stone Importance of bandwidth in PD Measurement in Operating Motors and Generators [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(1): 6-11.
[19] K. Horii K. Yamada Development of High Frequency Tuning Type Discharge Detector [C]. 8th ISH, Yokohama Japan, 89-92, August 1993.

(收稿日期: 2009-11-02)

基于改进人工鱼群算法的输电网规划

李传虎, 王林川, 刘 萍, 王 坤

(东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘 要:对传统的输电网规划模型增加考虑不确定信息因素的影响,建立了不确定因素影响下的数学模型,使得规划后的网络具有一定的剩余容量以适应未来不确定负荷的变化,可以满足未来小幅度的负荷波动以及未来短时的大幅度区域负荷增长的不确定性。使用改进的人工鱼群算法可以快速有效地求解该模型。24 节点系统算例的计算结果验证了模型及算法的正确性及有效性。

关键词:输电网规划;不确定负荷;人工鱼群算法

Abstract: The influence of uncertain information factors to the traditional transmission network planning model is considered and the mathematical model of transmission network planning under the uncertain factors is established which receives a certain residual capacity to meet the changes of uncertain load in the future. It can satisfy the uncertainties including the fluctuation of small load and the short-time load increasing greatly of big area in the future. Using the improved artificial fish swarm algorithm can solve the model quickly and effectively. The calculation results of 24-node system prove that the mathematical model and the algorithm are correct and effective.

Key words: transmission network planning; uncertain load; artificial fish swarm algorithm

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0052-04

0 引 言

输电网规划是规模庞大、计算复杂、带有大量等式和不等式约束条件的离散组合优化问题^[1]。目前进行输电网规划的方法分为数学优化方法和启发式方法两类。数学优化方法在理论上更为优越,一般可以保证解的最优性,但通常计算量过大,实际应用中有许多困难。启发式方法是以直观分析为依据的方法,通常是基于系统某一性能指标对可行路径上的一些参数作灵敏度分析,并根据一定的原则选择要架设的线路。启发式方法的优点是直观、灵活、计算量小、应用方便;缺点是无法从理论上证明其解的最优性,并且各启发式方法的收敛性也值得进行进一步的研究。

近年来应用于输电网规划的启发式方法主要有:遗传算法^[2-3]、粒子群算法^[4]、蚁群算法^[5]等。这些方法的提出丰富了输电网规划的解法,也为更好地进行电网规划工作打下了基础。

人工鱼群算法 (artificial fish swarm algorithm, AFSA) 是近年来提出一种模拟鱼类行为的优化方法,是集群智能思路的一个具体应用,它能很好地解决非线

性函数优化等问题。人工鱼群算法的主要优点是不需要了解问题的特殊信息,只需要对问题进行优劣的比较,初期有着较快的收敛速度;缺点是很难获得精确的最优解,而且算法在初期有较快的收敛性,后期收敛较慢。

通过引进保留精英机制和采用模拟植物生长算法作为后置程序的措施来改进人工鱼群算法 (improved artificial fish swarm algorithm, IAFA), 用于求解输电网规划问题。24 节点系统的算例表明了改进算法的有效性和可行性。

1 输电网规划的数学模型

电力市场环境下的电网规划面临如负荷变化、电源规划、政府政策、社会经济发展等更多不确定因素,这些因素将直接影响到规划方案的经济性和可靠性。因此,正确、客观、合理地描述这些不确定性信息是电网规划成功的基础^[6-8]。按照这些不确定信息的特点和性质不同,可分为随机不确定性、模糊不确定性、中介不确定性以及灰色不确定性等。这些不确定性在工程设计和实施过程中可能单独出现,也可能同时出现甚至相互联系、相互影响和相互作用,而这些不

确定性因素的影响最终都要体现在网络负荷变化上,从而为电网规划和实施带来困难。

传统的确定性负荷下的输电网规划模型,由于过于追求在网络安全前提下的线路投资最小化,常常会造成部分线路的容量在未来实际运行过程中被完全利用。在这种情况下,规划后的网络应对未来负荷波动的能力将较弱,有时比较小的负荷波动就可能会超过部分线路的传输容量。因此,计及负荷不确定性的影响,确保规划后的网络留有一定的可用传输容量是很有必要的,是解决不确定因素下系统安全性问题最基本的途径,可以有效地防止由于负荷的不确定性波动而造成的线路过载问题。

为此采用如下数学模型。

$$\max f = C_0 - \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} - \beta_1 \sum_{i \in \Omega_s} \gamma_{1i} - \beta_2 \sum_{i \in \Omega_s} \gamma_{2i}$$

约束条件如下。

$$\sum_{j=1}^{N_D} d_j - \sum_{i=1}^{N_G} g_i = 0$$

$$g_{i \min} \leq g_i \leq g_{i \max} \quad i=1, 2, \dots, N_G$$

$$d_{j \min} \leq d_j \leq d_{j \max} \quad j=1, 2, \dots, N_D$$

$$Z_{l \min} \leq Z_l \leq Z_{l \max} \quad l=1, 2, \dots, N_l$$

式中, f 为方案总投资费用; C_0 为一个很大的正常数; C_{ij} 为支路 ij 间增加单条线路的投资成本; n_{ij} 为实际增加线路的条数; β_1 为正常情况下网络切负荷惩罚因子; β_2 为紧急情况下网络切负荷惩罚因子; r 为最小切负荷列向量; Ω 为所有可增加线路的支路集合; Ω_s 为负荷节点集合。约束条件分别为网络平衡约束、发电厂机组容量约束、负荷的容量约束及输电容量约束。参数 N_G 为发电机组节点数; N_D 为负荷节点数; N_L 为线路总数; g_i 为发电机出力; $g_{i \max}$ 和 $g_{i \min}$ 为发电机 i 容量上下限; d_j 为负荷功率; $d_{j \max}$ 和 $d_{j \min}$ 为负荷 j 容量上下限; z_l 为线路潮流; $z_{l \max}$ 和 $z_{l \min}$ 为线路 l 容量上下限。

2 模型的求解

采用改进人工鱼群算法来求解所建立的模型。相比蚁群算法、神经网络等其他近代优化算法,传统 AFSA 的优点是对问题的要求比较宽松,对参数的依赖性较弱,只需要比较目标函数,全局寻优能力强。但是,该算法也存在缺点,主要是难以获得精确最优解,前期算法收敛快,后期收敛较慢。针对输电网规划问题,特对人工鱼群算法做以下改进:采取保留精

英方法,当一条人工鱼试探 $trytimes$ 次后,在无法寻得比当前解更优的解时,不再是盲目地随机移动一步同时替换解值,而是随机移动一步同时保留上一步的解值;采用模拟植物生长算法作为鱼群算法的后置算法程序,利用植物生长算法的极强的局部寻优能力,去获取精确最优解。

传统人工鱼群算法解决输电网规划问题的基本过程如下。

1) 输入初始数据,如人工鱼条数、最大迭代次数、视野、觅食尝试次数等。

2) 利用随机数发生器在控制变量可行域内随机生成个人工鱼个体,形成初始鱼群。鱼群中的每个人工鱼个体都代表一个初始方案。计算初始鱼群个体当前位置的食物浓度,令食物浓度最大者进入公告板,保存其位置及食物浓度值。

3) 各人工鱼分别执行觅食行为、追尾行为;选择行为后食物浓度较大者实际执行,缺省方式为觅食行为。这是以通过最有效的行动方式搜寻更优的规划方案。

4) 各人工鱼行动一次后,检验自身位置的食物浓度并与公告板比较,如果优于公告板,则将其取代。即每条人工鱼检查自己是否搜索到此时最合理的规划方案。

5) 判断是否达到预置的最大迭代次数,若是则输出计算结果;否则转步骤 4)。

各条人工鱼通过不断改变自身的位置,并将对应位置的食物浓度与公告板比较,在经过一系列的反复搜索寻优过程后,可能包含最优解的最佳结果将被留在公告板上。

改进后的人工鱼群算法求解提出的数学模型算法流程图如图 1。

在图 1 所示的流程图中,初始解采用二进制编码方式,模型中的最小切负荷量的计算需要同时计算正常情况和紧急情况下的最小切负荷量;后置的模拟植物生长算法是用来寻求精确最优解的,因此只进行减线操作,即对于随机选到的可行解的编码位进行减 1 操作。对于寻求到的既有经济性优点又满足一定负荷量变化的规划方案,本方法输出 3 个方案,包括最优解及几个次优解,便于规划人员参照比较。

3 算例分析

为了验证所提模型的正确性及改进算法的有效

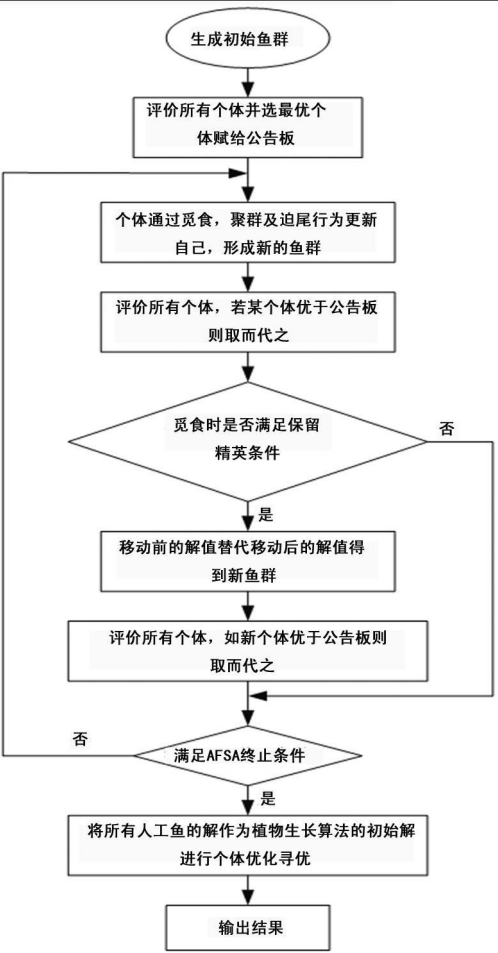


图 1 算法框图

性,对 IEEE-24 节点系统进行求解,24 节点系统是输电网规划中常用的算例,其原始结构图如图 2 所示,其基本数据参见文献 [9]。候选线路集选择与已有线路相同型号的线路进行扩建,线路的投资费用与线路长度成正比,节点间允许最多扩建支路数为 3 条。现假定规划年的每个节点负荷波动的幅度约为 ±5%,但是负荷波动的具体数学模型表述无法确定。假定图 2 东北部、中西部 2 个地区的总负荷量在用电高峰时都存在短时的负荷增长,并且增长幅度大于 15%,但每个地区的具体增长情况未知,在上述条件下,求解满足要求的网络规划方案。

为求解此 24 节点系统的规划优化方案,首先建立所提出的数学模型,根据人工鱼群算法,参数设置时考虑了文献 [10] 的意见,经调试,取人工鱼条数 (N = 20),最大觅食尝试次数 $trytimes = 45$,觅食视野 $Visual = 3$,最大迭代次数 $G_{max} = 15$,公告板最终保留 3 个结果。

利用传统人工鱼群算法程序和改进后的算法程序对该算例进行求解,各项计算指标结果比较如表 2

所示。

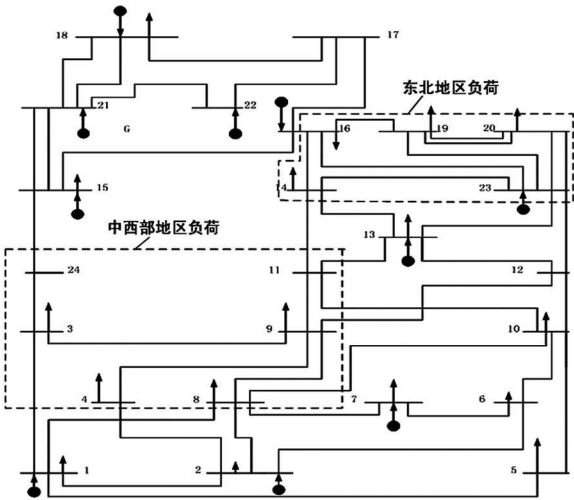


图 2 IEEE-24 RTS 系统
表 2 结果比较

指标	AFSA	IAFSA
总计算次数	50	50
种群数量	20	20
收敛次数	50	50
最优解出现代数范围	21~118	12~76
计算时间范围 /s	9.6~46	6.5~32

从运行计算的结果比较可以看出,IASFA 具有稳定的收敛性能,且用时较短。24 节点系统的规划结果如表 3 所示。

表 3 24 节点系统的规划结果

方案	架线方案	投资费用 /亿美元
1	—5(1), 3—9(2)	5.13
	4—9(1), 6—10(2)	
	7—8(2), 9—11(1)	
	10—11(1), 11—13(2)	
	15—16(2), 11—14(1)	
2	1—5(1), 3—24(2)	5.18
	4—9(2), 6—10(2)	
	7—8(2), 10—11(1),	
	11—13(1), 14—16(1),	
	15—24(1), 16—17(1)	
3	1—5(1), 3—24(2)	5.20
	4—9(2), 6—10(2)	
	7—8(2), 9—11(1)	
	10—12(1), 11—13(2)	
	15—16(2)	

这个规划结果较多地采用网状结构,网络电气连接紧密,实行多通道供、送电,故障下负荷转移方便,而常规优化方法为了节省投资而导致网架灵活性不够。表 3 中列出了 3 个规划方案,可以为规划人员提

供较大的选择余地。

4 结 语

传统的输电网规划过于关注经济性要求,而忽略了由于不确定信息带来的未来负荷变化的特点,因而适应能力较差。所建立的计及负荷不确定波动特点的输电网规划模型可以有效解决未来负荷点的长期小幅度波动以及某些区域短期大幅度波动影响,并且利用改进的人工鱼群算法通过 24 节点系统的算例进行了求解,算例分析表明了数学模型的正确性和算法的可行性及有效性。

参考文献

[1] 麻常辉,薛禹胜,鲁庭瑞,等. 输电规划方法的评述 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 97—101.

[2] 叶在福,单渊达. 基于多种群遗传算法的输电系统扩展规划 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 24—27, 35.

[3] 王秀丽,王锡凡. 遗传算法在输电系统规划中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 1995, 29(8): 1—9, 16.

[4] 金义雄,程浩忠,严健勇,等. 基于局优分支优化的粒子群收敛保证算法及其在电网规划中的应用 [J]. 中国电

机工程学报, 2005, 25(23): 12—18.

[5] 翟海保,程浩忠,吕干云,等. 多阶段输电网络最优规划的并行蚁群算法 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 37—42.

[6] Leeprechanon N, Moorthy S S, Brooks R D. Transmission Planning in Deregulated Systems: a Model for Developing Countries[C]. 2001 IEEE Porto Power Tech Conference Porto Portugal.

[7] Hugh Rudnick. Planning in a Deregulated Environment in Developing Countries, Bolivia, Chile, and Peru [J]. IEEE Power Engineering Review, 1996, 16(7): 18—19.

