

★四川省一级期刊

• 万方数据数字化期刊群入网期刊

• 《中国学术期刊(光盘版)》入编期刊

• 《中国期刊全文数据库》收录期刊

• 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊

• 北极星中华期刊网入网期刊

• 中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊

• 中国农村电气化信息网

• 重庆维普中文科技期刊数据库

• 《超星数字图书馆》入网期刊

• 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录

# 四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

成都普蓝特科技有限公司

自主研发的PD-800型线路施工专用遥控飞艇



ISSN 1003-6954



9 771003 695005

四川省电机工程学会 四川电力试验研究院

Vol.32

2009

No.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 张晓明

刘俊勇

委 员

(按姓氏笔划为序)

方文弟 王 卓 白家棣

刘 勇 朱白桦 朱国俊

朱 康 邓亚军 鄢小端

李建明 严 平 胡 灿

徐 波 唐茂林 谢 舫

甄 威 滕福生

秘 书 李世平

吴小冬

### 四川电力技术

双月刊 1978年创刊

刊号: ISSN 1003-6954  
CN 51-1315/TM

2009年第 32卷第 1期(总 198期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力试验研究院

发行范围:公开

主 编:朱 康

副 主 编:谢 舫 吴小冬

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: odscl@163.com

E-mail: wxd\_zs@sepc.com.cn

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册 6.00元

[期刊基本参数]CN 51-1315/TM \* 1978\*

b\* A 4# 96# 大\* P\* ¥6.00# 8000# 23\*

2009-01

## 目 次

#### • 基金项目 •

云广特高压直流输电系统换相失败研究

..... 刘 建 李兴源 艾 飞等 (1)

并联交流系统强度对换流母线电压稳定性的影响

..... 徐梅梅 李兴源 白加林等 (5)

基于负荷时域等值模型非线性度的谐波源定位 .....

..... 龚华麟 肖先勇 (11)

基于电容器投切的复小波选线方法 .....

..... 周登登 刘志刚 (13)

考虑运行方式和时变故障率随机评估电压凹陷频次 .....

..... 马 超 肖先勇 (18)

#### • 特约专稿 •

推进特高压电网建设 服务四川经济发展 .....

..... 朱国俊 蒋 乐 (23)

#### • 大专院校专栏 •

基于对称分量法的变压器谐波传输特性研究 .....

..... 周 晋 郭 蕾 黄 军等 (28)

基于粒子群优化的电力负荷灰色预测模型 .....

..... 周在阳 周步祥 师玉东等 (32)

电力系统负荷预测技术 .....

..... 宗慧敏 滕 欢 (36)

基于 Prony方法的电力系统低频振荡分析 .....

..... 白 洋 李国庆 姚天亮 (40)

基于小波变换的电力系统故障测距装置启动判据方法

..... 刘 扬 向俊杰 付 涛 (42)

#### • 电力谐波 •

电力谐波对电能计量影响的研究 .....

..... 何 群 (45)

基于最大熵的多谐波源求和方法研究 .....

..... 陈晓静 李 楠 (50)

基于多峰谱线插值的间谐波检测新方法 .....

..... 黄小佳 刘亚梅 廖学静等 (54)

#### • 电力市场 •

基于改进粒子群算法的高中压配电网实时电压无功优化 .....

..... 包永金 (59)

地区级电网负荷特性及其影响因素分析 .....

..... 尹 琦 刘青丽 (65)

影响电力负荷避峰的关联因素分析 .....

..... 刘凌川 段登伟 邓 华 (69)

配电系统继电保护操作电源的选用 .....

..... 李 俊 杨 莉 (74)

某市 2008~2012年电力负荷预测 .....

..... 邹汝杰 (77)

快速多目标无功优化方法在实际系统中的应用

..... 张 建 牛 霞 刘晓东等 (79)

#### • 输配电技术 •

两种神经网络在变压器油色谱故障诊断中的应用

..... 周亚明 田 野 陈 斌等 (84)

变电站直流电源远程监控技术 .....

..... 汪守贵 (88)

广域测量系统整合方案 .....

..... 曾旭东 沈 澜 (91)

#### • 简讯 •

成都局计量中心跃升“国家实验室” .....

..... (49)

达州 500 kV 变电站投运 .....

..... (76)

《四川电力技术》投稿须知 .....

..... (83)

## CONTENTS

Study on Commutation Failure of Yun-Guang UHVDC Transmission System .....	Liu Jian Li Xinyuan Ai Fei et al(1)
Influence of Parallel AC System Strength on Voltage Stability of Commutation Buses .....	Xu Meimei Li Xinyuan Bai Jiali et al(5)
Hamonic Source Location Based on Non-Linearly Index of Time-Domain Equivalent Model .....	Gong Hualin Xiao Xinyong(11)
Line Selection Method Based on Capacitor Switching by Complex Wavelet .....	Zhou Dengdeng Liu Zhigang(13)
Stochastic Assessment Method of Voltage Sag Frequency Considering System Operating Modes and Time-Varying Fault Rate .....	Ma Chao Xiao Xinyong(18)
Advancing UHV Power Grid Construction for Serving Development of Sichuan Economy .....	Zhu Guojin Jiang Le(23)
Research on Harmonic-Transmitting Feature Based on Symmetrical Component .....	Zhou Jinhua Guo Lei Huang Jun et al(28)
Grey Model of Power Load Forecasting Based on Particle Swarm Optimization .....	Zhou Zaiyang Zhou Buxiang Shi Yudong et al(32)
Load Forecasting Technology of Power System .....	Zong Humin Teng Huan(36)
Analysis on Low Frequency Oscillation of Power System Based on Prony Method .....	Bai Yang Li Guoqing Yao Tianliang(40)
Activated Criterion Method of Power System Fault Location Device Based on Wavelet Transform .....	Liu Yang Xiang Junjie Fu Tao(42)
Research on Influence of Harmonic on Electric Energy Measurement .....	He Qun(45)
Research on Multi-Harmonic Source Summation Method Based on Maximum Entropy .....	Chen Xiaojing Lin An(50)
An Inter-Harmonic Estimation Method Based on Chip Z Transform and Correction Algorithm of Four-Peak Spectral Line .....	Huang Xiaojia Liu Yanfei Liao Xuejing et al(54)
Real Time Voltage/Reactive Power Optimization for High and Medium Voltage Distribution Networks Based on Modified Particle Swarm Optimization .....	Bao Yongjin(59)
Analysis on Load Characteristic and Its Influence Factor in Regional Power Grid .....	Yin Qi Liu Qingli(65)
Analysis on Relation Factors Influencing Power Peak Load Averting .....	Liu Lingchuan Duan Dengwei Deng Hua(69)
Selection of Operational Power Supply of Relay Protection in Distribution System .....	Li Jun Yang Li(74)
Power Load Forecasting of a City from 2008 to 2012 .....	Zhou Ruji(77)
Application of Fast Multi-Objective Reactive Power Optimization to Real System .....	Zhang Jian Ni Xiaoli Xu Xidong et al(79)
Application of Two ANN's to Fault Diagnosis of Gas Chromatograph in Transformer Oil .....	Zhou Yanling Tian Ye Chen Bin et al(84)
Remote Monitoring Technology for Direct Current of Substation .....	Wang Shouqi(88)
Integration Scheme of Wide Area Measurement System .....	Zeng Xudong Shen Lan(91)

SICHUAN ELECTRIC POWER  
TECHNOLOGY  
2009 Vol 32 No 1  
(Ser No 198)  
Bimonthly Started in 1978

Sponsor  
Sichuan Society of Electrical Engineering  
Sichuan Test and Research Institute of Electrical Power  
Editor & Publisher  
Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER  
TECHNOLOGY  
Address Qingyang Gong Chengdu, Sichuan, China  
Postcode 610072

# 云广特高压直流输电系统换相失败研究

刘 建<sup>1</sup>, 李兴源<sup>1</sup>, 艾 飞<sup>1</sup>, 杨小兵<sup>1</sup>, 张 静<sup>2</sup>, 李中华<sup>3</sup>

(1 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2 浙江余杭供电局, 浙江 杭州 311100;

3 浙江群力电气有限公司, 浙江 杭州 311100)

**摘 要:**换相失败是 HVDC 系统最常见的故障之一。通过分析换流器换相失败的机理, 归纳了 HVDC 换相失败的影响因数及判据。以南方电网 2010 年数据为基础, 采用 PSCAD/EMTDC 对云广 ±800 kV 特高压直流输电系统建立了详细的电磁暂态仿真模型, 并分析了一次系统和控制系统的结构。对该直流输电系统逆变侧换流母线发生三相接地短路和单相接地短路故障的情况进行了仿真分析。仿真结果表明, 云广特高压直流输电系统故障后发生换相失败, 但由于该系统的高度可控性, 故障切除后系统从换相失败中恢复性能良好。

**关键词:**云广特高压; 换相失败; 恢复; 仿真

**Abstract:** Commutation failures are very dynamic events in HVDC transmission systems. The influencing factors and criterion of HVDC commutation failure are concluded based on the analysis of the mechanism of commutation failure. According to the data of CSG in 2010, a detailed electromagnetic transient model of Yun-Guang UHVDC transmission system is established using PSCAD/EMTDC, and the structures of primary system and control system are analyzed. The three-phase and single-phase grounding faults of inverter commutation bus are simulated. The simulation results show that the commutation failure occurs when there is fault in Yun-Guang UHVDC transmission system, but it recovers from commutation failure effectively after the fault is cleared due to the high controllability of the system.

**Key words:** Yun-Guang UHVDC; commutation failure; recovery; simulation

**中图分类号:** TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0001-04

根据中国的现状及规划, 百万千伏级交流和 800 kV 级直流特高压将成为中国电网的骨干网架。南方电网 (CSG) 将建设世界上第一回 800 kV、输电容量为 5 GW 的特高压直流 (UHVDC) 输电工程——云广直流输电工程, 以满足“十一五”期间云南向广东送电的需要以及“十二五”初小湾、金安桥等电站向广东送电的需要<sup>[1]</sup>。采用 800 kV 特高压直流输电具有输电距离更远、输电容量更大、线路走廊更窄、电力系统适应性更好等诸多优点<sup>[2,3]</sup>。但其投入在带来各种好处的同时也引进了新的问题, 换相失败就是系统中最常见的故障之一。通常发生一次换相失败的后果并不严重, 但如果恢复过程不顺利而发生后续的换相失败, 将最终导致直流传输功率中断, 甚至导致整个交直流系统失去稳定。因此, 必须研究 HVDC 在故障情况下发生换相失败对系统的影响及在故障消除后系统的恢复性能。

文献 [4] 对特高压直流输电系统运行方式进行了仿真研究。文献 [5] 对含特高压直流的多馈入交

直流系统动态特性进行了仿真研究。现以南方电网 2010 年数据为基础, 采用 PSCAD/EMTDC 对云广 ±800 kV 特高压直流输电系统建立了详细的电磁暂态仿真模型, 并分析了该模型在典型故障下发生换相失败对系统影响及故障切除后系统的恢复性能。重点研究了换相失败能否恢复、恢复过程所需要的时间及直流最低输送功率是多少等问题, 对南方电网的安全运行有极其重要的意义。

## 1 换相失败机理

换相失败是指当两个桥臂之间换相结束后, 刚退出导通的阀在反向电压作用的一段时间内, 如果未能恢复阻断能力, 或者在反向电压期间换相过程一直未能进行完毕, 会在阀电压转变为正向时被换相的阀将向原来预定退出导通的阀倒换相<sup>[6]</sup>。换相期间各参数之间的相互关系可以用下式表示:

$$\gamma = \beta - \mu \quad (1)$$

式中,  $\gamma$  为关断角 (或熄弧角);  $\beta$  为触发越前角;  $\mu$  为换相角。 $\gamma$  直接决定于  $\beta$  和  $\mu$ 。

**基金项目:** 国家重点基础研究专项经费资助项目 (2004CB217907), 国家自然科学基金项目 (50595412), 国家科技支撑计划 (2008BAA13B01)

换流器的阀是一种可控电力电子开关,它需要一定时间完成载流子复合,恢复正向阻断能力,其去游离恢复时间在  $400 \mu\text{s}$ (约  $7^\circ$  电角度)左右,考虑到串联元件的误差,晶闸管的恢复时间以电角度  $\gamma_{\text{min}}$  表示约为  $10^\circ$ 。所以在实际运行中,当  $\gamma \leq 10^\circ$  时就认为换相失败<sup>[7]</sup>。由于整流器阀在电流关断后的较长时间处于反电压下,所以仅当触发电路发生故障时,整流器才会发生换相失败<sup>[8]</sup>。而对于逆变器,由于换流阀关断后的恢复时间较短,所以其更容易发生换相失败。

发生换相失败的本质是逆变器熄弧角(或关断角)  $\gamma$  小于极限熄弧角<sup>[9,10]</sup>。主要原因有交流故障引起的电压降低和电压相移,晶闸管阀的参数也会影响到换相过程。发生一次换相失败后直流电压的波形如图 1 所示。

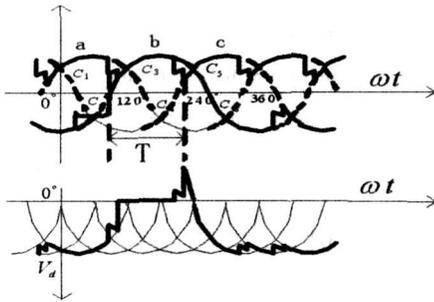


图 1 一次换相失败后的电压波形

换相失败的判定方法主要有熄弧角判断法和最小电压降落法<sup>[11]</sup>。工程上判断换相失败一般是采用经验电压判据。这里以熄弧角判断法来判断换相失败。

### 1.1 熄弧角判断法

熄弧角判断法是通过比较换流器实际熄弧角与引起换相失败的临界熄弧角之间的大小来判断发生换相失败的方法。该法是以换相失败的本质来判断换相失败的。由文献[6]可以得到交流系统发生故障时逆变器的关断角为:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}kI_d X_c}{U_L} + \cos\beta\right) - \varphi \quad (2)$$

式中,  $k$  为换流变压器的变比;  $U_L$  为逆变器交流侧母线线电压有效值;  $I_d$  为直流电流;  $X_c$  为等效换相电抗;  $\beta$  为越前触发角;  $\varphi$  为换相线电压过零点前移角度。当  $\gamma < \gamma_{\text{min}}$  时,就可判定逆变器阀换相失败。由此可见换相失败与  $k$ 、 $U_L$ 、 $I_d$ 、 $X_c$ 、 $\beta$  及  $\varphi$  有关。

### 1.2 最小电压降落法

最小电压降落法通过比较换相电压的降落与发生换相失败所需的最小换相电压降落之间的大小来判断系统是否发生换相失败。文献[9]给出了导致换相失败的临界电压降  $\Delta E$ :

$$\Delta E = 1 - \frac{I'_d X_{\text{qpu}}}{I_d X_{\text{qpu}} + \cos(\gamma_{\text{min}} + \varphi) - \cos\gamma} \quad (3)$$

式中,  $\gamma_{\text{min}}$  为换流阀固有极限熄弧角;  $\gamma$  为直流系统额定熄弧角;  $I_d$  为直流电流;  $I'_d$  为当关断角  $\gamma$  达到极限熄弧角  $\gamma_{\text{min}}$  时的直流电流;  $X_{\text{qpu}}$  为换相电抗的标么值;  $\varphi$  为不对称故障过零点漂移所产生的相移角。当换相电压下降大于  $\Delta E$  时,就可认为发生换相失败。但此结论是假定无穷大交流系统的情况下基于换流器准稳态方程得出的,其结果将会偏大。因此最小电压降落法可作为预测、判断换相失败的粗略指标。在本模型中可由式(3)粗略计算得到导致发生换相失败的临界电压降在 20% 左右。

## 2 云广特高压直流输电系统模型

如图 2 所示,云广直流输电工程西起云南楚雄州禄丰县,东至广东增城东部,电压等级为  $\pm 800 \text{ kV}$ ,输电线路长度为 1 438 km,输电规模为 5 GW,额定电流为 3 125 kA。送端楚雄换流站通过 2 回 500 kV 交流线路与云南主网昆西北 500 kV 变电站相连,小湾水电站与金安桥水电站分别通过 3 回和 2 回 500 kV 线路向楚雄站送电。受端分别以 2 回 500 kV 交流出线接入增城、横沥和水乡变电站<sup>[1]</sup>。

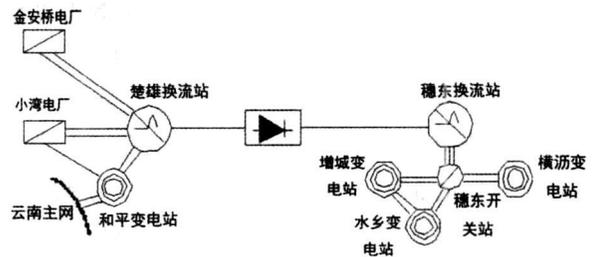


图 2 系统地理接线简图

### 2.1 发电机模型

发电机采用基于派克方程的精确模型。该模型包括了 D 轴阻尼绕组和 Q 轴 2 个阻尼绕组方程,计及了磁路饱和的影响<sup>[12]</sup>。

### 2.2 直流系统模型

#### 2.2.1 结构与元件

以往研究中根据换流母线电压跌落一定幅值判

断直流发生换相失败是不够准确的。当交流系统不对称故障期间通常换流站交流母线的电压不再对称,应用直流换流器准稳态模型进行研究具有一定局限。因此,采用详细换流器模型以关断角为判据研究交流系统中换相失败问题更为精确。基于南方电网 2010 年数据,采用 PSCAD /EMTDC 建立了云广 ±800 kV 特高压直流输电系统详细的电磁暂态仿真模型,其电路接线如图 3 所示。

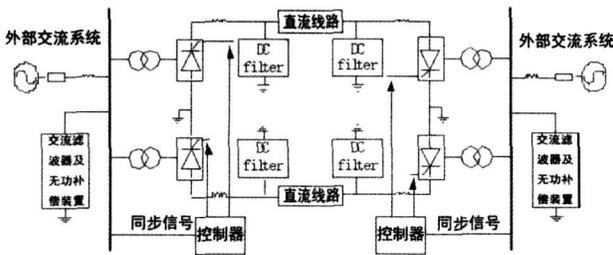


图 3 直流系统模型

在电磁暂态仿真中,滤波器通过断路器连接到高压母线。从换流站交流母线起,对换流变压器、换流阀采用详细的三相模型,且换流变压器考虑饱和效应。每极采用双 12 脉动换流器串联连接,直流线路采用分段 T 型线路表示,换流阀采用电磁暂态级的精确换流晶闸管模型,详细模拟直流滤波器和平波电抗器。

### 2.2.2 控制系统

根据实际详细模拟高压直流输电系统的控制系统,考虑预防换流阀受到过热损害以及换流器换相失败需要采用的保护措施主要有:1)最大电流限制;2)最小电流限制;3)依赖于电压的电流指令限制(VDCOL);4)最小触发角限制。

该系统的基本控制方式:整流侧由定电流控制和限制两部分组成;逆变侧配有定电流控制和定关断角  $d_{min}(\gamma_0)$  控制,但无定电压控制。此外,整流侧和逆变侧都配有低压限流(VDCOL)控制,逆变侧还配有电流偏差控制(CEC)。其静态伏安特性如图 4 所示。有研究<sup>[4]</sup>表明传统 ±500 kV 直流输电工程的控制策略仍然可以用于特高压工程,整流侧采用定电流控制,逆变侧采用定熄弧角控制可以获得较好的稳态和暂态特性。

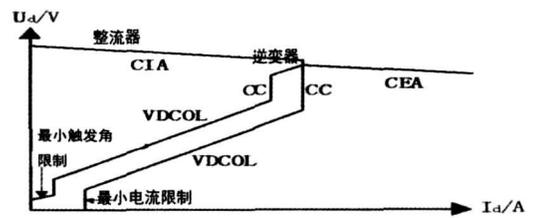


图 4 换流器的静态伏安特性

## 3 仿真结果和分析

### 3.1 三相接地短路故障

当穗东逆变站交流系统发生三相短路故障时(2.0~2.1 s),使换流站交流母线电压下降约 20% 时,逆变器关断角、逆变侧直流电压、直流电流、传输的直流功率及逆变器触发角响应特性如图 5 所示。

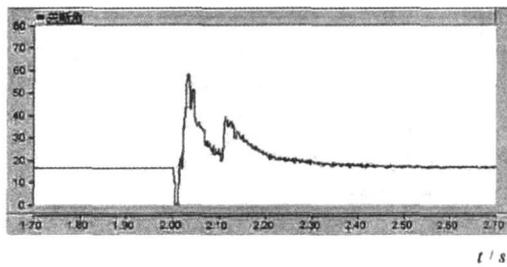
故障发生后逆变器经历短暂的换相失败,关断角下降到 0°,换相失败的时间约为 15 ms。直流电压急剧下降,直流电流上升,直流传输功率也急剧下降,最低输送功率仅有单极 1 GW。由于故障导致 VDCOL 动作,将电流整定值限制 1.57 kA 左右。而与此同时,在直流控制系统的作用下,逆变器触发角由 144° 下降至最低 115°,而关断角却最高上升至 60°。故障消除的同时,直流系统开始恢复。由图 5 可见直流电压、直流电流及直流功率的恢复特性良好,仅在故障切除 0.2 s 后就基本恢复到故障前的稳定运行状态。

### 3.2 单相接地短路故障

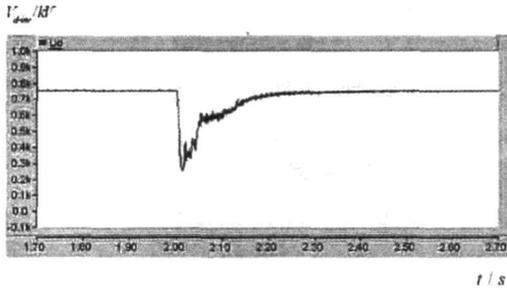
当穗东逆变站交流系统发生 a 相短路故障时(2.0~2.1 s),使换流站交流母线 a 相电压下降约 20% 时,逆变器关断角、逆变侧直流电压、直流电流、传输的直流功率及逆变器触发角响应特性如图 6 所示。从图 6 可以看出,本故障方式下直流系统的响应特性与发生对称故障时类似,但恢复速度比对称故障时快。

## 4 结论

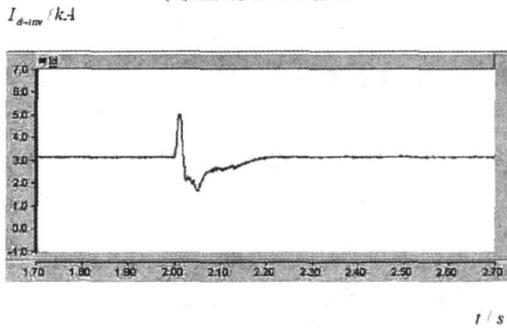
分析了换相失败的机理及判据,针对 ±800 kV 云广特高压系统建立了详细的电磁暂态模型,运用 PSCAD /EMTDC 分析了系统逆变侧交流母线在三相和单相接地故障时直流系统的响应特性。仿真结果表明由故障引起的交流母线电压大幅下降会导致换



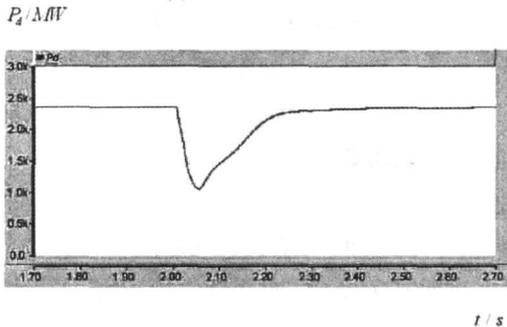
(a) 逆变侧触发角



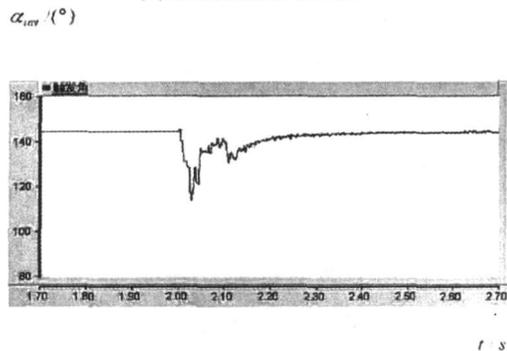
(b) 逆变侧直流电压



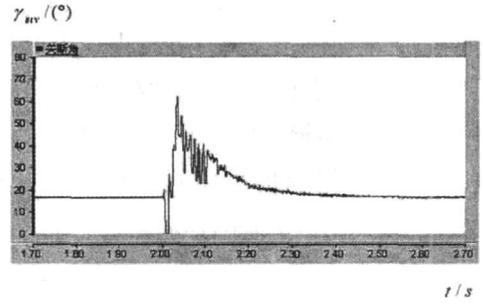
(c) 逆变侧直流电流



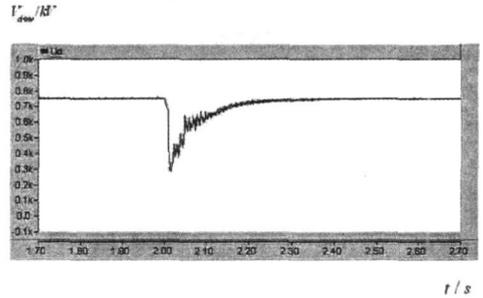
(d) 逆变侧直流传输功率



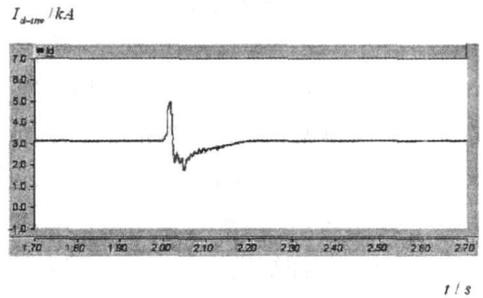
(e) 逆变侧触发角



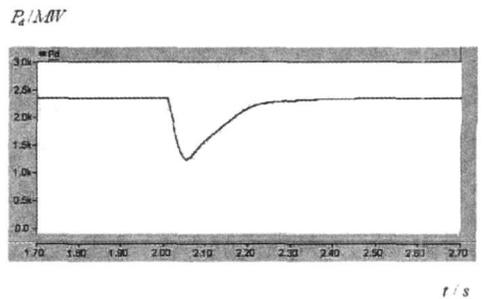
(a) 逆变侧触发角



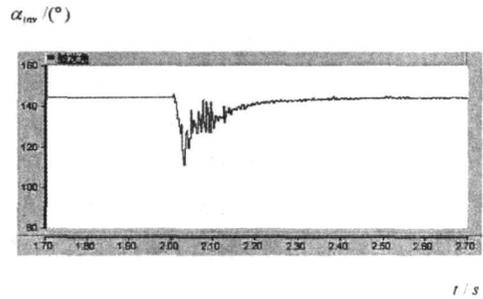
(b) 逆变侧直流电压



(c) 逆变侧直流电流



(d) 逆变侧直流传输功率



(e) 逆变侧触发角

图 6 逆变侧交流系统发生单相接地故障时  
直流输电系统的响应特性

图 5 逆变侧交流系统发生三相接地故障时  
直流输电系统的响应特性

(下转第 90 页)

## 4 系统特点

### 4.1 开放性

监控系统网络通讯协议符合国际网络协议标准 (TCP/IP), 操作系统选用国际通用 Windows 操作平台, 数据库系统选用通用的大型关系型数据库系统 (Microsoft SQL Server 2000), 方便系统的维护、扩充和升级。

### 4.2 扩充性

系统的软硬件设计符合国际工业监控与开放式设计标准, 采用模块化及标准化模块接口, 便于系统适应不同规模及功能要求的监控网络系统, 便于与其他系统进行接口。

### 4.3 安全性

硬件设备的设计采用可靠的电气隔离, 保护系统的软硬件在任何情况下, 均不会影响被监控对象运行的安全性。

软件系统的设计对系统管理和维护人员进行权限管理, 以区分限制各级别用户对系统的访问和操作能力, 保护系统操作的安全性。监控系统为用户对系

统所做的任何操作均记录在数据库中, 以备系统日后出现运行事故提供辅助分析功能及追究相关的事故责任。保证数据的完整性和一致性, 防止其他人员误操作。

### 4.4 实时性

变电站直流系统的告警信息与短信平台接口, 告警信息可及时发送到有关维护人员的手机上, 以便及时检修, 将事故消除在萌芽状态。

## 5 结 论

变电站直流电源远程监控系统实现了对变电站直流电源设备的在线监控和分析, 实时掌握变电站直流系统的运行工况, 加强了变电站直流系统设备的预检预修工作, 提高了变电站直流电源设备的运行管理水平, 保障了变电站保护、通讯、调度自动化和信息网络等系统运行的稳定性和安全性, 预防了因直流设备故障而造成事故。系统投运后变电站直流电源系统故障明显下降, 产生了良好的经济效益, 提高了变电站安全稳定运行水平。

(收稿日期: 2008—10—22)

(上接第 4 页)

相失败的发生, 但由于直流系统的高度可控性, 换相失败经历的时间极为短暂, 在故障切除后, 直流系统的恢复情况良好。由此说明  $\pm 800$  kV 特高压直流输电系统具有良好的动态响应性能, 能够满足长距离大容量的输电需求。

## 参考文献

- [1] 中国南方电网公司.  $\pm 800$  kV 直流输电技术研究 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006. 2—60.
- [2] 李立涅. 特高压直流输电的技术特点和工程应用 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 5—6.
- [3] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景 [J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1—3.
- [4] 陈潜, 张尧, 钟庆, 等.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电系统运行方式的仿真研究 [J]. 继电器, 2007, 35(16): 27—32.
- [5] 王晶芳, 王智冬, 李新年, 等. 含特高压直流的多馈入交直流系统动态特性仿真 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 97—102.
- [6] 浙江大学直流输电科研组. 直流输电 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1985.

- [7] 荆勇, 欧开健, 任震. 交流单相故障对高压直流输电换相失败的影响 [J]. 高电压技术, 200, 30(3): 60—62.
- [8] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [9] Thio C V, Davies J B, Kent K L. Commutation failures in HVDC transmission systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 946—957.
- [10] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败判断标准的仿真分析 [J]. 电网技术, 2007, 31(1): 20—24.
- [11] 林凌雪, 张尧. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述 [J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40—46.
- [12] 夏道止. 电力系统分析 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1995.

### 作者简介:

刘 建 (1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向电力系统稳定与控制。

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

(收稿日期: 2008—12—20)

# 并联交流系统强度对换流母线电压稳定性的影响

徐梅梅<sup>1</sup>, 李兴源<sup>1</sup>, 白加林<sup>2</sup>, 贺洋<sup>1</sup>, 湛天亮<sup>3</sup>, 郭铃铃<sup>3</sup>

(1 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240;  
3 乐山电业局夹江供电局, 四川 乐山 614100)

**摘要:**随着中国互联电网的发展, 交直流并联输电系统的电压稳定问题迫切需要研究。从并联交流系统强度出发, 以四机两区域系统为例, 利用负荷导纳模型算法求取节点电压稳定极限, 然后采用负荷裕度和特征值分析方法, 详细讨论了并联交流系统强度大小对逆变侧换流母线电压稳定性的影响。最后, 利用电磁暂态仿真程序 EMTDC/PSCAD 对系统进行动态仿真, 结果表明在重负荷条件下强并联交流系统有利于提高换流母线的电压稳定性。

**关键词:** 并联交流系统强度; 电压稳定性; 负荷裕度; 特征值分析; 交直流并联系统

**Abstract:** With the development of the interconnected power system in China, the voltage stability of AC/DC parallel transmission system needs to be researched. Taking the modified two-area four-generator power system for example, the admittance model algorithm is adopted to calculate the static voltage stability limit in load bus, then the influence of parallel AC system strength on voltage stability at inverter commutation buses is discussed by means of load margin and eigenvalue analysis method. Based on the electromagnetic transient simulation software PSCAD/EMTDC, it is shown that in heavy load conditions a strong parallel AC system is beneficial to enhance the voltage stability at commutation buses.