[8] 曾庆禹. 电力市场条件下的发输电规划协调与运行模式 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 1—5.

[9] ROMERO R, ROCHA C, MANTOVANI J R S et al. Constructive Heuristic Algorithm for the DC Model in Network Transmission Expansion Planning [J]. IEEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(2): 277—282.

[10] 刘耀年,李迎新,张冰冰,等. 基于人工鱼群算法的最优潮流计算 [J]. 电工电能新技术, 2006, 25(4): 30—33.

(收稿日期: 2009—08—10)

(上接第 8 页)

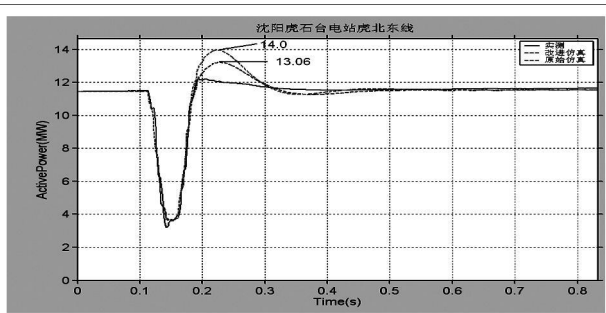


图 6 改进目标函数无功曲线

上述分析表明,将所提出的表征整体误差的动态变异率作为负荷模型的辨识函数,可以在辨识精度上有较为明显的改善,可以克服因权值处理不当而带来的电压稳态阶段超调误差。

5 结 论

1)提出了基于信号能量误差的计算式,对于整体误差具有很好的分辨及评估能力。运用所确定的误差水平评定方案,可解决批量仿真算例的误差计算

及评估。对东北电网主要负荷点的负荷数据及建模仿真数据评估表明,本方法是有效的。

2)所提出的误差计算准则对于现有的辨识算法有改善作用。

3)本方法对评估变化形式相对简单的量有效,对于其他变化形式的动态变量,相应的误差计算式可依据具体的数值特征确定。

参考文献

[1] 章健. 电力系统负荷建模方法的研究 [D]. 北京:华北电力大学, 1997.

[2] 朱守真,沈善德,郑宇辉,等. 负荷建模和参数辨识的遗传进化算法 [J]. 清华大学学报:自然科学版, 1999, 39(3): 37—40.

[3] 石景海. 考虑负荷时变性的大区电网负荷建模研究 [D]. 北京:华北电力大学, 2004.

[4] 石景海,贺仁睦. 动态负荷模型多曲线拟合参数辨 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 18—22.

(收稿日期: 2009—10—10)

基于变尺度标杆的短时电能质量分类法

李康瑞, 徐方维, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:短时电能质量扰动特征取决于其频率特征和持续时间, S 变换被认为是最适合于分析短时扰动的方法之一。提出了基于 S 变换的不同类型扰动标杆相似度识别不同持续时间扰动的方法。基于双线性插值的尺度变换建立同类扰动不同持续时间的标杆, 该扰动标杆涵盖了同类扰动的不同特征; 对被测扰动信号进行 S 变换, 经过尺度变换后统一为与标杆维数相同的矩阵, 依据相似度最大原则对扰动类型进行识别。该方法无需额外的分类器, 过程简单有效。仿真证明, 该方法对噪声不敏感, 能较好地解决不同持续时间的电能质量扰动信号的识别问题。

关键词:短时扰动; 变尺度; 标杆; S 变换; 最大相似度

Abstract: The features of short duration power quality disturbance depend on its frequency character and duration, so S-transform is regarded as one of the most suitable methods to analyze short duration disturbance. A classification method for different duration power quality disturbance based on similarity of scale-transform module time-frequency matrixes by S-transform is proposed. At first, the benchmark module time-frequency matrixes of different duration disturbance based on bilinear-interplot scale-transform are constructed, which includes their feature vectors. Then, the similarity of disturbance signal's module time-frequency matrixes with scale-transform to the benchmark module time-frequency matrixes is calculated and according to the principle of maximum similarity, the disturbances are classified. The proposed method is straightforward and it needs no any classifier. Simulation results show that this recognition system is immune to noises and the classification accuracy is high.

Key words: short duration disturbance; scale-transform; benchmark; S-transform; maximum similarity

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0056-05

随着经济和科技的发展, 基于微电子、电力电子的设备在电力负荷中所占比例越来越大, 这些负荷对电能质量扰动尤其是短时扰动非常敏感, 电力系统供电质量与用户设备的电压承受能力之间的矛盾越来越突出, 电力企业和用户对此非常关注。对各类短时电能质量扰动的准确识别和分类是改善供电质量、降低可能导致的经济损失的前提, 其中对电压凹陷 (voltage sag)、电压尖峰 (spike)、短时谐波 (harmonics) 和振荡暂态 (oscillatory transients) 等主要短时扰动的检测和分类识别是当前的研究热点^[1-3]。

现有的短时扰动分类识别方法中, 大多分特征提取、模式识别两个步骤。特征提取常用傅里叶变换、小波变换、余弦变换^[4-5]、线性调频 Z 变换^[6]、S 变换等基于信号变换的方法, 其中, 傅里叶变换适用于平稳信号^[15]; 小波变换能进行检测和分类, 但易受噪声干扰, 不适于短时谐波和间谐波^[11, 16]; 离散余弦变换能提取特征, 但对扰动类型适应性不强。现有分类方

法包括神经网络、决策树、支持向量机、模糊聚类等^[7-14], 均基于附加分类器。S 变换综合了小波和傅里叶变换的优点, 适于提取非平稳信号特征, 得到了广泛应用^[4, 15, 17-19]。无论如何提取特征, 现有方法均需加分类器对扰动分类, 因此, 如何结合各类扰动的特点, 不采用复杂的分类器, 而通过简单方法进行分类是值得研究的课题。

事实上, 有的特征为各类扰动共有, 有的特征为某类扰动所独有, 在提取特征时集合各类扰动的个性特征, 采用最适于提取短时扰动特征的 S 变换法^[17-19], 刻画能反映扰动类型的特征, 通过简单的代数运算直接进行分类, 可大大简化分类过程。

根据现有 S 变换模时频矩阵特点, 基于最大相似度原理进行扰动分类, 原理简单, 能有效进行分类^[18-19], 但不同持续时间的扰动的时频矩阵维数不同, 增加了模板数量且难以确定。因此从扰动特征出发, 提出一种时频矩阵尺度变换法。通过尺度变换, 建立各类扰动的统一标杆模板, 减少标准模板数, 基

于最大相似度原理, 仅需简单四则运算完成扰动分类。仿真证明, 尺度变换后的扰动标杆能有效反映各类扰动特征, 分类过程简单, 结果准确, 有一定理论价值和明显的工程应用价值。

1 S变换的快速实现

信号 $h(t)$ 的一维连续 S 变换定义为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

按时间间隔 T 离散化, 傅里叶变换为

$$H\left[\frac{n}{NT}\right] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h[kT] e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (2)$$

式中, $n=0, 1, \dots, N-1$ 。

令 $f \rightarrow n/NT$, $\tau \rightarrow jT$ 序列 $h(kT)$ 的离散 S 变换为

$$S\left[jT \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{-j\frac{2\pi mn}{N}} \quad (3)$$

S 变换可由快速傅里叶变换 (fast Fourier transforms FFT) 实现快速计算。 $h(kT)$ 经 S 变换后得到一个复时频矩阵, 对矩阵中的各个元素求模可得与之对应的模时频矩阵。矩阵的列对应采样点时刻, 行对应频率值, 矩阵元素对应幅值^[11]。该矩阵中含有各类短时扰动丰富的特征信息, 其等值线图能精确反映扰动的时频分布和不同频率成分的幅值分布情况^[18-19]。本质上, 各类扰动的主要特征是频率和幅值的突变, 扰动持续时间是扰动类型识别的必要条件。各类扰动的频率和持续时间总在某范围内, 可以建立扰动持续时间和频率变化的标准模时频矩阵。

2 模时频矩阵尺度变换

各类扰动的模时频矩阵的本质是数学矩阵, 类似于数字图像处理中的像素矩阵, 因此可以利用相似度进行类型识别。而不同持续时间的扰动, 其模矩阵的维数不同, 必须进行尺度变换, 统一各类扰动模矩阵的时间和频率分辨率, 建立各类扰动的标准模板。

设经 S 变换后某时频点图像灰度值为 $A_0(x_0, y_0)$, 经尺度变换为新的点 $A_1(x_1, y_1)$, 两者间的关系为

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} T = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式 (4) 中, a 和 b 为缩放尺度因子。

尺度变换后, 新图中某些点可能并不对应原图像的采用点, 因此采用双线性插值法^[20]来获得尺度缩放后不在采样点的像素的灰度值。

双线性插值原理如下。

设 $F'(x', y')$ 是图像缩放后输出的灰度值, $F(x, y)$ 是缩放过程中图像的灰度值, x, y 可能不在采样点, 而 x', y' 是与采样点对应的整数。为了计算出点 x, y 在频谱 F 中的灰度值, 需应用双线性插值如下。

设 i, j 是对 x, y 的取整。

$$\begin{aligned} F'(x', y') = & [F(i+1, j) - F(i, j)] \cdot (x-i) \\ & + [F(i, j+1) - F(i, j)] \cdot (y-j) \\ & + [F(i+1, j+1) + F(i, j) - \\ & F(i, j+1) - F(i+1, j)] \\ & \cdot (x-i) \cdot (y-j) + F(i, j) \end{aligned} \quad (5)$$

已有的研究表明, 利用双线性插值对新的图像灰度进行赋值, 可以得到较满意的图像效果。

3 S变换标杆选取

各类短时扰动经 S 变换后的模时频矩阵有其自身特征。但由于扰动起止时刻、扰动幅值、持续时间、谐波含量、振荡衰减等特征的随机变化, 直接进行识别比较困难。对各类扰动 S 变换后的模时频矩阵元素进行尺度变换, 统一各类扰动持续时间和频率分辨率, 形成各类扰动的标准模时频矩阵, 将其定义为该类扰动的 S 变换标杆矩阵。首先统一时间分辨率, 分别选取模时频矩阵扰动发生前一周波和扰动结束后一周波的元素, 再选取扰动持续期元素进行尺度缩放为一个周波的元素; 然后统一频率分辨率, 组成各类扰动的标杆矩阵。将每类扰动的 50 个标杆矩阵求平均, 即可得各类扰动的标杆模板 (S-transform benchmark template STBT) 矩阵。

为说明方法, 下面给出电压凹陷、尖峰、振荡暂态和短时谐波的波形图, S 变换时频等值线图以及该类扰动的标杆模板。可直观地看到各类持续时间不同的短时扰动能量分布、等值线图时频尺度缩放前后的变化以及与之对应的标杆模板的近似程度。扰动等值线图中横坐标为采样点, 纵坐标为频率, 等值线的颜色对应幅值。

3.1 电压凹陷

30 个周波的电压凹陷波形如图 1(a) 所示, 其典型特征是基波幅值的降低。对其进行 S 变换, 图 1

(b)是某凹陷的时频等值线图,可以看到,在电压幅值下降和上升时刻,等值线密集;凹陷持续期,等值线相对稀疏。凹陷持续期不同,等值线稀疏部分长短不同。50个不同持续时间的凹陷经过压缩,统一成持续时间为一个周波的矩阵,并对这些矩阵求平均后的凹陷模板矩阵如图 1(c)所示。

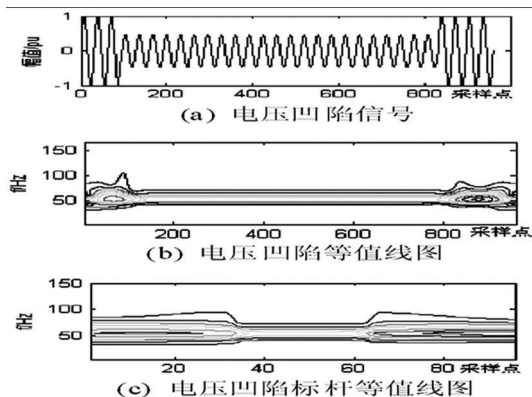


图 1 电压凹陷

3.2 电压尖峰

图 2(a)是具有一个电压尖峰电压波形。其 S 变换时频等值线图主要特征是基本幅值变化不太明显,但扰动发生时刻有较宽频带的暂态分量,持续时间短,如图 2(b)所示。对扰动发生时刻前后的点进行尺度放大,将尖峰持续期时间尺度拉伸至 1 周波,突出扰动发生时的频率暂态特征,50 个该扰动得到的标杆模板如图 2(c)所示。

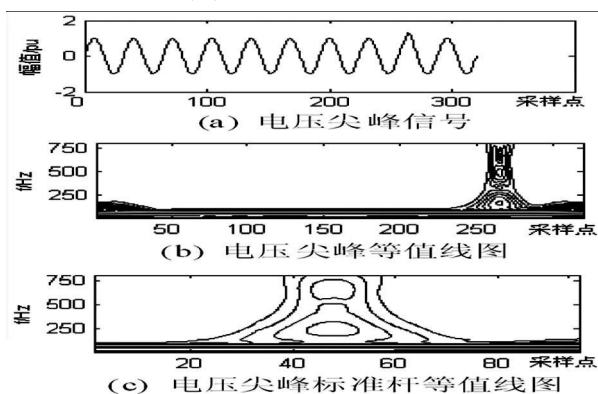


图 2 电压尖峰

3.3 振荡暂态

短时振荡电压波形如图 3(a)所示,图 3(b)是与之对应的 S 变换等值线图。可以看到,在较高频率处(500 Hz 附近及以上频率)频率变化显著,等值线密集。通过尺度压缩,统一 50 个时间尺度不同的振荡暂态扰动并建立标杆模板如图 3(c)所示。可以看到,随机振荡暂态和其模板极为相似,只是模板等值线相对稀疏。

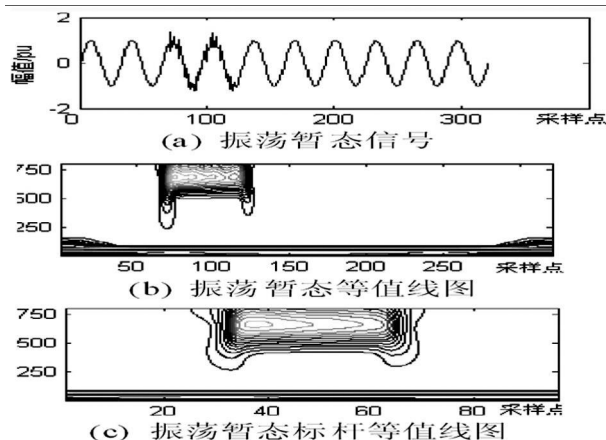


图 3 振荡暂态

3.4 短时谐波

图 4(a)是持续时间为 5 个周波的短时谐波信号,图 4(b)是其对应的 S 变换等值线图。可以看到,短时谐波特征主要体现在含有显著的基频整数倍频率分量上,在 150~400 Hz 频段有较密集的等值线分布。通过尺度压缩,统一 50 个时间尺度不同的短时谐波扰动并建立标杆模板如图 4(c)所示。

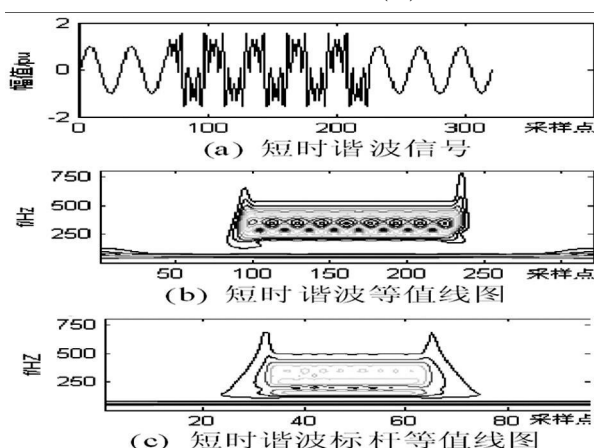


图 4 短时谐波

上述典型扰动分析可以得出:时频尺度缩放前后同类扰动等值线图像相似,时频尺度缩放起到统一扰动持续时间尺度和频宽分辨率的作用;同类持续时间不同的扰动,时频尺度缩放后扰动特征趋于一致,可以建立该类扰动的标准判据;各类扰动的标杆模板彼此间差别极大,说明通过时频尺度缩放,比较测试扰动与标杆模板之间的相似度是可以实行的。

4 相似度识别

设 M_A 为某类被测样本经 S 变换和尺度缩放后的扰动特征矩阵, M_B 为标杆,两者之间相似度为

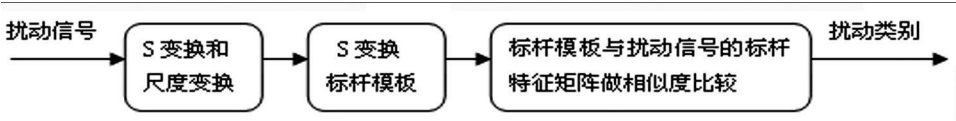


图 5 扰动信号识别流程图

表 1 各类电能质量扰动信号

扰动类型	信号模型	参数设置
电压凹陷 (−) 电压凸起 (+)	$v(t)=\{1\pm A[u(t-t_1)-u(t-t_2)]\}\sin\omega_0t$	$0.1\leq A\leq 0.9$ $T\leq t_2-t_1\leq 30T$
单个尖峰 (+) 单个尖峰 (−)	$v(t)=\sin\omega_0t\pm\operatorname{sgn}(\sin\omega_0t)\cdot\sum_{i=k}^kA\{u[t-(t_1+i\cdot 0.02)]-u[t-(t_2+i\cdot 0.02)]\}$	$0.1\leq A\leq 0.4, 2\leq k\leq 8$ $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数
振荡暂态	$v(t)=\sin\omega_0t+Ae^{-\alpha(t-t_1)}\sin\alpha\omega_0t\cdot[u(t-t_1)-u(t-t_2)]$	$0.1\leq A\leq 0.8, 0\leq\alpha\leq 15$ $5\leq t_2-t_1\leq 30T$
短时谐波	$v(t)=\sin\omega_0t+(A_3\sin^3\omega_0t+A_5\sin^5\omega_0t+A_7\sin^7\omega_0t)\cdot[u(t-t_1)-u(t-t_2)]$	$0.02\leq A_3, A_5, A_7\leq 1$ $2T\leq t_2-t_1\leq 8T$

$$S_{AB}=\frac{\sum_{i=1}^H\sum_{j=1}^WM_A(i,j)\cdot M_B(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^H\sum_{j=1}^WM_A^2(i,j)\cdot\sum_{i=1}^H\sum_{j=1}^WM_B^2(i,j)}}$$

(5)

式中, H 和 W 分别为矩阵行数和列数; $M_A(i,j)$ 和 $M_B(i,j)$ 分别表示标准化扰动特征矩阵和扰动标杆第 i 行、j 列元素值。

6 类典型扰动分类过程见图 5。首先对每类扰动的 50 个随机样本进行 S 变换, 并对变换后的模时频矩阵进行尺度变换形成标杆矩阵; 将每类 50 个标杆矩阵求平均, 得到 S 变换的各类标杆模板; 将待测的扰动信号也进行 S 变换和尺度变换, 并与 6 类扰动标杆模板按相似度最大原则进行匹配, 从而实现分类。

5 仿真分析

以电压凹陷、凸起、尖峰、缺口、振荡暂态以及短时谐波 6 类扰动为分析对象, 其数学表达及参数见表 1。用 Matlab 生成扰动信号, 采样频率为 1.6 kHz, 电压基频为 50 Hz, 电压凹陷和凸起数据取 40 周波, 其余扰动数据取 10 周波。改变 6 类扰动发生时刻、持续时间、幅值以及采样长度, 其中持续时间及幅值变化参数限制在表 1 范围内。

5.1 算例一

各类扰动随机生成 200 个测试样本, 总计 1 200 个, 叠加 20 dB 噪声, 计算样本 S 变换经尺度缩放后的扰动矩阵与 6 类扰动标杆模板间的平均相似度, 结果见表 2。

从表 2 易看出, 各类测试样本都与其同类标杆间的平均相似度最大, 且同类扰动标杆只与同类被测试本之间的平均相似度才最大, 说明该方法是可行的。

表 2 测试样本与标准模板平均相似度对比

样本	模板					
	凹陷	凸起	尖峰	缺口	暂态	谐波
凹陷	0.9774	0.9132	0.9238	0.9275	0.7342	0.6103
凸起	0.9004	0.9650	0.9422	0.9394	0.7415	0.6098
尖峰	0.9198	0.9486	0.9696	0.9689	0.7803	0.6726
缺口	0.9216	0.9442	0.9693	0.9701	0.7821	0.6779
暂态	0.7715	0.8265	0.8485	0.8471	0.9331	0.5831
谐波	0.6563	0.6950	0.7301	0.7341	0.5797	0.9248

表 3 分类识别结果

信号	噪声		
	40 dB	30 dB	20 dB
电压凹陷	100%	100%	99.4%
电压凸起	100%	100%	99.3%
电压尖峰	100%	100%	99.0%
电压缺口	100%	100%	99.1%
振荡暂态	100%	100%	99.2%
短时谐波	100%	100%	99.2%
平均数	100%	100%	99.2%

电压尖峰和缺口, 在无噪声情况下, 两类标杆相似, 只是基波幅值极性相反; 在噪声干扰情况下, 两类标准化的扰动特征矩阵图像清晰度下降, 与其标杆间的相似度随之降低, 但基波幅值的差异特征没变。因此, 表 2 中电压尖峰和缺口两类扰动平均相似度虽然接近但仍能正确分类。

5.2 算例二

被测样本叠加 40 dB、30 dB 和 20 dB 白噪声, 各类扰动在 3 种噪声下随机各取 1 000 个样本进行测试, 这些扰动的持续时间变化较大, 如电压凹陷、凸起的持续时间从 1 个周期至 30 个周期, 数据不规则性大。被测扰动识别准确率见表 3。

由表 3 可知, 采用所提出的方法, 在信噪比为 40 dB 和 30 dB 噪声水平下识别正确率为 100%; 在 20

dB 噪声水平下达 99% 以上, 分类结果较理想。出现极少数误判主要是强噪声情况下, 扰动特征被相对弱化。如电压凹陷下降幅度为 0.1 p.u., 信噪比为 20 dB 的环境下, 噪声最大幅度为 0.1 p.u.。因此, 对扰动信号进行滤波处理, 减小噪声对扰动特征的干扰, 可以进一步提高分类识别的准确度。

6 结 论

(1) 通过尺度缩放, 同类持续时间不同的扰动可建立统一的标杆模板, 该模板涵盖了对应扰动类别的标准特征, 具有统一的时间尺度和频率分辨率, 解决了扰动持续时间不同需建立不同模板的问题, 减少了标准样本数据量。

(2) 用最大相似度原理, 被测扰动与标杆模板间的相似程度仅需通过简单代数运算就可获得, 不需要复杂的分类器, 简化了分类过程。

(3) 仿真证明, 所提出的方法具有较高的识别精度和抗噪能力, 有明显的工程应用价值。

(4) 如何选取最佳变换尺度, 进一步提高识别精度尚需进一步研究。

参考文献

[1] 杨洪耕, 肖先勇, 刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展 (一)——电能质量一般概念 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(10): 1—4.

[2] 林海雪. 现代电能质量的基本问题 [J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5—13.

[3] Gargoom A. M., Ertugrul N., Soong W. L. A Comparative Study on Effective Signal Processing Tools for Optimum Feature Selection in Automatic Power Quality Events Clustering [C]. Industry Applications Conference 2005, (1): 52—58.

[4] 刘安定, 肖先勇, 邓武军. 短时电能质量扰动检测的一种新方法 [J]. 继电器, 2005, 33(8): 27—30.

[5] 刘安定, 肖先勇, 邓武军. 基于离散余弦变换和小波变换的电能质量扰动信号检测方法 [J]. 电网技术, 2005, 29(10): 70—74.

[6] 王楠, 肖先勇, 曾颂崎, 等. 基于插值线性调频 Z 变换的间谐波分析方法 [J]. 电网技术, 2007, 31(18): 43—47.

[7] Mamun Bin Ibne Reaz, Florence Choong. Expert System for Power Quality Disturbance Classifier [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1979—1988.

[8] Weinig Tong, Xuelei Song. Detection and Classification

of Power Quality Disturbances Based on Wavelet Packet Decomposition and Support Vector Machines [C]. The 8th International Conference on Signal Processing 2006, (4): 16—20.

[9] H. K. Sin, H. W. Ngan. Automatic Power Quality Recognition System Using Wavelet Analysis [C]. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies 2004, (1): 311—316.

[10] Chen S. Feature Selection for Identification and Classification of Power Quality Disturbances [C]. 2005 IEEE International Conference on Power Engineering Society General Meeting 2005(3): 301—306.

[11] 占勇, 程浩忠, 丁屹峰, 等. 基于 S 变换的电能质量扰动支持向量机分类识别 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 24(4): 51—56.

[12] I W. C. Lee, P. K. Dash. S-transform-based Intelligent System for Classification of Power Quality Disturbance signals [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2003, 50(4): 800—805.

[13] K. Vivek, M. Gopal, B. K. Panigrahi. Knowledge Discovery in Power Quality Data Using Support Vector Machine and S-transform [C]. Proceedings of the Third International Conference on Information Technology: New Generations 2006(16): 251—258.

[14] Fengzhan Zhao, Rengang Yang. Power-Quality Disturbance Recognition Using S-transform [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 944—950.

[15] 赵凤展, 杨仁刚. 时频分析方法在电能质量扰动检测与识别中的应用 [J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(5): 33—37.

[16] M. V. Chilukuri, P. K. Dash. Multiresolution S-transform-based Fuzzy Recognition System for Power Quality Events [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 323—330.

[17] 刘守亮, 肖先勇. Daubechies 复小波的生成及其在短时电能质量扰动检测中的应用 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 106—110.

[18] 刘守亮, 肖先勇, 杨洪耕. 基于 S 变换时频等值线图与幅值包络线的短时电能质量扰动检测与分类 [J]. 继电器, 2005, 33(22): 49—52.

[19] 刘守亮, 肖先勇, 杨洪耕. 基于 S 变换模时频矩阵相似度的短时电能质量扰动分类 [J]. 电网技术, 2006, 30(5): 67—71.

[20] 许录平. 数字图像处理 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.

(收稿日期: 2009—11—25)

电力系统谐波分析的有效方法

周利东, 滕 欢

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:电力系统谐波分析就是计算系统信号的基波和高次谐波的幅值和相角的过程。频域分析法是谐波分析的一个主要数学方法。论述了谐波分析中的频域分析法, 定义了谐波源及其对电力系统运行的影响。此外, 还讨论了此方法的优缺点, 并对以后的发展方向做出展望。

关键词:谐波分析; 谐波建模; 谐波仿真; 电力系统谐波

Abstract: The power system harmonic analysis is the process of calculating the magnitudes and phases of the fundamental and higher order harmonics of system signals. The frequency domain solution method is one of the major mathematical approaches for such analysis. The frequency domain solution method in the harmonic analysis is discussed. The harmonic sources and their effects on power system operation are identified. In addition, the advantages and disadvantages of this method are also discussed, and the direction of future development is prospected.

Key words: harmonic analysis; harmonic modeling; harmonic simulation; power system harmonics

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0061-05

0 引 言

电力系统中的谐波问题由来已久。特别是系统中大容量的电力电子装置的广泛应用, 使得谐波大量增加, 谐波污染越来越严重。而谐波引起电网电压、电流波形畸变, 影响电能质量, 降低电网可靠性, 影响供电企业的经济效益和供用电设备的正常工作甚至损坏设备^[1]。因此, 对谐波的治理刻不容缓。

电力系统网络中谐波的产生和传播大致如图 1^[2]所示。

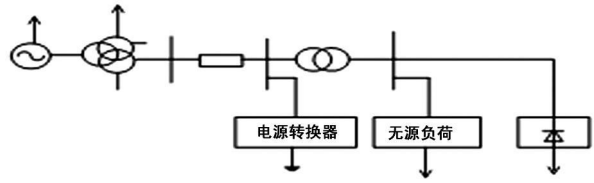


图 1 与谐波有关的电力系统模型

图 2^[2]对这些相互影响给出了概念上的描述, 其中源代表图 1 的电源转换器, 是作为一个谐波电流源出现的, 产生包含一系列谐波的畸变电流。相反的, 网络作为谐波电压源, 传播由其产生的畸变电压。系统中如果有其他谐波源的话, 则作用于母线。

电力系统谐波分析所关心的就是如何在网络边界上确定谐波的产生和传播。经过这么多年的研究和发展, 已经取得了很大的成果, 文献 [3] 总结出了

有关电力系统谐波建模和仿真的总体概念、理论和成熟的方法。许多谐波测量的标准和准则也已经发布^[4]。

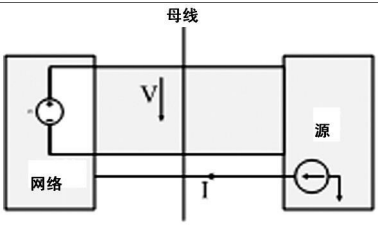


图 2 线性网络和谐波源的相互影响

电力系统谐波分析的方法并不是唯一的。根据谐波产生设备的类型、谐波分析的目的和分析演示的期望、对谐波源和网络元件的了解、各种计算资源的不同, 在频域、时域和谐波域已经开发许多方法。限于篇幅, 这里主要讨论频域分析法的建模策略、解决算法以及分析方法, 讨论它们的优点、缺点和实用性, 最后对频域分析法以后的研究进行了展望。

1 频域分析法的一般描述

频域分析法是一个计算的过程, 一个网络的总的分析法由一系列在各自频率点上分析方法的综合而来。在分析的过程中, 连续时间域中的系统元件转换到频率域上, 从而得到在频率域中更加简单的元件模