**Key words:** parallel AC system strength; voltage stability; load margin; eigenvalue analysis; AC/DC parallel transmission system

**中图分类号:** TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0005-04

实际的 HVDC 系统往往和交流系统相互连接, 从而形成交直流互联电网。交直流系统之间的相互作用, 尤其是与弱交流系统连接时, 会带来电压不稳定性、暂态不稳定、动态过电压和谐波不稳定等一系列问题。其中, 交直流混合电网的电压稳定性研究不同于纯交流和单馈入直流电网, 由于交直流系统的相互作用, 增加了研究的复杂性。因此对交直流并联电网电压稳定性的研究具有现实意义。

近年来, 分析交直流系统电压稳定的许多方法都是把用于纯交流系统的静态电压稳定方法推广到交直流系统中。如文献 [1] 提出的最大功率曲线 (MPC) 法是基于最大可用功率, 用有效短路比 (ESCR) 来衡量电压稳定性, 系统越强, 换流站交流母线的电压稳定性越强。文献 [2] 中的电压稳定性因子 (VSF) 法是基于电压灵敏度, 以 VSF 为稳定性判据, 类似于交流系统中  $dQ/dV$  的指标, 本质上这两种方法都是把系统状态对系统变量微小变化的灵敏度作为电压稳定的衡量标准。文献 [3] 和 [4] 讨论了负荷

静态特性对 3 种典型 HVDC 系统的功率/电压稳定边界指标的影响, 提出了 ALCI 指标, 以此来确定不同运行条件下的最不宜负荷特性。文献 [5] 讨论了关于 HVDC 系统功率/电压稳定性研究的详细发电机和电压控制数学模型。文献 [6] 对 HVDC 系统的非线性现象进行了分析, 提出 HVDC 的电压失稳机理是由于 Hopf 分岔而导致的振荡失稳。文献 [7] 则把崩溃点法和延拓法结合起来用于交直流系统电压稳定性的研究。

下面首先给出了研究交直流并联系统电压稳定性所采用的简单模型<sup>[3]</sup>, 在此基础上介绍交流系统强度的相关指标以及静态电压稳定性分析方法。然后在电磁暂态仿真软件 EMTDC/PSCAD 平台上, 搭建了四机两区域的交直流混合系统<sup>[8]</sup>, 根据负荷导纳模型算法<sup>[9, 10, 11]</sup>准确求取节点的电压稳定极限, 并且采用特征值分析<sup>[3, 12]</sup>和模态电压稳定性因子<sup>[3, 12]</sup>来详细讨论并联交流系统强度对逆变侧换流母线电压的影响。最后利用 PSCAD 进行动态仿真, 结果表明在重负荷条件下, 弱并联交流系统不利于交直流系统换流母线的电压稳定性。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (50595412); 国家重点基础研究专项经费资助项目 (2004CB217907); 国家科技支撑计划资助项目 (2008BAA13B01)。

# 1 交直流并联系统静态电压稳定性研究模型

采用图 1 的单条 HVDC 与交流线路并联 (SIFAC) 的交直流系统模型<sup>[3]</sup>, 相对送端而言, 系统更容易在受端发生电压失稳, 下面选择逆变侧换流母线作为研究对象。

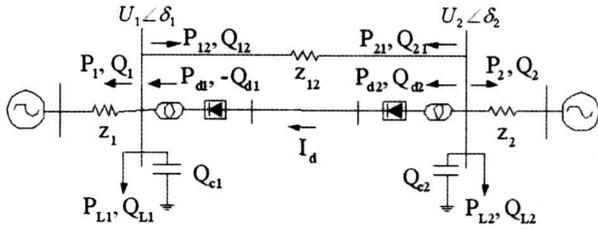


图 1 单条 HVDC 与交流线路并联交直流系统模型

# 2 交流系统强度的相关指标

一般地, 用短路比 (SCR) 来定义单直流换流站母线的稳定性能:

$$SCR = \frac{S_{sc}}{P_{dN}}$$

其中,  $S_{sc}$  是换流母线的短路容量,  $P_{dN}$  是换流站的额定功率。

为计及换流站无功补偿的影响, 通常采用有效短路比:

$$ESCR = \frac{S_{sc} - Q_c}{P_{dN}}$$

基于图 1 的 SIFAC 交直流系统模型, 为了计及并联交流输电系统强弱程度对换流母线特性的影响, 这里定义一个新指标——并联交流系统强度指标 (Parallel AC System Strength Index), 以此表示并联交流系统相对于直流系统的强度:

$$PACSSI = \frac{S_{12}}{P_{dN}}$$

其中,  $S_{12}$  为换流母线处并联交流系统的短路容量。

# 3 负荷裕度分析

负荷裕度是最基本的、被广泛接受的电压稳定性指标。基于负荷裕度判别法的静态电压稳定分析计算量小, 在一定程度上能较好地反映系统的电压稳定水平, 并能够给出系统的电压稳定裕度。负荷裕度分析<sup>[8, 13]</sup>就是从系统的运行状态出发, 按照某种模式增

长传输功率或者负荷, 逐步逼近电压崩溃点, 而当前运行点到电压崩溃点之间的距离即称之为负荷裕度。通常采用功率裕度指标来反映节点的强弱:

$$K_{pt} = \frac{P_{crit} - P_{0i}}{P_{0i}}$$

式中:  $P_{crit}$  为节点  $i$  的极限功率;  $P_{0i}$  为节点  $i$  当前的运行功率。

文中采用负荷导纳模型算法, 将重负荷节点的注入功率以一等效导纳表示, 按一定增长方式逐步增加节点负荷并进行常规潮流计算, 通过判断系统是否达到传输功率极限来准确求取静态电压稳定临界点。

# 4 特征值分解和模态电压灵敏度因子

基于图 1 所示的 SIFAC 系统模型, 潮流方程如下。逆变侧交流母线:

$$0 = P_1 + P_{12} + P_{L1} - P_{d1} \quad (1)$$

$$0 = Q_1 + Q_{12} + Q_{L1} + Q_{d1} - Q_{c1} \quad (2)$$

整流侧交流母线:

$$0 = P_2 + P_{21} + P_{12} + P_{d2} \quad (3)$$

$$0 = Q_2 + Q_{21} + Q_{12} + Q_{d2} - Q_{c2} \quad (4)$$

线性化潮流方程 (1)~(4), 且假设换流站交流母线上的有功增量为  $\Delta Q$ , 经等式变化后得到系统的简化雅可比矩阵  $J_{qv}$  如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta U_1}{U_1} \\ \frac{\Delta U_2}{U_2} \end{bmatrix} \Rightarrow [\Delta Q] = J_{qv} \frac{\Delta U}{U} \quad (5)$$

将简化矩阵  $J_{qv}$  进行特征值分解为:

$$J_{qv} = M \lambda N$$

式中,  $M$  和  $N$  分别为  $J_{qv}$  的左右特征向量;  $\lambda$  为  $J_{qv}$  的特征值矩阵。将其带入式 (5) 中变化可得:

$$\frac{\Delta U_i}{U_i} = \frac{1}{\lambda_i} \Delta Q_i$$

式中,  $\lambda_i$  为  $J_{qv}$  的第  $i$  个特征值;  $\Delta Q_i$  为第  $i$  个无功变化量;  $\Delta U_i$  为第  $i$  个电压变化量。

矩阵  $J_{qv}$  最小特征值的倒数定义为模态电压稳定因子, 即 MVSF 大于 0 表明系统处于稳定运行状态。MVSF 越小, 则系统越稳定; 当  $\det(J_{qv}) = \lambda_1 \lambda_2$  接近 0 时, MVSF 趋近于无穷大, 系统处于极其不稳定的运行状态。因此, 可以等价使用  $J_{qv}$  的最小特征值

$\lambda_i$  来描述系统的稳定性; 当  $\lambda_i > 0$  时, 系统稳定; 当  $\lambda_i < 0$  时, 系统失稳; 当  $\lambda_i = 0$  时, 系统处于电压崩溃临界状态。  $\lambda_i$  的幅值则决定了系统临近电压不稳定的程度。

## 5 算例分析

采用图 2 所示的四机两区域交直流并联系统进行静态和仿真分析。

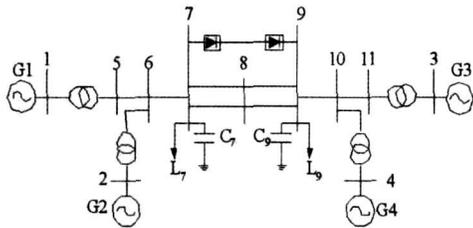


图 2 四机两区域的交直流并联系统

根据文献 [4] 提出的 ALCI (Active Load Characteristics Index) 指标, 确定恒功率模型为该系统的最佳不宜负荷特性。在 EMTDC/PSCAD 平台上, 搭建此交直流混合系统, 直流输电系统采用详细模型, 控制方式为: 定功率运行  $P_d = 200$  MW, 整流侧定电流控制, 逆变侧定熄弧角  $\gamma = 22^\circ$ 。通过改变并联交流输电线的距离, 在 3 种不同的系统运行条件下, 运用以上所述的分析方法来研究并联交流系统强度对逆变侧换流母线电压稳定性的影响。最后对其进行动态仿真, 以此验证所得结论的正确性。

### 5.1 静态分析

#### 5.1.1 相关指标与裕度分析

根据前述的定义, 计算 3 种情况在额定运行条件下的交流系统强度和换流母线 9 的功率裕度指标, 分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 3 种情况的有效短路比与并联交流系统强度

案例	距离 (km)	$S_{sc}$ (MVA)	$S_{12}$ (MVA)	$Q_c$ (Mvar)	$P_{dN}$ (MW)	$E_{scr}$	PACSSI
1	120	3 500	1 127	450	200	15.25	5.635
2	220	3 167	751.6	450	200	13.58	3.758
3	300	3 026	597.6	450	200	12.88	2.988

表 2 换流母线 9 的极限功率与负荷裕度

案例	距离 (km)	$P_{cr0}$ (MW)	$V_{cr0}$ (p.u.)	$K_{p0}$
1	120	2 103.2	0.877 1	0.190 3
2	220	2 065.8	0.888 9	0.169 1
3	300	2 053.2	0.905 8	0.162 0

由两表比较得知: 并联交流系统强度越大, 则系统短路比越大, 换流母线的稳定裕度越大。说明在一定的

直流控制方式下, 提高并联交流系统强度, 使得对受端交流系统的功率支援增大, 从而加强交流系统对直流系统的无功支持, 有助于提高换流母线的电压稳定性。

#### 5.1.2 特征值分析

表 3 给出了对应以上 3 种情况在同一负荷水平下换流母线的 MVSF, 而表 4 则给出了在不同负荷水平下的特征值。

表 3 换流母线的模态电压灵敏度因子

负荷水平 (p.u.)	Case 1	Case 2	Case 3
$S_9 = 17.67 + j1.0$	0.074 2	0.076 2	0.077 6

表 4 换流母线的特征值

负荷水平 $S_9$ (p.u.)	16.786 + j1.95	17.67 + j1.0	19.437 + j1.1
Case 1	14.541 1	13.469 7	10.774 2
Case 2	14.305 8	13.122 4	10.019 4
Case 3	14.174 0	12.882 4	9.522 1

由两表数据分析可知: 在同一负荷水平下, Case 1 系统换流母线的 MVSF 最小, 其电压稳定性最强, Case 2 系统次之, Case 3 系统最弱; 随着负荷增加, 三种情况换流母线的特征值依次减小, 表明电压稳定性变弱, 并且后两种情况受负荷变化影响较大。

### 5.2 时域仿真分析

假设 3 种情况均在负荷水平:  $S_9 = 17.67 + j1.0$  的运行条件下, 线路  $L_{89}$  的首端发生三相瞬时接地短路, 0.12 s 后切除故障, 其换流母线的电压波形分别如图 3~图 5 所示。

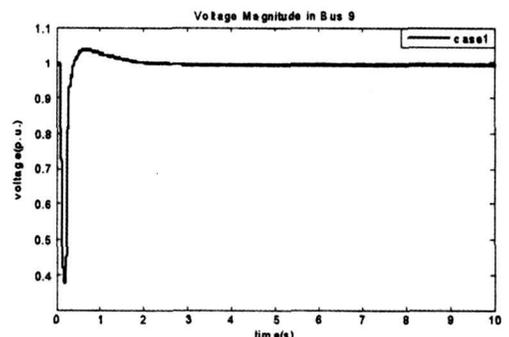


图 3 情况 1 换流母线的电压波形 (负荷水平 2)

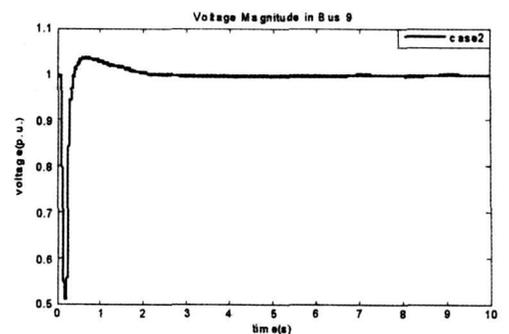


图 4 情况 2 换流母线的电压波形 (负荷水平 2)

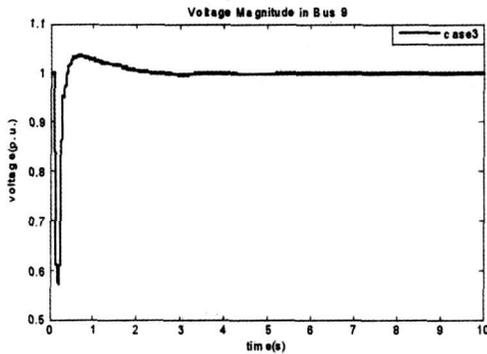


图 5 情况 3 换流母线的电压波形 (负荷水平 2)

由图 3~图 5 中的电压波形比较可知:在此负荷水平条件下,系统经受扰动后,母线电压很快能恢复正常,稳定性都很强。

另外,在负荷水平  $S_9 = 19.437 + j1.1$  运行条件下,施加同样的扰动,换流母线电压波形如图 6~图 8 所示。

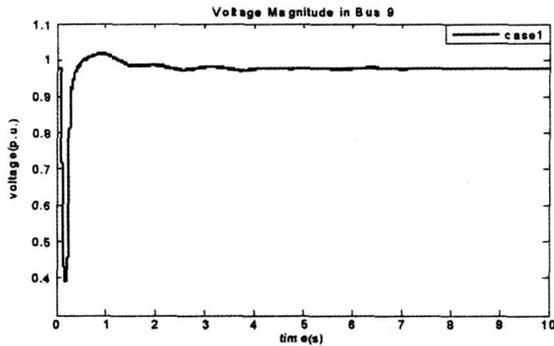


图 6 情况 1 换流母线的电压波形 (负荷水平 3)

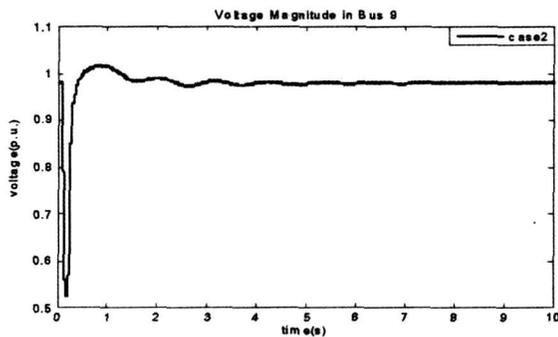


图 7 情况 2 换流母线的电压波形 (负荷水平 3)

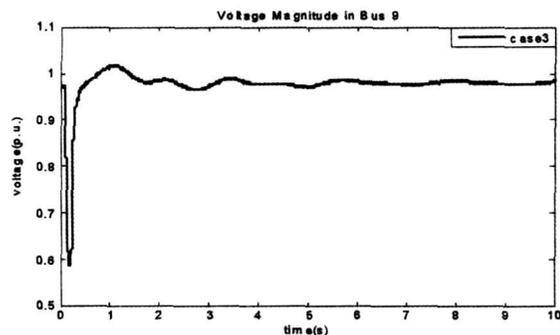


图 8 情况 3 换流母线的电压波形 (负荷水平 3)

比较图 6~图 8 可知:系统在重负荷运行条件下, Case 2 和 Case 3 的换流母线电压稳定性有所减弱,尤其是 Case 3,电压波动明显增大;但 Case 1 变化不大。这说明弱并联交流系统受负荷水平影响较大,不利于换流母线的电压稳定性。总体来说,在同一负荷水平下,这 3 种情况的稳定性依次减小。

## 6 结 论

通过相关的静态分析和动态仿真讨论了并联交流系统强度对逆变侧换流母线电压稳定性的影响,得出以下结论。

(1) 并联交流系统强度越大,则系统短路比越大,换流母线的稳定裕度越大;

(2) 随着负荷的增加,换流母线的电压灵敏度增大,系统趋于不稳定;

(3) 弱并联交流系统受负荷水平影响较大,不利于换流母线的电压稳定性;

(4) 在一定的直流控制方式下,提高并联交流系统强度,使得对受端交流系统的功率支援增大,从而加强交流系统对直流系统的无功支持,有助于提高换流母线的电压稳定性。

## 参 考 文 献

- [1] Ainsworth J D, Gavrilovic A, Thanawala H L. Static and synchronous compensators for HVDC transmission converters connected to weak AC systems [A]. International Conference on Large High Voltage Electric Systems [C]. International Conference on Large High Voltage Electric Systems Paris Fr, 1980.
- [2] Hammad A E. A computation algorithm for assessing voltage stability at AC/DC interconnections [J]. IEEE Trans on Power PWRs 1986, 1(1), 209-216.
- [3] Denis Lee Hau Aik, Andersson G. Influence of Load Characteristics on the Power/Voltage Stability of HVDC Systems Part 1: Basic Equations and Relationships [J]. IEEE Trans on Power Delivery 1998, 13(4), 1437-1444.
- [4] Denis Lee Hau Aik, Andersson G. Influence of Load Characteristics on the Power/Voltage Stability of HVDC Systems Part 2: Stability Margin Sensitivity [J]. IEEE Trans on Power Delivery 1998, 13(4), 1445-1452.

(下转第 35 页)

## 4 结 语

采用 PSO 算法对灰微分方程的参数进行直接求解,不需构造背景值,提高了模型的拟合和预测精度,增强了模型的适用性。将 PSOGM (1, 1, a, b, c) 模型分别应用于增长规律不同的四种电力负荷的预测问题中,预测精度明显优于传统 GM (1, 1) 模型; PSOGM (1, 1, a, b, c) 模型可以精确地预测具有近似指数增长规律的负荷,它不仅适用于变化平稳的历史负荷序列,还适用于负荷增长率较大的负荷序列,克服了 GM (1, 1) 模型的局限性,具有一定的应用价值。本算法的特点一是算法简单。首先,粒子群算法用于灰色模型参数的直接求解,无需像遗传算法那样进行复杂编码,可直接对实数变量进行操作;其次,算法中需要调整参数很少,即使调整也不需要太多经验。二是收敛快、精度高。粒子群算法收敛快是其重要特性,也是其近年来发展迅速的一个重要原因。

## 参 考 文 献

[1] 邓聚龙. 灰色预测与决策 [M]. 湖北, 华中理工大学出版社, 1992.  
 [2] Ni Dongxiao. "Adjustment gray model for load forecasting of power system." The Journal of Gray System, vol 6,

no 2, pp 127-134, 1994.  
 [3] 牛东晓, 赵磊. 粒子群优化灰色模型在负荷预测中的应用 [J]. 中国管理科学, 2007, 15(1): 69-73.  
 [4] 王翠茹, 孙辰军, 杨静, 冯海迅. 改进残差灰色预测模型在负荷预测中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(1): 86-89.  
 [5] 宋中民. 灰色 GM (1, 1) 模型参数的优化方法 [J]. 烟台大学学报, 2001, 14 (3): 161-163.  
 [6] J Kennedy and R. C Eberhart "Particle swarm optimization Proc IEEE Int Conf Neural Networks Piscataway NJ IEEE Press 1995, pp 1942-1948.  
 [7] 曾建潮, 介婧, 崔志华. 微粒群算法 [M], 北京, 科学出版社, 2004.  
 [8] 王成山, 杨军, 张崇见. 灰色系统理论在城市年用电量预测中的应用—不同预测方法的分析比较 [J]. 电网技术, 1999, 23(2): 15-18.  
 [9] 牛东晓, 曹树华, 赵磊. 电力负荷预测技术及其应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

### 作者简介:

周在阳 (1983—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统调度自动化及计算机信息管理。

周步祥 (1965—): 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统自动化、计算机应用等方面的教学与科研工作。

(收稿日期: 2008-12-10)

(上接第 8 页)

[5] Denis Lee Hau Aik Andersson G. Quasi-Static Stability of HVDC Systems Considering Dynamic Effects of Synchronous Machines and Excitation Voltage Control [J], IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1501-1514.  
 [6] Denis Lee Hau Aik Andersson G. Nonlinear Dynamics in HVDC Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(4): 1417-1426.  
 [7] Canizares C A Alvarado F L Point of Collapse and Continuation Method for Large AC/DC Systems [J], IEEE Trans on PWRs 1993, 8(1): 1-7.  
 [8] Kundur P. Power System Stability and Control McGraw-Hill Inc, New York 1994.  
 [9] Senlyen A Gao B Calculation of the Extreme Loading Condition of A Power System for the Assessment of Voltage Stability [J], IEEE Trans on PWRs 1991, 6(1): 307-315.  
 [10] 张尧, 宋文南. 节点电压稳定临界状态和弱节点的确定 [J]. 中国电机工学报. 1993, 13(6): 40-45.

[11] 张尧, 宋文南, 贺家李. 临近电压稳定极限的潮流和静稳极限算法 [J]. 中国电机工学报. 1994, 14(6): 17-23.  
 [12] Denis Lee Hau Aik Andersson G. Voltage Stability Analysis of Multi-Infed HVDC Systems [J], IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1309-1316.  
 [13] CIGRE Task Force 38.02.11 CIGRE Technical Brochure: Indices Predicting Voltage Collapse Including Dynamic Phenomenon. Electra 1995(159): 135-147.

### 作者简介:

徐梅梅 (1986—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析计算及稳定。

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

白加林 (1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制。

贺洋 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向电力系统分析计算及稳定。

(收稿日期: 2008-12-15)

# 基于负荷时域等值模型非线性度的谐波源定位

龚华麟, 肖先勇

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 谐波源定位是划分电网谐波污染责任的关键理论和技术难题。基于产生谐波污染的非线性负荷的非线性度特性, 研究负荷非线性度与负荷谐波发射水平的关系, 提出了一种适合于单相和三相负荷的谐波源定位方法。该方法利用负荷时域等值模型确定负荷非线性特征, 用删除残差法对负荷线性参数进行识别, 计算负荷非线性度, 以此确定负荷谐波发射水平, 判定 PCC 点处主要谐波源, 该算法能有效减少测量噪声影响。实验仿真及实际工程数据分析验证了该方法的有效性和准确性。

**关键词:** 谐波源定位; 非线性负荷; 非线性度; 谐波发射水平; 时域等值模型; 删除残差法

**Abstract:** It's difficult to determine the responsibility of the harmonic pollution which is produced by both the utilities and the customers. Due to the harmonic emission level in proportion to the nonlinear index of the load, an algorithm to calculate the nonlinear index of loads used in harmonic source location is proposed. Through the harmonic load model in time domain, the algorithm firstly calculates the nonlinear parameters of the load, secondly it computes the linear parameters of the same load by the delete residual method, then it estimates the non-linearity index and finally it finds the main harmonic source at the Point of Common Coupling. The proposed method can eliminate the measurement noise effectively in the data. The simulation analysis and the analytic result of the practical data testify that the proposed method is valid and accurate.

**Key words:** harmonic source location; nonlinear load; non-linearity; harmonic emission; time-domain equivalent model; deleting difference method

中图分类号: TM734 文献标识码: A 文章编号: 1003-6954(2009)01-0009-04

随着工业的高速发展, 大量非线性负荷如整流装置、电弧炉、变频装置等接入电网, 引起系统内电压、电流波形发生畸变, 造成的电网谐波污染越来越严重。为了有效防止污染, 国内外重点在谐波发射、标准、抑制手段等方面开展了大量研究, 提出了一系列方案和标准<sup>[1,2]</sup>。在负荷接入电网的公共连接点 (PCC) 处检测到的谐波包含: 由非线性负荷产生的用户侧分量和由系统或其他负荷产生的系统侧分量两部分, 如图 1。为划分责任, 定量评估用户侧和系统侧的谐波发射水平是关键。

现有 PCC 点谐波源定位法主要包括定性分析和定量分析两大类方法。定量分析法通过估计系统侧和用户侧参数, 计算用户发射的谐波电压, 主要有参考阻抗法<sup>[3]</sup>、波动法<sup>[4]</sup>和线性回归法<sup>[5~7]</sup>等; 这类方法能定量确定用户侧和系统侧谐波发射水平, 但需预先判定被评估负荷是主要谐波源。定性分析法通过谐波功率和用户非线性度判别主要谐波源, 主要有有功功率法、临界阻抗法、瞬时负荷参数分割法等。有功功率法<sup>[8]</sup>, 根据谐波有功方向判定谐波源, 方法简

基金项目: 四川省应用基础研究 (2008JY0043-2)。

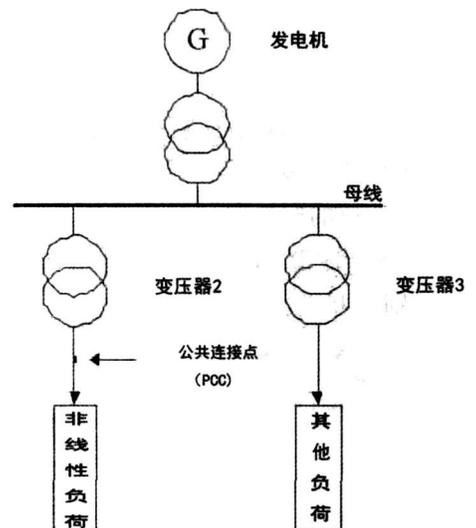


图 1 简化配电系统网络

单直观, 但由于谐波源相位在 4 个坐标象限内任意变化, 谐波有功方向实际上很难准确反映真实谐波源<sup>[9]</sup>; 临界阻抗法<sup>[10]</sup>, 首先计算完全吸收系统无功功率所需临界阻抗, 通过系统侧、用户侧平均阻抗大小确定谐波源, 该方法能判断主要谐波源, 但对系统侧、用户侧阻抗的估计在实际中难以实现; 瞬时负荷参数分割法<sup>[11]</sup>基于负荷的非线性度识别谐波源, 原理简

单, 无需系统和负荷参数, 通过线性阻抗计算负荷线性电压, 但线性阻抗如何求取尚需进一步研究, 其准确性易受测量噪声影响; 文献 [12、13] 改进了上述算法, 通过单相基波电压、电流计算非线性负荷的线性分量, 再估计负荷的非线性指数, 但三相不平衡引起的参数不对称的影响值得进一步研究。

现从线性、非线性负荷的时域等值模型出发, 在缺乏系统及用户参数的前提下, 通过负荷非线性指标判定主要谐波源, 同时考虑负荷不对称和噪声可能造成的影响。实验仿真和实际工程验证了该方法的有效性和正确性。

## 1 负荷谐波发射水平评估原理

如图 2 在实际中, 电压、电流波形的畸变, 即电压  $v(t)$ 、电流  $i(t)$  之间的非线性关系 [14] 主要由非线性负荷引起。

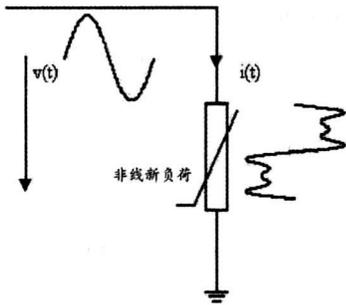


图 2 非线性负荷引起波形畸变

由于负荷大多呈感性, 可用感性时域等值模型表示 [15]。负荷的时域等值模型如图 3。其中,  $i_c(t)$  为负荷等效谐波源;  $R$ 、 $L$  为等效电阻、电感;  $i_{pcc}(t)$ 、 $v_{pcc}(t)$  分别为 PCC 点处电流和电压。

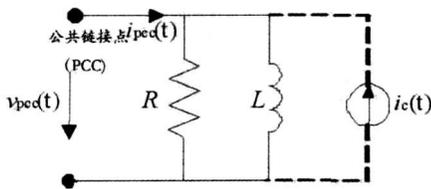


图 3 负荷的时域等值模型

当负荷线性时, 可通过采集 PCC 点电压、电流值由式 (1) 计算负荷的  $R$ 、 $L$  值, 此时  $R$ 、 $L$  呈线性变化; 当负荷非线性时, 不满足式 (1),  $R$ 、 $L$  值呈非线性关系, 如图 4。

若负荷为非线性负载,  $R_{linear}$ 、 $L_{linear}$  为其线性化后的等效电阻和电感值, 通过测量电压  $v_{pcc}(t)$ , 根据图 3 负荷的时域等值模型, 由式 (2) 可计算得到非线性

负荷线性化后的线性电流  $i_{pcc-linear}$ , 并与实际测量电流  $i_{pcc}$  比较, 以此来判断负荷的非线性大小, 即非线性负荷谐波发生水平高低, 从而找出主要谐波源。

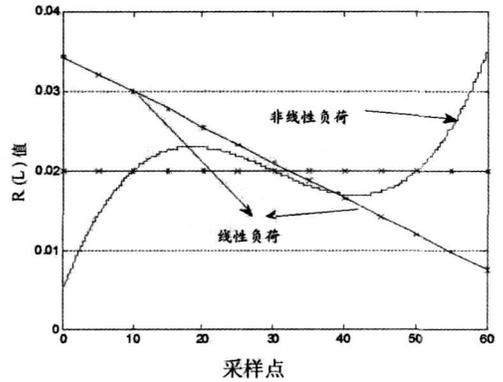


图 4 负荷的  $R$ 、 $L$  值

$$i_{pcc}(t) = \frac{v_{pcc}(t)}{R} + \frac{1}{L} \int v_{pcc}(t) dt \quad (1)$$

$$i_{pcc-linear}(t) = \frac{v_{pcc}(t)}{R_{linear}} + \frac{1}{L_{linear}} \int v_{pcc}(t) dt \quad (2)$$

## 2 负荷非线性度

### 2.1 确定负荷的 $R$ 、 $L$ 值

计算  $R$ 、 $L$  值时需在 PCC 点采集电压、电流值, 测量中电磁干扰不可忽视。谐波源定位过程中, 有效信号包括工频信号及其整数倍的信号, 利用傅里叶变化能有效提取有效信号, 去除干扰信号, 如式 (3), 其中  $h$  为谐波次数,  $h=1, 2, \dots, N$ ;  $V_h$ 、 $I_h$  为各次谐波电压、电流模值;  $\alpha_h$ 、 $\beta_h$  为各次谐波相角对基波电压的相角;  $\omega$  为角速度。

$$v_{pcc}(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^N V_h \cos(h\omega t + \alpha_h)$$

$$i_{pcc}(t) = \sqrt{2} \sum_{h=1}^N I_h \cos(h\omega t + \beta_h) \quad (3)$$

当采样时间变化时, 可以得到不同的电压、电流样本点  $v_i \sim v_n$ 、 $i_i \sim i_n$ 。根据电压、电流不同样本点建立方程组 (4),  $v_n$ 、 $v_{n-1}$ 、 $i_n$ 、 $i_{n-1}$  和  $y_n$ 、 $y_{n-1}$  分别为  $t_n$ 、 $t_{n-1}$  相邻两个时间点电压、电流和电压积分样本值。通过矩阵运算可求得负荷的  $R$ 、 $L$  值。

$$\begin{bmatrix} i_n \\ i_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{n-1} & y_{n-1} \\ v_n & y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{R} \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{令 } y(t) = \int v_{pcc}(t) dt$$

$$= \sum_{h=1}^N \frac{V_m}{h\omega} \cos(h\omega t + \alpha_h) \quad (5)$$

### 2.2 负荷的线性参数

已知  $n$  个连续的样本点, 每连续 2 个样本可计算出一对负荷的  $R, L$  值, 其值反映出电压、电流之间的关系。对其进行线性化处理, 可得负荷线性参数值。线性回归是研究数据线性关系的有效工具, 根据式 (6) 分别求出  $R, L$  的回归系数。

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

$$\beta = (\beta_0, \beta_1)^T \quad (6)$$

根据最小残差平方和原理得到的求解式 (6), 求解过程容易受异常值影响。根据式 (4) 所得负荷的  $R, L$  值, 由于受到电压、电流和电压积分样本过零点的影响, 导致出现了部分异常值。通过删除残差法<sup>[16]</sup>, 去除异常值, 再进行线性回归, 可得线性参数

$$R_{L_{\text{linear}}}, L_{L_{\text{linear}}}$$

### 2.3 负荷非线性度确定

将  $R_{L_{\text{linear}}}, L_{L_{\text{linear}}}$  带入式 (2), 可得负荷线性电流, 并与电流样本作比较, 如式 (6), 得负荷非线性区趋势  $T(t)$ , 利用式 (7) 求负荷总体非线性度  $NLI$  (non-linearity index)。

$$T(t) = \frac{i_{\text{pcc}} - \text{linear}(t) - i_{\text{pcc}}(t)}{i_{\text{pcc}}(t)} \quad (6)$$

$$NLI = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N T(t)^2} \quad (7)$$

### 2.4 对三相平衡负荷的计算

实际中, 三相平衡负荷与单相负荷计算类似。而不平衡负荷的电压、电流值由各相及相间感应决定。因此, 各相电压、电流不能完全反映该相的非线性程度。用对称分量法可将测量到的傅里叶变化后的数据分解为正序、负序和零序分量。由式 (1)~式 (7) 分别计算各序分量的非线性度, 并用式 (8) 计算真实非线性度  $NLI_{\text{phase}}$ , 其中  $I_+, I_-$  和  $I_0$  表示各序电流,  $NLI_{\text{pcc}}$  为真实非线性度,  $NLI_+, NLI_-$  和  $NLI_0$  为各序非线性度。

$$I_+ = \sqrt{\sum_{h=1}^N I_{h+}^2}, \quad I_- = \sqrt{\sum_{h=1}^N I_{h-}^2}, \quad I_0 = \sqrt{\sum_{h=1}^N I_{h0}^2}$$

$$NLI_{\text{phase}} = \frac{I_+ \cdot NLI_+ + I_- \cdot NLI_- + I_0 \cdot NLI_0}{I_+ + I_- + I_0} \quad (8)$$

## 3 实验仿真

以 6 脉波整流电路为例, 仿真电路如图 5, 用 Matlab/Simulink 进行仿真。系统频率 50 Hz 电压 380 V, 短路容量为 10 MVA。考虑实际系统中存在背景谐波, 根据国标<sup>[2]</sup>规定 PCC 允许谐波电压限值设定系统侧背景谐波电压, 如表 1, 其中基波电压相角为 0。用户侧负载 0.5 MVA, 功率因数 0.8。