型。由于平衡电力系统中的线性网络对不同谐波的响应是相互独立的,因此可以将各次谐波分别进行处理,即,对各次谐波分别建立等效电路(在频率域中)并求解电流和电压。总的响应可以通过在时域中将所有谐波分量相加来得到^[3]。

仿真的过程中,系统通常分成两部分:①谐波源;②线性网络。

根据上面的划分,忽略元件的内部细节,可以将大量网络元件简化成 RLC 支路,而且,当存在多个谐波源时,可以应用叠加定理。

2 频域上的线性网络元件模型

谐波研究的目的在于计算母线谐波电压、支路谐波电流、电压和电流总谐波畸变率(THD)以及找出谐振条件^[3]。因此在进行谐波研究时,准确模拟系统元件,以保证获得精确、可靠的谐波畸变结果是十分重要的。这里所提到的元件模型包括发电机、输电线、变压器和无源负载。

下面详细说明这些网络元件的模型。

2.1 发电机模型

理想的发电机,其电动势可认为是纯正弦的,不含谐波分量。因此在谐波网络中,发电机谐波电势为零,其等值电路为由发电机端点经谐波阻抗直接与中性点(地)相联。零序电流一般不会进入发电机。发电机的谐波阻抗可表示为

$$Z = \begin{cases} Z_0(h) = R_a + jhX_0 & h=3n=3, 6, 9, \dots \\ Z_1(h) = R_a + jhX_d'' & h=3n+1=1, 4, 7, \dots \\ Z_2(h) = R_a + jhX_2 & h=3n-1=2, 5, 8, \dots \end{cases} \quad (1)$$

式中, R_a 为电枢电阻,单位为 Ω ; X_2 为负序电抗,单位为 Ω ; X_d'' 为次暂态电抗,单位为 Ω ; X_0 为零序电抗,单位为 Ω ; h 为谐波次数。

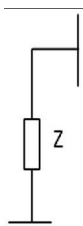


图 3 发电机的谐波等值电路

2.2 输电线路模型

在谐波研究中,输电线路的参数计算主要使用分布参数,即在集中参数的基础上再考虑长线效应而得

到谐波频率下更为准确的输电线路参数。

对于平衡条件下的谐波分析,输电线常用单相分布参数模型来表示,如图 4 所示。

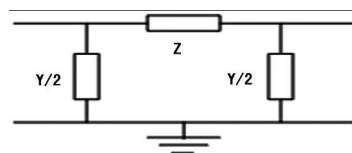


图 4 输电线路的谐波等值模型

分布参数模型包含线路的串联阻抗 Z 和线路的并联导纳 Y (在低频或者输电线较短时可以只考虑串联阻抗,而忽略并联导纳)。如果进一步考虑大地回路和集肤效应,那么串联阻抗 Z 包括两部分——内阻抗和外阻抗^[5]。内阻抗则主要受导体集肤效应的影响,由贝塞尔函数确定。外阻抗受大地回路和谐波频率的影响,由卡森公式来计算。

建立起这个模型以后,单位长度参数乘以线路长 x 得到整段线路的参数。

$$\begin{aligned} Z_{total} &= Z \cdot x \\ Y_{total} &= Y \cdot x \end{aligned} \quad (2)$$

一般的,取线路临界长度 $l_c = 150/h$ (m),其中 h 表示谐波次数。即当在第 h 次谐波环境下,如果输电线路的长度 $l < l_c$,采用集中参数模型;如果 $l \geq l_c$,则采用分布参数模型^[1]。那么就应该考虑长线效应。这种情况下,就应该使用下面的双曲长线方程^[2]。

$$\begin{aligned} Z_{total} &= Z_w \sinh \gamma x \\ Z_{total} &= \frac{2}{Z_w} \tanh \frac{\gamma x}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, Z_w 是波阻抗; γ 是传播常数。临界长度和谐波频率成反比,因为长波效应和并联导纳 $1/2\pi f h C$ 有关, f 为基波频率。在平衡条件下,完全可以用单相模型代替三相模型,根据三相对称的条件得到其他两相的情况。

2.3 变压器模型

基波潮流计算尤其是在高压网的计算中,常忽略变压器的激磁支路和绕组电阻。变压器参数严格说是不对称的。但由于不对称程度不大,可近似认为变压器是对称元件。在谐波作用下,变压器的等效电感近似认为不变,其谐波电抗与谐波次数成正比。而绕组的集肤效应和铁心的涡流损耗等在谐波作用下会有所增大,一些统计资料表明,变压器谐波等效电阻大致与谐波次数的平方根成正比,其阻抗值由绕组电阻和漏抗所组成,如图 5 所示。 h 次谐波阻抗为

$$Z_{Th} = R_{Th} + jX_{Th} = \sqrt{h} R_{T1} + jhX_{T1} \quad (4)$$

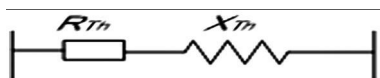


图 5 变压器的谐波等值电路

式中, R_{T1} 、 X_{T1} 分别为变压器的基波电阻和相应序电抗, 其序电抗由该次谐波的序特性决定。

2.4 无源负载模型

在谐波分析中, 无源负载通常是指各种家用的和商用的设备, 例如电灯、空调、加热器、冰箱、洗衣机、风扇、泵等等。它们不是被认为是谐波源而是等效成 RLC 电路, 很多设计都采用这些模型。图 6^[1, 9]所示为其中之一。

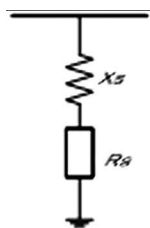


图 6 串联负荷模型

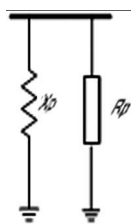


图 7 并联负荷模型

当所有网络元件模型被建立起来以后, 就可以将它们组合在一起构成表示电力传输系统的完整电路。

3 频域分析方法

对于线性网络, 尽管从需要的数据、关注的结果、问题的提法和实现的算法方面有不同的地方, 但都可以用这 3 种方法来分析: 频率扫描法、电流注入法和谐波潮流法。

3.1 频率扫描法

频率扫描也称阻抗扫描, 得到的是待研究母线的驱动点阻抗模值与谐波次数或频率之间关系的一张图, 从中可以检测到系统的谐振点^[3]。阻抗值的突然降低意味着串联谐振, 较小的激励电压就能产生很大的电流。而阻抗值的突然上升标志着并联谐振, 较小的激励电流就能产生较大的电压^[6]。频率扫描法就是用于监测这些可能发生的危险谐振情况。而母线谐波电压可由 $V=ZI$ 求得, 线路谐波电流可由 $I=YV$ 求得。为此, 首先必须通过包含所有网络元件的

联合模型结合下面的矩阵形式来建立网络导纳矩阵。

$$I_{n \times 1} = Y_{n \times 1} V_{n \times 1} \quad (5)$$

n 表示系统的节点数。

$I_{n \times 1} = [I_1, \dots, I_i, \dots, I_n]^T$ 是 I_i 注入 i 节点的谐波电流注入矢量。

$V_{n \times 1} = [V_1, \dots, V_i, \dots, V_n]^T$ 是谐波电压矢量, V_i 表示节点上 i 的谐波电压畸变水平。

$$Y_{n \times n} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1j} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{ji} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{ij} & \dots & Y_{in} \\ Y_{ji} & \dots & Y_{ji} & \dots & Y_{jj} & \dots & Y_{jn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{ni} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nj} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式 (6) 是网络导纳矩阵, Y_{ij} 是节点 i 和 j 之间的互导纳, 由网络元件计算得出。

应当指出, 在非平衡状态下, 式 (5) 需要以多相形式建立, 使矢量和矩阵是原来的三倍。在独立谐波源情况下, 求解式 (5) 会得出 n 个节点的谐波电压分布。在节点 i 处电压值 V_i 相当于此谐波频率下的节点驱动点阻抗。

但是, 频率扫描法不能考虑谐波源产生的谐波和系统的相互影响, 在处理谐振点附近的电力系统时容易得出错误的结果。

3.2 电流注入法

在实践中, 谐波源在单一频率时不产生谐波电流, 但是不同的谐波频率下会产生一系列谐波电流, 当它们注入系统时, 通过系统阻抗的电流导致各个节点的电压畸变。为了确定所关心的那些节点的电压畸变, 通常采用电流注入法 (CM), 也叫电流穿入法。此方法中, 谐波源被设计成理想电流源, 注入各个节点, 各次谐波电流的幅值和辐角与基波电流的幅值和辐角分别成线性关系。

将某个谐波频率下的 $I_{n \times 1}$ 带入式 (5) 中, 可以计算出此谐波下的各个节点的电压畸变 $V_{n \times 1}$ 。对其他频率的谐波重复进行此计算。不过对计算的谐波次数存在一个上限, 一个原因是谐波次数增加时谐波级数会减少, 而且高次谐波可以忽略; 另一个原因是感性传输系统的导纳会随着频率增加而成比例增加。因此高次谐波电流不需要进行深入研究。

在每个节点, 可以得到谐波电压的频谱, 其他指标例如 THD (总的谐波畸变) 也可以确定。在上面的方法中, 没有用到谐波电流相位的信息。如果只考虑

一个谐波源,这都没有关系。但是当有多个谐波源时,谐波电流可以考虑相位信息也可以不考虑。由它们引起的电压失真可以考虑进来也可以忽略。所以,有多个谐波源时,包括相角信息是必要的,用来表示谐波电流和电压向量的。如果电流频谱来自现场数据,那么必须保持测量的同步以保证准确的相角信息。电流注入法对作为谐波电流源产生的谐波电流进行了适当简化,因此该方法易于掌握且实际计算效率较高,适用于大型电力系统分析,同时也能应用于对三相不对称系统的谐波分析。实验表明,电流注入法只在电源电压畸变小于 10% 有效^[7],而且在电力系统中常常会发现两种谐波源。

类型 1: 电子开关设备,谐波电流产生对电源电压不太敏感。

类型 2: 非线性设备,母线电压的畸变水平对其影响相当大。

电流注入法特别适合于工作在理想状态下属于类型 1 的设备。在这种情况下,由这些设备产生的谐波电流可以由频谱很好地近似。例如,作用在理想的正弦交流电压和直流电流的一个 12 脉冲 AC-DC 转换器仅产生 $12h \pm 1$ 次谐波, $h=1, 2, 3, \dots$ 。但是,如果谐波源是类型 2 则电流注入法对取决于电压失真的电流频谱是错误的。另一个叫做谐波潮流 (HPF) 的方法可以弥补电流注入法的一些不足。

3.3 谐波潮流法

含有谐波源的情况下,系统的潮流由基波潮流和谐波潮流两部分组成,谐波潮流归根结底是由基波潮流在非线元件中转换产生,且只占系统潮流的一小部分。谐波潮流计算是进行谐波分析的重要手段,目前计算谐波潮流的算法主要有:线性法^[8],它忽略基波潮流与谐波潮流的相互影响,分别计算基波潮流与谐波潮流;非线性法^[9,10],它考虑基波潮流与谐波潮流的相互影响,通过两者的联立迭代求解。

线性法假定谐波源的电流大小和相位仅与基波电压有关,而与谐波电压无关,并在不考虑谐波潮流的情况下先算出基波潮流,然后根据基波电压算出谐波源电流,最后分别求解各次谐波网络方程 $\dot{I} = Y^* \dot{V}$,就可算出谐波潮流和各监测量的各项谐波指标。线性法计算速度快,收敛性能好,程序设计简单,所以其成为当前使用最为普遍的一种算法。但实际上谐波源的电流总是受相应的谐波电压影响的,由于此法忽略了基波潮流和谐波潮流的相互影响,所以计

算精度较差。

非线性法考虑了各次谐波电压对谐波源电流的影响,将谐波源的各次谐波表达成相应的谐波电压的函数,并计及基波潮流与谐波潮流的相互影响,通过两者的联立迭代求解,直至满足迭代收敛精度,即得谐波潮流解。非线性法先采用 PQ 分解法以节点基波功率平衡为收敛准则进行一次基波潮流迭代,然后联立迭代谐波源电流方程 $I_h = f_h(U_{s1}, U_{s2}, \dots)$ 和节点电压方程 $I_h = Y_h U_h$ 进行谐波潮流求解。从能量平衡的观点来看,谐波源向系统提供的谐波功率来自其从系统中吸取的基波功率,即

$$P_{s1} = P_{d1} + \sum P_{si} \quad (7)$$

其中, P_{s1} ——吸取的基波功率;

P_{d1} ——转化成其他形式的能量;

P_{si} ——转化为 i 次谐波功率。

所以谐波潮流的平衡将影响到基波功率的平衡,当谐波潮流改变时,基波潮流要重新进行迭代,这样逐次迭代,谐波潮流趋于收敛,谐波源节点基波功率也趋于收敛,总迭代过程的结束取决于基波潮流的最后收敛。

非线性法由于考虑了基波潮流与谐波潮流的相互影响,比线性法计算精度要高,但由于基波潮流与谐波潮流联立迭代,非线性法方程维数多,计算量大,占用内存多,计算速度和收敛速度要慢;基波与谐波数值上相差较大,迭代过程中,基波电压的变化可能引起谐波电流的变化较大,不利于潮流的平稳收敛,甚至可能出现不收敛的情况;谐波电压初值选择不当,导致收敛困难。

4 总 结

频域分析法是电力系统谐波分析中一个很好的工具。在频域分析法中,所研究的网络是线性的和时间不变的,由于其本身的性质,频域分析法要求对一个网络的详细信息进行计算,对一个频率段上的每一个频率这些信息都需要清楚地计算出来。而且,所要获得的信息是高度精密的。频域分析法更加适合于研究频率依赖、系统等价和频率响应的现象。但是它们不用来解决与谐波产生过程中随时间变化的因素有关的问题或者不同频率电力电子转换器的相互影响。

在电力系统分析中,由于电力传输系统频率依赖

性性质和本身良好的线性关系,使得在频域范围内的线性方程可以恰当地表示电力网络。但是谐波源的 $V-I$ 关系更加复杂,通常是非线性和时变的。为了找出合适的谐波源表示法已经做了许多努力,这也促使谐波分析不同方法的发展。目前的研究都在一个确定的框架内进行,考虑谐波产生源随机的特征仍然有许多领域去探索。需要确定与源谐波电流和电压有关的概率密度函数,需要从统计学的角度考虑网络怎么变化。随着增加的电源转换器的投运,电力网络变得更大、更复杂而且不断地变化,这些题目都会引起许多研究者的兴趣,需要做更进一步的研究。

参考文献

- [1] 张一中,宁元中,宋永华. 电力谐波 [M]. 成都:成都科技大学出版社, 1992.
- [2] Wang Yifei S Chen S S Choi An Overview of Various Approaches to Power System Harmonic Analysis [J]. The 8th International Power Engineering Conference (IPEC 2007) 3—6 Dec 2007; 338 — 343.
- [3] George J W akileh 著,徐政译. 电力系统谐波——基本原理、分析方法和滤波器设计 [M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [4] GB 14549—93 电能质量 公用电网谐波 [S].

(上接第 21 页)

由于电源的电势与断开相恢复电压之间的电压差对合闸成功与否有重要影响,为了提高重合的成功率,重合闸装置可以实时测量断开相电压,以确定最佳的合闸时机,如何解决好合闸时机是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 刘浩芳,王增平,徐岩,等. 带并联电抗器的超 特高压输电线路单相自适应重合闸故障性质识别判据 [J]. 电网技术, 2006, 30(18): 29—34.
- [2] 商立群,白维祖,程刚,等. 带并联电抗器的线路单相自适应重合闸故障判别原理 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 81—84.
- [3] 李斌,李永丽,贺永李,等. 750 kV 输电线路保护与单相重合闸动作的研究 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 73—76.

- [5] Zheng Xu Hongtao Liu The Harmonic Model and Its Algorithm for Coupled Multiphase Transmission Line [J]. Harmonics and Quality of Power 2000. Proceedings Ninth International Conference on Volume 3. Page (s): 938 — 941.
- [6] Grady WM. et al(1993). Power Factor Correction and Power System Harmonics Short Course New Mexico State University.
- [7] Task Force on Harmonic Modeling and Simulation Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks Part I: Concepts Models and Simulation Techniques [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 11, 1996.
- [8] 陈宝林. 最优化理论及算法 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [9] A. T. Sario M. S. Calovic M. B. Djukanovic. Fuzzy Optimization of Capacitors in Distribution Systems [J]. IEE Proceedings—Generation Transmission and Distribution, 1997, 144(5): 415—422.
- [10] K. H. Abdul-Rahman S. M. Shahidepour A Fuzzy-based Optimal Reactive Power Control [J]. IEEE Transaction on Power Systems 1993, 8(2): 662—670.

(收稿日期: 2009—12—10)

- [4] 索南加乐,孙丹丹,付伟,等. 带并联电抗器输电线路单相自动重合闸永久故障的识别原理研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 75—81.
- [5] 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时故障和永久故障的方法 [J]. 西安交通大学学报, 1984, 18(2): 23—31.
- [6] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 1996.
- [7] 林湘宁,刘沛,程时杰. 超高压输电线路故障性质的复值小波识别 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 33—38.
- [8] 李斌,李永丽,曾治安,等. 基于电压谐波信号分析的单相自适应重合闸 [J]. 电网技术, 2002, 26(10): 53—57.
- [9] 范越,施围. 输电线路单相自动重合闸中电压判据的修正 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 44—47.

(收稿日期: 2009—9—23)

三相组合互感器两种检定方法的比较研究

刘 鹏, 蒋映霞

(四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:给出了高压三相组合互感器的工作原理,并以三相组合互感器的电流单元为例先给出了其单相检定方法和试验结果。针对高压三相组合互感器的结构特点,提出了采用三相法模拟实际工作状态下对高压三相组合互感器进行检定,并给出了试验结果。由两种方法比较可知所提出的三相法能准确检定出高压三相组合互感器中电压元件和电流元件实际运行中相互影响带来的误差,比单相检定方法更能真实反映高压三相组合互感器实际工作的真实误差情况。

关键词:高压三相组合互感器;误差;相互影响;检定方法

Abstract: The working principle of HV three-phase combined transformer is proposed. The single-phase calibration method and three-phase calibration method of HV three-phase combined transformer are introduced. And the test methods and the test results are given. HV three-phase combined transformer can be calibrated accurately in simulating real running state with the proposed calibration method and apparatus. The test results show that the error of HV three-phase combined transformer caused by the mutual influence between the voltage elements and current elements can be measured accurately.

Key words: HV three-phase combined transformer; error; mutual influence; calibration method

中图分类号: TM76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0079-03

在 35 kV 及以下电压等级的电网中,三相组合互感器和三相电压互感器广泛用于关口电能计量以及电网的电压监测^[1-3]。它们的质量性能及其误差特性直接影响到电力部门的安全稳定运行和计量的公平、公正。如何准确对其进行检定尤显迫切和重要。

目前,无论是三相组合互感器生产厂家还是各检测部门均采用单相法^[4-6]对其进行出厂检验、验收及周检。高压三相组合互感器将电流互感器和电压互感器组合在一个狭小空间内,各互感器单元之间存在电磁影响^[2]。单相法检定出的误差结果无法真实反映高压三相组合互感器实际工作时的误差特性。为此,提出了采用三相法对高压三相组合互感器进行检定的方法。该方法同时对高压三相组合互感器施加三相电压和三相电流,模拟现场实际运行状态,对其进行检定,能够有效检测出三相组合互感器中电流元件和电压元件相互影响带来的误差量。

以电流单元为例,给出了其单相法和三相法这两种检定方法。并以一台三相二元件 10 kV 组合互感器为试验对象进行了试验,并给出了试验结果。结果表明,单相法的校验线路简单,三相法的校验线路稍微复杂,但能同时对三相组合互感器的电流或者电压

单元同时进行校验,也提高了校验效率,同时能够真实检定出高压三相组合互感器实际运行时的误差特性,为电能计量的公平公正提供了可靠的技术保障。

1 高压三相组合互感器

高压三相组合互感器(又称高压电力计量箱组合互感器)适用于额定频率为 50 Hz 额定电压为 3 kV、6 kV、10 kV、35 kV 的三相配电网用作电能计量,并安装在供电变压器的高压侧,仪表箱内装三相有功电度表及无功电度表,是用来直接测量高压线路中有功和无功电能的电器设备。对防止窃电、节约能源、供电管理具有重要作用。图 1 为两元件的高压三相组合互感器的原理图。图 1 中方框内部分为三相组合互感器的电气原理,其中包括了两个电压互感器和两个电流互感器,它们组合在一起形成一个整体。在此狭小空间中,相互之间存在电磁影响,必然在其运行时对其测量误差特性产生影响。

2 三相组合互感器的单相校验法

三相组合互感器的单相校验法是指对其采用传统校验方法对三相组合互感器中的某个电流互感器

基金项目:四川省电力公司科研基金 2007(32)

或者电压互感器单独进行校验,校验时其他几个互感器均不升流和升压。以校验其中电流互感器单元为例给出了单相法校验线路图,如图 2 所示。

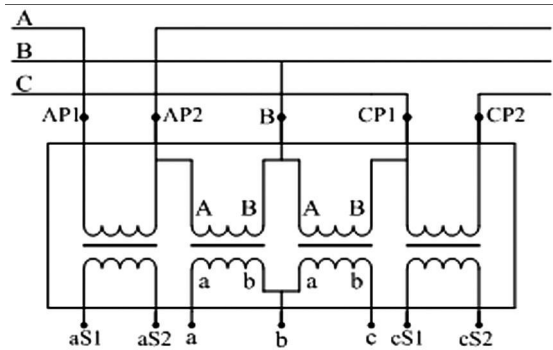


图 1 两元件高压三相组合互感器原理图

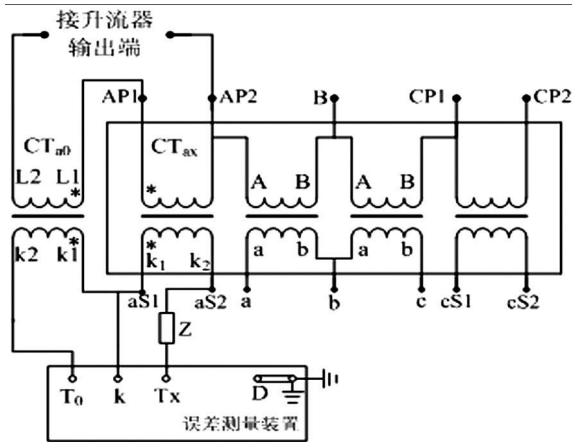


图 2 三相组合互感器中电流互感器的单相法校验线路图

由图 2 可知采用单相法对高压三相组合互感器进行校验其校验线路简单,容易掌握。但是校验时高压三相组合互感器内部其他电气单元均没有升流和升压,不符合现场运行情况。文中仅就 V-V 接线方式进行试验分析研究。选取一台型号为 JLSJWH-10 的三相二元件的 10 kV 组合互感器。该三相组合互感器中电压单元电压变比为 10000 V/100 V,额定容量为 25 VA,准确度等级为 0.2 级;电流单元的电流变比为 10 A/5 A,额定容量为 10 VA,准确度等级为 0.2 s 级。在试验中采用单相法对高压三相组合互感器的电流单元作了误差测试。其电流互感器的测试结果如表 1 所示,试验中所有互感器二次负荷功率因数均为 0.8。

3 三相组合互感器的三相校验法

采用三相法模拟高压三相组合互感器实际工作状态进行检定的原理框图如图 3 所示。由图 3 可知,

表 1 单相法检定电流互感器误差						
相别 变比	误差	额定电流百分数 %				二次 负荷
		1	5	20	100	
A 相 10 A / 5 A	f/%	0.054	0.058	0.065	0.084	10 VA
	δ/'	5.200	4.780	3.510	1.050	
	f/%	0.120	0.123	0.123	0.123	2.5 VA
	δ/'	2.460	2.370	2.010	1.080	
C 相 10 A / 5 A	f/%	0.064	0.063	0.066	0.085	10 VA
	δ/'	5.230	5.100	3.780	0.960	
	f/%	0.122	0.130	0.127	0.123	25 VA
	δ/'	2.850	2.610	2.290	1.200	

采用三相法检定高压三相组合互感器的检定系统主要由高压三相组合互感器检定控制台、高压带升流器的标准电流互感器、升压器、标准电压互感器、三相组合互感器校验仪以及被试品等几个部分组成。

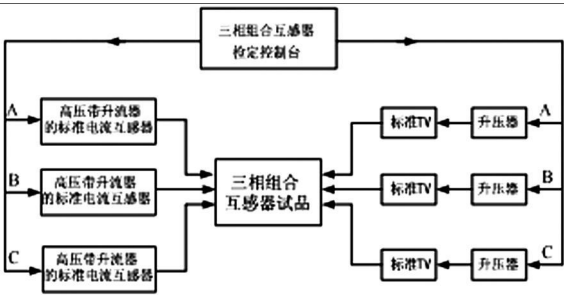


图 3 三相法检定三相组合互感器原理框图

当采用三相法对高压三相组合互感器中电流互感器进行检定时,由三相组合互感器检定控制台通过升压器将电压升至三相组合互感器的工作电压,并通过标准 TV 监视升压的电压值。然后由三相组合互感器检定控制台的控制下逐步升流,对三相组合互感器中的电流互感器同时进行检定。同样,当采用三相法对高压组合互感器中电压互感器进行检定时,由三相组合互感器检定控制台首先将三相组合互感器的电流互感器的一次侧电流升至额定电流值,其二次侧短路或接入二次负载,并通过标准电流互感器监视升流的电流值。然后在三相组合互感器检定控制台的控制下逐步升压,对三相组合互感器中的电压互感器同时进行检定。这样检定装置可采用同时对被试品通入额定三相电流和额定三相电压的检测方法进行检定,克服了单相检定方法不能模拟三相实际使用情况的不足,使检测结果更符合现场实际,从而达到了准确、可靠。另外使用本装置使得检测试验回路清晰明了,既有利于高压试验工作的安全,又避免了原来单相法中多次接线易出错的弊病,提高了工作效率。

采用三相法对上述试品中的电流互感器进行误差试验。V-V 型接线的高压三相组合互感器中电



变压器用绕组温控仪原理及应用

谢崇宇, 刘翔宇

(成都电业局修试所, 四川 成都 610041)

摘 要: 目前, 对变压器绕组温度的测量主要是通过热模拟测量方法, 绕组温度表在油温表的基础上配备一台电流匹配器和电热元件, 通过温度叠加来反映变压器绕组温度。这种测温方法具有简单、适用的特点。就绕组温控仪及其配套匹配器的入网检定和温度控制节点的整定进行了讨论, 对绕组温控仪的实际使用有一定指导意义。

关键词: 绕组温控仪; 接点; 检定

Abstract: The way to obtain the winding temperature of transformer is heating simulation method at present that is winding temperature indicator is equipped with a current matching box and electrothermal component on the basis of oil temperature indicator and the winding temperature is indicated by the temperature superposition. The proposed method is simple and applicable. The means for the calibration of winding temperature and its matching box are discussed which is the guidance for the actual use of winding temperature indicator and controller.

Key words: winding temperature indicator and controller; contact; calibration

中图分类号: TK39 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003—6954(2010)01—0082—04

0 前 言

变压器运行中, 如果遇到短路、过载、环境温度过高或冷却通风不够等情况时, 就会使变压器过热。当绕组温度超过绝缘耐受温度时会使绝缘破坏, 是导致变压器不能正常工作的原因之一。电力变压器的油温和绕组温度是主变压器运行工况监测的重要参数, 关系到运行中的变压器风冷投入、温高报警、油温过高跳闸等保护的正常动作。目前, 主变压器测温系统均采用压力式温度计, 温度值由密封的充液体的测量系统测取, 其主要由温包、毛细管、布登管等组成, 所有元件在一个封闭的管系统中, 内充高压液体。温度升高时, 液体膨胀, 将压力的变化传送到布登管。布登管连接到指针心轴, 驱动心轴转动, 从而温度变化和温度值指示在刻度盘上。这种机械式的测量系统是一个独立单元, 不需要外部输入功率。

直接测量变压器绕组温度需要解决高电压隔离的世界级难题, 国内外绝大部分变电站均采用热模拟方法间接测量变压器绕组温度。绕组温度由变压器顶层油温使仪表内弹性波纹管产生对应的角位移量, 叠加仪表内发热元件产生的角位移量, 从而指示变压器绕组温度, 发热元件通过匹配器及变压器 TA 二次

侧负载情况变化而补偿不同的铜油温差。

在温控仪上设置有 2~5 个微动开关, 每个开关配有各自的温度设置指针或温度盘用于设置触点动作温度值, 可提供输出接点分别用于投切变压器冷却系统、超温报警和超温跳闸等要求, 同时在温控仪内还配有 PT100 或 4~20 mA 温度变送器用于主变压器温度的远方监视。

保证温控仪测温系统对温度测量的准确性, 报警接点和跳闸接点的动作可靠性对主变压器的可靠运行至关重要, 因此做好主变压器温控仪的入网投运检定工作特别是按照规程对接点进行整定的工作是保证温控仪正常、可靠运行的关键。下面就主变压器绕组温控仪的检定及定值的整定进行了探讨, 对主流的几种绕组温控仪校验方法做了介绍。

1 压力式绕组温控仪测温原理

压力式温度计是依据封闭系统内部工作物质的体积或压力随温度变化的原理工作的, 如图 1 所示。仪表封闭系统由温包、毛细管和弹性元件组成。温包内充工作介质, 在测量温度时, 将温包插入被测介质中, 受介质温度影响, 温包内部工作介质的体积或压力发生变化, 经毛细管将变化传递给弹性元件 (如弹