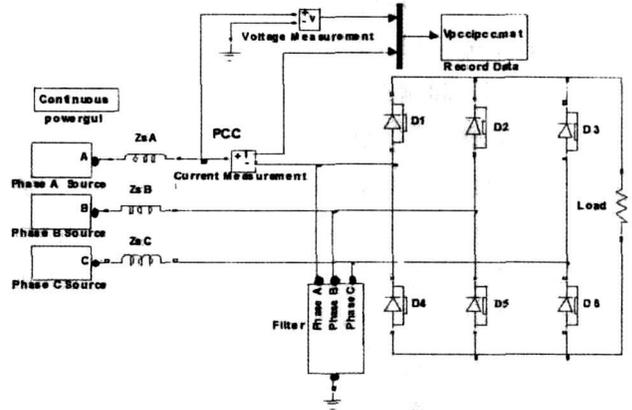


图 5 6 脉波整流仿真模型

表 1 系统侧电压源构成

谐波次数	谐波电压含有率 (%)	相角
1	100	0°
5	2.04	50°
7	2.03	70°
11	2.03	110°
13	2.05	130°

由于负荷对称, 只需要测量其中一相的数据。由于供电侧电压和负荷大小恒定, 负荷产生的谐波电流也为定值, 因此, 通过调节滤波器的不同补偿容量, 控制非线性负荷注入公共连接点的谐波水平, 以得到不同的电压电流畸变率和非线性度, 如表 2 以此验证算法的准确性。

表 2 非线性度计算结果

算例	非线性度 NLI	电压畸变率 (%)	电流畸变率 (%)
1	8.6543	19.20	24.46
2	8.4859	19.03	24.17
3	8.3208	18.83	23.82
4	8.1601	18.56	23.37
5	7.5187	18.23	22.80
6	7.3451	17.77	22.02
7	6.6452	17.13	20.93
8	6.4140	16.16	19.27
9	6.0432	14.51	16.45
10	5.3174	11.10	10.60

由表 2 可知, 当电压、电流畸变率同时降低, 负荷非线性度随之降低, 且能反映细微的畸变率变化, 证明了算法的准确性。负荷在 PCC 点的不同谐波发射水

平对应不同的畸变率,提出的非线性度算法能准确反映其变化,因此,能准确找出 PCC 点处的主要谐波源。

## 4 工程应用研究

实测数据来自某 35 kV 配电网(如图 6),测量点 A、B、C 分别对应负荷 A、B、C。图 7 给出其中负荷 A 点电压、电流一相的数据。由于负荷接在同一条母线上,在不同时间测得的电压畸变率相差不大,而负荷 A、B 电流畸变率明显不同,如图 7、图 8。

分别对负荷非线性度进行计算,结果如表 3。负荷 A、B 的非线性度大,表明该负荷为主要谐波源。负荷 C 的 R、L 值变化平稳,非线性度低,而负荷 A、B 的 R、L 值波动较大,非线性度趋势高,故负荷非线性程度大,谐波发射水平高。

表 3 负荷非线性度

负荷编号	非线性度
A	5.231 0
B	7.806 6
C	0.855 4

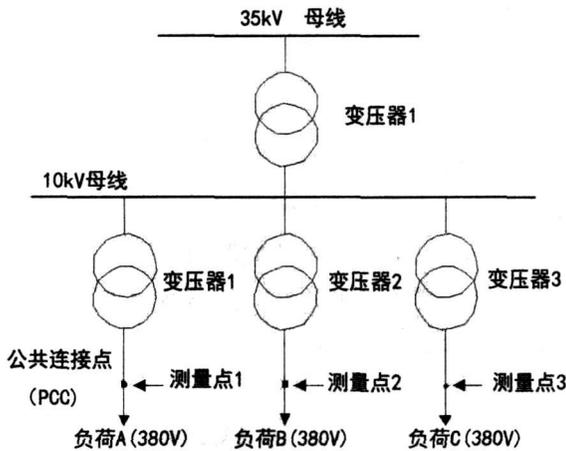


图 6 某 35 kV 配电网

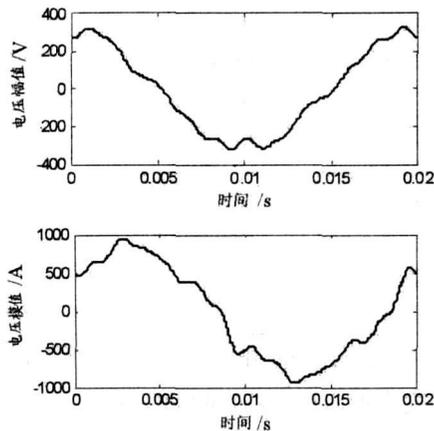


图 7 负荷 A 公共连接点电压电流波形

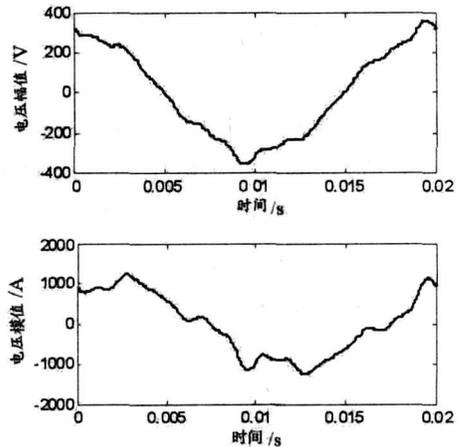


图 8 负荷 B 公共连接点电压电流波形

## 5 结论

在系统存在背景谐波的情况下,前面提出一种基于三相负荷非线性度的谐波源定位法,该方法不受噪声影响,能准确判断负荷非线性度和谐波发射水平。实验仿真和实际工程运用均验证了该方法的有效性和正确性。该方法原理简单,方案可行,易于进行仪器开发和工程实现,具有一定理论价值和明显的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] Mitra J, Singh C. Pruning and simulation for determination of frequency and duration indices of composite power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14 (3): 899-905.
- [2] 国家技术监督局. GB/T 14549-93 电能质量 公用电网谐波 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1994.
- [3] Wilson Xu, Yili Liu. A method for determining customer and utility harmonic contribution at the point of common coupling [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 3-16.
- [4] Yang H, Piroette P, Robert A. Harmonic emission levels of industrial loads statistical assessment [C]. CIGRE 1996, 36-306.
- [5] 车权, 杨洪耕. 基于稳健回归的谐波发射水平估计方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (4): 39-42.
- [6] 张巍, 杨洪耕. 基于二元线性回归的谐波发射水平估计方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (6): 50-53.
- [7] 黄舜, 徐永海. 基于偏最小二乘回归的系统谐波阻抗与谐波发射水平的评估方法 [J]. 中国电机工程学报,

(下转第 68 页)

电因素的影响,采用自然增长 + 显著增长的基本预测方法, 预计 2008 年 德阳电业局可实现售电能量 73.439 亿 kW·h 同比增长 5.48%; 力争实现售电能量 75.0785 亿 kW·h 同比增长 7.83%。2008 年各月负荷预测见表 3。

## 5 改善德阳电网负荷特性的主要措施

(1) 加强设备停电管理, 实行《年度停电管理办法》。《年度停电管理办法》的核心就是将德阳电网所辖设备的大修、技改、预试和基建的停电工作都纳入电业局年度停电计划和供电局年度停电计划, “同一设备一年内原则上只安排一次停电计划”。大力推行带电作业和不停电作业。任何单位发生重复计划停电和非计划停电、停电延期, 电业局都将对其进行严格考核。

(2) 加快电网建设。加快中江 220 kV 站及配套的 110 kV 输变电工程、绵竹 220 kV 九岭站及配套的 110 kV 输变电工程等一系列新建、扩建工程项目, 增加变电容量, 提高供电可靠性, 解决供电能力不足的问题。

(3) 加快 10 kV 配电网改造, 适当增加配电变压

器, 对老旧线路进行更新改造, 并新建配电线路, 消除配网“卡脖子”现象。

(4) 加强负荷预测工作。做好每日极值预测; 并根据季节、气温变化的特点进行负荷的预测, 提高负荷预测的准确率, 以减少拉闸限电。如夏季应注意空调负荷、气候突变对负荷变化的影响, 做好降温负荷预测; 冬季电力供应紧缺, 做好负荷预测, 指导用电客户根据供电形势有序用电。

(5) 合理、科学安排运行方式; 及时掌握系统运行的情况、负荷水平、电网薄弱环节, 在此基础上合理安排设备停电检修方式。方式安排中, 杜绝电网设备过载运行。方式变化较大时, 应进行潮流计算, 了解系统潮流、电压的变化及可能对系统带来的影响。

(6) 加强需求侧管理, 有效降低高峰时段的电力需求。

(7) 充分发挥电价在削峰填谷、均衡用电方面的经济杠杆作用。进一步加大峰谷电价政策的执行力度, 区别不同行业的价差比例, 实行分时段按功率因数调整电费, 以增强各类用户对其的响应程度, 指导用户低谷用电, 提高电网负荷率。执行季节性电价、避开电网尖峰时段。

(收稿日期: 2008-11-10)

(上接第 12 页)

2007, 27 (1): 93-97.

[8] Cristaldi L, Ferrero A. Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality [J]. IEEE Trans on Instrum. and Meas. 1995, 44: 683-685.

[9] Wilsun Xu, Xian liu, Yili liu. An Investigation on the validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination [J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 2003, 18(1): 214-219.

[10] Li Chun, Xu Wilsun, Tayjasanant T. A critical impedance based method for identifying harmonic sources [J]. IEEE Trans on Power Delivery. 2004, 19 (2) : 671-678.

[11] Moustafa A A, Moussa A M, El-Gammal M A. Separation of Customer and Supply Harmonics in Electrical Power Distribution Systems [C]. Harmonics and Quality of Power 2000 Proceedings Orlando Florida. 2000, 3 (1): 1035-1040.

[12] Kandil M S, Farghal S A, Elmitwally A. Refined power quality indices [J]. IEE Proceedings - generation Transmission and Distribution. 2001, 148(6): 590-596.

[13] Antonio Dell'Aquila, Maria Marinelli, Vito Giuseppe Monopoli, Pericle Zanchetta. New power-quality assessment criteria for supply systems under unbalanced and non-sinusoidal conditions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 2004, 19(3): 1284-1290.

[14] 吴竞昌. 供电系统谐波 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[15] Mahdi M, El Arin A. A time domain load modelling technique and harmonics analysis [C]. 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power Athens Greece. 1998, 930-938.

[16] 何晓群, 刘文卿. 应用回归分析 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2001.

### 作者简介:

龚华鳞 (1985-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向: 电能质量及其控制技术。

肖先勇 (1968-), 男, 四川宜宾人, 副教授, 硕士生导师, 长期从事电能质量及其控制技术等方面的教学和研究。

(收稿日期: 2008-12-08)

# 基于电容器投切的复小波选线方法

周登登, 刘志刚

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:**在对配电网单相接地故障电流行波仔细分析的基础上, 得出了各出线电流初始行波之间的恒定关系式, 通过采用具有时移不变性的双树复小波来构造选线算法从而避免了实小波的各种缺点, 防止选线失效, 同时也解决了仅含两相电流互感器的选线问题。另外考虑了母线分布电容对选线算法的影响, 得出分布电容不但不会削弱选线效果反而更有利于选线的结论。最后通过仿真实例验证了所提出的算法有效、可行, 灵敏度高, 能够适用于任何出线线路类型相同的配电网。

**关键词:**单相接地故障; 电流行波; 双树复小波; 时移不变性

**Abstract:** Based on the analysis of the current traveling wave of the single-phase grounding fault in distribution network, the identity function relation of current initial traveling wave of every phase is obtained. Various disadvantages of real wavelet can be avoided by using complex wavelet transform which possesses the advantage of shift invariant, so the problem of line selection failure can not be occurred. This algorithm can also solve the problem when the distribution network has only two-phase current transformer. Otherwise, the influence of bus distributed capacitance on the algorithm also is considered, then a conclusion that the distributed capacitance can be beneficial to line selection rather than weaken that. At last, the simulation examples prove the effectiveness and high sensitivity of the proposed algorithm. This method can be used at the distribution network which has the outgoing lines of the same type.

**Key words:** single-phase grounding fault; current traveling wave; dual-tree complex wavelet; shift invariant

**中图分类号:** TM727.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0013-05

中国配电网中性点普遍采用不接地或经消弧线圈接地(统称非有效接地)的运行方式<sup>[1]</sup>。到目前为止, 虽然有部分选线装置在使用, 但选线成功率极低, 不少变电站将其停运, 中性点非有效接地系统的选线问题仍然是一个困扰电力工作者的难题。

近年来, 对配电网的选线问题研究越来越多, 出现了利用稳态分量、暂态分量和注入法的三类选线方法, 如幅比相法<sup>[2]</sup>、有功分量法、五次谐波法、首半波法<sup>[3]</sup>和信号注入法<sup>[4]</sup>。这些方法各有优缺点, 多数只能适用于中性点不接地或不直接接地系统, 具有局限性, 并且选线准确性受到一定质疑<sup>[5]</sup>。

配网行波选线法的思想是受输电系统行波测距原理所启发。国内对配电系统的行波选线原理研究较少, 但已有学者证明配电系统行波选线甚至测距都是可行的, 并且做了一些有意义的工作<sup>[6~11]</sup>。这些方法多使用零模或线模电流进行判断, 这在仅含有两相电流互感器的线路中选线算法失效。为此有人想出了适用于仅含两相电流互感器线路的选线方

法<sup>[11]</sup>。在前人工作的基础上, 着重分析了行波在含有电容的母线处的传播特性, 得出了基于投切电容的复小波选线原理。该原理的最大创新在于它通过故障时投入母线电容, 使已有的选线算法的检测准确率大大提高, 并且通过复小波检测, 克服了现有的实小波检测的各种缺陷。这种原理具有独立性, 它可以与现有的任何行波选线算法相融合, 从而使这种方法可以应用在现有的仅含两相电流互感器的配电网中。值得一提的是现有算法在两出线系统中准确率很低或失效, 而若采用基于电容投切的原理, 应用现有选线算法则可使选线准确率大幅度提高。最后通过一些算例对比验证了该方法耐过渡电阻、过渡相角、故障距离能力都很好, 且与中性点接地方式无关。

## 1 复小波检测的优点

到目前为止用于选线的小波都属于实小波, 但是实小波有几个突出的缺点: 时移敏感性、缺乏方向性和缺少相位信息。由于文中选线算法与后两个缺点无关, 因此主要考虑它的时移敏感性。造成实小波时

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

移敏感性的主要原因在于实小波的下采样或者说实小波基函数不解析,而双树复小波<sup>[12]</sup>所设置的双树变换具有半采样点延迟关系,等价于加倍采样率,从而克服了下采样所导致的各种问题,或者说是复小波的解析性克服了时移敏感性。双树复小波具有近似解析性、双树正交性、线性相位、精确重构性、低复杂度(2倍于实小波变换),被认为是理想的小波变换工具。通过下面的仿真实例可以看到复小波的优点。

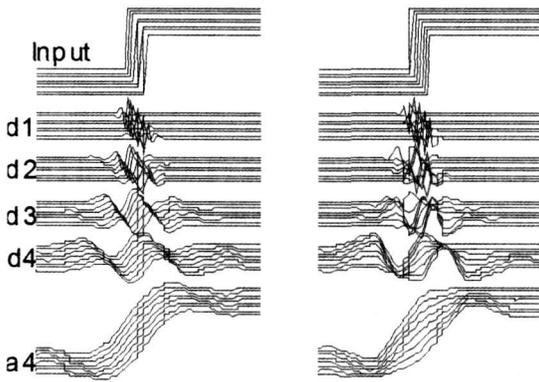


图 1 实、复小波对阶跃信号的变换对比

图 1 中左图是复小波对阶跃信号的变换结果,右图是实小波变换对阶跃信号的变换结果,  $d1 \sim d4$ ,  $a4$  分别表示各尺度重构信号。由图 1 可见,当信号有时延时,复小波变换结果也有相类似的时延,不会像实小波变换那样出现震荡的情况。这说明复小波变换具有时移不变性,而实小波变换没有这个特点,可以预见,当分析信号时,若在时域或小波域对信号做了任何处理,打破了小波变换的平衡,那么实小波变换结果都是不准确的。而复小波变换就避免了这个问题,从而使分析结果更可信。

## 2 故障选线判据

### 2.1 未投入母线电容时的行波分析

图 2 是中性点经消弧线圈接地(不接地的)配电系统示意图。图中设置的是 C 相线路经过渡电阻  $R_g$  接地。

消弧线圈的电感电阻在图中分别用  $L$   $R$  表示。故障点故障前电压为  $U_c$ ,故障后电压为  $U_o$ ,故障支路电流为  $i$ 。

对故障情况,由于一般的时域法存在三相之间的耦合导致求解困难,因此多数均选用模域变换法。在此选择应用最广泛的凯伦贝尔(Karrenbauer)变换用于相分量之间解耦。

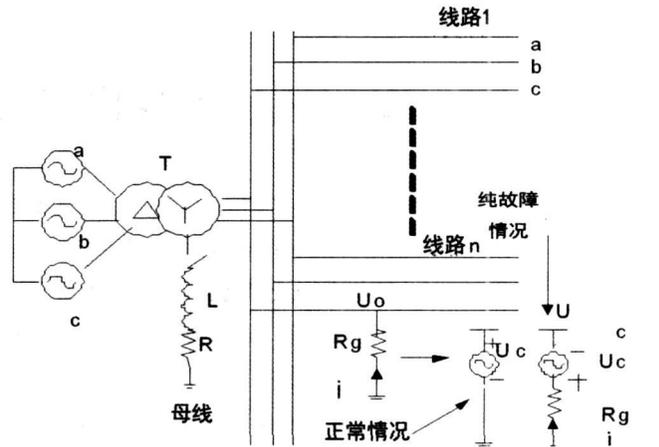


图 2 配电网单相接地示意图

$$\begin{bmatrix} x^0 \\ x^1 \\ x^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a(t) \\ X_b(t) \\ X_c(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $x^0$  为零模分量;  $x^1$ ,  $x^2$  为线模分量;  $X_a$ ,  $X_b$ ,  $X_c$  为相分量。

当采用上述变换后,三相之间的关系就演变成为三个模分量之间的关系。这三个模分量是相互独立的,可以单独用来分析,因此三相系统的问题就转化成单模系统的分析。

设配电系统有  $n$  条出线,当故障发生后由故障位置所产生的行波就会由故障点向两侧行进,朝左方行驶的行波遇到不连续点(母线)时,就会发生波的折射与反射,折射波进入其他出线,反射波与入射波叠加形成故障线路的测量行波,当反射波行进到故障点时又会发生折射反射,此时的反射波开始向左端的母线行进,而故障点右侧的初始行波在对端母线(或不连续点)所产生的反射波也会透过故障点(折射)朝左端母线行进,当故障点选择不同时,这两个反射波的波头谁先到达左端母线是不确定的,因此下面就着手提取第一个初始行波波头,这就避免了各种反射波的影响,从而使所提出的原理更准确。

由于初始行波频率很高(达  $10 \sim 100$  kHz),配电变压器的阻抗与频率成正比,因此配电变压器很少有行波通过,可视为开路。由于母线尺寸很小,行波在其内的传播过程可以忽略不计。这样当不考虑母线分布电容时,行波的流通过程就只有各条出线。根据彼德逊法则可得故障行波计算示意图,如图 3 所示。

图中,  $Z_1$  表示故障线路波阻抗;  $Z_2 \dots Z_n$  分别表示  $n-1$  条正常线路的波阻抗;其他参数意义如式(2)的解释。

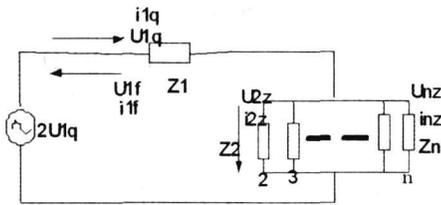


图 3 配电网故障后行波计算示意图

根据电流电压连续性关系可得下式：

$$\begin{cases} \frac{U_{1q}}{Z} = i_{1q}, \frac{U_{1f}}{Z} = -i_{1f} \\ i = i_{1q} + i_{1f} = i_{z_1} + \dots + i_{z_n} \\ U = U_{1q} + U_{1f} = U_{z_1} = \dots = U_{z_n} \end{cases} \quad (2)$$

式中， $U_{1q}$ 、 $i_{1q}$  为故障线路电压电流前行波； $U_{1f}$ 、 $i_{1f}$  为故障线路电压电流反行波； $Z$  为故障线路波阻抗； $i_{z_1}$ 、 $i_{z_2}$ 、 $i_{z_3}$ 、 $\dots$ 、 $i_{z_n}$  为正常线路电流、电压折射波。一般各出线线路类型一致，因此各出线波阻抗相等。规定由母线流出的电流为正，据此化简上式有：

$$i_z = \frac{2}{n} i_{1q}, i_{\text{合}} = \frac{2}{n} (1-n) i_{1q} \quad (3)$$

式中， $i_z$  为电流折射波； $i_{\text{合}}$  为故障线路电流合成波； $n$  为出线条数。

由于式 (3) 中的  $i_z$ 、 $i_{\text{合}}$  并未指明是线模行波还是零模行波，因此无论线模还是零模行波都应该满足式 (3)。于是可知故障线路与正常线路的相应模分量之比永远等于  $(1-n)$ ，而非故障线路相应模分量之比恒相等。

## 2.2 投入母线电容后的行波分析

当出现单相接地故障后，母线电压会降低，可以利用这个信号投入母线电容器，也可以使用在正常情况下一直投入的母线补偿电容器。在母线含有电容的情况下，行波的传播路径相当于多了一条出线，只是这条出线上接的是电容元件。据彼德逊法则可得计算示意图，如图 4 所示。

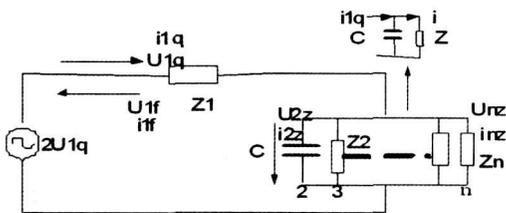


图 4 考虑分布电容时配电网行波计算示意图

图 4 中， $C$  为母线电容； $Z$  为除电容外各正常出线的等效波阻抗； $Z_1$  为故障线路波阻抗； $i$  为  $Z$  支路初始行波电流。其他参数同对式 (2) 的解释。

由图 4 可得：

$$\begin{cases} Z = \frac{Z_1}{n-1} \\ i_{1q} = i + C \frac{dZ}{dt} \\ 2U_{1q} = iZ + i_{1q}Z = iZ + i_{1q}Z_1 \end{cases} \quad (4)$$

解得：

$$\begin{cases} i_z = 2i_{1q} \frac{(n-1 + e^{-\frac{t}{ZC}})}{n} \\ i_{\text{合}} = \frac{2i_{1q}}{n} (1 - e^{-\frac{t}{ZC}}) \end{cases} \quad (5)$$

由式 (5) 可知，在母线含有电容情况下，故障线路与正常线路相应模分量之比变成

$$\frac{n-1 + e^{-\frac{t}{ZC}}}{1 - e^{-\frac{t}{ZC}}} = \frac{n}{1 - e^{-\frac{t}{ZC}}} - 1$$

下面考察  $1 - e^{-\frac{t}{ZC}}$  的具体取值情况。由于影响  $1 - e^{-\frac{t}{ZC}}$  的有  $n$ 、 $C$ ，而  $Z$  一般变化较小，尤其是在出线较多时，变化更小，因此主要考察  $n$ 、 $C$  对  $\omega$  的影响。图 5 列出当  $C$ 、 $n$  取不同值时的关系曲线。

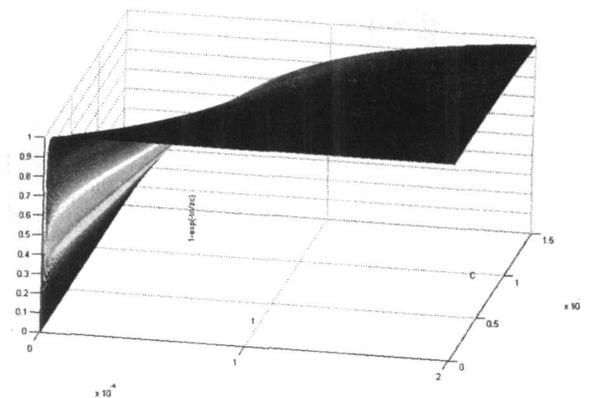
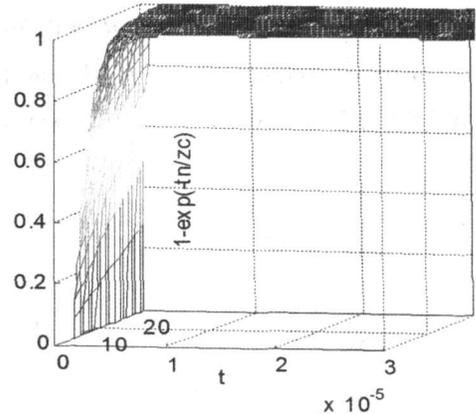


图 5  $C$ 、 $n$  变化时  $1 - e^{-\frac{t}{ZC}}$  的曲线图

由图 5 曲线变化情况可以知道，当  $C$  很大，出线  $n$  在 20 左右时，上述绝对值远大于  $(n-1)$ ，从而使现有的选线判据更灵敏。 $n$  减小时，上述比值进一步

加大。当 C 较小时,上述比值稍大于  $n-1$ 。由于不论 C、n 如何变化,  $1 - e^{-\frac{C}{n}}$  永远处于 (0, 1) 之间, 因此上述比值永远大于  $n-1$ , 故在故障后投入母线电容器会使现有的选线判据更加灵敏。

### 2.3 基于投切电容的选线判据

发生故障后依靠检测到的电压行波信号启动母线投切电容, 此时检测各线路的零序电流信号, 并对其进行复小波变换, 通过比较各出线零序电流复小波变换模极大值的大小来判断线路故障类型: 若这些值都相等, 则是母线故障; 若有一条出线模极大值远远大于其他出线的模极大值, 则模极大值最大的那条线路故障。

## 3 仿真验证

图 6 为搭建的四出线 10 kV 系统仿真模型, 消弧线圈接地 (10% 过补偿), 线路参数如下: 变压器 110/10 kV; 正序参数:  $R_1 = 0.48 \Omega / \text{km}$ ,  $L_1 = 0.9283 \text{ mH} / \text{km}$ ,  $C_1 = 0.07038 \mu\text{F} / \text{km}$ ; 零序参数:  $R_0 = 0.79 \Omega / \text{km}$ ,  $L_0 = 4.2146 \text{ mH} / \text{km}$ ,  $C_0 = 0.0436 \mu\text{F} / \text{km}$ ; 四条出线的长度分别为 6 km、16 km、24 km、20 km, 输电

线路采用贝杰龙分布参数模型。

算例 1: 不投入电容, 过渡电阻为  $500 \Omega$ , 故障相角为  $20^\circ$ , 距母线 20 km 处线路 3C 相短路各线路模分量复小波变换结果如图 7(a)。相同条件下投入母线电容各线路模分量复小波变换结果如图 7(b)。

从中可以看到未投入电容时线路 3 初始模极大值与其他线路初始模极大值之比为 3, 而线路 1、2、4 初始模极大值比值为 1, 证明这三条线路特性一致, 均与线路 3 特征相反, 由此可判定为线路 3 短路接地。但是投入电容后, 故障线路与正常线路电流行波初始模极大值之比扩大为 903.3, 非故障线路之间比值仍为 1。可见投入电容器会使故障线路故障特征更明显, 相当于起了放大镜的“作用”, 从而更有利于选出故障线路。

通过图 8 可以看到, 投入电容前后, 故障线路模分量波形没有发生变化, 而正常线路模分量的波形上升速度变缓, 显得更加平滑, 由于小波变换相当于检测奇异点的导数, 很明显, 故障线路的小波变换要明显大于正常线路, 这就是投入电容对选线精度带来的好处。

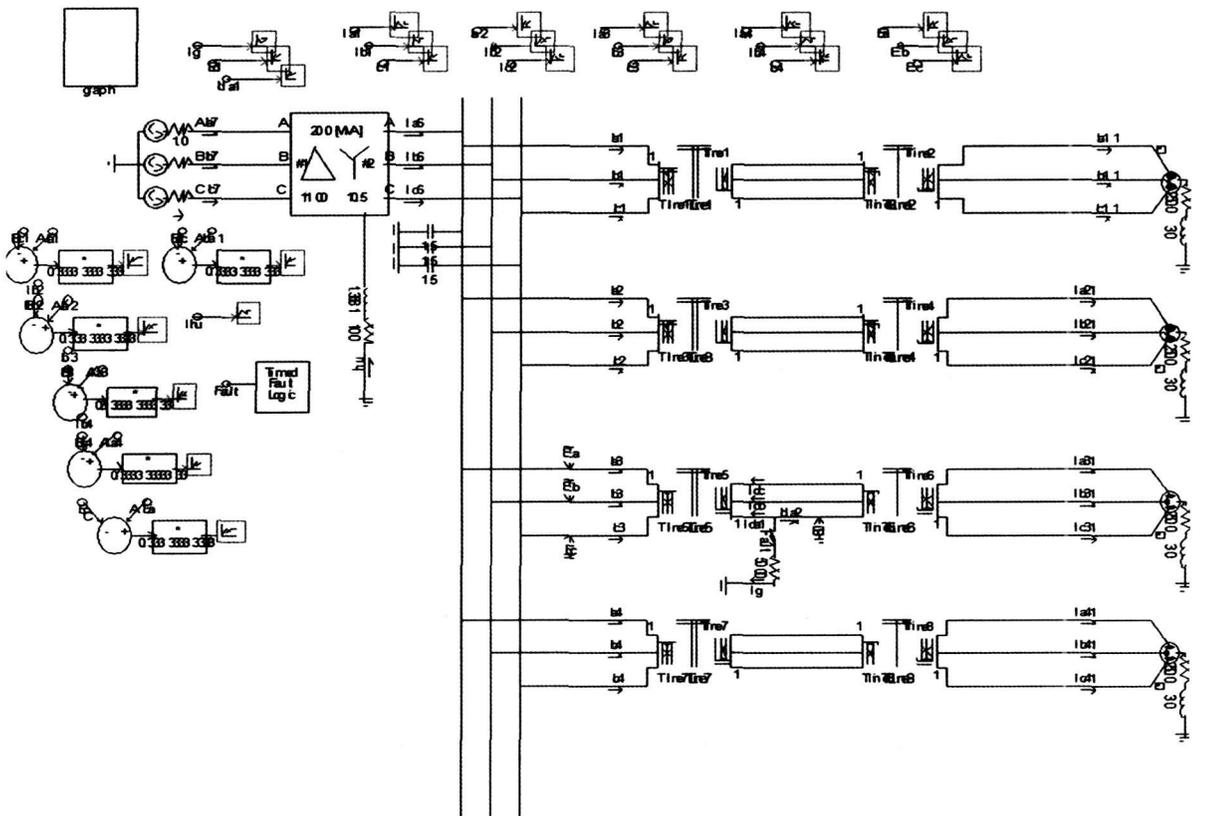


图 6 系统仿真模型

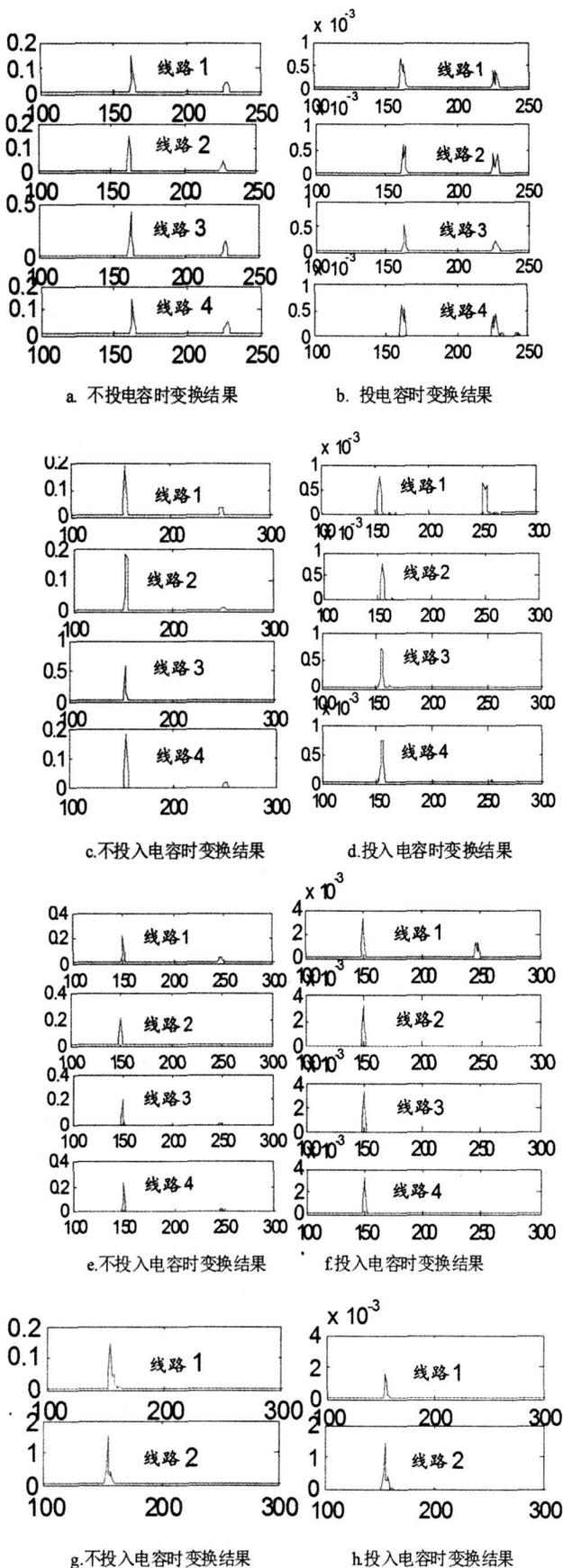


图 7 各算例变换结果

算例 2: 图 7(c) 表示不投电容, 故障相角为  $20^\circ$ , 距母线 0.5 km 处经  $500 \Omega$  过渡电阻短路的情况。相同条件下投入电容的变换结果见图 7(d)。从图中可以看到, 虽然此时距母线很近, 但是故障线路特征依然很明显, 故障线路与正常线路的初始行波变换模极大值之比为 1 000, 远大于不投入电容时的比值 3。因此很容易判定为是线路 3 故障。

算例 3: 考虑母线故障的情况,  $C = 1.5 \mu\text{F}$ , 过渡电阻仍为  $500 \Omega$ , 故障相角为  $20^\circ$ 。不投入电容时的变换结果见图 7(e), 投入电容后的变换结果见图 7(f)。此时无论是投入电容还是不投电容, 所有出线模电流分量的复小波变换比值都相等, 即各出线特征相同, 应判定是母线故障。此时, 投入电容并不能提高判据精度。不过, 此时由于是母线故障, 各出线特征相同, 也没必要提高判据精度。

算例 4: 当仅有两条出线时, 下面给出最不易区分故障线路的情况: 距母线 0.5 km 处短路, 大过渡电阻接地, 故障电压相角很小。此时分别考察不投入电容与投入电容的情形。由图 7(g)(h) 仿真结果可以看到, 投入电容时, 故障线路与非故障线路复小波变换比值为 1 000, 不考虑电容时, 此比值为 10.7, 可见只存在两条出线时, 通过投入电容仍能正确选线, 并且选线精度更高。

表 1、表 2 分别列出了前述两出线时和四出线时的算例仿真结果。

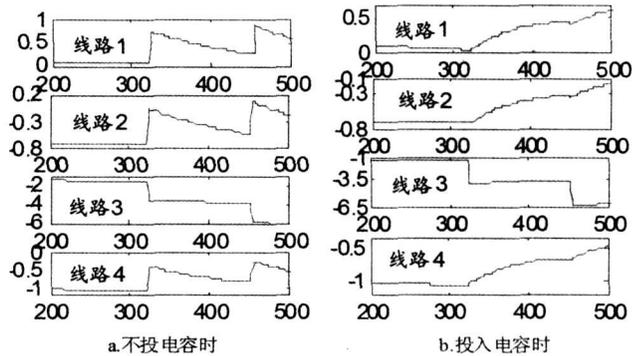


图 8 算例 1 时域图

表 1 两出线时的模极大值情况及选线结果

故障类型	线路 1	线路 2	选线结果
0.5 km 短路, 不考虑 C	$7.3e-2$	$7.79e-1$	线路 2
0.5 km 短路, 考虑 C	$7.435e-4$	$7.442e-1$	线路 2

(下转第 27 页)

也是一次世界性的重大创新,对四川相关产业和企业带来重要的发展机遇。在电力企业中,对设计院、试研院、送变电、铁塔厂、金具厂、电建公司来说都将是一个促进技术进步向电力高端发展的大好机会。利用特高压在四川的地域优势,抓住机遇,就将为今后的发展赢得更为广阔的空间。

综合考虑特高压输电技术的优越性,可以看出,

发展特高压电网有着巨大的经济效益和社会效益。中国经济飞速发展,发展特高压输电势在必行。发展特高压输电,对实现四川“工业强省”战略,对建设环境友好型、资源节约型的美好四川都将具有强大的推动作用。

(收稿日期:2008-12-30)

(上接第 17 页)

表 2 四出线时的模极大值情况及选线结果

故障类型	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	选线结果
20 km 处短路	0.224	0.222 9	3.034	0.222 4	线路 3
0.5 km 短路, 不考虑 C	$7.93e^{-2}$	$7.887e^{-2}$	$9.147e^{-1}$	$7.856e^{-2}$	线路 3
0.5 km 短路, 考虑 C	$7.447e^{-4}$	$7.459e^{-4}$	$7.44e^{-1}$	$7.576e^{-4}$	线路 3
母线处短路	$2.665e^{-3}$	$2.648e^{-3}$	$2.673e^{-3}$	$2.641e^{-3}$	母线

## 4 结 论

在对中性点非有效接地/不接地系统单相接地故障行波传输规律分析的基础上,提出了基于复小波变换的相电流行波选线算法。由于复小波的时移不变性克服了实小波变换结果的不稳定性,从而使本选线算法更可靠。本算法简单,仅需判定幅值即可,不必做大量计算,适于在线分析。实际变电站母线端都含有分布电容,而通过理论和仿真证明了分布电容对所提出的选线算法不但不影响选线效果,反而能增强选线灵敏度,从而使选线结果更准确。理论与仿真表明,本算法不受过渡电阻、补偿方式、故障相角和故障距离的影响,在各类出线线路类型相同的变电站均适用。

### 参考文献

[1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

[2] 郝玉山,杨以涵,任元恒. 小电流接地微机选线的群体比幅比相原理 [J]. 电力情报. 1994, 5(2): 15-19.

[3] 陈奎,唐轶. 小电流接地系统电弧接地选线方法的研究 [J]. 继电器. 2005, 33(16): 5-9.

[4] 桑在中,张慧芬,潘贞存. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护 [J]. 电力系统自动化. 1996, 20(2): 11-13.

[5] 徐青山. 电力系统故障诊断及故障恢复 [M]. 北京: 中

国电力出版社, 2007.

[6] 施慎行,董新洲,周双喜. 单相接地故障行波分析 [J]. 电力系统自动化. 2005, 29(23): 29-33.

[7] 张帆,潘贞存,等. 基于方向行波的小电流接地系统故障选线 [J]. 中国电机工程学报. 2007, 27(34): 70-75.

[8] 徐青山,陈锦根,唐国庆. 考虑母线分布电容影响的单端行波测距法 [J]. 电力系统自动化. 2007, 31(2): 70-73.

[9] 董新洲,毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究 [J]. 中国电机工程学报. 2005, 25(4): 1-6.

[10] 孔瑞忠,董新洲,毕见广. 基于电流行波的小电流接地选线装置的实验 [J]. 电力系统自动化. 2006, 30(5): 63-67.

[11] 毕见广,董新洲,周双喜. 基于两相电流行波的接地选线方法 [J]. 电力系统自动化. 2005, 29(3): 17-21.

[12] N. G. Kingsbury. Shift invariant properties of the dual-tree complex wavelet transform, in "Proc ICASSP 99, Phoenix AZ paper SPTM 3.6, March 16 - 19, 1999."

### 作者简介:

周登登 (1981-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统故障诊断。

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

(收稿日期:2008-12-20)

# 考虑运行方式和时变故障率随机评估电压凹陷频次

马 超, 肖先勇

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:** 电力系统的运行状态、线路与母线故障率、线路故障位置等不确定性因素对电压凹陷频次评估有重要影响。传统随机估计法分别假设电力系统运行状态、线路及母线故障率恒定, 主观假设线路故障随机分布规律, 不能很好地反映实际情况。综合考虑各种不确定性因素, 用系统内各机组的发电计划描述系统运行状态; 引入天气因子, 用线路和母线的时变故障率反映其不确定性; 用最大熵原理提取线路故障位置分布规律, 不需任何主观假设的不足, 评估结果更符合实际。考虑不同运行方式、故障类型、天气条件后, 综合评估母线电压凹陷频次。假设 3 种不同仿真条件, 对 IEEE-30 节点标准测试系统进行仿真分析, 结果证明所得到的评估结果更符合实际, 评估精度较高, 具有一定的理论价值和明显的工程应用前景。

**关键词:** 电压凹陷; 运行方式; 天气因子; 最大熵原理; 随机评估

**Abstract:** There are many uncertain factors influencing the voltage sag frequency assessment at buses such as the system operating modes, the failure rate of transmission line and buses and the fault location in transmission line. The current evaluation method usually considers that the system operating modes and the fault rate of line and bus are constant and the probability distribution rule of the fault location in transmission line is supposed. But it is not reasonable because of the uncertainty of these practical factors. Considering these influencing factors synthetically, the system operating mode is described by generator scheduling, time-varying fault rate is considered for transmission line and bus through introducing the weather factor in different time interval, and the probability distribution rule of fault location in line is distilled based on maximum entropy principle without any subjective assumption. In order to testify the rationality of the proposed method, the different operating modes, fault types and weather condition are considered synchronously. Three cases are used for simulation for IEEE-30 standard testing system. The simulation results show that the results are accurate and credible, and the proposed method is with academic value and practical foreground.

**Key words:** voltage sag; operating modes; weather factor; maximum entropy principle; stochastic assessment

**中图分类号:** TM711.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0018-05

电压凹陷 (voltage sag 或 dip) 是最严重的电能质量问题, 引起了国内外专家、学者的广泛关注<sup>[1]</sup>。国际电气与电子工程师学会 (IEEE) 将其定义为供电电压均方根值 (root mean square RMS) 快速下降到额定值的 90%~10%, 持续时间为 0.5 周波至 1 min<sup>[1]</sup>。引起电压凹陷的原因很多, 输配电线路短路是最主要的原因之一<sup>[2~4]</sup>。诸多电力电子、微电子设备, 如调速电机 (adjustable speed drives ASD)、计算机 (personal computers PC)、交流接触器 (AC contactor ACC)、可编程逻辑控制器 (programmable logic controllers PLC) 等对电压凹陷十分敏感<sup>[5~9]</sup>, 因电压凹陷造成的经济损失很大<sup>[5]</sup>。因此, 为降低凹陷造成的损失, 在制订供电方案、规划电网时必须对年度电

压凹陷频次及其可能造成的影响进行正确评估。

电力系统内故障引起的电压凹陷受网络拓扑、变压器接线方式、故障阻抗、故障类型、故障率、故障位置、系统运行状态<sup>[2, 10, 11]</sup>等诸多因素影响, 评估难度大。现有评估法可分为实测统计法<sup>[4, 11]</sup>和随机评估法<sup>[4]</sup>两类。实测统计法通过对给定负荷母线进行长期监测并统计其发生凹陷频次, 是一种直接、可靠的方法。但要获得足够精度, 必须安装必要的监测装置并进行长期监测, 其结果仅适用于确定网络结构、负荷水平等, 对于未监测母线和规划建设中的电网, 该方法很难得到可信赖的结果。随机估计法以建立的概率评估模型为基础, 根据历史样本和随机模型对凹陷频次进行估计, 可减少监测点和缩短监测时间, 具有较强的推广性和预测性, 对于规划建设阶段的输配电网和新建用户是一种有效的评估方法。

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

临界距离法<sup>[12~14]</sup>、故障点法<sup>[13~14]</sup>是经典的电压凹陷随机估计方法。临界距离法通过确定系统内被估计母线的电压达到其允许的临界电压  $U_{crit}$  时,在系统内对应的故障点到该母线的临界距离  $l_{crit}$ ,根据该临界距离内相关线路和设备的故障率评估在该母线发生给定临界电压水平的凹陷频次,其原理简单,评估精度高,但仅适用于放射形电网<sup>[14]</sup>。现有故障点法基于系统内输配电线路、母线上可能出现的故障点位置及故障类型,直接计算被评估母线的电压幅值以确定可能造成的凹陷深度,结合线路和母线的故障率、线路故障分布规律等评估整个系统内凹陷发生的频次,该方法适用于任意网络,但现有故障点的选取和故障随机分布规律,尤其是线路上的故障分布规律大多基于主观假设,缺乏严格的依据,在估计过程中,虽然通过增加故障点数可提高评估精度,但时间耗费也增加,且无法克服主观假设造成的误差。现有该领域的研究成果较多,但一般仅考虑系统始终处于某一种运行状态,认为被分析系统中的所有发电机组均投入运行,系统内所有线路、母线故障率均取平均故障率;而实际中,不同发电机组的年度、月度等发电计划随时间变化,线路和元件的故障率与季节、气候等条件有关。综合考虑系统可能的多运行状态、线路和母线故障率的时变特性、故障位置等不确定性等因素,用发电机组的发电计划描述系统运行状态<sup>[15]</sup>,用时变故障率描述线路和设备的时变故障特性,根据最大熵原理<sup>[16]</sup>(maximum entropy principle MEP)建立母线凹陷频次随机评估模型。以 IEEE-30 节点标准测试系统为例,用蒙特卡罗随机模拟法进行仿真,证明了所提出的方法能克服主观假设的不足,评估结果更符合客观实际,有一定理论价值和明显的工程应用前景。

## 1 凹陷频次影响因素的不确定性

### 1.1 故障位置的不确定性

电力系统中,尤其是输配电线路上的故障位置受天气条件、绝缘体污染、动物接触等多因素影响<sup>[4]</sup>,具有不确定性。实际中,由于历史数据有限或不准确,大多认为线路故障位置沿线路随机分布,并主观假设其服从均匀、正态、指数等不同分布规律<sup>[4]</sup>,这样的主观假设如果不准确对评估结果影响很大。

最大熵方法(MEP)已被证明是最不依赖于主观假设的随机分析方法,并在电力系统得到了广泛应

用<sup>[17~19]</sup>。该方法直接从样本出发,无需对随机分布规律作任何假设,且适用于小样本估计。利用有限的样本数据,基于 MEP 建立不依赖于主观假设的线路故障位置随机评估模型,以此评估线路故障对凹陷频次的影响。

### 1.2 用发电计划描述的系统运行方式不确定性

系统运行状态是影响电压凹陷频次的主要原因之一。传统随机估计方法假设系统运行状态不变,认为给定电压耐受水平下的脆弱区域(凹陷域)固定。用发电机运行计划描述系统运行状态,对给定电压水平下,凹陷域随运行方式的变化改变。实际系统中,发电机运行状态常可用长期发电计划、短期发电计划和实时经济调度发电计划<sup>[15]</sup>描述。机组的电压控制策略、内部序阻抗对正常和故障时母线电压影响很大。研究表明,靠近大型发电机组的母线上的凹陷次数少<sup>[13]</sup>。在凹陷评估过程中,为提高精度,把长期发电计划分成一年内每月或周共 12 或 52 种运行状态<sup>[15]</sup>,相邻时段内相同状态进行归并后得出可能运行状态,以此确定待评估母线上给定电压水平对应的凹陷域,凹陷域随运行状态变化,更符合实际。表 1 给出了某系统的月度发电计划。该系统有 5 台机组,时间间隔为月,“1”表示机组运行,“0”表示停机。合并相邻时段的相同状态(2 和 3、5 和 6、8 和 9),该系统共 9 种运行状态。

表 1 某系统年度发电计划

发 电 机	月 份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
G1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
G2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1
G3	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1
G4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G5	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1

### 1.3 时变特性引起的故障率不确定性

线路、母线等的故障率是影响电压凹陷的重要因素。现有评估方法认为母线、线路的故障率在评估期内保持不变,取年平均故障率。实际中,故障率受季节、雷击、大风和降雨等气候条件,以及季节、地理位置等影响<sup>[4,15]</sup>,仅取年平均故障率可能引起评估误差。考虑故障率的不确定性,引入天气因子<sup>[15]</sup>,即根据年度天气统计值,定义不同季节内不良天气的比例,如图 1,以此判定 T 时刻的时变故障率  $\lambda(T)$ :

$$\lambda(T) = W(T)\lambda_a \quad (1)$$

$$W(T) = T_a / T_s \quad (2)$$

式中,  $W(T)$  为天气因子;  $\lambda_a$  为统计所得年均故障率;  $T_a$  为某季节内不良天气天数;  $T_s$  为该季节总天数。

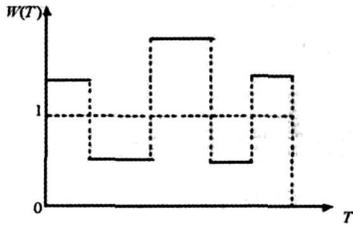


图 1 天气因子示意图

采用年均故障率时, 确定的凹陷域内, 凹陷频次不变, 引入时变故障率后, 凹陷频次随故障率变化而改变, 更符合实际。

## 2 考虑不确定因素后凹陷频次的随机评估

系统凹陷频次取决于不同发电机运行状态下凹陷域、线路和母线故障率以及线路故障位置的随机分布。设发电计划以一年 12 个月平均分布 (根据实际可以采取其他分布), 则月凹陷频次和年凹陷频次计算如下:

(1) 对于各发电计划模式, 根据不同故障类型 (单相接地、两相相间、两相接地及三相故障, 分别表示为  $i=1, 2, 3, 4$ ) 和各相 (分别用  $j=1, 2, 3$  表示) 分别确定凹陷域, 计算各凹陷域内线路总长度及母线数。

(2) 根据天气因子确定时变故障率的分布规律, 则第  $M$  月的故障率为:

$$R_B(M) = \frac{\int_{T_{start}}^{T_{end}} \lambda_B(T) dT}{12} \quad (3)$$

$$R_L(M) = \frac{\int_{T_{start}}^{T_{end}} \lambda_L(T) dT}{12} \quad (4)$$

式中,  $R_B(M)$  为第  $M$  月的母线故障率;  $R_L(M)$  为第  $M$  月的线路故障率;  $\lambda_B(T)$  为母线时变故障率;  $\lambda_L(T)$  为线路时变故障率;  $T_{start}$  为第  $M$  月开始时刻;  $T_{end}$  为第  $M$  月结束时刻。

(3) 根据最大熵原理确定线路故障位置的随机分布规律。

最大熵模型如下:

$$\text{Max } H(X_i) = -\sum_{i=1}^r P(X_i) \ln P(X_i) \quad (5)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^r P(X_i) = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^r iP(X_i) = E_1 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^r (i - E_1)^h P(X_i) = E_h \quad (8)$$

( $h = 2, 3, 4, 5; t = 1, 2, 3, \dots, r$ )

式中,  $X_i$  为随机变量  $X$  的可能取值;  $r$  为随机变量数;  $P(X_i)$  为随机变量取  $X_i$  时的概率值;  $E_1, E_h$  分别为线路故障区间样本数据的第 1 阶原点矩和第  $h$  阶中心矩。详见文献 [18]。

(4) 针对不同发电模式对应的凹陷域和各评估时段内线路、母线故障率、线路故障位置分布, 分别计算母线和线路故障引起的凹陷频次。

第  $M$  月不对称故障 ( $i=1, 2, 3$ ) 引起的给定电压耐受水平下母线  $m$  各相 ( $j=1, 2, 3$ ) 发生凹陷频次总和为:

$$\text{VSF}(M)_{UF} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left[ \sum_{B_{ij} \in S_B} R_{B_{ij}}(M) + \sum_{L_{ij} \in S_L} P_k R_{L_{ij}}(M) \right] \quad (9)$$

式中,  $\text{VSF}(M)_{UF}$  为不对称凹陷总频次;  $B_{ij}, L_{ij}$  为第  $i$  类故障第  $j$  相凹陷所对应的母线和线路;  $S_B, S_L$  分别为相应脆弱区域内母线和线路的全体;  $P_k$  为第  $k$  条线路故障区间随机分布概率值。

第  $M$  月对称故障 ( $j=4$ ) 仅考虑任何一相, 则发生电压凹陷频次为:

$$\text{VSF}(M)_{BF} = \sum_{B_{i4} \in S_{B41}} R_{B_{i4}}(M) + \sum_{L_{i4} \in S_{L41}} P_k R_{L_{i4}}(M) \quad (10)$$

式中,  $\text{VSF}(M)_{BF}$  为第 1 相的对称凹陷频次;  $B_{i4}, L_{i4}$  为对称故障对应的母线和线路;  $S_{B41}, S_{L41}$  为第  $M$  月第 1 相对称故障脆弱区域内母线和线路全体。

假设各相凹陷概率相等, 第  $M$  月内某一相的凹陷频次  $\text{VSF}_{sp}(M)$  为:

$$\text{VSF}_{sp}(M) = \frac{\text{ESF}_{UF}(M)}{3} + \text{ESF}_{BF}(M) \quad (11)$$

全年 12 个月的凹陷频次  $\text{TVSF}_{sp}$  为:

$$\text{TVSF}_{sp} = \sum_{M=1}^{12} \text{VSF}_{sp}(M) \quad (12)$$

## 3 算例仿真

### 3.1 IEEE-30 节点标准测试系统

利用前面提出的评估模型和方法, 对如图 2 所示

的 IEEE-30 节点标准测试系统进行仿真分析。测试系统由 6 台发电机组、30 条母线、37 条线路和 4 台变压器组成,其中变压器为 Y/Y<sub>0</sub> 接线方式。详细的线路数据见文献 [15], 发电机正、负、零序阻抗分别为  $\rho. 3$ 、 $\rho. 3$  和  $\rho. 05$ 。

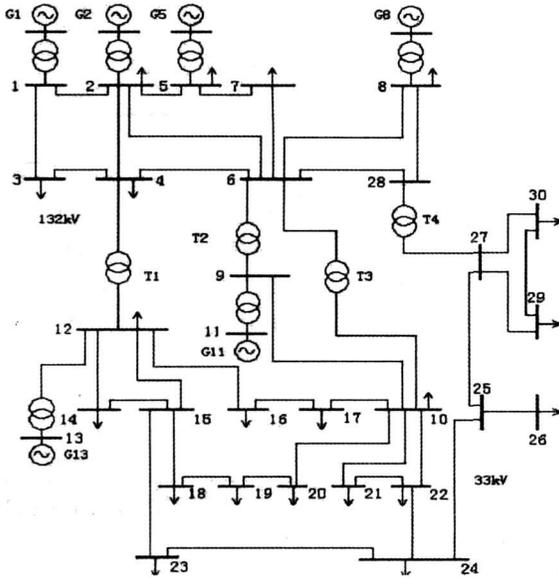


图 2 IEEE-30 节点标准测试系统

### 3.2 故障信息的蒙特卡罗模拟

用蒙特卡罗法模拟系统中线路发生短路故障的随机性。考虑三相故障、单相接地故障、两相相间故障、两相接地四类故障, 概率分别取 5%、70%、15%、10% [20]。故障类型、故障率和线路故障位置的蒙特卡罗模拟见文献 [18]。

### 3.3 仿真条件

为说明方法的合理性, 考虑 3 种仿真条件:

(1) 测试系统中发电机全部运行, 且线路和母线故障率取年平均故障率。

(2) 考虑发电机运行计划, 线路和母线故障率仍取年平均故障率。其中, 发电机运行计划如表 2 以两个月为时间间隔, 系统 6 种运行状态。

表 2 IEEE-30 节点标准测试系统的年发电机运行计划

发电机	S1	S2	S3	S4	S5	S6
G1	1	1	0	1	1	0
G2	1	1	1	0	1	1
G5	0	1	1	1	0	1
G8	1	0	1	1	0	1
G11	1	1	1	0	1	1
G13	1	0	1	1	0	1

(3) 综合考虑发电计划、线路和母线时变故障率。其中, 天气因子如图 3。

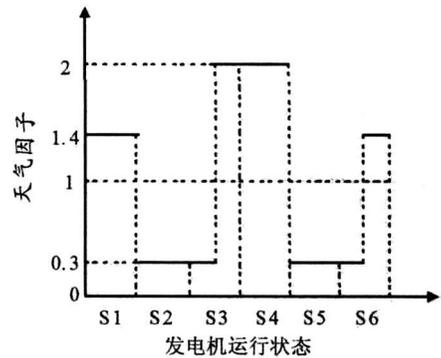


图 3 IEEE-30 标准测试系统的天气因子示意图

## 4 仿真结果

假设测试系统线路、母线年均故障率分别为 100 次/年、5 次/年。随机选择母线 15, 评估该母线发生凹陷的频次。评估结果见表 3~表 5。

表 3 仿真条件 1 下母线 15 中某一相的凹陷频次

电压区间 (p.u.)	凹陷频次 (次)
0.8~0.9	2.713
0.7~0.8	7.791
0.6~0.7	9.300
0.5~0.6	8.963
0.4~0.5	3.280
0.3~0.4	0.876
0.2~0.3	0.161
0.1~0.2	0.238

仿真条件 2 主要研究系统不同运行状态对凹陷频次的影响。不同的发电计划对应的凹陷域不同。从表 4 可见, 当仅考虑年均故障率时, 当发电计划相同时, 如 S3 与 S6, 凹陷频次相同; 反之, 发电计划不同时, 如 S1~S5, 不同电压区间下的凹陷频次相差很大。从表 3、表 4 可知, 系统故障时, 母线 15 的电压幅值在 0.7~0.8 p.u 变化时, 基于仿真条件 1 和 2 的评估结果分别为 7.791 和 4.075, 其他电压区间类似。可见, 发电计划对母线凹陷频次评估结果影响很大, 考虑不同发电计划更符合实际。

仿真条件 3 考虑了发电计划和时变故障率对凹陷频次的影响。用天气因子及年均故障率描述时变故障率, 得 6 个时间段内线路和母线的故障总数分别为 8.156、1.750、6.710、11.666、1.750 和 4.960。由表 5 知, S3 与 S6 的发电计划相同, 采用时变故障率时, 由于所处季节不同, 评估结果也不同。从表 4、表

表 4 仿真条件 2 下母线 15 中某一相的凹陷频次

电压区间 (p.u.)	S1(次)	S2(次)	S3(次)	S4(次)	S5(次)	S6(次)	总凹陷频次(次)
0.8~0.9	0.375	0.382	0.328	0.368	0.268	0.328	2.049
0.7~0.8	1.035	0.119	1.177	0.404	0.163	1.177	4.075
0.6~0.7	1.857	0.390	1.780	1.575	0.152	1.780	7.534
0.5~0.6	1.414	1.404	1.358	1.932	1.229	1.358	8.695
0.4~0.5	0.721	1.394	0.746	0.834	1.065	0.746	5.506
0.3~0.4	0.166	1.353	0.177	0.514	1.812	0.177	4.199
0.2~0.3	0.030	0.591	0.029	0.061	0.745	0.029	1.485
0.1~0.2	0.038	0.162	0.038	0.033	0.355	0.038	0.664

表 5 仿真条件 3 下母线 15 中某一相的凹陷频次

电压区间 (p.u.)	S1(次)	S2(次)	S3(次)	S4(次)	S5(次)	S6(次)	总凹陷频次(次)
0.8~0.9	0.524	0.115	0.377	0.736	0.080	0.279	2.111
0.7~0.8	1.449	0.036	1.353	0.809	0.049	1.000	4.696
0.6~0.7	2.599	0.117	2.046	3.150	0.046	1.513	9.471
0.5~0.6	1.980	0.421	1.562	3.863	0.369	1.155	9.350
0.4~0.5	1.009	0.418	0.858	1.668	0.320	0.634	4.907
0.3~0.4	0.232	0.406	0.203	1.027	0.544	0.150	2.562
0.2~0.3	0.042	0.177	0.034	0.122	0.224	0.025	0.624
0.1~0.2	0.053	0.049	0.044	0.067	0.107	0.032	0.352

5 可知,各电压区间下 S1~S6 时段内凹陷频次及总凹陷频次相差很大,证明线路和母线的故障率对凹陷频次影响很大。

用蒙特卡罗法随机生成故障位置分布规律未知的故障信息时,传统方法基于主观假设,缺乏足够依据,且不同的概率假设对结果影响很大。由于采用最大熵评估模型,避免了主观假设的不足。3 种仿真条件下的仿真结果如表 6 表中误差 ( $d\%$ ) 为:

$$d\% = \frac{|h_a - h_b|}{h_b} \times 100\% \quad (9)$$

式中,  $h_a$  为各电压区间内基于 MEP 所得总凹陷频次;  
 $h_b$  为蒙特卡罗法仿真生成总凹陷频次的平均值。

由表 6 可知,不同的仿真条件下,该方法对随机选择的母线 15 的凹陷频次评估结果的最大误差仅为 3.43%, 有效地克服了主观假设的不足,能正确反映

不同发电计划、时变故障率对评估结果的影响,评估结果的准确性高。

## 5 结 论

综合考虑电力系统运行状态、线路和母线故障率、故障位置等电压凹陷影响因素的不确定性,用发电计划描述系统运行状态,引入天气因子,用线路和母线时变故障率表示系统故障率的不确定性,用最大熵原理提取线路故障位置的随机分布规律,提出一种更客观的电压凹陷频次随机评估方法。针对不同发电计划、线路和母线故障率随季节变化、不同故障类型、故障位置的随机性等情况,对 3 种不同情况进行仿真,结果证明,该方法的评估结果更符合工程实

表 6 不同仿真条件下母线 15 凹陷频次及误差

电压区间 (p.u.)	仿真条件 1			仿真条件 2			仿真条件 3		
	平均值(次)	评估值(次)	误差(%)	平均值(次)	评估值(次)	误差(%)	平均值(次)	评估值(次)	误差(%)
0.8~0.9	2.714	2.713	0.04	2.037	2.049	0.59	2.106	2.111	0.24
0.7~0.8	7.842	7.791	0.65	4.170	4.075	2.28	4.778	4.696	1.72
0.6~0.7	9.307	9.300	0.08	7.487	7.534	0.63	9.419	9.471	0.55
0.5~0.6	8.914	8.963	0.55	8.705	8.695	0.12	9.315	9.350	0.38
0.4~0.5	3.279	3.280	0.03	5.550	5.506	0.79	4.988	4.907	1.62
0.3~0.4	0.867	0.876	1.04	4.092	4.199	2.62	2.477	2.562	3.43
0.2~0.3	0.161	0.161	0	1.525	1.485	2.62	0.646	0.624	3.41
0.1~0.2	0.239	0.238	0.42	0.643	0.664	3.27	0.343	0.352	2.62

(下转第 64 页)

[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(6): 45—49.

[5] 方兴, 郭志忠. 配电网时变无功电压优化方法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 40—44.

[6] 吴文传, 张伯明. 能量损耗最小的无功补偿动态优化算法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 68—73.

[7] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]. IEEE International Conference on Neural Networks Perth Australia 1995, 4: 1942—1948.

[8] 袁晓辉, 王乘, 张勇传, 等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28(19): 14—19.

[9] Mantawy A H, Al-Ghandi M S. A new reactive power optimization algorithm [C]. IEEE Bologna Power Tech Conference Bologna, Italy, 2003(4): 1—6.

[10] 唐剑东, 熊信银, 吴耀武, 等. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 81—84.

作者简介:

包永金 (1975—), 男, 宜宾电业局营销部配网运行工程师, 主要从事配电网的研究和管理工作。

(收稿日期: 2008—10—10)

(上接第 22 页)

际, 评估精度较高, 具有一定的理论价值和明显的工程应用价值。如何进一步研究和开发满足真实系统所需的评估系统, 是值得继续研究的重要课题。

参考文献

[1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[2] 王宾, 潘贞存, 徐丙垠. 配电系统电压跌落问题的分析 [J]. 电网技术, 2004, 28(2): 56—59.

[3] 陶顺, 肖湘宁, 刘晓娟. 电压暂降对配电系统可靠性影响及其评估指标的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 63—69.

[4] Milanovic J V, Aung M T, Gupta C P. The influence of fault distribution on stochastic prediction of voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 278—285.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 赵剑锋, 王浔, 潘诗锋. 用电设备电能质量敏感度测试系统研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 32—37.

[10] Pema C D, Olgun G, Verde P, et al. On probabilistic system indices for voltage dips [C]. 2004 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems Ames USA, 2004, 9: 796—800.

[11] Martínez J A, Martín-Amedo J. Voltage sag stochastic prediction using an electromagnetic transients program [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1975—1982.

[12] Bollen M H J. Fast assessment method for voltage sags in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications 1996, 32(6): 1414—1423.

[13] Qader M R, Bollen M H J, Allan R N. Stochastic prediction of voltage sags in a large transmission system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications 1999, 35(1): 152—162.

[14] Moschakis M N, Hatziangyrio N D. Analytical calculation and stochastic assessment of voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1727—1734.

[15] Chang-Hyun Park, Gilsoo Jang, Thomas R J. The influence of generator scheduling and time-varying fault rates on voltage sag prediction [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2008, 23(2): 1243—1250.

[16] 王彬. 熵与信息 [M]. 西安: 西北工业出版社, 1994.

[17] 朱成骥, 孙宏斌, 张伯明. 基于最大信息熵原理的短期负荷预测综合模型 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 1—6.

[18] 马超, 肖先勇, 李勇. 线路故障引起电压凹陷的频次最大熵评估 [J]. 中国电机工程学报 (已录用).

[19] 姚建刚, 付维生, 陈庆祺, 等. 电力市场中电价与能源及环境保护的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 71—75.

[20] Juarez E E, Hernandez A. An analytical approach for stochastic assessment of balanced and unbalanced voltage sags in large systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1493—1500.

作者简介:

马超 (1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 电能质量及其控制技术。

肖先勇 (1968—), 男, 副教授, 长期从事电能质量及其控制技术的教学与研究。

(收稿日期: 2008—12—08)

# 推进特高压电网建设 服务四川经济发展

朱国俊, 蒋 乐

(四川省电力公司, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 发展特高压电网有着巨大的经济效益和社会效益。2008 年, 是四川特高压电网建设快速发展的一年。文章对特高压电网建设进行了分析和研究。

**关键词:** 特高压; 输电技术; 电网建设

**Abstract:** Developing UHV power grid has a good economic benefit and social benefit. In the year of 2008, the UHV power grid of Sichuan has a rapid development. And the construction of UHV power grid is analyzed and studied.