簧管),弹性元件变形,自由端产生位移,借助于传动机构,带动指针在刻度盘上指示出温度数值。

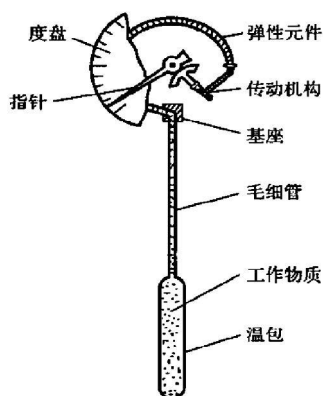


图 1 压力式温度计典型结构

由于直接测量变压器绕组温度需要进行高电压隔离,目前还没有成熟的技术,因此国内外在绕组温度测量上采用“热模拟”的方法进行测量。根据 IEC 354《油浸变压器负载导则》给出的变压器温度场数学模型如图 2 所示。

油平均温升随绕组高度升高而增加,同时绕组平均温升呈直线与油温升平行,绕组温升与油温升之差即为铜油温差,即绕组温升如式 (1) 所示。

$$T_w = T_0 + \Delta T_{w0} \tag{1}$$

式中, T_w 为绕组温度; T_0 为油面温度; ΔT_{w0} 为铜油温差。

TA 额定电流 I_T 的大小与变压器铭牌额定负荷电流、电流互感器变比等有关,与变压器绕组电流成正比。加热电流 I_h 是对 I_T 进行调整后根据变压器铜油温差人为给出的一个工作电流,加热电流通过加热电阻,从而产生的指示值比实测值高一个温差,该温度与变压器绕组电流即变压器负载相对应。经过调整后的加热电流 I_h 在电热元件上产生的热量使弹性元

件产生一个附加位移,从而产生一个比油温高一个温差的温度指示值,这个温差即模拟出来的变压器铜油温差,采用这种间接的方法可以得到绕组温度的平均指示值。

采用绕组温控仪的“热模拟”方法进行绕组温度测量,其加热的位置一般分为两类:一类是将加热电流引入温控仪内部,通过对温控仪内部的补偿温包进行加热以使弹性元件产生附加位移,典型的温控仪如 AKM 绕组温控仪 WT35 系列;另一类是分流器和传感器一体位于变压器顶层油温的测温孔处,分流器输出的加热电流直接对插入测温孔处的温包进行加热,以此产生比油温高一个温差的温度值,典型的温控仪如 MESSKO 绕组温控仪 MT-STW 160F2 系列。

2 变流器整定及温度点测试

变流器用于将输入的 TA 二次侧绕组电流转换为与变压器负荷成正比的加热电流 I_h ,其整定的方法如下。

(1) 根据变压器的额定电流及互感器的变比,计算电流互感器的输出电流 I_p ,如式 (2) 所示。

$$I_p = \frac{S}{\sqrt{3}U \cdot K_{CT}} \tag{2}$$

式中, I_p 为互感器额定输出电流; S 为变压器额定容量; U 为变压器额定电压; K_{CT} 为电流互感器变比。

(2) 通过变压器厂家提供的参数或变压器使用说明书提供的变压器绕组对油平均温升值 ΔT 查表得到需要的加热电流 I_h ,绕组温控仪的温升特性曲线(或表格)可以在绕组温控仪说明书上获得。

(3) 根据 I_p 和 I_h 的值计算得到变流器导线或短

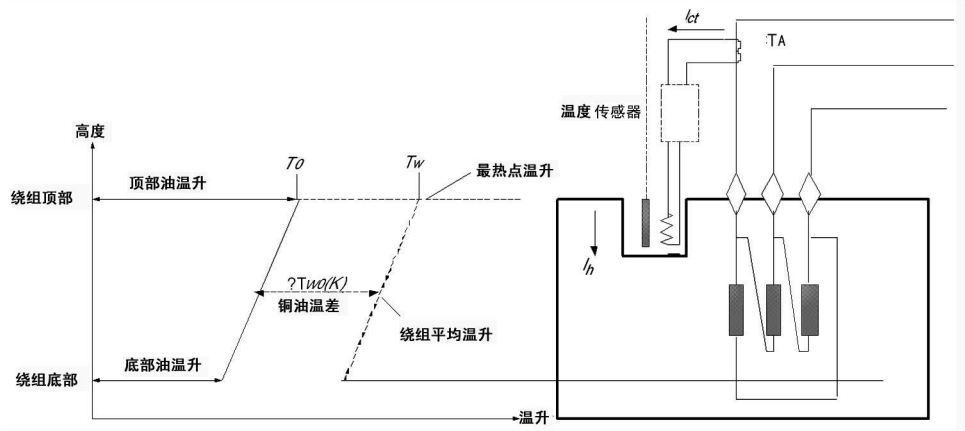


图 2 变压器温度场模型

表 1 WTI35 绕组温升特性

	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
油温 60℃	0.71	0.78	0.85	0.91	0.97	1.03	1.08	1.14	1.19	1.24	1.29

路连片的位置及方式,调整电流源使输入变流器的电流为步骤 (1) 计算得到的电流值 I_p , 调整变流器的可调元件,使实际的变流器输出达到步骤 (2) 查表得到的 I_L 值。

在成都某 500 kV 变电站使用型号为 WTI35 的绕组温控仪,其匹配器按照上面的步骤检定如下:根据变压器厂家提供的主变压器额定容量为 250 000 kVA,额定电压为 $525\sqrt{3}$ kV,TA 变流比为 1000 /1,变压器铜油温差 ΔT_{wo} 为 18 ℃,根据式 (2) 可以计算出二次额定电流 $I_p=0.825$ A,通过表 1 及式 (3) 可以得到加热电流 $I_L=0.973$ A。

$$I_L = \frac{I_{L20} - I_{L18}}{(20 - 18)} \cdot (\Delta T_{wo} - 18) + I_{L18} \quad (3)$$

式中, I_L 为变流器输出电流; I_{L20} 为绕组温升特性表中铜油温差 20℃ 时对应的加热电流; I_{L18} 为绕组温升特性表中铜油温差 18℃ 时对应的加热电流; ΔT_{wo} 为铜油温差。

通过计算出来的 I_p 、 I_L 可以确定出变流器输出的接线位置,在变流器输入端输入模拟的二次额定电流后,通过调整可调电阻,将输出调整到计算出的 I_L 需求值后,按照图 3 所示进行接线安装,进行温升试验。

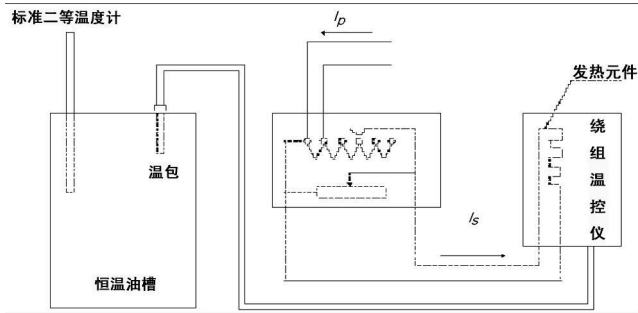


图 3 绕组温升试验

将输入的 I_p 电流置为零,恒温油槽内的变压器油升至 60℃ 并控制好油槽中油的流动,温控仪的传感器应保持大于 $2/3$ 的长度浸入油槽中,稳定 30 m in 后读取绕组温控仪的温度,作为温升试验前的温度 T_1 ,将输入的 I_p 电流置为计算出的 TA 二次额定电流,稳定 45 m in 后读取绕组温控仪的温度指示值 T_2 ,绕组的实际“热模拟”温升 ΔT 可由式 (4) 计算。

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad (4)$$

实际温升值与变压器参数中给出的铜油温差值误差应不大于温控仪的基本误差,各温度刻度的检定

可将 I_p 电流置为零后通过恒温油槽升温依次进行。

3 绕组温控仪接点整定

绕组温控仪接点可根据现场启动风冷、温高报警、温高跳闸灯的要求进行整定,当温度指示达到整定值时接点闭合动作。接点设定值一般在 0~150℃ 范围内连续可调,其中 20~150℃ 为需要进行整定校验的考核范围,接点的容量不应小于 AC 220 V /3 A 或 AC 220 V /5 A (阻性),动作寿命不少于 10 万次。温控仪的接点动作误差应不大于 $\pm 2^\circ\text{C}$ [1],开关接点动作设定值与示值的测试点不得重叠,其间距不得小于 5℃。

接点动作值整定完毕后,测试接点动作误差时,除信号电路和试验点外,采用与示值基本误差试验相同的试验条件、试验设备和标准仪表,测试点按照标准设定点进行。将被测试温控仪和标准二等水银温度计或标准 PT100 铂电阻插在恒温槽中 (如图 3 所示),并将被试温控仪的端子接到信号电路中,然后均匀改变恒温槽温度 (温度变化率应不大于 $1^\circ\text{C} / \text{min}$),使接点产生闭合或断开的切换动作 (信号电路接通或断开),在动作的瞬间记录标准水银温度计或标准 PT100 铂电阻的示值,即为接点正行程或反行程的上切换值或下切换值。在同一测试点上,上切换值设定点的差值即为接点动作误差;上切换值与下切换值的差值即为接点切换差。接点动作误差和切换差在各试验点上就接点闭合和断开各试验一次,其测试结果均应满足误差要求。

为了保证在整定过程中对接点整定的可靠性及准确性,温控仪在整个试验过程中,表头应垂直安装,温包必须全部浸没,引长管浸没不得小于管长的 $1/3 \sim 2/3$ 各类的压力式温控仪均要求表头和温包之间的高度差不得大于 1 m,由于现场应用的接点会使用在风冷全停延时跳闸回路及温高跳闸回路,因此要求接点的动作值能真实反映主变压器的温度,在读取接点动作值的时候,应读取和被试表温包位于同一恒温油槽内的标准水银温度计或 PT100 标准铂电阻,读取温控仪指示的温度值作为接点的动作值会造成温控仪示值误差,引入到接点动作误差中。在读取温控

仪或温度计的温度示值时,视线应垂直于刻度线,使用放大镜读数时,视线应通过放大镜的中心,读数估计到分度值的 $1/10^{[21]}$;

4 结 论

监测变压器运行的油面温度及绕组温度,及时在变压器温度过高时发出报警或跳闸信号是保证变压器正常运行、防止绝缘损坏引发更大事故的保证。由于变压器测温装置在户外紧贴变压器运行,运行环境恶劣,需要考虑到防水、防霉、抗震动等的户外设备运行特殊要求,因此多采用可靠的压力式温度计,利用液体介质热胀冷缩的原理,绕组温度测量采用“热模拟”方法。要保证温控仪现场运行的可靠性及动作准确性,防止发生误跳变压器的严重事故,需要对温

控仪进行入网检定及接点整定试验工作,前面针对变压器绕组温控仪的原理、变流器整定计算、接点整定试验方法进行了介绍,整定的过程及计算方法应用在 AKM、Teman、Messko 等进口温控仪和华立、大连金州等国产温控仪上,现场运行良好,接点动作可靠,所介绍的整定过程及计算方法对变压器绕组温控仪的入网检定工作有较强的实际指导作用。

参考文献

- [1] JG 310—2002 压力式温度计 [S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局, 2002.
- [2] JB/T 8450—2005 变压器用绕组温控仪 [S]. 北京:中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2005.

(收稿日期: 2009—10—04)

(上接第 69 页)

他敏感负荷进行评估,其适用性较广。

参考文献

- [1] 程浩忠,艾芊,张志刚,等. 电能质量 [M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [2] 陶顺,肖湘宁,刘晓娟. 短路故障引起的电压暂降与短时间中断特征和设备敏感度分析 [J]. 电气技术, 2005 (8): 36—40.
- [3] 肖先勇,王希宝,薛丽丽,等. 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.
- [4] Djokic S Z, Desmet J, Vanalme G, et al Sensitivity of Personal Computers to Voltage Sags and Short Interruptions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 375—383.
- [5] Djokic S Z, Stockman K, Milanovic J V, et al Sensitivity of AC Adjustable Speed Drives to Voltage Sags and Short Interruptions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 494—505.
- [6] Djokic S Z, Milanovic J V, Kirschen D S. Sensitivity of AC Coil Contactors to Voltage Sag Short Interruptions and Undervoltage Transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1299—1307.
- [7] P. Pohjanheimo M. Lehtonen. Equipment Sensitivity to Voltage Sags—Test Results for Contactors PCs and Gas Discharge Lamps [C]. in Proc. 2002 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power Brazil 2002: 559—563.
- [8] Milanovic J V, Gupta C P. Probabilistic Assessment of Financial Losses Due to Interruptions and Voltage Sags -

Part I: The Methodology [J]. IEEE Transactions 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 Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 925—932.
- [10] Gupta C P, Milanovic J V. Probabilistic Assessment of Equipment Trips Due to Voltage Sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 711—718.
- [11] 罗卫华,孙云莲. 独立分量分析法在电能质量监测与分析中的应用 [J]. 电网技术, 2006, 30(15): 81—84, 89.
- [12] 薛毅,耿美英. 数值分析 [M]. 北京:北京工业大学出版社, 2003.
- [13] 衣书伟,杨赢,郁惟镛. 改进的最佳平方逼近算法在电力系统中应用 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26(1): 65—69.
- [14] Chan J Y, Milanovic J V. Severity Indices for Assessment of Equipment Sensitivity to Voltage Sags and Short Interruptions [C]. Power Engineering Society General Meeting 2007(6): 1—7.
- [15] Chan—Nan Lu, Cheng—Chieh Shen. Estimation of Sensitive Equipment Disruptions Due to Voltage Sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 1132—1137.
- [16] C. N. Lu, C. C. Chen. Voltage Sag Immunity Factor Considering Severity and Duration [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting 2004(6): 1—5.
- [17] 刘晓石,陈鸿建,何腊梅. 概率论与数理统计 [M]. 北京:科学出版社, 2004.
- [18] 陈瑞. 电压暂降在配电网中的传播规律及仿真评估研究 [D]. 北京:华北电力大学, 2006.

(收稿日期: 2009—12—10)

基于温度场的单芯电缆载流量研究

谢光彬, 谢 伟

(宜宾电业局, 四川 宜宾 644002)

摘 要:导体温度是电力电缆载流量幅值变化的最直接特征量, 电缆表面温度和线芯温度是反应电缆运行情况的重要参量。在简化内热源的基础上, 建立单芯交联聚乙烯电力电缆的传热模型; 通过研究稳态时电缆温度场分布, 分析温度参量之间的关系和影响载流量的因素; 基于这个传热模型, 优化影响因素, 对提高电缆安全运行的可靠性和载流量最优化配置有重要的指导意义。

关键词: 电缆; 表面温度; 线芯温度; 实时监测

Abstract: The conductor temperature is the most direct characteristic for amplitude changing of the power cable ampacity. The surface temperature and conductor temperature is the important parameters representing the operating condition of the cable. The heat transfer model of the single-core crosslinked polyethylene cable is established on the basis of simplifying inner heat source. The relationship between the temperature parameters and the influencing factors of ampacity are analyzed by researching the stable temperature field distribution of cables. The influencing factors are optimized based on the heat transfer model which possesses an important guiding significance for improving reliability of the safe operation of cables and the optimal collocation for ampacity.