**Key words:** UHV; power transmission technology; power grid construction

**中图分类号:** TM721 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0023-05

2008 年年底, “晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 特高压试验示范工程”将试运投产; 向家坝—上海±800 kV 特高压直流送出工程正加紧施工; 锦屏—苏南±800 kV 特高压直流送出工程已经启动。自国家电网公司提出特高压发展战略以来, 对于发展特高压输电的必要性和可行性已经经过了充分的讨论和严格的论证, 但是, 对于特高压输电对地方经济发展的作用和意义研究不多, 在工程建设的实施过程中, 相关各方对此的了解不多。因此, 非常有必要进行分析和探讨。

## 1 特高压输电契合四川经济发展需要

### 1.1 四川水电送出需要大通道

四川水力资源丰富, 是中国水电能源基地建设的大省。全省技术可开发量为 120 GW, 占全国的 22%; 经济可开发量为 103 GW, 占全国的 26%; 技术可开发量和经济可开发量均居全国第一位; 省委、省政府非常重视水电资源开发, 2000 年确定为西部开发战略的主导产业, 在“十一五”期间, 省委、省政府已将水电列为全省的一大支柱产业推出。本届政府又在原来的基础上作了进一步规划: 四川要建全国最大的水电能源基地, 要把省内这些重点工程都建成水电开发的标志性工程。据统计, 四川省境内目前开展前期项目的水电站装机, 已经超过了 40 GW。仅在金沙江一条江上, 即规划有 20 座梯级电站, 总装机容量高达 60 GW, 这些项目绝大多数将在“十一五”期间开工建设。“十一五”期间, 四川新增水电装机容量力

争超过 15 GW; 到 2010 年年底, 全省水电装机容量达到 30 GW 左右, 川电外送能力达到 6 GW; 到 2020 年年底, 全省水电装机容量达 73 GW 左右, 川电外送能力将达到 33 GW 左右。目前全省在建水电项目约 70 座, 主要有溪洛渡、向家坝、锦屏一级、锦屏二级、官地、瀑布沟、深溪沟、龙头石、沙湾、狮子坪、柳洪、坪头、仁宗海、金窝、大发、大岗山、沙坪、灵关、偏桥等, 在建规模约 34 GW。

四川水电的开发, 无论是庞大投资对相关产业的拉动还是税收的增加, 对四川国民经济的发展都将做出巨大的贡献。但是, 要把四川的水电资源优势变为经济优势, 实现四川水电大发展的关键还在于解决川电外送的输电通道的建设。按照 2020 年外送 33 GW 的规模, 采用现有 500 kV 电压等级需要 30 多条通道, 这既不经济, 也使现有土地资源难以承受, 输电大通道需要特高压。

### 1.2 四川电源和电网结构改善需要大联网

由于四川能源资源以水电为主, 多年来, 四川电源结构一直呈现出“三多三少”(水电多, 火电少; 丰期多, 枯期少; 小机组多, 大机组少)的局面。从电源结构上, 到 2020 年, 四川水、火电比例将达到 85 : 15, 丰水期水火电出力比例将达到 90 : 10, 这样的结构难以满足电网的稳定要求, 必须将大量水电外送, 为四川火电和核电的发展换来容量空间。

在电网结构方面, 虽然近年来电网建设加快, 电网结构有所加强, 但是电网稳定水平低, 电网线路输送能力偏低; 尤其是川电外送通道少, 送电裕度不足。在四川大型水电建成后, 更是无法满足大规模水电外

送的要求。所以,构建以特高压为骨干网、500 kV 为主干网,与华中、华东、西北多通道联网的大电网是加强四川电网的必然选择。

### 1.3 四川电力交易和资源配置需要大平台

表 1 为四川 2010~2020 年的电力平衡预测表,从中即可看出,今后十年,四川富余电力外送要求十分巨大。

表 1 电力平衡表

四川	2010年		2015年		2020年	
	丰	枯	丰	枯	丰	枯
1 负荷水平	2 750	2 700	4 071		5 500	5 390
2 装机容量	4 752				10 092	
其中:水电	3 252		6 684		8 592	
火电	1 500		1 500		1 500	
3 电源出力	3 400	3 350	6 150	4 000	8 100	6 985
水电	2 600	1 950	5 350	8 184	7 300	5 585
火电	800	1 400	800	1 400	800	1 400
4 电力盈亏	+650	+650	+2 080	+1 500	+2 600	+1 593

从四川省内电力市场需求预测看,今后一段时期,四川水电在省内是无法完全消纳的,也是国家能源战略所不许可的。必须将相当大一部分送出省外,才是实现变资源优势为经济优势的唯一出路。

同时,根据四川资源结构特点,随着国民经济发展,在枯水期,在发生大的灾害和四川电网故障时,同样需要从省外获得电力支援。在今年“5.12”大地震期间,四川获得的支援就是明证。因此必须通过特高压电网,构筑全国范围内资源配置和电力交易的平台。

国家电网公司根据能源资源优化配置的总体布局,提出了配合四川水电开发,建设特高压输电的战略规划。把四川建成全国水电能源基地,对促进四川经济的跨越式发展,具有十分重大的战略意义和现实意义。

## 2 四川特高压电网规划概况

### 2.1 溪洛渡、向家坝水电站外送直流特高压电网规划

金沙江一期的溪洛渡、向家坝电站是金沙江干流最下游的两个联系紧密、效益互补的梯级电站,溪洛渡电站装机 18×700 MW,总容量为 12.6 GW,向家坝电站装机 8×750 MW,总容量为 6 GW,两电站总装机容量为 18.6 GW,是中部西电东送的重要电源,2020 年前全部投产,电力主要送往华中和华东电网。

为满足溪洛渡、向家坝水电站电力外送需要,金

沙江一期溪洛渡和向家坝送出工程将采用 2 回 ±800 kV 特高压直流线路送出,其中向家坝复龙换流站至上海奉贤换流站 1 回、溪洛渡左岸双龙换流站至浙西换流站 1 回至华东电网,分别于 2011 年和 2016 年建成投运,溪洛渡右岸罗场换流站至南方电网换流站 1 回至南方电网,2014 年建成投运。

### 2.2 锦屏等水电站直流外送特高压电网规划

雅砻江的锦屏一级电站装机 6×600 MW,总容量为 3.6 GW,锦屏二级电站装机 8×600 MW,总容量为 4.8 GW,官地电站装机 4×600 MW,总容量为 2.4 GW,三电站总装机容量为 10.8 GW。

根据电力电量消纳方案,锦屏一、二级和官地水电站有 7.2 GW 电力在华东消纳,2 GW 在重庆消纳,其余在四川消纳。华东消纳的 7.2 GW 电力通过 1 回西昌长村换流站至江苏同里换流站的 ±800 kV、输电能力 7.2 GW 的特高压直流线路输送,该输电工程预计在 2013 年建成投运。另有 1 回四川—湖南 ±660 kV 高压直流输电线路。

### 2.3 金沙江二期乌东德、白鹤滩等水电站外送直流特高压电网规划

金沙江二期乌东德电站装机 12×720.5 GW,总容量为 8.7 GW,白鹤滩电站装机 16×750 MW,总容量为 12 GW,两电站总装机容量为 20.7 GW。

为满足乌东德、白鹤滩水电站电力外送需要,将建设 3 回 ±800 kV 以上电压等级、输电规模为 6.4 GW 以上容量的特高压直流输电工程,其中 2 回至华东电网,1 回至华中电网,分别是乌东德换流站至福建泉州换流站 ±1 000 kV 1 回、白鹤滩换流站 1 站至鄂东换流站 1 回、白鹤滩换流站 2 至浙西换流站 1 回。

### 2.4 四川特高压交流电网规划

“十二五”期,为了满足 2020 年四川水电通过交流通道外送 18 GW 的要求,结合大渡河、雅砻江流域大型水电站接入系统研究成果,初步推荐 2020 年四川交流特高压外送方案采用双通道方案,即:四川电网内规划建设雅安、绵阳、乐山三座特高压变电站,重庆电网规划建设重庆特高压变电站和万县特高压变电站,规划建设南、北两个特高压交流外送通道:北通道为雅安—绵阳—万县—荆门双回特高压线路,南通道为雅安—乐山—重庆—恩施—长沙双回特高压线路。届时四川将有 4 回特高压交流输电线路及 3 座特高压变电站。

综上所述,到 2020 年中国将形成坚强的特高压

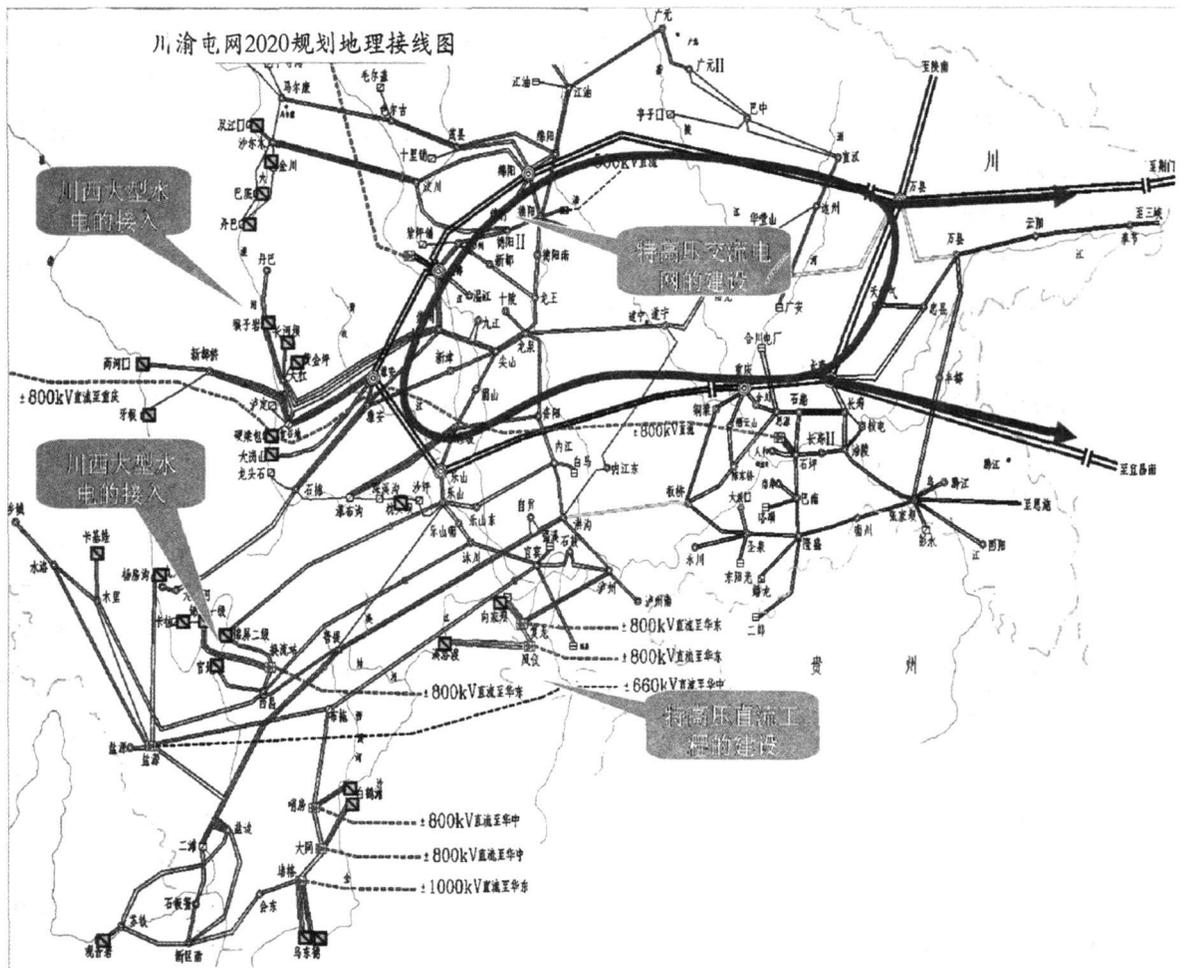


图 1 川渝电网 2020 年规划地理接线图

电网,届时,四川将有 7 回特高压直流输电线路及相应的 7 座特高压直流换流站和有 4 回特高压交流输电线路及 3 座特高压变电站(即“四交七直”的规模)。四川省在特高压电网建设中处于相当重要的地位,通过坚强的交直流特高压电网,四川电网将在跨大区、跨流域水火电互济、全国范围内能源资源优化配置中受益匪浅。

### 3 特高压输电利国利川

在电力建设和发展过程中,电源分布和电力传输的协调规划,是一个需要进行综合考虑的问题,既涉及资源在较大范围内的优化配置和有效利用,又涉及节约土地资源,节约投资,节省运行费用以及减少煤电对环境污染的影响等方面的问题。实践表明,随着用电需求的快速增长,不断发展更高电压等级的输电技术,对实现远距离、大容量输电,优化资源配置,降低环境影响具有重要意义。根据中国能源储备和电力负荷分布极不均衡的状况,发展特高压输电势在必

行,这不仅是国家能源战略的必然选择,对四川经济的发展也将发挥巨大的作用。

#### 3.1 有利于四川大水电能源基地战略地位的确立

四川作为全国水电资源最大的省份,其水电资源的开发和利用必须纳入全国能源总体规划。这一方面是全国能源资源优化配置需要;二是大规模水电的开发必须依赖于全国的资金和技术,举全国之力才能办到;三是仅在省内无法消纳如此多的电量,从电源结构和电源支撑的要求,只有外送也才能为四川火电和核电装机留出空间。因此,四川水电如何外送一直是长期研究的课题。采用特高压方式输电,使四川通过坚强庞大的特高压电网与华中、华北紧密联系起来,不仅是四川水电得以外送,变资源优势为经济优势,同时,四川作为在全国能源体系中的极其重要的大能源基地的作用将得以凸现,有利于四川在全国经济及能源战略地位的提升。

#### 3.2 有利于四川节省线路走廊和土地资源

输电线路走廊是指线路路径的通道,线路走廊宽度一般由地面电场强度满足有关要求来确定。输电

线路输送自然功率与电压的平方成正比,与线路的波阻抗成反比。用自然输送功率作为比较,采用 1 000 kV 特高压输电,一回 1 000 kV 的线路相当于五回 500 kV 线路。按照中国环保标准规定的线路走廊宽度,一回 1 000 kV 电压输电线路的走廊宽度约为五回 500 kV 线路走廊宽度的 40%。也就是说,输送同样的功率,采用 1 000 kV 线路输电与采用 500 kV 的线路相比,可节省 60% 的土地资源。±800 kV、6 400 MW 直流输电方案的线路走廊宽度约 76 m,单位走廊宽度输送容量约为 84 MW /m,是 ±500 kV、3 000 MW 方案的 1.3 倍。总体来看,特高压交流输电可节省约 2/3 的土地资源,特高压直流输电可节省约 1/4 的土地资源。

在四川规划的“四交七直”特高压线路,如果采用 500 kV 电压等级输电,将需要三十多条线路走廊。仅在四川境内,就可节省近 20 条 500 kV 线路走廊,按四川境内每条平均 300 km 计算,就可节约 300 (km)<sup>2</sup> 的土地资源,这是一笔难以想象的巨大财富。因此,发展特高压电网,可以显著提高线路走廊的输电效率,节约宝贵土地资源,实现电力工业的可持续发展。

### 3.3 有利于四川投资拉动和扩大就业

1) 投资的直接和间接拉动: 2006~2020 年,四川水电开发投资约 4 000 亿元,带动 GDP 增长数万亿元。2007~2020 年间,特高压输电通道及配套线路投资约 1 000 亿元,对带动相关产业的发展具有巨大的推动作用,必将拉动地区经济的大幅增长。

2) 税收的增加: 到 2010 年,电力销售可累计增加增值税和地方税 140 亿元。虽然目前输电电量税收还未与地方税收挂钩,但可增加电网公司的输电收入和税收,且相关各方也正在提出研究输电与沿线地方税收分享的可能和办法。

3) 创造就业机会: 中国科学院曾就锦屏一级水电站建设对四川省国民经济的拉动作用做过一项研究预测。报告指出,除了能推动四川省 5 000 亿左右的经济增长外,雅砻江水电开发还将带动就业。按照一年 260 个劳动日计算,雅砻江流域近 30 GW 装机的建设相当于提供了 115 万个就业机会,平均每年可安排约 7 万人就业。特高压输电上千亿的投资,必将为四川提供数十万个就业机会。

### 3.4 有利于四川电网的加强,并提供更为广阔的交易空间

1) 按照国网公司“一特四大”(特高压、大电网、大水电、大核电)发展战略,四川既是全国能源体系中的大水电基地,又是特高压电网的送端电源支撑点,在国家能源体系中占有十分重要的战略地位。在四川“四交七直”特高压电网建成后,四川电网将真正成为“特高压骨干网坚强可靠,500 kV 主干网结构完善,220 kV 支撑网覆盖广泛,城乡配电网安全经济”的多电压等级协调发展的大电网,打造为“东接三华(华中、华东、华北)、西纳新藏(新疆、西藏)、北联西北、南通云贵”的全中国电力交换大枢纽,构筑成跨省区、跨流域的“水火购送灵活、交换方便”的全中国电力资源配置大平台。

2) 特高压工程的建成,将进一步打开四川外送电、外购电的通道,大大促进四川电网与华中、华东电网交易电量,促进不同地域的水火互济和丰枯互济,并将对四川电网电力电量平衡和省公司的经济效益带来有利的影响。无论是在电力紧缺或电力富余时期,都将为四川电网和其它电网的电力互惠交易提供更为广阔的空间和手段。据预测,仅 2009 年,四川水电富余量约 7 TWh。由于晋东南—荆门特高压交流的联网投产,可解决 45 亿左右的富余水电量。在四川目前金沙江、雅砻江、大渡河流域的大水电发电后,外送输电的要求将更为急迫。在四川特高压网架全面建成后,完全可形成丰期送得出、枯期进得来的良好局面。按照国网公司安排,宜宾向家坝—上海特高压直流输电工程将在 2010 年实现双极投运,届时,四川电网除了由泸州提供特高压工程的调试电源外,在向家坝水电站全面建成投产之前,还可利用特高压通道,为四川电力外送、消纳富余电量做出贡献。

3) 发展特高压输电网,把送端和受端之间大容量输电的主要任务转到特高压输电上来,可减少输电网损,提高电网的安全性,使整个电力系统能继续扩大覆盖范围,有效地利用整个电网内各种可以利用的发电资源。另外,通过交流特高压同步联网,可以大幅度缩短电网间的电气距离,提高稳定水平,发挥大同步电网的各项综合效益,包括错峰、调峰、水火互济、互为备用和减少弃水电量等,增强网络功率交换能力,减少负荷中心地区的发电装机容量,实现全国范围内的能源资源优化配置。通过特高压电网,实现分层分区布局,还可以优化包括超高压在内的系统结构,从根本上解决短路电流超标的问题。

4) 特高压输电,不仅是一次革命性的电网升级,

也是一次世界性的重大创新,对四川相关产业和企业带来重要的发展机遇。在电力企业中,对设计院、试研院、送变电、铁塔厂、金具厂、电建公司来说都将是一个促进技术进步向电力高端发展的大好机会。利用特高压在四川的地域优势,抓住机遇,就将为今后的发展赢得更为广阔的空间。

综合考虑特高压输电技术的优越性,可以看出,

发展特高压电网有着巨大的经济效益和社会效益。中国经济飞速发展,发展特高压输电势在必行。发展特高压输电,对实现四川“工业强省”战略,对建设环境友好型、资源节约型的美好四川都将具有强大的推动作用。

(收稿日期:2008-12-30)

(上接第 17 页)

表 2 四出线时的模极大值情况及选线结果

故障类型	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	选线结果
20 km 处短路	0.224	0.222 9	3.034	0.222 4	线路 3
0.5 km 短路, 不考虑 C	$7.93e^{-2}$	$7.887e^{-2}$	$9.147e^{-1}$	$7.856e^{-2}$	线路 3
0.5 km 短路, 考虑 C	$7.447e^{-4}$	$7.459e^{-4}$	$7.44e^{-1}$	$7.576e^{-4}$	线路 3
母线处短路	$2.665e^{-3}$	$2.648e^{-3}$	$2.673e^{-3}$	$2.641e^{-3}$	母线

## 4 结 论

在对中性点非有效接地/不接地系统单相接地故障行波传输规律分析的基础上,提出了基于复小波变换的相电流行波选线算法。由于复小波的时移不变性克服了实小波变换结果的不稳定性,从而使本选线算法更可靠。本算法简单,仅需判定幅值即可,不必做大量计算,适于在线分析。实际变电站母线端都含有分布电容,而通过理论和仿真证明了分布电容对所提出的选线算法不但不影响选线效果,反而能增强选线灵敏度,从而使选线结果更准确。理论与仿真表明,本算法不受过渡电阻、补偿方式、故障相角和故障距离的影响,在各类出线线路类型相同的变电站均适用。

### 参考文献

[1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

[2] 郝玉山,杨以涵,任元恒. 小电流接地微机选线的群体比幅比相原理 [J]. 电力情报. 1994, 5(2): 15-19.

[3] 陈奎,唐轶. 小电流接地系统电弧接地选线方法的研究 [J]. 继电器. 2005, 33(16): 5-9.

[4] 桑在中,张慧芬,潘贞存. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护 [J]. 电力系统自动化. 1996, 20(2): 11-13.

[5] 徐青山. 电力系统故障诊断及故障恢复 [M]. 北京: 中

国电力出版社, 2007.

[6] 施慎行,董新洲,周双喜. 单相接地故障行波分析 [J]. 电力系统自动化. 2005, 29(23): 29-33.

[7] 张帆,潘贞存,等. 基于方向行波的小电流接地系统故障选线 [J]. 中国电机工程学报. 2007, 27(34): 70-75.

[8] 徐青山,陈锦根,唐国庆. 考虑母线分布电容影响的单端行波测距法 [J]. 电力系统自动化. 2007, 31(2): 70-73.

[9] 董新洲,毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究 [J]. 中国电机工程学报. 2005, 25(4): 1-6.

[10] 孔瑞忠,董新洲,毕见广. 基于电流行波的小电流接地选线装置的实验 [J]. 电力系统自动化. 2006, 30(5): 63-67.

[11] 毕见广,董新洲,周双喜. 基于两相电流行波的接地选线方法 [J]. 电力系统自动化. 2005, 29(3): 17-21.

[12] N. G. Kingsbury. Shift invariant properties of the dual-tree complex wavelet transform, in "Proc ICASSP 99, Phoenix AZ paper SPTM 3. 6, March 16 - 19, 1999."

### 作者简介:

周登登 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障诊断。

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

(收稿日期:2008-12-20)

# 基于对称分量法的变压器谐波传输特性研究

周 晋, 郭 蕾, 黄 军, 魏 光

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘 要:** 基于对称分量理论, 利用变压器的谐波模型, 对三相不平衡系统中的谐波传输进行了研究, 重点考察了变压器接线方式对谐波传输的影响; 并在此基础上, 提出了综合电压不平衡度。仿真和实测数据验证了对称分量理论在分析谐波与负序相互作用时的正确性和可行性。

**关键词:** 对称分量法; 变压器; 综合电压不平衡度

**Abstract:** Based on symmetrical component method, the harmonic transmission in unbalance three-phase system is studied by using transformer harmonic model. The influence of transformer connection mode on harmonic transmission is mainly analyzed. On this basis, total voltage unbalance degree is proposed. Finally, the accuracy and feasibility of symmetrical component method are verified by the simulation and the measured data in the case of analyzing the interaction of harmonics and negative sequence.

**Key words:** symmetrical component method; transformer; total voltage unbalance degree

**中图分类号:** TM401 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0028-04

随着高压直流输电的发展和各种电力电子装置的大量应用, 电力系统的非线性负荷部分越来越不容忽视, 使得谐波问题更加突出。对不平衡的三相系统, 由于系统自身的不对称或者负荷的不对称使得系统的谐波呈现明显的不对称性。目前一些文献都是将谐波和负序分开进行研究<sup>[1~3][7]</sup>, 而在实际中谐波和负序是紧密联系在一起, 尤其在谐波情况下其不对称性更加明显。变压器是电网中的重要传输器件之一, 采用对称分量法对其在不对称谐波下的特性进行了研究, 提出了综合不平衡度并通过仿真和实测数据验证了该参数在分析谐波与负序相互作用时的合理性和准确性。

## 1 理论基础

### 1.1 三相系统中的三类不对称

一般三相系统电气量可以表示成  $S_a(t)$ 、 $S_b(t)$  和  $S_c(t)$ ; 当三相电气量满足式 (1) 时, 称其为对称三相系统。

$$S_a(t) = S_b(t+T/3) = S_c(t-T/3) \quad (1)$$

从式 (1) 可以看出对称三相系统必须满足两个条件: 一是三相幅值相等; 二是三相相角满足 A 相超前 B 相  $1/3$  个周期, B 相超前 C 相  $1/3$  个周期。根据这两个对称条件可以将不对称系统分为三类, 见表 1。

表 1 三类不对称

类 型	不对称条件
第一类不对称	仅三相幅值不相等
第二类不对称	仅三相相角不循环 (A-B-C) 相差 $1/3$ 个周期
第三类不对称	三相幅值不相等, 且三相相角不循环 (A-B-C) 相差 $1/3$ 个周期

### 1.2 三种类型的谐波

以电压为例, 假设其平均值为零, 三相系统的电压通过傅里叶变换可以表示成以下形式,

$$\begin{cases} u_a(t) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N U_a^k \cos(k\omega t + \alpha_a^k) \\ u_b(t) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N U_b^k \cos[k(\omega t - \frac{2}{3}\pi) + \alpha_b^k] \\ u_c(t) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N U_c^k \cos[k(\omega t + \frac{2}{3}\pi) + \alpha_c^k] \end{cases} \quad (2)$$

根据  $k$  的不同取值, 谐波可分为 3 种类型: 正序性、负序性和零序性, 如表 2 所示。

表 2 谐波的类型

谐波次数 ( $k$ )	角速度	性质
$3n$	$3n\omega$	零序性
$3n+1$	$(3n+1)\omega$	正序性
$3n+2$	$(3n+2)\omega$	负序性

### 1.3 对称分量法和综合电压不平衡度

对于不对称的畸变三相系统, 可以先通过傅里叶变换将每相的基波和谐波提取出来, 再通过对称分量

法逐次分解为正序分量、负序分量和零序分量,即

$$u_r^k = Tu^k = [U_{T1}^k \ U_{T2}^k \ U_{T3}^k]^T \quad (3)$$

其中,  $u^k = [U_a^k \ U_b^k \ U_c^k]^T$ , 表示 a、b、c 三相的 k 次谐波电压。

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 式中 } \alpha = e^{j120^\circ}$$

$U_{T1}^k$ 、 $U_{T2}^k$ 、 $U_{T3}^k$  分别表示 k 次谐波的正序分量、负序分量和零序分量。

对于不同类型的谐波, 定义了平衡电压、不平衡电压和综合电压不平衡度, 其计算式分别为式 (4)、式 (5) 和式 (6)。

平衡电压: 基波和正序性谐波的正序电压、负序性谐波的负序电压和零序性谐波的零序电压。

不平衡电压: 基波与正序性谐波的负序与零序电压、负序性谐波的负序电压与零序电压以及零序性谐波的零序电压和负序电压。

综合电压不平衡度: 不平衡电压所占平衡电压的百分比。

$$U^b = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} [(U_{T1}^{3n+1})^2 + (U_{T2}^{3n+2})^2 + (U_{T3}^{3n+3})^2]} \quad (4)$$

$$U^{ub} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} [(U_{T2}^{3n+1})^2 + (U_{T3}^{3n+1})^2 + (U_{T2}^{3n+2})^2 + (U_{T3}^{3n+2})^2 + (U_{T1}^{3n+3})^2 + (U_{T2}^{3n+3})^2]} \quad (5)$$

$$UBD = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{U_{ubn}^2}{U_{ln}^2} \right)} \quad (6)$$

#### 1.4 谐波阻抗和 $\Delta$ 接法的影响

许多文献介绍了变压器的谐波阻抗<sup>[4~7]</sup>, 一致认为变压器的阻抗随频率的变化关系为  $Z_{Tn} = \sqrt{h}R_{T1} + jhX_{T1}$ 。式中, h 为谐波次数;  $R_{T1}$  为变压器的基波电阻;  $X_{T1}$  为变压器的基波电抗。在假设三相变压器绕组对称的前提下, 提出了变压器的等效单相阻抗模值

$Z_{eq}$ , 用此值可以评价变压器损耗与谐波次数之间的关系。

$$Z_{eq} \text{ 的定义式为: } Z_{eq} = \frac{U_{eq}^2}{S_{in} - S_{out}} \quad (7)$$

式中,  $U_{eq}$  表示等效单相电压 ( $U_{eq} = \frac{1}{3} \sqrt{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2}$ );  $S_{in}$  表示变压器输入的视在功率;  $S_{out}$  表示变压器输出的视在功率。

变压器  $\Delta$  接法主要对零序电流起到阻断的作用, 由于零序电流是同相的, 在变压器的  $\Delta$  接绕组内形成环流, 以致于经过  $\Delta$  接的变压器将不会出现零序电流。所以零序电流对变压器的损耗有很大的贡献。

## 2 仿真验证

应用 Matlab/Simulink 进行了仿真试验, 仿真图如图 1 所示。

其中, 谐波电流源内阻为  $1 \Omega$ , 内感为  $10^{-3} L$ ; 等效系统内阻为  $1 \Omega$ , 内感为  $10^{-3} H$ ; 变压器容量为 250 MVA, 额定电压 110/10.5 kV, 绕组电阻 0.004 pu, 电感 0.08 pu。当变压器分别为  $Y_g/Y_g$  接法和  $Y_g/\Delta$  接法时, 根据式 (7) 可以算得变压器的等效谐波阻抗见表 3。

由表 3 可见, 当变压器为  $Y_g/Y_g$  接法时, 其等效阻抗随频率的增加而增加, 基本符合线性特性; 当变压器为  $Y_g/\Delta$  接法时, 3、6、9 次谐波的阻抗比其他次数的阻抗大得多, 甚至相差 3 个数量级, 这说明在三相对称谐波下,  $\Delta$  接法对零序性电流有很强阻断作用。

图 1 中变压器采用了  $Y_g/\Delta$  接法, 对 3 次谐波电流源的三类不对称分别进行了仿真, 仿真结果见图 2~图 5 和表 5。其中, 图 2~图 5 为选取 A 相为例时的仿真图; 表 5 中的电流为变压器次边三相电流的有效值。

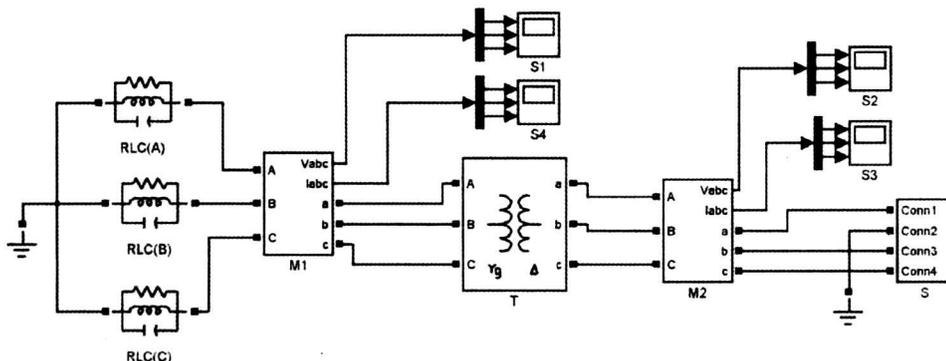


图 1 Matlab/Simulink 仿真图

表 3 变压器的等效谐波阻抗  $Z_{eq}$

谐波次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Y_g/Y_g$ 接时的 $Z_{eq}$	0.217	0.421	0.647	0.843	1.069	1.238	1.478	1.631	1.938	2.092
$Y_g/\Delta$ 接时的 $Z_{eq}$	0.218	0.453	164.0	0.881	1.094	13.48	1.554	1.794	22.10	2.257

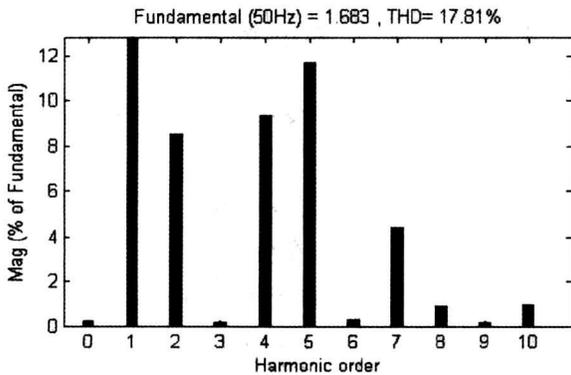


图 2 三相对称谐波下的高压侧 A 相谐波含量

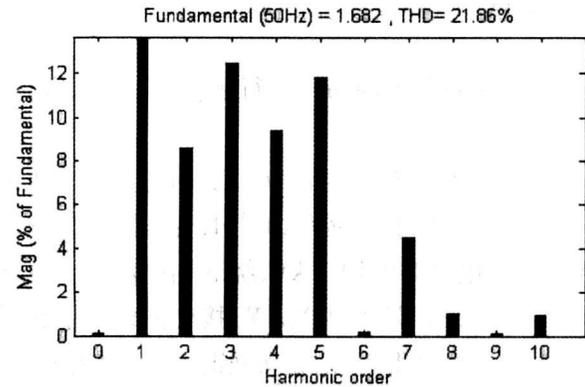


图 3 第一类不对称情况下的高压侧 A 相谐波含量

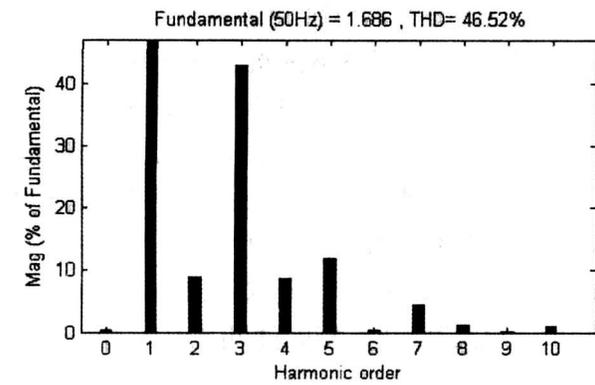


图 4 第二类不对称情况下的高压侧 A 相谐波含量

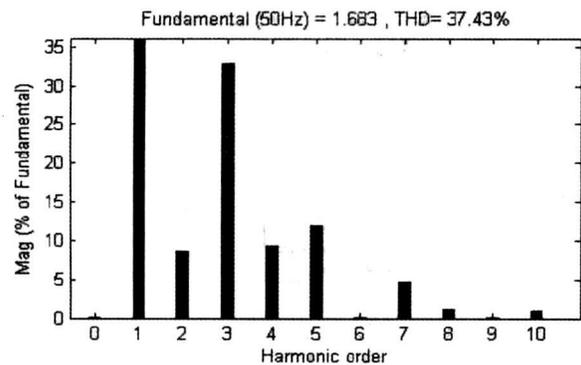


图 5 第三类不对称情况下的高压侧 A 相谐波含量

表 4 三类不对称谐波情况下变压器高压侧三相电流的理论值与实际值的比较

分类	理论计算值 (A)	仿真值 (A)	误差 (%)	
第一类不对称	a相	3.72	3.72	0
	b相	1.86	1.85	0.54
	c相	1.86	1.87	0.54
第二类不对称	a相	12.88	12.66	1.71
	b相	6.44	6.35	1.40
	c相	6.44	6.31	2.02
第三类不对称	a相	9.84	9.73	1.12
	b相	4.92	4.87	1.02
	c相	4.92	4.86	1.22

注:理论计算值是三相电流分别扣除零序电流以后的有效值。

从图 2 与图 3、4、5 的比较可以看出:3 种不对称情况下,变压器高压侧的 3 次谐波含量都很高,这表明  $\Delta$  接法只能阻断 3 次谐波的平衡部分,不平衡部分依然可以通过。由表 4 可以看出:将电流减去其零序部分即为理论计算值,其值与仿真值的相对误差很小,从而说明采用对称分量法分析不对称谐波是合理的、准确的;谐波不对称对相角的敏感度比对幅值的敏感度要大,因为仿真中第一类不对称情况下误差最小,第三类次之,第二类最大。

### 3 实测数据验证

对四川省江油牵引变电所主变压器的高压侧三相电压进行了 24 h 的实时监测,包括基波和 2~20 次谐波。通过对称分量法,可以得到各次谐波的序电压,由于文章篇幅有限,只列出了 2~5 次谐波的序电压图,分别见图 6~图 8。

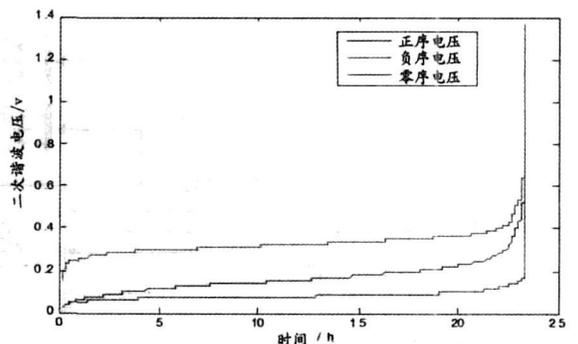


图 6 2 次谐波的序电压

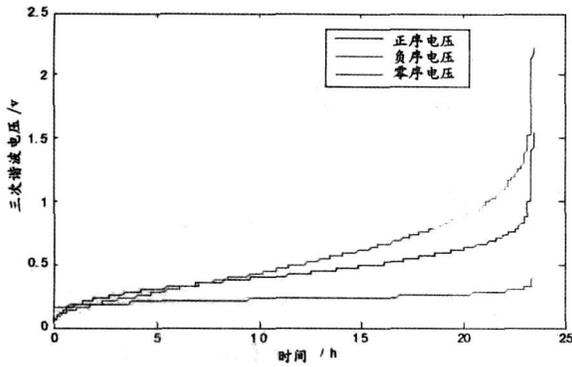


图 7 3 次谐波的序电压

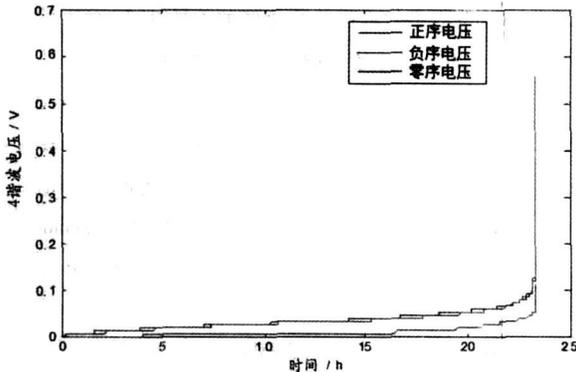


图 8 4 次谐波的序电压

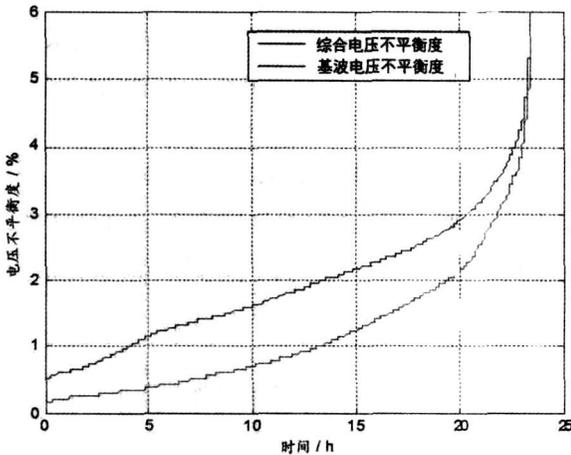


图 9 综合电压不平衡度与基波电压不平衡度的比较

表 5 2~5 次谐波序电压的统计值

谐波次数	2 次		3 次		4 次		
	平均值	95% 概率大值	平均值	95% 概率大值	平均值	95% 概率大值	
电压幅值	正序	0.163 6	0.288 9	0.440 4	0.743 3	0.036 1	0.072 1
	负序	0.329 9	0.405 4	0.544 4	1.135 5	0.035 6	0.070 0
	零序	0.081 4	0.120 6	0.230 4	0.292 3	0.011 6	0.036 0

2 次谐波属于负序性谐波, 3 次谐波属于零序性谐波, 5 次谐波属于正序性谐波。从图 6~图 8 和表 7 来看, 各次谐波的零序电压都很小, 这是因为该牵引变压器采用的是 YN, d11 接法; 而每次谐波的负序电压都很大, 这说明谐波下不对称现象更为严重, 进

一步证明对谐波进行序分量法的现实性和重要性。

根据式 (6) 可以算得实测三相电压的综合电压不平衡度, 与基波电压不平衡度相比, 综合电压不平衡度要大, 如图 9 所示。综合电压不平衡度的 95% 概率大值为 3.736 1, 而基波电压不平衡度的 95% 概率大值为 3.238 6, 这是因为综合电压不平衡度考虑和体现了谐波下的不对称。

## 4 结 论

在实际三相系统中, 电压不对称普遍存在, 在谐波情况下更为严重。对于不对称谐波, 可以利用对称分量法分解为序分量, 运用序分量能够方便地解释不同接线的变压器在谐波渗透中的作用; 在谐波下, 相角不对称比幅值不对称更为敏感; 通过综合电压不平衡度衡量系统的对称性可以体现系统中谐波的不对称, 更为合理。

## 参 考 文 献

- [1] Shi-Lin Chen, Ray-Jong Li and Pao-Hsiang His. Traction System Unbalance Problem — Analysis Methodologies [J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 19, NO. 4, OCTOBER 2004.
- [2] 孙旻, 陈学林. 220 kV 单相牵引系统负序电流计算及分析方法 [J]. 江西电力职业技术学院学报, 2006. 6.
- [3] 刘晓宇, 陈建业. 铁路牵引系统中的负序计算和仿真 [J]. 变流技术与电力牵引, 2007. 3.
- [4] George J. W. Kileh 著. 徐政译. 电力系统谐波——基本原理和滤波器设计 [M]. 机械工业出版社, 2003.
- [5] J. Arrillaga, D. A. Bradley, P. S. Bodger. 电力系统谐波 [M]. 唐统一, 吴震春, 孙树勤译. 北京: 中国矿业大学出版社, 1991.
- [6] 吴竟昌, 孙树勤. 电力系统谐波 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [7] 王猛. 电力系统谐波、负序过程仿真及应用 [C]. 西南交通大学研究生学位论文, 2003.

## 作者简介:

周 晋 (1983—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统谐波分析。

郭 蕾 (1980—), 女, 山东人, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力系统谐波分析。

黄 军 (1983—), 男, 四川内江人, 硕士研究生, 研究方向为供电仿真与优化。

魏 光 (1984—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制。

(稿日期: 2008-11-10)

# 基于粒子群优化的电力负荷灰色预测模型

周在阳, 周步祥, 师玉东, 郑海滨

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**通过对  $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u$  的通解  $\hat{x}_k^{(1)} = ce^{-ak} + \frac{u}{a}$  的参数  $a, u, c$  直接求解, 避免了灰微分方程参数辨识时选取

合理背景值的问题, 构建了适应性更强的不需构造 GM(1, 1) 模型的背景值而直接求解灰微分方程参数的模型, 并且在求解这些参数的过程中, 应用了求解非线性问题中具有全局寻优能力的粒子群算法 (PSO)。提出了基于粒子群算法优化的电力负荷灰色预测模型 PSOGM(1, 1, a, u, c), 通过在电力负荷实例中的应用并与传统的 GM(1, 1) 预测模型进行了效果比较, 验证了基于粒子群算法优化的电力负荷 GM(1, 1) 模型具有很好的预测精度和适用性。

**关键词:** 灰色模型; 粒子群算法 (PSO); 电力负荷预测; 背景值

**Abstract:** A new method which is used to solve the parameter  $a, u$  and  $c$  of GM(1, 1) is discussed. Then particle swarm optimization is adopted to solve the value of  $a, u$  and  $c$  as this algorithm has the virtue of optimum-seeking and high-quality solution. Therefore a GM(1, 1, a, u, c) based on PSO is finally built. And the result of the traditional GM(1, 1) compares with the result of the new GM(1, 1) model. The practical example indicates that the GM(1, 1, a, u, c) based on PSO model has the characteristic of better precision and wider application field.

**Key words:** grey model; particle swarm optimization (PSO); power load forecasting; background value

**中图分类号:** TM714 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0032-04

负荷预测是供电部门的重要工作之一, 准确的负荷预测可以经济合理地安排电网内部发电机组的启停, 制订设备检修计划, 编制电网建设规划, 保证社会正常的生产、生活用电, 提高经济效益和社会效益。因此, 对电网未来负荷变化趋势及幅度的精确预测是电网调度和规划部门所应具备的一项基本能力。

灰色预测具有要求样本数据少、不考虑分布规律和变化趋势、原理简单、运算方便、预测精度高、可检验性强等优点, 因而得到了广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。但由于模型是一个指数函数, 并且比较适合于负荷增长较平稳的情况, 而实际问题中影响电力负荷的不确定性因素很多, 对预测的方法适应性要求很高, 因此, GM(1, 1)模型的应用受到一定程度的限制。许多文献通过对 GM 模型引入背景值或进行残差修正来提高预测模型的精度<sup>[3,4]</sup>, 而很少直接从求取 GM 模型的参数方面着手。文献 [5]指出如果事先能求解出发展系数  $a$  再求解其他参数, 这样建立的模型才更加合理。

基于此, 通过直接对  $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u$  通解  $\hat{x}_k^{(1)} = ce^{-ak} + \frac{u}{a}$  中参数  $a, u, c$  的求解来提高预测模型的拟合和预测精度, 由于灰微分方程解中的参数与误

差之间存在明显的非线性关系, 为使参数的求解最优化, 采用具有全局寻优能力的粒子群算法 (PSO) 求解参数  $a, u, c$  并提出了基于粒子群优化的电力负荷灰色预测模型 PSOGM(1, 1, a, u, c), 这样就可以避免通过形成背景值求解参数产生的误差。通过在电力负荷预测中的应用, 证明本方法能很好地提高预测模型的精度。

## 1 基于 PSO 的灰色预测模型

### 1.1 传统 GM(1, 1)模型<sup>[1]</sup>

传统 GM(1, 1) 模型首先对时间序列  $X^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$  进行一阶累加生成规律性较强的序列  $X^{(1)} = (x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$ , 其中:  $x_k^{(1)} = \sum_{i=1}^k x_i^{(0)}, k = 1, 2, \dots, n$

接着生成背景值序列  $Z^{(1)} = (z_1^{(1)}, z_2^{(1)}, \dots, z_n^{(1)})$ , 其中,  $z_k^{(1)} = 0.5(x_k^{(1)} + x_{k-1}^{(1)}), k = 2, 3, \dots, n$ , 然后构造 GM(1, 1) 的一阶微分方程表达式:  $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u$ , 该方程解的一般表达式如下:

$$\hat{x}_k^{(1)} = ce^{-ak} + \frac{u}{a}, k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

传统 GM(1, 1)模型中求解参数 a 和 u 大都取实际样本的初始值  $x_1^{(0)}$  作为初始条件, 利用最小二乘法求解参数 a, u:

$$[a \ u]^T = (B^T B^{-1}) B^T Y \quad (2)$$

$$\text{其中, } B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}, 1 \\ -z^{(2)}, 1 \\ \dots \\ -z^{(n)}, 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x_2^{(0)} \\ x_3^{(0)} \\ \dots \\ x_n^{(0)} \end{bmatrix}$$

则模型的预测结果为:

$$\hat{x}_{k+1}^{(1)} = (x_k^{(1)} - \frac{u}{a}) e^{-ak} + \frac{u}{a}, k = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

对上式进行一阶累减还原计算  $(1 - IAGO)$ , 得到  $x^{(0)}$  的灰色预测模型:

$$\hat{x}_{k+1}^{(0)} = (1 - e^{-a})(x_1^{(0)} - \frac{u}{a}) e^{-ak}, k = 1, 2, \dots \quad (4)$$

### 1.2 GM(1, 1)模型的改进

由式 (1)、(2)、(3)、(4) 知, GM(1, 1)模型的拟合及预测精度与参数 a, u, c 的选取和背景值的构造有关, 因此, 如何求解这些参数及避免形成背景值就成了提高模型拟合及预测精度的关键。

采用粒子群算法直接求取参数 a, u 和 c。因为  $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u$  的通解为  $\hat{x}_k^{(1)} = ce^{-ak} + \frac{u}{a}$ , c 为任意常数, 则预测结果为:  $\hat{x}^{(0)}(1) = ce^{-a} + \frac{u}{a}$ ,  $\hat{x}^{(0)}(k) = ce^{-a(k-1)}(1 - e^{-a})$ ,  $k=2, 3, \dots$ 。提出的模型就是通过求取参数 a, u 和 c 提高模型的拟合和预测精度。

### 1.3 粒子群算法 (PSO)

粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是由 Eberhart 博士与 Kennedy 博士发明的一种新的全局优化进化算法, 该算法源于对鸟类捕食行为的模拟<sup>[6]</sup>。假设在一个 D 维的目标搜索空间中有 n 个粒子, 每个粒子的位置表示一个潜在的解。用  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ ,  $i=1, 2, \dots, n$  表示第 i 个粒子的位置向量, 用  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ ,  $i=1, 2, \dots, n$  表示第 i 个粒子飞行的速度向量, 用  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ ,  $i=1, 2, \dots, n$  表示第 i 个粒子迄今为止搜索到的最好位置, 也称为个体极值 pBest。用  $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ ,  $i=1, 2, \dots, n$  表示整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置, 也称为全局极值 gBest。每一次迭代所有粒子 i 根据下面公式来更新自己的速度和位置:

$$v_{id} = \omega * v_{id} + c_1 * r_1 * (p_{id} - x_{id})$$

$$+ c_2 * r_2 * (p_{gd} - x_{id}) \quad (5)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (6)$$

其中,  $r_1, r_2$  是 (0, 1) 之间的随机数,  $c_1$  和  $c_2$  被称为学习因子, 通常,  $c_1 = c_2 = 2.0$ ,  $\omega$  是加权系数, 取值在 0.1 到 0.9 之间。

粒子通过不断学习更新, 最终飞至解空间中最优解所在的位置, 搜索过程结束。最后输出的 gBest 就是全局最优解。在更新过程中, 粒子每一维的最大速率被限制为  $v_{max}$ , 粒子每一维的坐标也被限制在允许范围之内。

粒子群优化算法没有交叉与变异运算, 所以算法结构简单, 运行速度快。但是, 基本粒子群优化算法在解空间内搜索时, 有时会出现粒子在全局最优解附近“振荡”的现象, 为了避免这个问题, 可以作以下改进, 随着迭代进行, 速度更新公式中的加权因子  $\omega$  由最大加权因子  $\omega_{max}$  线性减小到最小加权因子  $\omega_{min}$ 。即:

$$\omega = \omega_{max} - \text{inter} * \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\text{interNum}} \quad (7)$$

其中 inter 为当前迭代数, 而 interNum 是总的迭代次数。

## 2 基于 PSO 优化的电力负荷灰色预测模型

通过对参数 a, u 和 c 的直接求解, 提出了基于 PSO 优化的电力负荷预测模型, 以误差平方和最小为目标函数, 采用 PSO 直接求解 a, u 和 c 并代入  $\hat{x}^{(0)}(1) = ce^{-a} + \frac{u}{a}$ ,  $\hat{x}^{(0)}(k) = ce^{-a(k-1)}(1 - e^{-a})$ ,  $k=2, 3, \dots$ , 便可求出预测值  $\hat{x}^{(0)}(k)$ , 求解该灰色模型的粒子群优化算法描述如下:

1) 随机初始化粒子群中粒子的位置与速度。粒子维数设为三维, 分别代表待求解的参数 a, u 和 c。粒子在三维搜索空间的当前位置即对应 a, u 和 c 的某一可能解;

2) 计算每个粒子的适应值: 将粒子的个体最优位置设置为当前位置 pBest 全局最优位置 gBest 设置为初始粒子群体中最佳粒子的位置, 根据适应度值最小来优选初始粒子群中的最佳粒子, 以误差平方和最小为目标, 计算个体 a, u, c 当前位置的适应度:

$$f(a, u, c) = \sum_{k=1}^n (\hat{x}^{(0)}(k) - x^{(0)}(k))^2$$

- 3) 判断算法收敛准则是否满足, 如果满足, 执行 6); 迭代结束, 输出  $a$ 、 $u$  和  $c$  的值; 否则, 执行 4);
- 4) 对于粒子群中的所有粒子, 根据式 (5)、(6) 更新粒子的速度与位置, 如果粒子适应度优于  $gBest$  相应的适应度,  $gBest$  设置为新位置;
- 5) 判断算法收敛准则是否满足, 如果满足, 执行 6); 输出  $a$ 、 $u$  和  $c$  的值; 否则转向 4) 迭代, 继续寻优;
- 6) 输出全局最优位置  $gBest$  得到  $GM(1, 1)$  模型参数  $a$ 、 $u$  和  $c$  的全局优化解, 算法运行结束。

算法收敛准则 (迭代终止条件) 设置为最大迭代次数或优化所得全局最优位置  $gBest$  相应的适应度值, 满足预设的适应度阈值。

### 3 负荷预测的实例分析

为验证该方法的有效性, 以文献 [8] 中提供的 4 种具有代表性的负荷序列对  $GM(1, 1)$  模型及 PSO 优化的  $GM(1, 1)$  进行考核, 原始数据如表 1 所示。表 1 中与前 8 个年份编号对应的数据作为考核两个模型的原始数据, 而年份编号为 18 的数据就是  $k=18$  时对应的负荷值, 该值作为待预测年的准确值。

表 1 GM 模型测试负荷数据

年份编号	负荷 1(MW)	负荷 2(MW)	负荷 3(MW)	负荷 4(MW)
1	1.126 37	1.220 18	1.647 07	7.160 21
2	1.198 40	1.351 20	2.119 10	7.804 40
3	1.269 98	1.490 33	2.715 56	8.447 64
4	1.351 21	1.650 37	3.493 83	9.154 64
5	1.431 90	1.820 30	4.477 21	9.854 24
6	1.523 48	2.015 77	5.760 36	10.621 80
7	1.614 46	2.223 32	7.381 67	11.374 30
8	1.717 72	2.462 06	9.497 22	12.199 10
18	3.129 89	6.692 58	115.700 00	21.405 60
年均增长率 (%)	6.214 20	10.548 90	28.439 50	7.910 70

对每种模型进行了后验差、小误差概率和相对误差的检验, 验证结果如表 2 所示。其中后验差比值是残差方差的均方根与原始数据方差的均方根的比值, 其值越小越好。小误差概率定义为各期残差与残差平均值之差的绝对值小于 0.67 倍原始数据方差的均方根的概率, 其值越大越好。预测结果相对误差则是最直观同时也是最关键的指标。有关上述指标的详细定义及其物理含义可参见文献 [9]。

就城市电网中长期规划而言, 当负荷预测相对误差小于 10% 时可视为高精度预测, 相对误差在 10% ~ 20% 之间时可视为较好的预测 [8]。从表 2 可看出, 对表 1 中的 4 种负荷序列的预测中, 灰色模型全部通过了后验差检验且模型等级均为好, 除第 4 种负荷序列外, 灰色模型均能给出高精度的预测结果, 并且负荷的增长率愈低, 误差就愈小。

对于 4 组测试数据,  $PSO_{GM}(1, 1, a, u, c)$  模型的精度都较  $GM(1, 1)$  模型有一定程度的提高, 尤其是对前 3 种指数型发展趋势, 效果更明显, 精度提高幅度更大; 对第 4 组负荷数据序列, 相对误差减少了 14.12%, 也取得了较好的效果。

表 2 传统 GM 模型与改进的 GM 模型的预测结果

	参数 (a, u, c)	目标年预测值 (MW)	后验差比值 (%)	小误差概率	相对误差 (%)
负荷 1	$PSO_{GM}(1, 1, a, u, c)$ (-0.060 07, 1.093 85, 18.208 5)	3.130 0	0.695 3	1	0.003 5
	传统 $GM(1, 1)$ (-0.060 15, 1.093 72)	3.126 7	0.710 2	1	0.101 9
负荷 2	$PSO_{GM}(1, 1, a, u, c)$ (-0.100 06, 1.161 29, 11.604 9)	6.691 8	0.427 6	1	0.011 7
	传统 $GM(1, 1)$ (-0.997 1, 1.160 32)	6.674 9	0.492 8	1	0.264 2
负荷 3	$PSO_{GM}(1, 1, a, u, c)$ (-0.250 16, 1.450 22, 5.796 5)	115.816 4	0.190 6	1	0.100 6
	传统 $GM(1, 1)$ (-0.248 85, 1.442 56)	112.421 0	1.611 9	1	2.833 8
负荷 4	$PSO_{GM}(1, 1, a, u, c)$ (-0.073 79, 7.051 56, 95.412 3)	25.618 0	2.402 8	1	-19.678
	传统 $GM(1, 1)$ (-0.073 84, 7.045 59)	26.310 1	2.406 2	1	-22.912

## 4 结 语

采用 PSO 算法对灰微分方程的参数进行直接求解,不需构造背景值,提高了模型的拟合和预测精度,增强了模型的适用性。将 PSOGM (1, 1, a, b, c) 模型分别应用于增长规律不同的四种电力负荷的预测问题中,预测精度明显优于传统 GM (1, 1) 模型; PSOGM (1, 1, a, b, c) 模型可以精确地预测具有近似指数增长规律的负荷,它不仅适用于变化平稳的历史负荷序列,还适用于负荷增长率较大的负荷序列,克服了 GM (1, 1) 模型的局限性,具有一定的应用价值。本算法的特点一是算法简单。首先,粒子群算法用于灰色模型参数的直接求解,无需像遗传算法那样进行复杂编码,可直接对实数变量进行操作;其次,算法中需要调整参数很少,即使调整也不需要太多经验。二是收敛快、精度高。粒子群算法收敛快是其重要特性,也是其近年来发展迅速的一个重要原因。

## 参 考 文 献

[1] 邓聚龙. 灰色预测与决策 [M]. 湖北, 华中理工大学出版社, 1992.  
 [2] Ni Dongxiao. "Adjustment gray model for load forecasting of power system." The Journal of Gray System, vol 6,

no 2, pp 127-134, 1994.  
 [3] 牛东晓, 赵磊. 粒子群优化灰色模型在负荷预测中的应用 [J]. 中国管理科学, 2007, 15(1): 69-73.  
 [4] 王翠茹, 孙辰军, 杨静, 冯海迅. 改进残差灰色预测模型在负荷预测中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(1): 86-89.  
 [5] 宋中民. 灰色 GM (1, 1) 模型参数的优化方法 [J]. 烟台大学学报, 2001, 14 (3): 161-163.  
 [6] J Kennedy and R. C Eberhart "Particle swarm optimization Proc IEEE Int Conf Neural Networks Piscataway NJ IEEE Press 1995, pp 1942-1948.  
 [7] 曾建潮, 介婧, 崔志华. 微粒群算法 [M], 北京, 科学出版社, 2004.  
 [8] 王成山, 杨军, 张崇见. 灰色系统理论在城市年用电量预测中的应用—不同预测方法的分析比较 [J]. 电网技术, 1999, 23(2): 15-18.  
 [9] 牛东晓, 曹树华, 赵磊. 电力负荷预测技术及其应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

### 作者简介:

周在阳 (1983—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统调度自动化及计算机信息管理。

周步祥 (1965—): 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统自动化、计算机应用等方面的教学与科研工作。

(收稿日期: 2008-12-10)

(上接第 8 页)

[5] Denis Lee Hau Aik Andersson G. Quasi-Static Stability of HVDC Systems Considering Dynamic Effects of Synchronous Machines and Excitation Voltage Control [J], IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1501-1514.  
 [6] Denis Lee Hau Aik Andersson G. Nonlinear Dynamics in HVDC Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(4): 1417-1426.  
 [7] Canizares C A Alvarado F L Point of Collapse and Continuation Method for Large AC/DC Systems [J], IEEE Trans on PWRs 1993, 8(1): 1-7.  
 [8] Kundur P. Power System Stability and Control McGraw-Hill Inc, New York 1994.  
 [9] Senlyen A Gao B Calculation of the Extreme Loading Condition of A Power System for the Assessment of Voltage Stability [J], IEEE Trans on PWRs 1991, 6(1): 307-315.  
 [10] 张尧, 宋文南. 节点电压稳定临界状态和弱节点的确定 [J]. 中国电机工学报. 1993, 13(6): 40-45.

[11] 张尧, 宋文南, 贺家李. 临近电压稳定极限的潮流和静稳极限算法 [J]. 中国电机工学报. 1994, 14(6): 17-23.  
 [12] Denis Lee Hau Aik Andersson G. Voltage Stability Analysis of Multi-Infed HVDC Systems [J], IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1309-1316.  
 [13] CIGRE Task Force 38.02.11 CIGRE Technical Brochure: Indices Predicting Voltage Collapse Including Dynamic Phenomenon. Electra 1995(159): 135-147.

### 作者简介:

徐梅梅 (1986—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析计算及稳定。

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

白加林 (1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制。

贺洋 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析计算及稳定。

(收稿日期: 2008-12-15)

# 电力系统负荷预测技术

宗慧敏, 滕 欢

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:** 负荷预测是电力系统规划、供电、调度等部门的重要的基础工作, 讨论了负荷预测的特点、分类及各种成熟的负荷预测技术, 研究了现代负荷预测技术的发展动态, 并指出未来主要的研究方向。

**关键词:** 电力系统; 负荷预测; 预测技术

**Abstract:** Load forecasting is the foundation of power system planning, power supply and dispatching. The characteristics and classification of the load forecasting are discussed as well as all kinds of mature load forecasting technologies. Furthermore, the development of modern load forecasting technology is studied and the main issues of future researches on this field are pointed out.

**Key words:** power system; load forecasting; forecasting technology

**中图分类号:** TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)-0036-04

负荷预测是从已知的电力需求出发, 通过对历史数据的分析, 并考虑政治、经济、气候等相关因素, 对未来的用电需求做出估计和预测。负荷预测是电力系统规划、供电、调度等部门的重要的基础工作。对于经济合理地安排发电机组的启停及检修计划, 保持电网安全稳定运行以及未来电网的增容和改建等有十分重要的作用。

## 1 负荷预测的特点及分类

负荷预测研究的对象是不肯定事件, 对于这种事件, 需要人们采用适当的预测技术, 推知负荷的发展趋势, 这就使负荷预测具有不确定性、条件性、时间性、多方案性等特点。显然, 就不可能存在任何时候、任何地点、对任何对象都具有普遍适用性的预测方法。

负荷预测中经常按时间期限分为长期、中期、短期和超短期: ①长期负荷预测是指数年至数十年的负荷预测, 主要是帮助电网规划部门对电网进行规划、增容和改建, 要特别考虑国民经济发展、人口、国家政策等影响。②中期负荷预测是指月至年的负荷预测, 用于水库调度、机组检修、燃料计划等运行计划的编制, 主要受大用户生产计划、气象条件、产业结构调整等影响。③短期负荷预测是指日至周的负荷预测, 用于调度计划的编制, 主要受星期类型、气象因素等影

响。④超短期负荷预测是指未来 1 h 以内的负荷预测, 其中 5~10 s 的负荷预测用于质量控制, 1~5 min 的负荷预测用于安全监视, 10~60 min 的负荷预测用于预防控制和紧急状态处理。

此外, 负荷预测按行业可以分为城市民用负荷、商业负荷、农村负荷、工业负荷以及其他负荷的负荷预测; 按特性又可以分为最高负荷、最低负荷、平均负荷、负荷峰谷差、高峰负荷平均、低谷负荷平均、平峰负荷平均、全网负荷、母线负荷、负荷率等类型的负荷预测。

## 2 负荷预测的基本程序

1) 确定负荷预测的目的和要求, 根据实际需要和具体情况, 拟定一个合理的预测工作计划。

2) 多方面调查收集资料, 并以直接有关性、可靠性、最新性的标准挑选资料, 深入研究后, 再考虑是否还需要收集其他资料, 尽可能做到细致、全面, 但避免用臆想的数据填补所缺少的资料。

3) 基础资料的整理和分析。在对大量的资料进行全面分析之后, 选择其中有代表性的、真实程度和可用程度高的有关资料作为预测的基础资料。对基础资料进行必要的分析和整理, 对资料中的异常数据进行分析, 做出取舍或修正。

4) 电力系统相关因素数据的获取。电力系统受

到经济发展、天气变化等因素的影响,可以从相关部门获取其对相关因素未来变化规律的预测结果,作为负荷预测的基础数据。

5)选取预测模型。这是关键性的一步,预测模型要能够反映统计资料的一般特征,否则就会造成预测误差过大。可以同时用几种模型进行运算对比,以选择适合具体资料的模型。

6)用预测模型进行负荷预测,再考虑影响预测对象的因素以及新的发展趋势,经过综合分析、判断、修正后确定预测结果。

7)负荷预测的滚动性管理。即经过一段时间的实践,利用反馈信息对预测值进行调整,并对预测结果进行误差分析,以考虑预测模型是否适合,为下次预测做好准备。

### 3 电力负荷预测方法简介

负荷预测有一些常规单一的预测方法,如专家预测法、类比法、主观概率预测法、单耗法、负荷密度法、比例系数增长法、弹性系数法等。这些方法虽然简单,但大多需要做很多细致的统计调查工作,而且很难反映现代政治、经济、气象等条件的影响。下面介绍几种经典的负荷预测技术<sup>[1,2]</sup>。

#### 3.1 趋势外推预测技术

电力负荷虽然是不确定的、随机的,易受到气候、意外事故等各种条件的干扰,但在一定条件下,仍存在明显的变化趋势。例如从季度和月份方面看,用电负荷存在周期性的变化趋势,又如用电负荷总体上呈增长趋势等。一旦找到了负荷的变化趋势,就能按照这种变化趋势对未来负荷做出判断,这就是趋势外推预测技术。

外推法有水平趋势预测、线性趋势预测、多项式趋势预测、季节型趋势预测等。优点是简单实用,所需数据量少,缺点是对随机成分不做统计处理,如果负荷出现变动,会引起较大误差。

#### 3.2 回归模型预测技术

回归模型预测就是根据以往负荷的历史资料,用数理统计中的回归分析方法对变量的观测数据进行统计分析,建立数学模型,从而实现预测的目的。

回归模型有一元线性回归、多元线性回归、非线性回归等回归预测模型。其中,线性回归模型适用于电力系统中期负荷预测。优点是原理和结构简单,预

测速度快,外推特性好,缺点是对历史数据要求高。

#### 3.3 时间序列预测技术

时间序列预测技术是现在常用于短期负荷预测的较为成熟的方法。它是根据整个观测序列所呈现出的某种随机过程的规律性去建立和估计产生实际序列的随机过程的模型,然后用这些模型进行预测。

时间序列可分为自回归(AR)、动平均(MA)、自回归—动平均(ARMA)、累计式自回归—动平均(ARMA)等模型。优点是所需历史数据少,计算速度快,缺点是对原始时间序列的平稳性要求较高,只致力于数据的拟合,不注重规律的发现,对影响负荷变化的因素考虑不足。

#### 3.4 灰色预测技术

灰色系统理论认为任何随机过程都是在一定幅值范围、一定时区内变化的灰色量,称随机过程为灰色过程。以灰色系统理论为基础的灰色预测技术是利用原始数列的整理来寻找数的规律,从而推导出信息发展的趋势。

灰色预测是用灰色模型  $GM(1,1)$ 、 $GM(1,n)$  进行的定量预测,从其功用和特征上可分为数列预测、灾变预测、季节灾变预测、拓扑预测、系统预测五类。优点是要求负荷数据少、不考虑分布规律、不考虑变化趋势、运算方便、短期预测精度高、易于检验等,缺点是当数据离散程度越大,预测精度越差,也不太适合于电力系统的长期后推若干年的预测。

### 4 电力负荷预测技术的发展动态

近些年来,随着科学技术的迅速发展,新的预测方法不断出现,例如组合模型预测、专家系统预测、神经网络预测、小波分析预测、模糊负荷预测等。下面将重点介绍组合模型、神经网络和小波分析三种预测技术。

#### 4.1 组合模型预测技术

组合模型预测有两类概念:一是指将几种预测方法所得的预测结果,选取适当的权重进行加权平均;二是指在几种预测方法中进行比较,选择拟合度最佳或标准离差最小的预测模型作为最优模型进行预测。