Key words: cable; surface temperature; cable-conductor temperature; real-time monitoring

中图分类号: TM757 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0086-03

电缆正常运行时, 导体允许的长期最高工作温度决定了额定载流量的大小。导体温度是载流量幅值变化的最直接特征量。电缆导体由于电阻的焦耳热及在交变电场中的介质损耗, 传递到绝缘层、护层等, 引起表面温度变化。电缆传热过程受材料的热物性、负载、电缆铺设方式和环境条件影响。电力电缆在运行中, 过负荷、局部过热、绝缘损坏等原因会逐渐老化, 稳态温度场能反映电缆的绝缘情况和载流量。

针对电缆的稳态导热, 根据几何和物性特征, 建立传热数学模型, 研究在稳态温度场分布中, 线芯温度、表面温度、环境温度三者之间的关系和载流量的影响因素, 对提高电缆的额定载流量提出了切实可行的建议, 对提高电缆安全运行的可靠性和载流量最优化配置有重要的指导意义。

2) 内热源发热均匀, 热流由里向外流。不考虑外部热源。

3) 电缆材料的热物性为常数。

4) 线芯、绝缘层及复合层之间的热接触良好, 无接触电阻。

1.2 单芯电缆的稳态传热模型

电缆分为线芯、绝缘层、内垫 (包括金属护套) 及外护层 (包括铠装)。对交流电缆来说, 热源包括电缆载流导体损耗、绝缘损耗、护套和铠装损耗^[1]。均匀内热源以热流形式注入相邻界面节点到绝缘层、屏蔽及护层, 通过电缆表面传至外界环境。稳态下的等效热路图用集中参数表示, 如图 1。

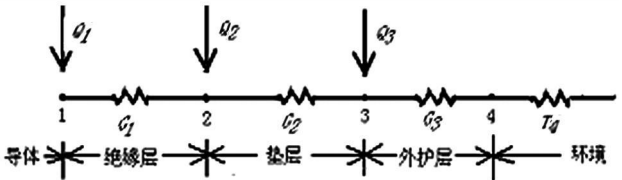


图 1 单芯电缆稳态等效热路图

用矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} G_1 & -G_1 & 0 \\ -G_1 & G_1 + G_2 & -G_2 \\ 0 & -G_2 & G_2 + G_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ 0.5Q_2 \\ Q_3 - G_3 \cdot t_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

1 传热模型

1.1 模型的基本假设

1) 稳态一维导热。热量的传递仅沿径向传播, 温度分布不随时间变化, 不考虑电缆分布电容对温度分布的影响。

Q_1 为导体损耗; Q_2 为绝缘介损; Q_3 为护套损耗, 包括护套涡流损耗和环流损耗; t_i 是导体、绝缘、屏蔽和外护层的分界点温度; T_i 是对应各层单位长度导热热阻; $G_i = \frac{1}{T_i}$ 。

T_i 和 Q_i 根据 IEC 287 标准推荐的公式进行计算, 其结构参数应采用相应产品国家标准中的规定值。 t_i 可通过温度传感器紧贴电缆表面或者用红外测温仪测得。

通过上面的矩阵可以算出各个分界点处的温度值, 作为边界条件代入下面的微分方程。

具有内热源的导热微分方程 (柱坐标) 为

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \cdot \frac{dt}{dr} \right) + \frac{Q}{K} = 0 \quad (2)$$

边界条件: $r=r_i$ $t=t_i$

分离变量积分两次:

$$t(r) = -\frac{Q \cdot r^2}{4\lambda} + c_1 \ln r + c_2 \quad (3)$$

代入边界条件解出两个积分常数, 对各层进行计算, 从而得到整个电缆内部的稳态传热模型。

例如线芯导体内部的温度分布函数为

$$t(r) = -\frac{Q_1 \cdot \frac{r^2}{4}}{\lambda} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + t_i \quad (4)$$

线芯中心的最高温度是

$$t(r=0) = -\frac{Q_1 \cdot \frac{R^2}{4}}{\lambda} + t_i \quad (5)$$

2 环境温度、表面温度和线芯温度的关系

2.1 线芯温度和表面温度

由矩阵的第一、二行可见, 线芯温度和表面温度之间的温差为

$$\Delta \theta_1 = t_i - t_i = f(G_i, Q_i) \quad (6)$$

G_i 已经由电缆各层半径、材料及结构确定, 载流量决定热源大小, 所以 $\Delta \theta_1 = f(I)$ 。

2.2 表面温度和环境温度

在电缆正常运行或者过载的时候, 表面温度和环境温度相差很大, 它们之间的关系如下。

$$\Delta \theta_2 = t_i - t_i = T_i \cdot \Sigma Q_i = f(G_i, \Sigma Q_i) \quad (7)$$

从式 (7) 可以看出, 热量从电缆表面传至外界环境过程中, 外部热阻和热源共同作用于表面温度和环境温度之间的温差, 在环境温度确定的情况下, 有

$$t_i = t_i + \Delta \theta_1 = t_i + \Delta \theta_2 + \Delta \theta_1 \quad (8)$$

稳态情况下, 电缆温度场分布由环境温度、各层热阻、热源决定。

3 影响额定载流量的因素及提高措施

电缆正常运行时导体允许的长期最高工作温度取决于绝缘材料的电气性能和机械性能。当导体达到最高温度时的载流量, 就是电缆传输的最大连续载流量, 也称为额定载流量。对交联聚乙烯电缆, t_i 最高温度为 90℃。由传热模型得

$$t_i = f(I, G_i, T_i, t_i) \quad (9)$$

针对不同的铺设方式和运行环境, 同一型号的电缆最大允许载流量也是不同的。在不同的地理环境和季节, 根据环境温度的变化, 额定载流量的大小也会随之变化。额定电缆载流量主要考虑以下几个因素。

1) 环境温度。它随地域, 气候影响, 具有一定的周期性。

2) 外部热阻。它与电缆的铺设方式 (直埋、管道铺设等)、散热机制、环境参数 (土壤类型、空气对流系数、周围温度、湿度) 有关。

3) 电缆型号。内部热阻和介质损耗受电缆设计参数及材料决定, 有无钢丝铠装, 金属护套的互联接地方式都影响热源大小。

4) 导体材料, 标称截面。导体损耗是内部热源的主要部分, $Q_1 = I^2 \cdot R$ 其中交流有效电阻随温度变化。

对电力运行部门来说, 环境温度 and 电缆内部热阻是不能改变的, 因此提高额定载流量切实可行的措施是增大外部热阻和减少热源。在电缆的铺设方式、空气对流情况等方面改进, 电缆与周围物质直接接触比紧贴墙壁或天花板, 热传递散热比大气对流散热有效的多, 比如在管道里填充介质。采用非磁性材料铠装电缆, 采用金属护套交叉互联接地都可以减少热源。

4 仿真计算

在传热模型的微分方程式中, 代入实验电缆的物性参数, 采用有限元分析软件 Fem lab 进行仿真, 得到稳态时的温度分布场; 分别以载流量和环境温度为变量, 验证传热模型的合理性及 3 个温度参数之间的关系; 在满足导体允许的长期最高工作温度的情况下, 拟和出不同外部热阻对应的额定载流量。

选用 8.7/15 kV YJV 1×400 mm² 交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电缆, 以电缆屏蔽两端互连接地, 直

埋于土壤中,额定载流量为 680 A 进行计算。

表 1 8.7/15 kV YJV 电缆结构

名 称	数 值
导体直径 /mm	23.8
绝缘直径 /mm	26.6
屏蔽平均直径 /mm	35.8
护层厚度 /mm	2.3
电缆外径 /mm	41.0

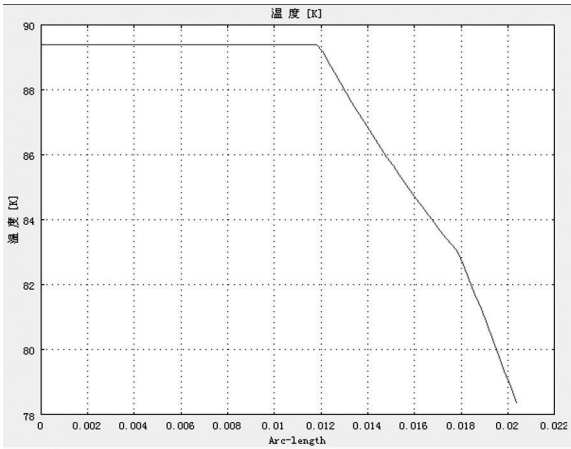


图 2 额定载流量时电缆径向温度分布

4.1 环境温度

选取电缆额定载流量,外部参数 h 为 $5\text{W}/\text{m}^2\times\text{K}$ 时,环境温度改变对电缆稳态温度分布的影响。从表 2 中可以看出,当环境温度升高时,电缆表面温度和线芯温度随之升高,但是温差 $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$ 分别都是恒定的。这说明环境温度影响温度场分布,但是并不影响温差。

表 2 额定载流量时电缆温度随环境温度变化

名称	数 值				
环境温度	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
表面温度	66.28	71.28	76.28	81.28	86.28
线芯温度	77.57	82.57	87.57	92.57	97.57
$\Delta\theta_1/^\circ\text{C}$	11.29	11.29	11.29	11.29	11.29
$\Delta\theta_2/^\circ\text{C}$	56.28	56.28	56.28	56.28	56.28

4.2 外部热阻

敷设在空气中时,外部热阻 $T_1=\frac{1}{\pi\cdot d\cdot h}$, h 是复合换热系数,由电缆外半径、铺设方式和环境参数等修正。由图 3 可见,电缆在额定载流量、环境温度为 25°C 的情况下, h 对电缆表面温度的影响成非线性。同样,当电缆埋设在土壤中时,土壤的热阻系数和水分是否迁移都会直接影响外部热阻。就是说,选择恰当的铺设方式、改进电缆周围的散热等措施来减小外部热阻,完全可以保证电缆长期运行的绝缘要求。

4.3 载流量

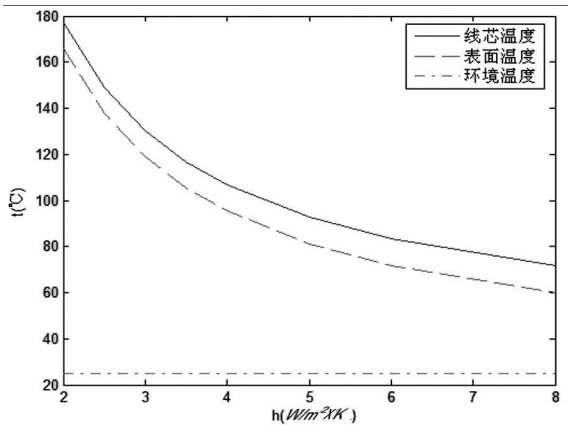


图 3 恒定载流量时电缆随 h 温度变化曲线

电缆铺设在空气中, $h=5.3\text{W}/\text{m}^2\times\text{K}$,环境温度为 25°C 时,电缆稳态温度场随载流量变化曲线如图 4。当载流量较小的时候,表面温度更易受环境温度影响。

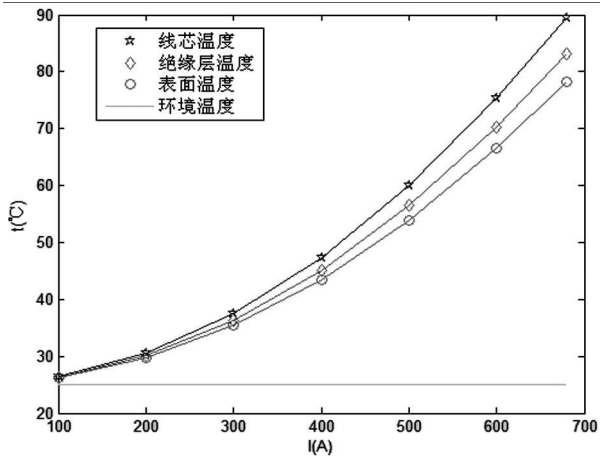


图 4 电缆温度随载流量变化曲线

5 结 论

- 1)对模型热源的简单处理,经仿真计算验证,可满足工程需要。
- 2)电缆表面温度的测取受接触热阻,测温传感器和后续单元的影响,尤其是在小载流量较小的时候,受环境温度影响较大。
- 3)电缆线芯温度、表面温度和环境温度之间的关系,通过 Fem lab 软件仿真数据得到验证。对提高额定载流量和保证电缆的安全运行有重大意义。

参考文献

[1] 马国栋. 电线电缆载流量 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
[2] 赵建华, 袁宏永, 范维澄, 等. 基于表面温度场的电缆线芯温度在线诊断研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19 (1): 53—54.

(收稿日期: 2009—12—10)

110 kV 主变压器中性点间隙击穿跳闸分析及对策

胡晓松, 陈旭峰, 赵 强
(宜宾电业局, 四川 宜宾 644000)

摘 要:近几年宜宾电网多次发生 110 kV 系统接地故障时, 主变压器中性点间隙击穿, 主变压器间隙过流保护动作主变压器跳闸的事件。从主变压器中性点间隙击穿的原因分析来看, 主要是主变压器中性点出现了持续时间较长的暂时工频过电压。因此需要从缩短故障清除时间、适当延长主变压器间隙保护跳闸时限、加强运行接线方式管理等方面着手, 避免主变压器因中性点间隙击穿引起主变压器无故障跳闸。

关键词:接地故障; 间隙击穿; 中性点间隙; 跳闸分析

Abstract: In recent years when ground fault took place in 110 kV system of Yibin power grid, the neutral gap of main transformer was broke down, then overcurrent protection acted and caused the transformer tripping. The main reason was that the temporary power-frequency overvoltage was occurring in neutral point of transformer which lasted a long period of time. So in order to avoid the same malfunction, the solution is to shorten fault clearance time, extend the tripping time limit of main transformer protection appropriately, and strengthen the management of operation mode of power grid.