第一类概念的关键问题是权重的选取,经常使用的是等权平均和基于最小二乘法的最优权重确定方法。前者方法简单,是在对各种预测方法的预测精度完全未知的情况下所采用的一种较为稳妥的方法,能

降低单一预测方法的风险性,提高了可靠度。后者则依据各基本预测方法对历史数据的拟合误差,建立以误差平方和为最小的目标函数及相应的权系数的约束条件,并通过最小化目标函数来求取权重系数。但这种优化方法存在诸如局部最优、约束条件和目标函数的不易处理等问题。

文献 [3] 深入研究了组合模型预测机制,提出了“最优拟合模型”不等于“最优预测模型”的观点,放宽了算法的不等式约束条件,使得权重可以取负值;文献 [4] 从理论上论证了组合预测方法相对于单一预测模型的优越性,并提出一种基于 BP 神经网络模型的最优权重确定方法,能够充分反映各个预测模型的预测值与样本真实观测值之间的非线性关系,提高了组合模型的预测精度;文献 [5] 通过虚拟预测结果与实际负荷曲线数据的误差平方和的最小化,得到组合模型的权重值;文献 [6] 采用进化规划方法处理优化问题,避免了传统优化方法存在的局部最优、约束条件等问题。

组合预测是在单个预测模型不能完全正确地描述预测量的变化规律时,能够有效提高预测效果的一种补偿办法,如果可以找到一个能完全反映实际发展规律的模型进行预测,可能比用组合预测方法预测效果更好。

#### 4.2 人工神经网络 (ANN) 预测技术

神经网络理论是利用神经网络的学习能力,让计算机学习包含在历史负荷数据中的映射关系,再利用这种映射关系预测未来负荷。人工神经元是神经网络的基本计算单元,一般是多输入、单输出的非线性单元。目前用于负荷预测的人工神经网络主要有误差反向传播网络 (BP)、径向基函数网络 (RBF) 等。神经网络预测技术可以模仿人脑做智能化处理,对大量非结构性、非确定性规律具有自适应功能,有信息记忆、自主学习、知识推理和优化计算的特点,适合于做短期负荷预测。人工神经网络有很大的应用市场,但也存在很多不足:收敛慢,易陷入局部极小的状态;网络结构确定缺乏有效理论指导,主观依赖性强;神经网络的学习过程通常较慢,对突发事件的适应性差。因此,运用 ANN 进行负荷预测的关键在于:网络结构的确定、恰当的输入变量的选取以及样本和训练集的构建。

文献 [7] 通过多种数据挖掘技术寻找与预测日同等气象类型的多个历史日负荷,由此进一步提取数

据,组成规律强化、干扰弱化、具有高度相似气象特征的数据序列,再构建人工神经网络模型,有效提高了预测精度,简化了模型的输入和计算;文献 [8] 将相似日方法和人工神经网络方法结合,提出一种基于相似日和 RBF 网络的新方法,有效提高了预测精度和稳定性;文献 [9] 利用 BP 神经网络进行短期负荷预测,在有足够的训练样本的前提下,对模型进行合理分类,将样本随机分离为训练集和测试集,有效防止了训练过程中常出现的过拟合现象,提高了预测精度;文献 [10] 提出灰色模型 (GM) 因不同的参数  $a, u$  取值,就得到不同的预测值,从而很难选择准确的模型。于是将灰色预测作为 ANN 的输入,利用人工神经网络克服上述困难,提高预测精度。文献 [11] 将擅长处理不确定性、不精确性及噪声所致问题的模糊系统,与具有分布式并行处理和自学习机制的神经网络结合,提高了收敛速度和预测精度,降低了陷入局部极值点的可能性。此外,有的学者应用了粗糙集理论选择预测模型输入变量和确定神经网络的结构,也有学者将混沌理论与 RBF 神经网络相结合,基于延迟坐标相空间重构技术,求出最佳嵌入维数和延迟时间,由嵌入维数决定 RBF 神经网络的输入从而实现预测。这些都在一定程度上弥补了单一神经网络的不足。

#### 4.3 小波分析预测技术

小波分析是一种时域-频域分析方法,它在时域和频域上同时具有良好的局部化性质,并且能根据信号频率高低自动调节采样的疏密,容易捕捉和分析微弱信号以及信号、图像的任意细小部分。小波变换能将各种交织在一起的不同频率组成的混合信号分解成不同频带上的块信号,对负荷序列进行小波变换,可以将负荷序列分别投影到不同的尺度上,对不同的子负荷序列进行数据处理,并分别采用相匹配的模型进行预测,最后通过小波重构,得到完整的负荷预测结果,这种方法具有较高的预测精度和较强的适应能力<sup>[12]</sup>。

文献 [13] 针对电力负荷本身具有以天、周、年为周期发生波动的特点,使用周期自回归 (PAR) 模型有选择的对分解序列进行预测,结果表明先使用小波分析处理的预测结果比直接使用 PAR 模型预测的精度高;文献 [14] 利用小波分析对负荷样本做序列分解,根据小波变换的分辨率随频率增高而降低的特点,对高尺度负荷分量采用常规预测方法,其他负荷

分量则采用模糊神经网络处理技术,最后通过序列重构得到完整的负荷预测结果,取得了较高的预测精度和适应能力;文献 [15] 采用了小波变换和最小二乘支持向量机混合模型,先利用小波分析方法将负荷序列分解,再根据分解后各分量的特点,构造不同的支持向量机模型,对各分量分别进行预测,最后对各分量预测信号进行重构得到最终预测结果,取得了较高的预测精度;文献 [16] 提出一种基于 BP 子网络和小波网络的短期负荷预测的级联网络模型,采用 BP 子网络来映射气象等不确定因素的影响,采用小波网络来映射历史负荷值的影响。它结合了小波变换良好的时频局域化性质和神经网络的自学习能力,明显地改善了神经网络难以合理确定网络结构和存在局部最优等缺陷。

## 5 结论与建议

通过对负荷预测的特征和多种负荷预测方法的综述,得出以下结论和建议:

1) 单一负荷预测方法存在各种各样的弊端,很难满足要求,而模糊数学、专家系统理论、混沌理论等新兴交叉学科理论的出现,为负荷预测提供了坚实的理论依据和数学基础,因此,智能化、组合化以及各种交叉学科理论在负荷预测中的应用成为未来负荷预测方法研究的主要发展方向。

2) 以上所述负荷预测方法都有一定的适用场合,目前,要找出一种可以适用于任何负荷模型的方法并不是很现实的。因此,预测人员应结合预测地区的实际负荷情况和特点,建立适合的负荷预测模型,以提高预测精度。

3) 历史负荷数据的质量直接影响预测精度,应选择合理的方法对历史数据进行辨识与预处理,剔除坏数据,并及时补充新数据,充分合理地利用各种历史数据,这样,预测效果将会更好。

### 参考文献

- [1] 牛东晓,曹树华,赵磊,等. 电力负荷预测技术及其应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
- [2] 康重庆,夏清,刘梅. 电力系统负荷预测 [M]. 北京:中国

电力出版社, 2007.

- [3] 莫维仁,张伯明,孙宏斌,等. 短期负荷综合预测模型的探讨 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 30—34.
- [4] 安德洪,韩文秀,岳毅宏. 组合预测法的改进及其在负荷预测中的应用 [J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(6): 843—844.
- [5] 程旭,康重庆,夏清,等. 短期负荷预测的综合模型 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 42—44.
- [6] 谢敬东,唐国庆,徐高飞,等. 组合预测方法在电力负荷预测中的应用 [J]. 中国电力, 1998, 31(6): 3—5.
- [7] 牛东晓,刑棉,孟明. 基于联合数据挖掘技术的神经网络负荷预测模型研究 [J]. 电工技术学报, 2004, 19(9): 62—68.
- [8] 鞠平,姜巍,赵夏阳,等. 96点短期负荷预测方法及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2001, (22): 32—36.
- [9] 周佃民,管晓宏,孙婕,等. 基于神经网络的电力系统短期负荷预测研究 [J]. 电网技术, 2002, 26(2): 10—13.
- [10] 史德明,李林川,宋建文. 基于灰色预测系统和神经网络的电力系统负荷预测 [J]. 电网技术, 2001, 25(12): 15—17.
- [11] 赵宇红,唐耀庚,张韵辉. 基于神经网络和模糊理论的短期负荷预测 [J]. 高电压技术, 2006, 32(5): 107—110.
- [12] 邵能灵,侯志俭,李涛,等. 基于小波分析的电力系统短期负荷预测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 45—50.
- [13] 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.
- [14] 邵能灵,侯志俭. 小波模糊神经网络在电力系统短期负荷预测中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 24—29.
- [15] 杨延西,刘丁. 基于小波变换和最小二乘支持向量机的短期电力负荷预测 [J]. 电网技术, 2005, 29(13): 60—64.
- [16] 李永坚,胡鹤宇. 电力系统短期负荷预测的级联网络模型研究 [J]. 继电器, 2004, 32(10): 14—18.

### 作者简介:

宗慧敏 (1982—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统调度及其自动化。

滕欢 (1965—), 女, 高级工程师, 长期从事电力系统调度自动化科研、教学及工程实践工作。

(收稿日期: 2008—11—10)

# 欢迎订阅《四川电力技术》

# 基于 Prony 方法的电力系统低频振荡分析

白 洋, 李国庆, 姚天亮

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘 要:** 电力系统低频振荡时常发生, 准确提取振荡频率成为抑制其发生的前提。介绍了 Prony 方法的计算过程以及如何提高 Prony 分析方法的准确性, 通过与电力系统中已有算法的比较, 分析了 Prony 方法在电力系统中的适用性。成功的应用 Prony 方法检测到了 PSASP 中 8 机系统的主导低频振荡模式, 算例结果表明, 该方法实用、有效、准确性较高, 完全能满足实际应用的需要, 是一种有效的工具。

**关键词:** 低频振荡; Prony 分析; 主导低频振荡模式; 功角曲线

**Abstract:** The low frequency oscillations in power system often occur. The accurate extraction of oscillation frequency becomes the premise which suppresses it to occur. The computation process of Prony method and how to enhance the accuracy of Prony analysis method are introduced. Compared Prony method with other existing algorithms used in power system, the serviceability of Prony analysis method in power system is analyzed. And Prony method is successfully applied to detect the dominant modes of low frequency oscillations of the 8-machine system in PSASP. The example results indicate that the method is practical, effective and has a higher accuracy. It can satisfy the need of practical application completely, and it is an effective tool.

**Key words:** low frequency oscillation; Prony analysis; dominant mode of low frequency oscillation; power angle curve

**中图分类号:** TM761 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)-0040-02

随着电网的日益扩大, 大容量机组在电网中的不断投运, 快速励磁的普遍使用, 低频振荡现象在大型互联电网中时有发生。发电机在电网中并列运行时, 在扰动情况下发生转子间的相对摇摆, 并在阻尼不足时发生持续性的振荡<sup>[1,2]</sup>。此时在输电线上传输的功率也会发生相应振荡。由于机组的惯性时间常数其振荡频率很低, 引起的振荡的范围一般为 0.1~2.5 Hz 这就是低频振荡。低频振荡一般发生在长距离、大负荷输电线上, 由于普遍采用现代快速、高顶值倍数励磁系统, 现在低频振荡在电力系统中更易发生。低频振荡一般为局部振荡和区域间振荡。局部振荡是指在区域内某一台电机或几台电机相对于区域内其他机组振荡, 由于其电气距离较近, 所以频率一般较高, 在 0.7~2.5 Hz 之间。区域振荡是指在不同区域的电机群之间发生相互振荡, 其距离较大, 所以频率一般较低, 在 0.1~0.7 Hz 之间。认识和找到处理电力系统低频振荡的本质和方法, 在全国电力系统不断互联中显得更加重要。

近年来, 电网的低频振荡现象非常频繁, 已经严重影响电网的稳定运行。研究系统的低频振荡就要首先得到系统的振荡频率、幅值及衰减等信息, 常

用的傅里叶变换和小波变换等方法不易提取衰减特性, 而且精度不高<sup>[3]</sup>。利用 Prony 分析法, 可以通过从系统中得到的信号直接获得信息, 特别是可以直接得到系统特征值, 使电力系统稳定分析更加便捷。

## 1 Prony 方法特点及其应用

早在两百多年前, Prony 就提出了使用  $e$  的指数函数的线性组合来拟合等间距采样的数学模型。Prony 方法可以有效地获取系统振荡模式特征, 它可通过给定输入信号下的响应直接估计系统的振荡频率、衰减、幅值和初相位<sup>[4]</sup>。该方法是用含有  $N$  个指数项的指数曲线来拟合  $2N$  个数据样本, 当数据样本个数大于  $N$  时, 该方法也是在最小二乘意义下实现的。

Prony 算法假设模型是由一系列的具有任意振幅、相位、频率和衰减因子的指数函数的组合, 也就是说, 由一组衰减的正弦分量所组成<sup>[5]</sup>。

$$\hat{x}(n) = \sum_{m=1}^P h_m z_m^n \quad (n = 0, 1, \dots, N-1) \quad (1)$$

式 (1) 是数据  $x(0), \dots, x(N-1)$  的模型。

$$h_m = A_m \exp(j\theta_m) \quad (2)$$

$$z_m = \exp[(\alpha_m + j2\pi f_m)\Delta t] \quad (3)$$

其中,  $A_m$  为幅值;  $\theta_m$  为相位;  $\alpha_m$  为衰减因子;  $f_m$  为振荡频率;  $\Delta t$  为采样间隔。

为使模拟信号逼近于真实信号, Prony 算法使平方误差最小, 即

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

Prony 方法之所以被广泛地应用于求解低频振荡的模式, 是因为方法本身的特点<sup>[6]</sup>。

(1) 可以对信号进行快速拟合, 从而得到各个分量的振幅、阻尼比、频率、相角等信息。

(2) 不需要对大系统进行大规模的矩阵分析, 可通过输入特定信号和输出信号快速得到系统的传递函数。

(3) 可根据现场测量的信号得到系统的参数和传递函数, 从而解决了设计中参数数据与实际数据不符造成的控制器参数误差。

(4) Prony 方法处理高阶系统效果好, 系统模型阶数的选择可以根据辨识的目的和需要具体确定<sup>[7]</sup>。

## 2 Prony 方法应用的范围

在应用 Prony 分析功能时, 需要注意 Prony 方法的适用范围。由于 Prony 方法基于线性系统原理, 所以 Prony 分析法适合于分析系统非线性特性已不明显, 或线性系统特性已恢复的工况。具体点讲, 应用 Prony 方法分析曲线所含模态时, 应注意:

(1) 取点数在 100 至 500 个点为宜。

(2) 曲线的起始时间应选择在故障结束以后, 因为受故障影响, 故障期间曲线的变化较大, 非线性较强, 这部分曲线不能反映系统自身的模态, 还会影响 Prony 分析的准确性。

(3) 取点间隔据实际情况而定, 对于大系统, 主要研究频率在 0.1 至 2.5 Hz 之间的振荡模式, 因此采用 0.2 s 的取点间隔比较合适, 但对于某些振荡频率较快的曲线, 如果只采用 0.2 s 的间隔, 则曲线会很光滑。

## 3 算例分析

### 3.1 8 机系统算例

以电力系统分析软件包 (PSASP) 中的 8 机系统为算例。发电机采用 3 阶模型 ( $\delta, \omega, E_q'$ )。其中 1 号、7 号和 8 号机没有励磁控制, 其余 5 台机采用如 PSASP 所示的二型快速励磁, 系统总阶数为 28 阶。2 号机励磁系统放大系数  $k_{e2} = 24$ , 其他机的放大系数均为 16, 2 号机励磁系统时间常数  $T_{e2}$  为 0.005 s,  $T_{a2}$  为 0.06 s, 其他机时间常数  $T_i$  均取 0.005 s,  $T_{a_i}$  均取为 0.015 s。

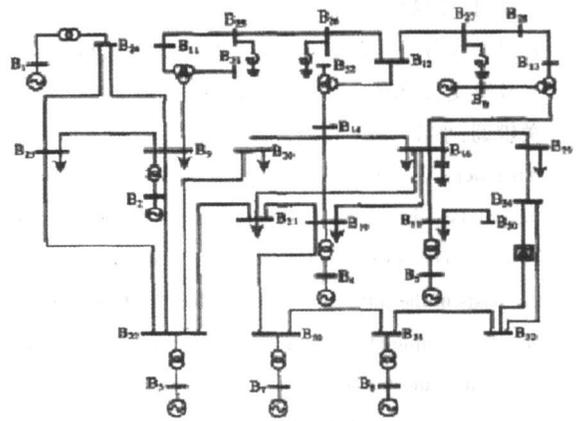


图 1 8 机系统

假定  $t=1$  s 时, 在 6 号发电机出口变压器高压侧发生三相瞬时短路, 得到功角曲线  $\delta_{36}$ 。

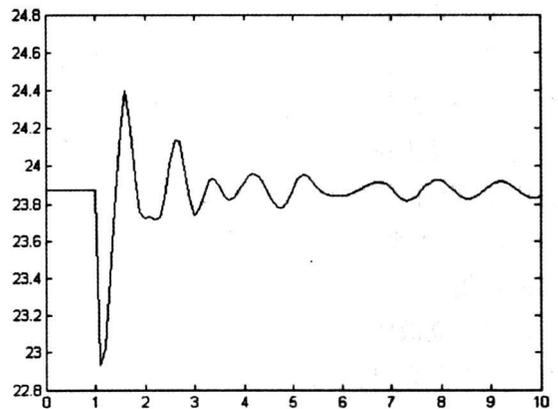


图 2 功角曲线  $\delta_{36}$

对功角曲线  $\delta_{36}$  分析<sup>[8]</sup>, 可以知道频率为 0.78 Hz 的低频振荡模式为该曲线的主导模式, 这与对 8 机系统进行 QR 分析得到的主导低频振荡模式相同。说明了 Prony 方法分析低频振荡的有效性。

表 1 功角曲线  $\delta_{36}$  的主导模式

模式	幅值	阻尼	振荡频率 (Hz)	能量级
1	9.0e+000	-2.4e+000	7.8e-001	5.4e+001
2	1.6e+000	-8.2e-001	1.1e+000	4.1e+001

### 3.2 四川电网算例

(下转第 73 页)

### 参考文献

[1] 段登伟,刘俊勇,吴集光. 计及风险的配电公司最优分时零售电价模型 [J]. 电力系统自动化, 2005, (3): 8-12.

[2] 段登伟,刘俊勇,刘继春,等. 基于激励原理的可中断负荷. 四川大学学报(工程科学版), 2005, 37(3): 143-148.

[3] 黄海峰,田华,吴巍. 2006年湖北电网迎峰度夏电力需求侧管理 [J]. 湖北电力, 2005, 30(1): 91-94.

[4] 田诺,仇新宇. 供需平衡时期电力供应应急预案编制的探索 [J]. 电力需求侧管理, 2007, 9(1): 16-19.

[5] 中国赴欧洲电力需求侧管理培训团. 欧洲电力需求侧

管理对中国的启示(上)——来自中国赴欧洲电力需求侧管理的培训报告 [J]. 电力需求侧管理, 2007, 9(2): 13-18.

[6] 王明俊. 市场环境下的负荷管理和需求侧管理 [J]. 电网技术, 2005, 29(5): 1-5.

#### 作者简介:

刘凌川 (1974—), 男, 硕士, 工程师, 从事电力运行管理工作;

段登伟 (1974—), 男, 博士, 高级工程师, 从事电网调度管理工作, 研究方向为电力市场、需求侧管理;

邓 华 (1973—), 男, 硕士, 工程师, 从事继电保护工作。

(收稿日期: 2008-10-29)

(上接第 41 页)

由文献 [9] 可知, 四川本地的低频振荡模式有 6 个, 将 2 个区域间模式列于表 2。

按 3.1 中方法, 在川云潭 31 号发电机出口变压器高压侧施加扰动, 在它与远处的托托电 G3 机组功角曲线上可以检测到频率为 0.21 Hz 的振荡模式, 而且该模式占主导作用。

表 2 四川电网区域间主导模式

序号	模式	频率 (Hz)	衰减阻尼比 (%)
1	$-0.0389 \pm j1.333$	0.21	2.9
2	$-0.0706 \pm j2.576$	0.41	2.7

同样, 在川二滩 04 号发电机出口变压器高压侧施加扰动, 在它与远处的鲁荷泽厂 5 号机组功角曲线上, 可以检测到频率为 0.41 Hz 的振荡模式, 而且该模式占主导作用。

### 4 结 论

介绍了 Prony 方法的理论基础和 Prony 算法主要特点及其适用范围, 通过试验信号证明了 Prony 方法适于分析振荡信号。最后通过仿真验证, 证明 Prony 算法完全可以分析低频振荡数据特征, 是一种有效的分析工具。

### 参考文献

[1] 吴敬儒,徐永禧. 我国特高压交流输电发展前景 [J]. 电网技术, 2005, 29(3): 1-4.

[2] 王海林,黎岚,吴安平,高万良,四川“十一五”电网规划及远景展望 [J]. 四川电力技术, 2007, 30(1): 5-7.

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

[4] 王铁强,贺仁睦,徐东杰,王昕伟. Prony 算法分析低频振荡的有效性研究 [J]. 中国电力, 2001, 43(11): 38-41.

[5] 芦晶晶,郭剑,田芳,吴中习. 基于 Prony 方法的电力系统振荡模式分析及 PSS 参数设计 [J]. 电网技术, 2004, 28(15): 31-34.

[6] 刘剑,刘天琪. Prony 在电力系统稳定控制领域中的应用 [J]. 现代电力, 2005, 22(6): 27-31.

[7] 曹维,翁斌伟,陈陈. 电力系统暂态变量的 Prony 分析 [J]. 电工技术学报, 2000, 15(6): 56-60.

[8] 邓集祥,涂进,陈武晖. 大干扰下主导低频振荡模式的鉴别 [J]. 电网技术, 2007, 31(7): 36-41.

[9] 邓集祥,贺建明,姚天亮. 大区域联网条件下四川电网低频振荡分析 [J]. 电网技术, 2008, 32(17): 78-83.

#### 作者简介:

白 洋 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。

李国庆 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。

姚天亮 (1979—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。

邓集祥 (1947—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2008-12-10)

# 基于小波变换的电力系统故障测距装置启动判据方法

刘 扬, 向俊杰, 付 涛

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 电力系统故障或扰动时伴随着电流电压的突变, 而小波变换的窗口大小具有自适应性, 当减小尺度参数  $a$  的取值时, 可以使时窗宽度变窄、频窗高度增大, 有利于检测突变信号。在介绍小波变换的基础上, 通过建立故障行波的故障特征与小波变换模极大值之间的关系, 构造了一种基于行波原理的输电线路故障测距装置启动判据方法, 可以在故障发生的瞬间快速检测出电流或电压突变量信号。

**关键词:** 小波变换; 行波; 输电线路; 模极大值

**Abstract:** The failure or disturbance of power system always follow along with the abrupt change of current and voltage. And the window size of wavelet transform has the adaptability. when reducing the values of scale parameter, the window width can be narrowed and the high-frequency window can be increased, which is beneficial to detect the signal of abrupt change. On the basis of the introduction of wavelet transform, the activated criterion method of transmission line fault location device based on the principle of traveling wave is constructed by establishing the relationship between the failure characteristics of fault traveling wave and the modulus maxima of wavelet transform, which can quickly detect the instant signal of abrupt change of current or voltage when fault occurs.

**Key words:** wavelet transform; traveling wave; transmission line; modulus maxima

**中图分类号:** TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)-0042-03

在电力系统运行中, 输配电线路担负着电能输送分配的重任, 很容易发生故障, 而用人工查找故障点又非常困难。故障定位技术可以根据线路故障时的故障特征迅速准确地进行故障定位, 不仅有利于线路及时修复, 保证可靠供电, 大大减轻人工巡线的工作量, 而且对电力系统的安全稳定和经济运行都有十分重要的作用。

通过建立故障行波的故障特征与小波变换模极大值之间的关系, 构造了一种故障测距及录波装置的启动方法, 以达到在线路故障时迅速、准确地启动装置, 以记录故障波形及实现故障定位。

## 1 电力系统故障特征

输电线路故障后, 故障点将产生沿线路运动的电压和电流行波; 由于波阻抗不连续, 行波在故障点、故障线路母线及与故障线路相连接的其他线路末端母线发生折、反射。行波的故障特征正是由行波分量之间的折、反射关系确定的<sup>[1,2]</sup>。

(1) 随着各种行波陆续到达母线, 行波出现“突

变”, 分别标志着故障发生、行波从故障点到检测母线往返一次的时间等。

(2) 突变的幅值取决于故障发生时刻故障点初始电压的大小  $[ -e(t) ]$ 、波阻抗间断点 (像母线、故障点等) 的折、反射系数和行波的衰减特性。

(3) 突变的极性取决于故障发生时故障点初始电压的极性和波阻抗的间断性质。

## 2 小波变换奇异点与信号变换剧烈处的联系

两者间的联系建立在两个基本概念的基础上<sup>[3]</sup>。

1) 设  $\theta(t)$  是一起平滑作用的低通函数 [如高斯函数  $\theta(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} e^{-\frac{t^2}{2\delta^2}}$ ], 则如图 1(a) 所示, 信号  $x(t)$  被  $\theta(t)$  平滑得到  $y(t)$ , 再求  $y(t)$  的导数  $z^{(1)}(t)$ 。这一运算等效于直接用  $\frac{d\theta}{dt}$  对  $x(t)$  作处理。

同理, 图 1(b) 的两个处理也是等效的。

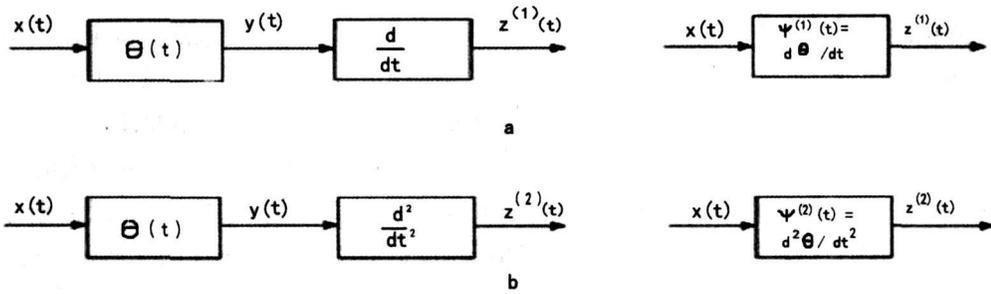


图 1 a为一阶, b为二阶导数情况

2)任何一个低通的平滑函数  $\theta(t)$  ( $\int \theta(t) dt \neq 0$ ,  $\Theta(\omega=0) \neq 0$ ), 其各阶导数 (例如  $\frac{d\theta}{dt}$ ,  $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ ) 必定是带通函数。因为根据傅里叶变换的微分定理, 它们的频率特性在  $\omega=0$  处必有零点。因此,  $\psi^{(1)}(t) = \frac{d\theta}{dt}$ ,  $\psi^{(2)}(t) = \frac{d^2\theta}{dt^2}$  都可以用作小波变换的基本小波。

把上述两个概念结合起来便可得到下述结论:

如果  $\psi^{(1)}(t)$  是某一低通平滑函数  $\theta(t)$  的一阶导数, 则可用  $\psi^{(1)}(t)$  对  $x(t)$  作小波变换。此时小波变换的零点正是  $\frac{dy}{dt}=0$  之处, 也就是  $y(t)$  的极值点所在 ( $y(t)$  是  $x(t)$  被  $\theta(t)$  平滑后的结果); 小波变换的极值点是  $\frac{d^2y}{dt^2}=0$  之处, 也就是  $y(t)$  的转折点, 在极限情况 (阶跃) 下它也就是阶跃点。

如果  $\psi^{(2)}(t)$  是平滑函数  $\theta(t)$  的二阶导数, 则可用  $\psi^{(2)}(t)$  对  $x(t)$  作小波变换。此时小波变换为零之点是  $y(t)$  的转折点 [ $\frac{d^2y}{dt^2}=0$ ]; 极限情况下也就是

阶跃点。  
这些结论对基本小波的伸缩  $\psi_{\alpha}^{(1)}(t) = \frac{1}{\alpha} \psi^{(1)}(-\frac{t}{\alpha})$ ,  $\psi_{\alpha}^{(2)}(t) = \frac{1}{\alpha} \psi^{(2)}(-\frac{t}{\alpha})$  当然也同样适用。

图 2 以阶跃式边沿和  $\delta$  函数式尖峰两类突变为例, 对上述分析作一图示总结 (其中  $\psi^{(1)}(t)$ 、 $\psi^{(2)}(t)$  为小波基,  $WT^{(1)}x(t)$ 、 $WT^{(2)}x(t)$  分别为对阶跃输入和脉冲输入进行小波变换后的结果)。它也就是用小波变换的过零点和极值点来检测信号的局部突变的基础。

由图 2 可见, 突变点的位置有时是由小波变换的过零点反映的, 有时是由其极值点反映的。一般来说, 根据过零点作检测不如根据极值点。因为过零点易受噪声干扰, 而且有时过零点反映的不是突变点, 而是信号在慢区间的转折点。因此, 检测边沿宜采用如  $\psi^{(1)}(t)$  的反对称小波, 检测尖峰脉冲宜采用  $\psi^{(2)}(t)$  型的对称小波 [4~6]。

### 3 小波变换用于故障信号的判据

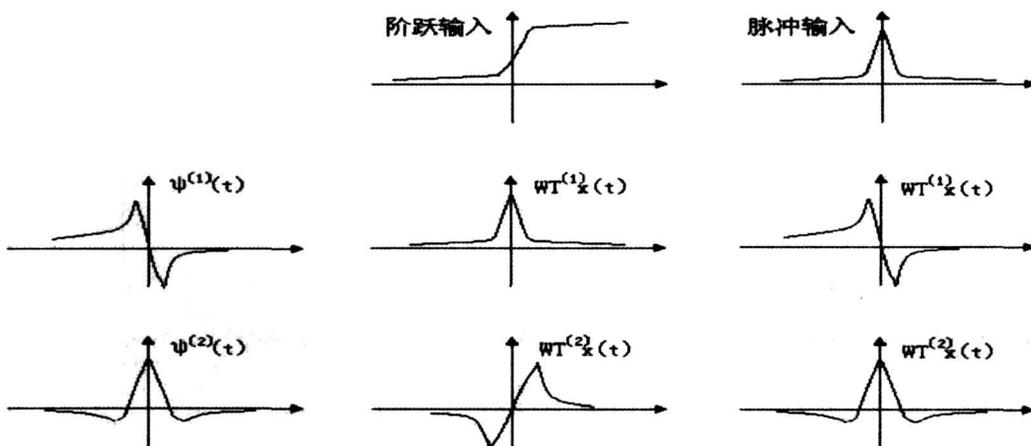


图 2 用  $\psi^{(1)}(t)$ 、 $\psi^{(2)}(t)$  作小波对阶跃输入及脉冲输入的处理结果

为了验证上节所述利用小波变换奇异点原理检测电力系统中故障或扰动时电流电压量的突变,用 MathWorks 公司的 MATLAB 中 PSB (Power System Blockset) 工具箱对此进行了大量的数字仿真。

### 3.1 仿真模型

仿真模型为双端供电的单回输电线路分布参数模型,如图 3 所示。

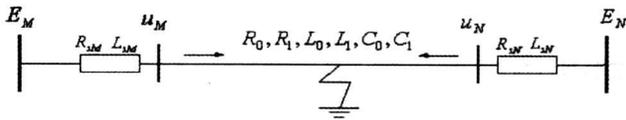


图 3 单回线路仿真模型

线路参数:  $R_1 = 0.085 \Omega / \text{km}$

$L_1 = 1.016 \times 10^{-3} \text{ H} / \text{km}$

$C_1 = 1.1368 \times 10^{-8} \text{ F} / \text{km}$

$R_0 = 0.3165 \Omega / \text{km}$

$L_0 = 3.555 \times 10^{-3} \text{ H} / \text{km}$

$C_0 = 4.6673 \times 10^{-9} \text{ F} / \text{km}$

系统参数:  $E_M = E_N = 220 \text{ kV}$

$R_{SM} = R_{SN} = 1 \Omega$

$L_{SM} = L_{SN} = 0.1 \text{ H}$

线路长度为 300 km, 两端电源相角差为  $5^\circ$ 。

### 3.2 数字仿真及结果

仿真数据的采样率为 4 kHz, 设置数据保存方式为前 5 个周波是故障前数据, 故障开始时刻为第 6 个周波开始, 即第  $4000 \times 0.02 \times 5 + 1 = 401$  个采样点。

#### 3.2.1 小波基的选择

对于小波基的选择要求既可以突出故障点, 又能尽量减少噪声造成的影响。尝试了 DB1、DB4 小波作为小波基, 发现相对于 DB1 小波, DB4 小波更符合要求。因为在短路电流比较小, 噪声较大的场合, 噪声对 DB1 小波造成的影响更大 (如图 4 所示), 而对 DB4 小波造成的影响较小如图 5 所示, 对比两图可见 DB4 小波分解后的数据在故障点处的突变更明显。

#### 3.2.2 仿真结果

由仿真结果可知, 在各种短路情况下, 利用小波奇异点原理均可以较准确地检测到电力系统中故障或扰动时电流电压量的突变, 其误差通常控制在几个采样点左右。在有些情况下如线路另一侧出口处在电压过零点时短路, 造成本侧短路电流特别小时, 为了突出故障点, 可对采得的数据先进行一次微分。

具体应用于启动判断时, 可取当前时刻小波变换的模的绝对值与一个周期前对应时刻的小波变换的模的绝对值相减, 根据有效信号突变点所对应的小波变换模极大值具有沿尺度传递的特性, 当某一时刻在尺度  $j=2, 3$  或  $j=3, 4$  上, 小波变换模的突变量均超过各自尺度上的整定值时, 即可判定在该时刻发生了故障。这种方法可以大大缩减启动判断所需的数据窗的长度, 在理论上甚至可以达到不带延迟启动, 这在需要高速启动的场合例如超高压线路微机保护上面有很大的发展前途, 不过在如何区分系统扰动和故障仍需做更多的工作。

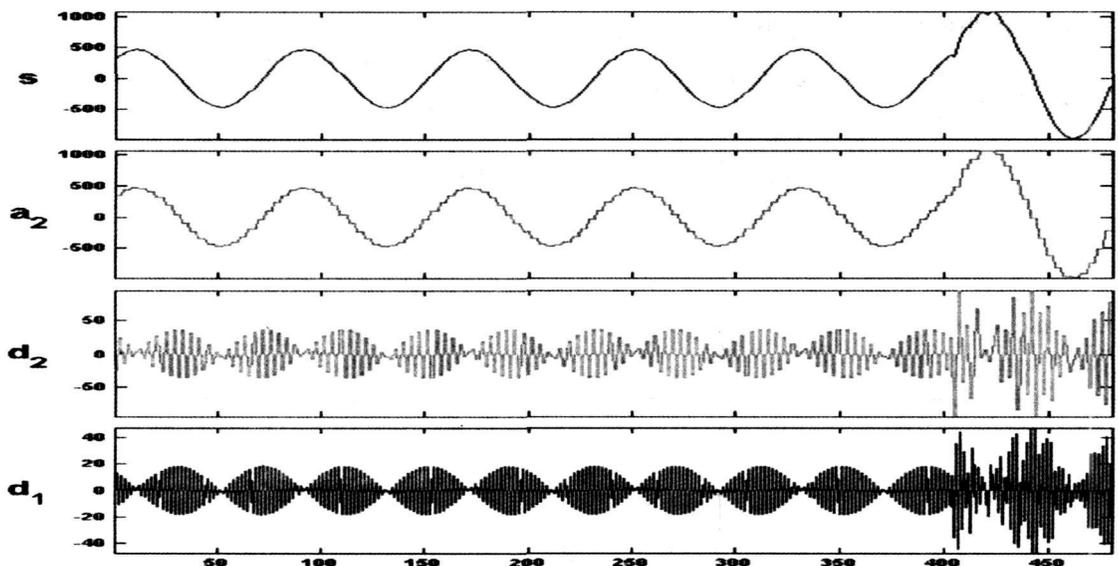


图 4 A 相距 M 侧 270 km 处故障 DB1 小波分解图

(下转第 58 页)

[19] Massimo A, Antonio C, Nuccio S. A chip-Z transform based synchronizer for power system measurements[C]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement Technology Conference USA, 2002.

ment for harmonics and interharmonics measurement in power supply systems[J]. Measurement 2004, 35 (4): 371-380.