Key words: ground fault; breakdown accident of protective gap; neutral gap; tripping analysis

中图分类号: TM864 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)01-0089-03

1 事故情况

2005 年 7 月 2 日 110 kV 普建线 (普安站—建中站) 36 号杆 A 相被雷击发生单相接地短路, 普建线 156 开关零序过流 II 段动作跳闸, 同时建中站 1 号主变压器间隙击穿, 间隙过流保护动作跳闸。

2006 年 7 月 13 日 110 kV 豆普线 (豆坝电厂—普安站) 15 号塔 B 相被雷击发生单相接地短路, 豆普线 136 开关零序过流 II 段动作跳闸, 同时马延坡站 1 号主变压器、云天化站 1 号和 2 号主变压器间隙击穿, 间隙过流保护动作跳闸。

2007 年 6 月 29 日 110 kV 建高线 (建中站—高县站) 25 号塔 BC 相被雷击发生两相接地短路, 建高线 124 开关接地距离 I、II 段动作跳闸, 同时巡场站 1 号主变压器间隙击穿, 间隙过流保护动作跳闸。

2007 年 7 月 6 日 110 kV 建高线 (建中站—高县站) 25 号塔 A 相被雷击发生单相接地短路, 建高线 124 开关接地距离 I、II 段动作跳闸, 同时巡场站 1 号主变压器间隙击穿, 间隙过流保护动作跳闸。

2007 年 7 月 18 日 110 kV 豆新线 (豆坝电厂—建新站) 63 号塔 AC 相被雷击发生两相接地短路, 豆新线 133 开关接地距离 II 段、零序过流 II 段动作跳

闸, 同时建新站 1 号主变压器间隙击穿, 间隙过流保护动作跳闸。

2008 年 7 月 31 日 110 kV 豆普线 (豆坝电厂—普安站) 15 号塔 C 相被雷击发生单相接地短路, 豆普线 136 开关零序过流 II 段动作跳闸, 同时普安站 1 号和 2 号主变压器、建中站 1 号主变压器、马延坡站 1 号主变压器、云天化 1 号主变压器间隙击穿, 间隙过流保护动作跳闸。

为准确、详细分析 110 kV 主变压器在 110 kV 线路故障时中性点间隙击穿后间隙过流动作跳闸的原因, 下面以 2007 年 6 月 29 日事件为例进行分析。

2 故障前系统运行方式

因 220 kV 龙头站 2 号主变压器停电进行综合自动化改造, 1 号主变压器供电能力不足, 110 kV 巡场站采用特殊运行方式供电, 即: 豆坝电厂—普安站—建中站—高县站 110 kV II 母—巡场站。

巡场站 1 号主变压器供 35 kV I 母, 110 kV 中性点不接地运行, 双马水泥厂发电机通过 35 kV 巡马线在 35 kV I 母并网; 2 号主变压器供 35 kV III 母, 110 kV 中性点接地运行, 芙蓉矿务局发电机通过 35 kV 巡电线在 35 kV III 母并网。

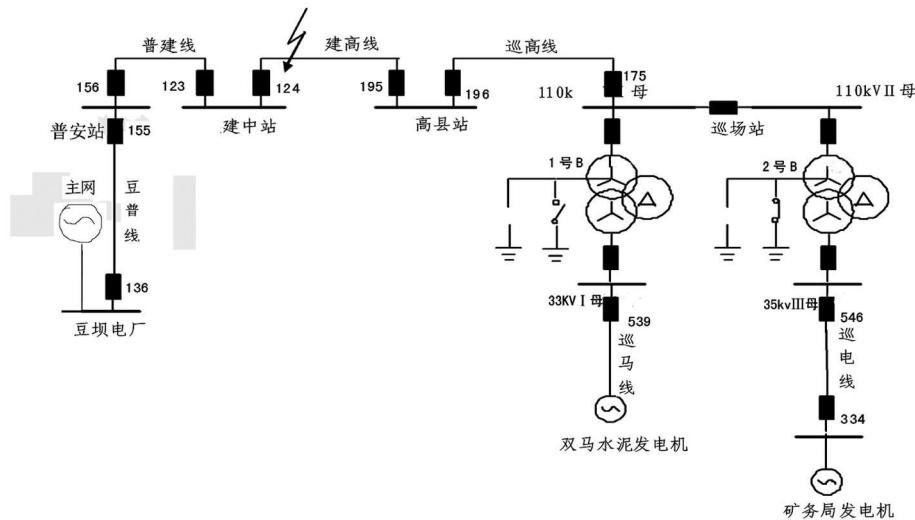


图 1 故障前系统运行图

3 相关继电保护整定方案

110 kV 豆普线 136、普建线 156、建高线 124、巡高线 196 开关的相间距离、接地距离、零序过流保护投入运行,受电侧 110 kV 豆普线 155、普建线 123、建高线 195、巡高线 175 开关所有保护退出运行。

110 kV 巡场站采用特殊运行方式供电,110 kV 是 4 级串供,为实现继电保护快速切除故障,将 110 kV 建高线、巡高线作为一级进行整定,即将 110 kV 建高线 124、巡高线 196 开关的相间、接地距离 II 段时限压缩为 0 s 零序过流 II 段时限压缩为 0.1 s。

巡场站主变压器零序保护、35 kV 故障解列装置解列小电源按表 1 方案运行。

表 1 小电源运行方案

	巡马线 539 开关	巡电线 546 开关
1 号 B 间隙零序过流 I 段解列	投入	退出
2 号 B 零序过流 I 段解列	退出	投入
35 kV 故障解列 1 号装置解列	投入	——
35 kV 故障解列 2 号装置解列	——	投入

说明:“——”表示装置不具备该开关的解列回路。

结合系统运行方式通过对上述主变压器跳闸事件分析发现以下几个特点:① 110 kV 线路故障均为接地类型故障,即单相接地或两相短路接地;②故障点线路两侧均有电源,即主网电源和小电源;③间隙击穿跳闸的主变压器均处于故障点小电源侧;④故障点在大小电源作用下,在系统中存续的时间相对较长,均大于 0.5 s。

4 故障分析依据资料

- (1)故障发生时为强雷雨天气。
- (2)110 kV 建中站故障录波,包括 110 kV 建高线 124 开关电流、建中站 110 kV II 母电压。
- (3)110 kV 高县站故障录波,包括 110 kV 建高线 195 开关电流、高县站 110 kV II 母电压。
- (4)110 kV 巡场站故障录波,包括 110 kV 巡高线 173 开关电流、巡场站 110 kV I 母电压。
- (5)110 kV 巡场站现场检查记录:避雷器动作记录、变电工区现场试验结果、监控机通信记录。
- (6)110 kV 建高线 25 号杆 B、C 相有雷击痕迹;巡场站 1 号主变压器 110 kV 中性点间隙有放电痕迹。

5 继电保护及安全自动装置动作

根据保护装置、录波装置的启动情况以及故障录波图分析表明,110 kV 建高线 25 号杆被雷击后,建高线 124 开关跳闸、巡场站 1 号主变压器 110 kV 中性点间隙击穿跳三侧、35 kV 巡电线 334 开关跳闸是在同一时间段发生的。

动作过程如下。

- 1)0 s 110 kV 建高线 25 号杆被雷击,短路接地故障发生,线路两侧向故障点提供短路电流,巡场站 1 号主变压器 110 kV 放电间隙击穿。建高线 124 开关保护、巡场站 1 号主变压器 110 kV 中性点间隙零

序过流保护、35 kV 故障解列 1 号和 2 号装置、矿务局 35 kV 巡电线 334 开关保护全部启动。

2) 0.06 s 110 kV 建高线 124 开关距离 I、II 段动作跳闸, 切除大电源, 双马水泥和矿务局小电源继续向故障点提供短路电流。

3) 0.2 s 巡场站 1 号主变压器 110 kV 间隙零序过流 I 段动作跳 35 kV 巡马线 539 开关, 切除双马水泥小电源, 矿务局小电源继续向故障点提供短路电流。

4) 0.5 s 巡场站 1 号主变压器 110 kV 间隙零序过流 II 段动作跳主变压器三侧开关, 间隙绝缘恢复。

5) 1.3 s 35 kV 巡电东线 334 开关过流 II 段动作跳闸, 切除矿务局小电源, 故障点电源被全部切除, 故障点绝缘开始恢复。

6) 2 s 巡场站 35 kV 故障解列 2 装置动作解列 35 kV 巡电线 546 开关。

7) 3.3 s 110 kV 建高线 124 开关检无压重合闸成功, 110 kV 巡场站恢复主供电源。

6 故障原因分析

6.1 110 kV 中性点间隙击穿

主变压器中性点过电压有 3 种类型, 即雷过电压、冲击过电压 (如开关跳闸过电压)、暂时工频过电压, 为保护主变压器中性点绝缘, 针对 3 种过电压, 采用了两种装置作为控制过电压的措施, 即中性点避雷器控制雷过电压和冲击过电压, 放电间隙控制暂时工频过电压。

110 kV 建高线 25 号杆 B、C 相被雷击接地短路时, 加在巡场站 1 号主变压器 110 kV 中性点间隙两端的过电压理论上有 3 种: 一是避雷器截波后的雷过电压; 二是暂时工频过电压; 三是建高线 124 开关跳闸时产生的冲击过电压。由于避雷器截波后的雷过电压和切断故障电流时产生的冲击过电压具有持续时间特别短 (一般不大于 $50 \mu\text{s}$)、幅值不是特别高 (被多级避雷器截波) 的特点, 且系统上接有负载, 间隙放电在击穿机理上需要一定延时, 因此巡场站 1 号主变压器 110 kV 中性点间隙被雷过电压或开关跳闸时产生的冲击过电压击穿的可能性小。

暂态电压系数取 1.8 时, 理论计算建高线 25 号杆 BC 相接地短路时加在巡场站 1 号主变压器 110 kV 中性点间隙两端的暂时工频过电压可达到 72 kV

(文中涉及工频过电压均采用有效值)。巡场站 110 kV 中性点间隙距离为 $150 \pm 5 \text{ mm}$, 工频放电电压区间为 $[55.8 \text{ kV}, 68.3 \text{ kV}]$ 。由于故障期间加在巡场站 1 号主变压器 110 kV 中性点间隙两端的暂时工频过电压具有幅值高、持续时间长 (大于 0.5 s) 的特点, 因此巡场站 1 号主变压器 110 kV 中性点间隙被系统暂时工频过电压击穿的可能性大。

因此, 110 kV 线路保护配置相间距离、接地距离和零序电流保护在满足选择性后, 110 kV 电网多级串供时难以实现快速切除故障。110 kV 系统短路故障不能被快速切除, 不接地主变压器 110 kV 中性点间隙被暂时过电压长时间击穿, 导致主变压器跳闸。特别是在大小电源联络线接地故障时, 小电源得不到快速切除, 增加了短路故障的存在时间, 主变压器间隙击穿时间进一步延长, 更易导致主变压器跳闸。

6.2 间隙击穿后主变压器跳闸

巡场站 1 号主变压器 110 kV 中性点间隙过流延时按 GB/T 14285—2006《继电保护和安全自动装置技术规程》4.3.8.2 条规定整定, 即延时 0.5 s 跳主变压器三侧。中性点间隙在大小电源的共同作用下持续击穿 0.5 s 其中大小电源共同作用 0.06 s 小电源作用 0.44 s 0.5 s 后间隙过流 II 段动作跳主变压器三侧开关。

7 防范对策

1) 优化 110 kV 电网运行方式, 减少串接运行级数, 原则上把串接运行控制在三级以内, 控制线路主保护延时不大于 0.9 s 线路远后备保护延时不大于 1.2 s。

2) 完善 110 kV 系统故障时小电源解列技术措施, 确保 110 kV 系统故障时, 小电源的可靠快速解列。110 kV 系统发生相间、单相接地或两相接地短路时能可靠快速解列小电源, 即在小电源并网的变电站 110 kV 母线上装设低压和零序过压解列小电源装置; 或在小电源并网的 35 kV 母线上装设低压解列小电源装置、110 kV 母线上装设零序过压解列小电源装置。若现场不具备零序过电压解列小电源装置时, 可采取以下临时措施: 中性点接地运行主变压器, 利用其中性点零序过流保护 I 段联切小电源并网开关; 中性点不接地运行主变压器, 利用其零序过压和中性

(下转第 94 页)

作的人员担任操作人和监护人,并考虑操作人和监护人的身体状况是否良好。填写好操作票后,严格执行三次审核程序后并签字,并将写好的操作票与主接线图仔细核对。操作时,严格执行监护复诵制,监盘人员要认真监视主接线图上运行方式的变化,随时关注操作。操作完毕后,要全面检查复核所操作一、二次设备状态,特别是保护压板、空气开关等的核对。

3.2 技术措施

倒母线操作顺序中的危险点,对于带负荷拉合隔离开关的防范措施就是将母联开关改非自动;对于母联改非自动时母线故障不能零秒跳双母线的防范措施就是母差互联压板投入;对于电压切换继电器接点损坏的防范措施就是将 TV 二次并列切换开关投入;对于母差保护误动的防范措施就是认真检查隔离开关位置指示灯是否正常,如果隔离开关位置指示不正常,则要将母差保护隔离开关位置强制开关切至强制接通位置,二次电压切换不正常则要申请专业人员及时处理;对于误停运线路或主变压器的防范措施就是拉开母联断路器前检查停运母线上所有隔离开关确在分闸位置并检查母联电流为零;对于谐振的防范措施就是拉开母联之前先拉开 TV 的隔离开关;对于主变压器后备保护误跳开关的防范措施就是及时调整主变压器后备保护跳相应母联和分段开关压板的投退。除以上防范措施外,在母差保护装置上粘贴运行

提示卡,提示内容为倒母线操作的主要步骤,当值班员在母差保护装置操作时,能够看到正确的操作顺序,及时提醒操作人和监护人。

3.3 安全技能培训

加强值班员的安全培训,提高值班员的安全风险辨别意识,严格执行安全规程。认真学习双母线操作中的各个事故案例,从中吸取经验教训。对于倒母线这类大型操作,必须在培训中经常练习填写倒母线的操作票,使每个值班员牢牢记住倒母线的每个步骤,通过提高值班员技能水平来保证人的可靠性。

4 结 语

双母线接线倒母线操作的各个危险点,上面做了详细的分析并提出了防范措施,实践证明这些防范措施是有效的,能够保证操作中的安全。

参考文献

- [1] 国家电网公司典型设计工作组编著. 国家电网公司 500 kV 变电站典型设计 [M]. 北京:中国电力出版社, 2005.
- [2] 江苏省电力工业局. 变电运行技能培训教材 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.

(收稿日期: 2009—08—02)

(上接第 91 页)

点间隙过流保护 I 段联切小电源并网开关。上述方案解列小电源延时不应不大于 110 kV 系统线路主保护延时,即不大于 0.9 s。

3)适当延长主变压器中性点间隙过流保护跳三侧开关动作时间。突破 GB/T 14285—2006《继电保护和安全自动装置技术规程》4.3.8.2 条规定,将主变压器中性点间隙过流保护跳三侧开关动作时间延长到 1.5 s。依据国际电工 IEC 76—4.76 规定变压器最短路承受时间不小于 2 s 以及四川省电力公司川电生技[2006]19 号文《四川省电力公司反事故措施实施细则(试行)》5.1.6.4 条主变压器保护切除故障时间不应大于 2 s 的规定,将主变压器中性点间隙过流保护跳三侧开关动作时间延长到 1.5 s 是符

合变压器技术要求的。需要注意的是,延长主变中性点间隙过流保护跳三侧开关动作时间时,应一并延长主变压器及线路后备保护动作时间,防止后备保护失去选择性。

4)改造继电保护装置和安全自动装置,实现故障的快速切除和自动恢复供电。对 110 kV 电网中两侧电源线路继电保护装置和自动装置进行改造,增配纵联保护和检母线无压重合闸,小电源并网开关配置低压、低频解列稳定控制装置。

5)改造 110 kV 电网结构,尽可能采用 220 kV 变电站辐射供电,减少多级串接和“T”接运行,便于继电保护整定上实现快速切除故障,避免主变压器因中性点间隙长时间击穿跳闸。

(收稿日期: 2009—08—15)