(收稿日期: 2008-10-29)

[20] Massimo A, Antonio C, Salvatore N. A PC-based instru-

(上接第 44 页)

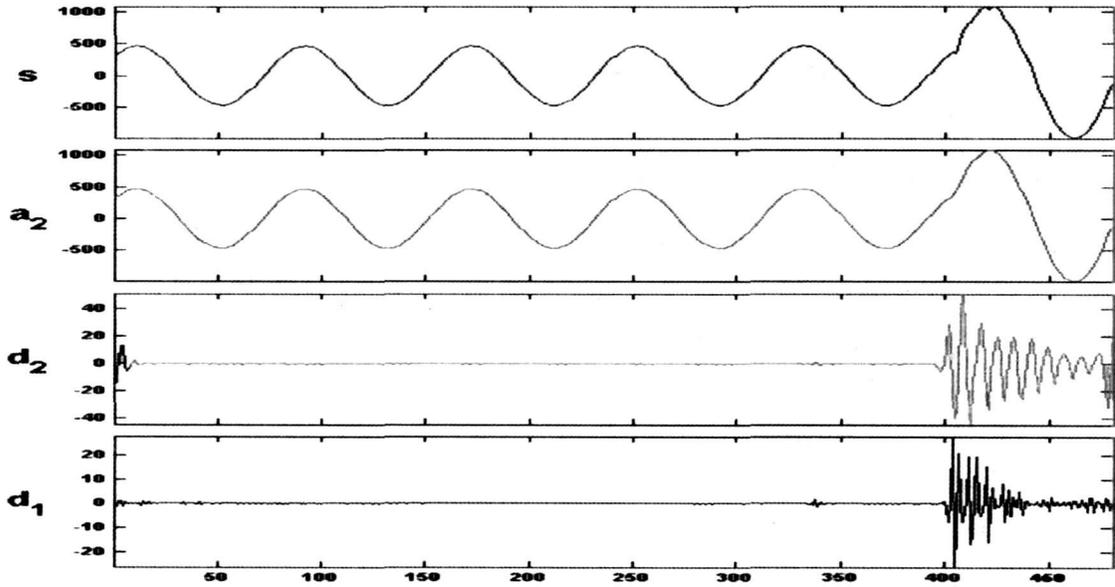


图 5 A 相距 M 侧 270 km 处故障 DB4 小波分解图

## 4 结 论

线路故障后的暂态行波中包含着故障信息,其故障特征是信号的突变,分析了利用小波变换作为故障判别启动判据的方法。它利用小波分析对突变信号的敏感性,采用对采集的数据进行小波变换后寻找奇异点的方法判别故障的发生,以此来启动故障测距或录波系统。通过 MATLAB 中的小波工具箱对上述方法进行的仿真表明了本方法的有效性<sup>[7]</sup>。

### 参考文献

[1] 贺家李,葛耀中. 超高压输电线故障分析与继电保护[M]. 北京: 科学出版社, 1987.  
[2] 金玉生,杨敏中,王晓蓉,等. 高压架空输电线路的故障测距方法[J]. 电网技术, 2000, 24 (4): 27-33.

[3] 董新洲. 小波理论应用于输电线路故障测距研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1996.  
[4] 蒋涛,陆于平. 基于小波变换的单端输电线路行波故障测距[R]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十二届学术年会.  
[5] 李友军,王俊生,郑玉平,等. 几种行波测距算法的比较[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (14): 36-39.  
[6] 贾俊国,范云鹏,李京,等. 利用线路行波的线路故障测距技术及应用[J]. 电网技术, 1998, 22 (8): 63-66.  
[7] 董新洲,贺家李,葛耀中,等. 基于小波变换的行波故障选相研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (1): 20-22.

### 作者简介:

刘 扬 (1986-),男,汉族,湖北襄樊人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制,武汉大学电气工程学院。

(收稿日期: 2008-12-15)

# 电力谐波对电能计量影响的研究

何 群

(四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610072)

**摘 要:** 由于非线性负荷的大量应用, 谐波对电能计量产生影响的问题越来越受到业界的关注, 在介绍了感应式和电子式两类电能表的计量原理的基础上, 采用 MATLAB 仿真工具, 分析了两类计量装置的误差频率特性, 并通过对谐波在线性负载和非线性负载下消耗电能情况的计算公式推导, 指出现行计量方式存在的不合理性, 并提出了一种新型的电能计量方式。

**关键词:** 电能计量; 谐波; 频率特性; 电能表; MATLAB

**Abstract:** Because of a large amount of applications of non-linear load, it attracts more and more attention of power industry to the influences of harmonic on electric energy measurement. After the detailed descriptions of the structures and measuring principles of induction watt-hour meter and electronic watt-hour meter, the frequency characteristic curves of the two types are simulated by the tool of MATLAB. A new electric energy measuring standard is given based on the expression formula of the electric energy consumed by linear loads and non-linear loads.

**Key words:** electrical energy measurement; harmonic; frequency characteristic; watt-hour meter; MATLAB

**中图分类号:** TM93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)-0045-04

电能是国民经济和人民生活的主要能源, 对国家的发展起着举足轻重的作用。电能计量数据直接涉及发电、供电、用电三方的经济利益, 同时也是许多技术指标计算的重要依据。然而随着电力电子装置等非线性负荷的大量应用, 整个电力系统被引入了大量谐波, 严重影响了电能计量的准确性和合理性。谐波对于电力系统来说是完全有害的, 目前, 世界各国都对谐波问题予以了充分的重视, 加强了对电力谐波问题的研究。通过谐波对电能计量影响的分析, 提出了一种改进的电能计量方式。

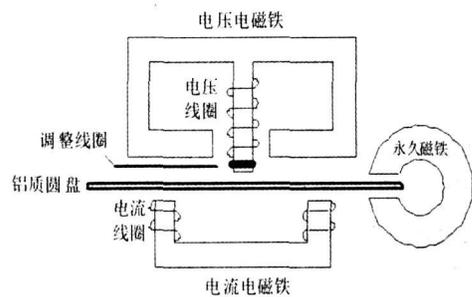


图 1 感应式电能表工作原理示意图

当转动力矩  $M$  与制动力矩  $M_b$  相等的时候铝盘将以匀速转动, 此转速  $N$  正比于电路的功率:

$$N = \frac{k}{k_c} P = kP \quad (3)$$

3) 计数装置是一个十进制的机械式计数器, 用来记录铝盘转数。

$$N = \int_0^t n dt = k \int_0^t P dt = kE \quad (4)$$

$$E = \frac{1}{k} N = CN \quad (5)$$

$C$  称为电能表常数。铝盘转数乘以常数  $C$  就是被测电路消耗的电能。

## 1.2 电子式电能表工作原理

电子式电能表的结构主要包括: 输入部分、乘法器、积分部分、输出部分。其工作原理示意图如图 2 所示。电子式电能表工作原理是通过电压采样和电

## 1 电能表的计量原理

### 1.1 感应式电能表结构及工作原理

感应式电能表由驱动装置、制动装置、计数装置三部分组成, 其结构及工作原理示意图如图 1 所示。

1) 驱动装置由电压电磁铁、电流电磁铁和装于轴上的铝质圆盘构成。用来产生驱动力矩, 驱动力矩正比于被测电路消耗的功率:

$$M = k_i P \quad (1)$$

2) 制动装置由永久磁铁与圆型铝盘构成, 大小正比于铝盘的转速:

$$M_b = k_c n \quad (2)$$

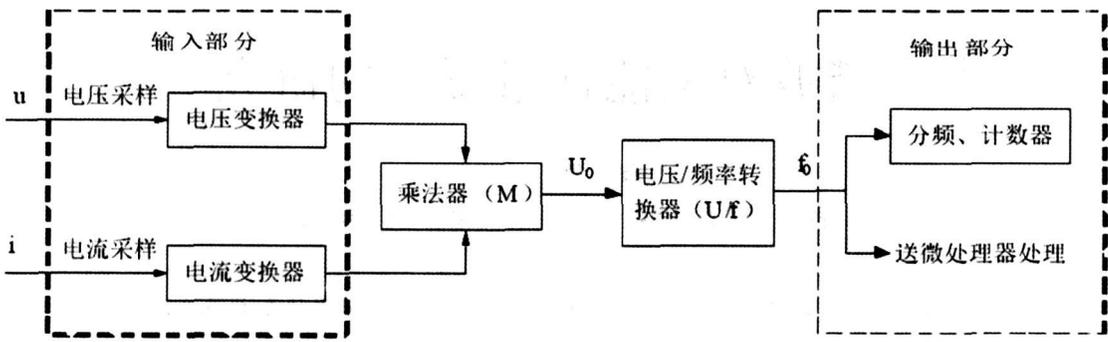


图 2 电子式电能表工作原理示意图

流采样,将电压信号和电流信号送入乘法器得到功率,然后通过积分电路,也就是进行 V/F 压频变换,得到对应的频率,通过对频率信号计数得到被测电路消耗的电能值送至输出。

## 2 谐波对电能计量准确性影响的理论分析

电能计量装置是针对工频正弦波电压设计的,由于谐波的存在使得电能计量装置偏离约定的计量环境状态,产生误差。谐波是一个周期电气量的正弦波分量,其频率为基波频率的整数倍,从理论上讲任何周期性波形都可以将它分解为傅里叶级数来进行分析,也就是进行频域分析,因此电能计量装置的频率特性是研究基波变形对电能计量影响的重要依据。

### 2.1 感应式电能表的频率特性

根据已经建立的感应式电能表频率特性模型,采用 MATLAB 数学工具软件模拟仿真,将数据直接进行图形化处理,可以直观方便地展示输入、输出之间的关系。通过程序计算绘图,可以得到感应式电能表的误差频率特性曲线如图 3 所示。图中多条曲线分别为不同功率因数下的感应式电能表误差情况。

1) 感应式电能表的电能计量误差频率特性曲线呈迅速下降趋势,即感应式电能表在计量高频电能时,会出现负误差;

2) 计量误差随频率的增高而增大,当频率为 1000 Hz 左右时,误差超过了 -90%;

3) 不同功率因数下的误差值有一定的差异。

### 2.2 电子式电能表的误差频率特性

电子式电能表的误差频率特性曲线如图 4 所示。从仿真结果看,随着频率升高,误差值增大,整个曲线近似为一个二次曲线。和感应式电能表相同,电子式电能表计量误差随着谐波频次的升高而增加,但总体来看,电子式电能表计量误差比感应式电能表计量误

差小得多,20 次谐波频率特性误差值不超过 4%。

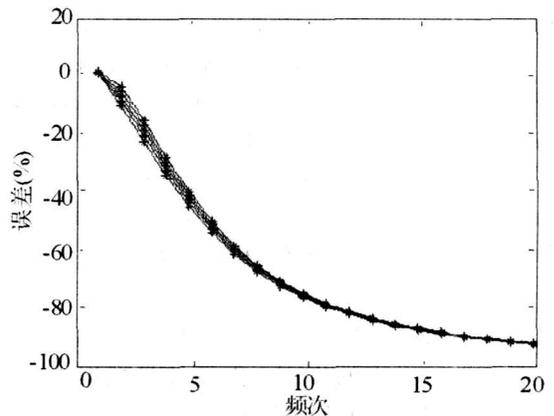


图 3 感应式电能表误差频率特性曲线

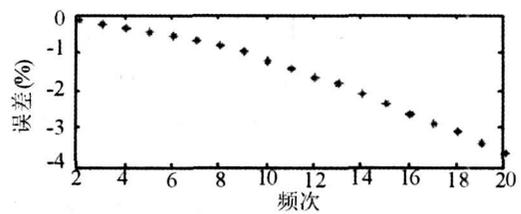


图 4 电子式电能表误差频率曲线

### 2.3 感应式电能表和电子式电能表的误差频率特性比较

将感应式电能表和电子式电能表的误差频率特性曲线绘制到一张图上,如图 5 所示。可以看出:感应式电能表随着高次谐波的增加,误差频率特性曲线衰减很严重,而电子式电能表的误差频率曲线则相对平坦,这说明电子式电能表具有较宽的频率响应特性。

从以上分析可以看出:感应式电能表有迅速下降的误差频率特性,使得感应式电能表只能计量谐波的一部分。若以  $W_1$  表示基波电能,  $W_n$  表示谐波电能,  $W$  表示电能表所计量的电能,则感应式电能表反映的电能值近似可表示为:

$$W = W_1 + \sum K_n W_n \quad (6)$$

其中:  $K_n$  为谐波电能系数,表征谐波被计量的程

度,显然  $K_n < 1$ ,且随谐波频率次数增加而减少。

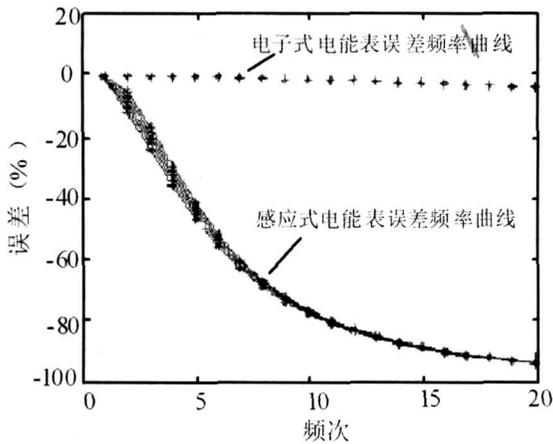


图 5 两种电能表误差频率特性曲线比较

而对电子式电能表的仿真分析结果表明,和感应式电能表测量基波电能和部分谐波电能不同,电子式电能表误差频率特性曲线变化较为平缓,即电子式电能表测量基波电能和几乎全部谐波电能。因此电子式电能表测量可近似表示为:

$$W = W_1 + \sum W_n \quad (7)$$

在以全能量为计量标准的计量中,电子式电能表的计量误差接近于零,但是以基波为计量标准的计量中,电子式电能表的计量误差将比感应式电能表的计量误差大。

### 3 现阶段电能计量方式的探讨

#### 3.1 谐波作用下电能计量的方式

目前在谐波作用下电能计量有 3 种方式。

- 1) 电能表要准确反映实际功率,即基波和谐波的综合功率,称为全能量方式;
- 2) 电能表仅仅反映基波功率,不计谐波功率,称为基波电能方式;
- 3) 电能表分别计量基波功率和谐波功率,称为谐波电能方式。

由于目前国内采用的是全能量的电能计量方式,使得在谐波作用下电能计量的准确性和合理性都产生了问题。

#### 3.2 谐波功率对现行计量方式合理性的影响

中国采用的全能量的计量方式,在基波情况下能够准确地反映出用户的用电情况,但是在谐波作用下,就会产生较大的差异,下面通过一个简化的电力系统模型,分析在谐波情况下的电能计量情况。

图 6 为一含有非线性负载和线性负载的简单的系统等效模型,图中电压源 S 电压为  $u_s(t)$ ,  $u(t)$  是用

户与电网公共连接点 PCC 处的电压, Z 是电源内阻和线路阻抗;  $Z_H$  和  $Z_M$  分别代表非线性负载和线性负载;  $I_{H1}$  和  $I_{M1}$  分别为非线性负载和线性负载吸收的基波电流有效值;  $I_{Hh}$  为非线性负载向电网中注入的 h 次谐波电流有效值;  $I_{MHh}$  为线性负载吸收的来自于非线性负载的 h 次谐波电流有效值;当电源中含有谐波时,  $I_{HSh}$  和  $I_{MSH}$  分别为非线性负载和线性负载从电源中吸收的 h 次谐波电流有效值。

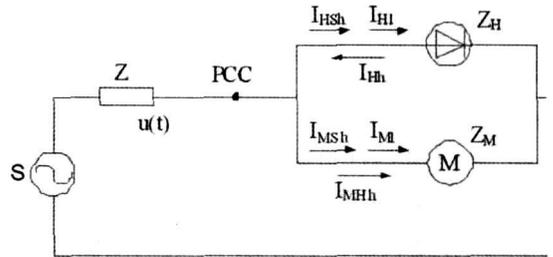


图 6 含线性和非线性负载的简化电力系统模型

下面就电源电压波形畸变和无畸变两种情形,研究电能计量所受到的影响。设电源电压中含有的最高次谐波次数为 M,则设电压  $u(t)$  为

$$u(t) = \sqrt{2}U_1 \cos(\omega t + \Phi_{u1}) + \sum_{h=2}^M \sqrt{2}U_{Sh} \cos(h\omega t + \Phi_{uSh}) + \sum_{h=2}^N \sqrt{2}U_{Hh} \cos(h\omega t + \Phi_{uHh}) \quad (8)$$

式中,  $U_1$ ——PCC 点处的基波电压有效值;

$N$ ——非线性负载所产生的谐波电压的最高次谐波次数;

$U_{Hh}$ 、 $U_{Sh}$ ——分别为由电源所含谐波和由非线性负载发出谐波在 PCC 点引起的 h 次谐波电压有效值;

$\Phi_{uSh}$ 、 $\Phi_{uHh}$ ——电压源和非线性负载这两个谐波源在 PCC 点 h 次谐波电压的初相角;

$\Phi_{u1}$ ——PCC 点的电压基波分量的初相角。

设流经非线性负载的电流  $i_h(t)$  和线性负载的电流  $i_m(t)$  分别为:

$$i_h(t) = \sqrt{2}I_{H1} \cos(\omega t + \Phi_{H1}) + \sum_{h=2}^M \sqrt{2}I_{HSh} \cos(h\omega t + \Phi_{HSh}) - \sum_{h=2}^N \sqrt{2}I_{Hh} \cos(h\omega t + \Phi_{Hh}) \quad (9)$$

$$i_m(t) = \sqrt{2}I_{M1} \cos(\omega t + \Phi_{M1}) + \sum_{h=2}^M \sqrt{2}I_{MSh} \cos(h\omega t + \Phi_{MSh}) + \sum_{h=2}^N \sqrt{2}I_{MHh} \cos(h\omega t + \Phi_{MHh}) \quad (10)$$

式中,  $\Phi_{HSh}$ 、 $\Phi_{MSh}$ ——非线性负载和线性负载从系统中吸收的 h 次谐波电流的初相角;

$\Phi_{hh}$ ——非线性负载发出的  $h$  次谐波电流初相角, 有效值前的负号表示电流实际方向与参与方向相反;

$\Phi_{Mhh}$ ——线性负载吸收的由非线性负载发出的  $h$  次谐波电流初相角;

$\Phi_{H1}$ 、 $\Phi_{M1}$ ——非线性负载和线性负载的基波电流初相角。

计算得非线性负载  $Z_H$  吸收的有功功率  $P_H$  为:

$$P_H = U_{H1} I_{H1} \cos\Phi_{H1} + \sum_{h=2}^{\infty} U_{Sh} I_{Sh} \cos\Phi_{HSh} - \sum_{h=2}^{\infty} U_{Hh} I_{Hh} \cos\Phi_{Hh}$$

$$= P_{H1} + P_{Hs} - P_{Hh} \quad (11)$$

式中,  $P_{H1}$ 、 $P_{Hs}$ ——分别为非线性负载吸收的基波和背景谐波有功功率;

$P_{Hh}$ ——为非线性负载发出的谐波有功功率, 负号表示向系统注入谐波功率。

则非线性负载在一个周期内消耗的电能  $E_{H1}$  为:

$$E_{H1} = \int_0^T P_H dt = \int_0^T (P_{H1} + P_{Hs} - P_{Hh}) dt$$

$$= E_{H1} + E_{Hs} - E_{Hh} \quad (12)$$

式中,  $E_{Hs}$ ——表示电网中的背景谐波在非线性负载  $Z_H$  上引起的谐波电能损耗;

$E_{Hh}$ ——表示非线性负载  $Z_H$  向电网中注入的谐波电能。

同理, 可求出线性负载  $Z_M$  在一个周期内消耗的电能  $E_M$  为:

$$E_M = \int_0^T P_M dt = \int_0^T (P_{M1} + P_{Msh} + P_{MH}) dt$$

$$= E_{M1} + E_{Msh} + E_{MH} \quad (13)$$

式中,  $E_{M1}$ ——线性负载吸收的基波电能;

$E_{Msh}$ 、 $E_{MH}$ ——线性负载消耗的分别由系统和非线性负载两个谐波源提供的电能。

上述等式都是在电源电压波形畸变的前提下得到的, 当电源电压为工频正弦波时, 式 (11)~式 (13) 右边不含中间项, 而其他两项不变。可求得两种负载在一个周期内消耗的电能:

$$E_H = \int_0^T P_H dt = \int_0^T (P_{H1} - P_{Hh}) dt = E_{H1} - E_{Hh} \quad (14)$$

$$E_M = \int_0^T P_M dt = \int_0^T (P_{M1} + P_{MH}) dt = E_{M1} + E_{MH} \quad (15)$$

比较两种情况下非线性负载和线性负载吸收电能的表达式 (12)~式 (15) 可以看出: 由于谐波功率的大小和方向的影响, 无论电源电压波形是否畸变, 只要系统中存在谐波功率, 线性负载实际消耗的电能就大于其吸收的基波电能 ( $E_M > E_{M1}$ )。而在一般情况下, 非线性负载从系统吸收的背景谐波电能小于其向系统注入的谐波电能 ( $E_{Hh} < E_{H1}$ ), 所以非线性负载

实际消耗的电能值要小于其吸收的基波电能值 ( $E_{H1} < E_{Hh}$ )。

非线性负载吸收其所需基波电能的同时又向系统注入谐波电能, 线性负载吸收基波电能的同时又被迫吸收了谐波电能。而不论是对于线性负载还是非线性负载, 谐波电能都是有害的, 电动机所做的功只和它从电网吸收的基波电能成正比, 不会由于从谐波源送来的谐波电能而多做功。

如果按现行的电能计量方式, 电能表反映的是基波和谐波的综合电能 ( $E_H$  或  $E_M$ )。这就导致用户实际消耗基波电能 ( $E_1$ ) 与电能表读数不等。按电能表读数缴费就会使非线性负载向系统注入谐波功率反而少缴电费, 而线性负载受到谐波污染却要多交电费, 这显然是不合理的。

#### 4 一种建议的新型电能计量方式

为解决谐波对电能计量准确性及合理性的影响这一问题, 需要确定新的计量方式。在分析某个特定用户与配电网的相互影响时, 可以将单一正弦电压源供电的多用户配电网等效为一个由多电源 (正弦电压源与背景谐波源) 供电的单用户电网, 电网与某一负荷间的关系可以总结为以下几种情况:

1) 电网无背景谐波, 负荷为线性负荷, 此时没有谐波功率;

2) 电网无背景谐波, 负荷为非线性负荷, 此时有谐波功率由负荷流向电网, 谐波功率为负, 负荷为谐波发生源;

3) 电网有背景谐波, 负荷为线性负荷, 此时有谐波功率由电网流向负荷, 谐波功率为正, 负荷为谐波吸收源;

4) 电网有背景谐波, 负荷为非线性负荷, 这是最为普遍的一种情况, 此时谐波功率有正也有负, 当谐波总和为正时可以将负荷看作谐波吸收源, 为负时看作谐波发生源, 因此第二、第三种情况可以视为第四种情况的特殊情况, 在谐波分析时只考虑第四种情况即可。

发电机提供的电源近乎纯正弦波电压源, 因而, 电网中消耗的谐波能量是由电网中各个电力用户的非线性负荷引起的。因此, 由某个电力用户所引起的配电网谐波电能损耗理应由该用户来承担。电力用户希望电网提供纯正弦波电压源, 因而, 由电网背景谐波源在电力用户中引起的谐波电能损耗理应由电

网来承担。假设负荷吸收的基波电能为  $W_1$ , 吸收的谐波电能为  $W_{in}$ , 发出的谐波电能为  $W_{out}$  (这里  $W_{in}$ 、 $W_{out}$  仍以基波电能方向为基准, 与基波方向同向为正, 反向为负), 在电能量收费时可以按照下式对以上 3 种电能进行区别对待:

$$\text{电费} = C_1 W_1 - C_{in} W_{in} + C_{out} W_{out} \quad (16)$$

$C_1$ 、 $C_{in}$  和  $C_{out}$  分别是负荷消耗的基波电能电价、负荷吸收的谐波电能电价及负载产生的谐波电能电价。这里规定:

$$C_{in} \leq C_1 \leq C_{out} \quad (17)$$

依据此电费数学模型对用户进行收费, 将有效地起到通过经济手段, 迫使用户采取措施减小注入电网的谐波量, 同时对受谐波危害的用户进行部分补偿的作用, 有利于电能计量的准确性和公平性。

采用这种建议的计量方式需要设计、制造新型电子式电能计量装置, 由于它的原理相对复杂, 成本会比较高。但是如果所研究的标准和定义是建立在科学基础上的, 这些研究工作将会有力地促进电测仪表的发展和改进。随着电子技术的不断发展, 相信这种计量方式将会在技术、经济、政策等方面得到支持, 在众多的研究、生产、管理部门的共同努力下电能计量将越来越准确、合理。

## 参考文献

- [1] 韩宵汉. 电子式电能表的应用浅析 [J]. 浙江电力, 1997 (1).
- [2] 李长宇, 舒乃秋, 彭辉, 等. 基于 RTDS 的谐波对电能计量影响的仿真分析 [J]. 继电器, 2004, 32(16): 25-27.
- [3] 同向前, 余健明, 薛钧义. 电网谐波电能损耗的计量方法 [J]. 西安理工大学学报, 2002, 18(2): 181-184.
- [4] Baghzouz Y. et al Harmonic analysis of induction wattour meter performance IEEE Trans on Power Apparatus and Systems 1985, 104(2): 399-406.
- [5] Duane Hanselman, Bruce Littlefield 李人厚, 张平安, 等译校. 精通 MATLAB 综合辅导与指南 [M]. 西安交通大学出版社, 1998 年第 1 版.

### 作者简介:

何群, 高级工程师, 1993 年毕业于重庆大学电气工程系电磁测量及仪表专业, 取得学士学位, 在四川省电力工业调整试验所承担电测计量工作。2003 年就读于北京理工大学计算机科学与工程系, 取得工学硕士学位, 现在在四川省电力工业调整试验所承担电测计量技术监督工作, 并受聘四川大学计算机科学与工程学院副教授。

(收稿日期: 2008-10-14)

# 成都局计量中心跃升“国家实验室”

2009 年元旦前夕, 中国合格评定国家认可委员会 (CNAS) 国家级权威评审专家们进行为期三天客观、公正、严格、细致的现场评审后正式宣布: 国家电网四川成都电业局电能计量中心顺利通过了“国家实验室”现场评审, 成为中国西部地区第一家地市级电能计量“国家实验室”。

这就意味着成都局电能计量中实验室质量管理及控制水平实现了质的飞跃, 一举跃升为“国家级电能计量检测机构”。今后, 成都局电能计量中心在 CNAS 认可业务范围内授权出具的质量报告, 将被世界上 54 个国家和地区的政府及国际大公司所认可。

成都局电能计量中心是根据《四川省电力公司电能计量中心建设指导性意见》和成都局城区单位体制改革试点设立的主业二级单位, 2007 年 1 月挂牌成立, 当年 7 月正式全面运营。该中心成立以来, 克服了人才资源和物质条件严重不足的困难, 在全川电能计量中心中第一家通过了 ISO 9001 质量管理体系 A 级优质客户认证, 取得了 JJF 1069 法定计量检定机构考核认证。

与此同时, 该中心的建设工作也取得了阶段性成果——将该计量中心初步建设成了集约化、规模化、专业化、标准化和现代化的全川最大型电能计量专业检测机构。国家电网公司、四川省电力公司和省(市)质量技术监督局的有关领导和权威技术专家到该中心实地检查和指导工作后, 均给予了高度评价, 一致认为该中心在建设、生产、运营、管理等方面都走在了全川前列。

据悉, 今后中国合格评定国家认可委员会 (CNAS) 每年都将派考评专家到该中心进行了一次监督考评, 以确保“国家实验室”的技术权威性。

(摘自《西南电力报》)

# 基于最大熵的多谐波源求和方法研究

陈晓静<sup>1</sup>, 李楠<sup>2</sup>

(1. 重庆电力科学研究院, 重庆 400015; 2. 成都电业局调度局, 四川 成都 610021)

**摘要:**提出了一种处理电力系统中随机谐波矢量(电压和电流)求和问题的新方法。用随机矢量 X-Y 分量的各阶矩求和代替随机矢量求和运算,再用矩量平方换算给出矢量和的  $2n$  阶矩。由最大熵原理仅需要矢量和的 4 阶矩就能很好地得到逼近求和概率密度函数 pdf(probability density function)。这种方法求和时不需要各个随机矢量在相位上具有  $0 \sim 2\pi$  的概率分布,使用统计样本较少。最后对 2 个谐波电流矢量幅值的近似 pdf 和由实测值统计得到的 pdf 进行对比,证明了该方法的有效性。

**关键词:**谐波求和;非线性;最大熵

**Abstract:** A new method about random harmonic summation in power system is proposed. It is to use several order moments of X-Y component of random vectors to substitute the random vectors summation. And the  $2n$  order moments of vectors summation is given by moments squares conversion. Using the maximum entropy could approximate the probability density function. The method could use less statistic samples and need no probability distribution of  $0 \sim 2\pi$  about every random vector. At last the availability of the method is approved by the case.

**Key words:** harmonic summation; nonlinear; maximum entropy

**中图分类号:** TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)-0050-04

近年来,由于半导体、电弧和电磁等类型的大量非线性负荷在民用、工业和商业中的广泛应用,使得电力系统配电网和输变电系统中产生了大量的谐波电流和谐波电压,给系统和用户造成了极大的危害。IEC(国际电工委员会)和国标都提出了以谐波的 95% 超值概率值(即超过 95% 概率值谐波电压或电流的大小)作为谐波估计标准。

谐波源具有时变特征,因此普遍采用概率统计的方法来对其产生的谐波电流或相应的谐波电压进行分析和估计。为了计算谐波的 95% 超值概率值,首先要求获得谐波分布的概率密度函数。传统采用 Monte-Carlo 方法计算概率密度函数<sup>[2]</sup>,但计算量大,计算所耗时间长。文献[3]总结了电力系统中常见的 3 种计算概率密度函数的方法,包括 Gram-Charlier(或者 Edgeworth)级数法、Pearson 法和 Johnson 法。Gram-Charlier 级数法假定分布是近似的正态分布, Pearson 法<sup>[4]</sup>要求以一种特别的概率密度函数为基础,分布函数满足某一特定的微分形式,而 Johnson 法中,将给定的概率密度函数转换成另一种熟悉的形式,不同的转换函数可能带来不同的误差,转换函数的最优选择还有待进一步探讨。因此,它们在计算谐波分布概率密度函数和谐波的 95% 超值概率值时都还存在着一定的局限性。

电力系统不可能在所有节点位置安装谐波检测装置,通常对未测节点用随机矢量求和的方法进行评估,所以就提出了多谐波源求和问题。目前已做了一些涉及随机求和问题的研究工作。如文献[5]提出的随机变量求和方法以累积量法为基础采用高阶正交多项式逼近等效负荷曲线;文献[6]提出了随机相位概率分析法,将具有  $[0, 2\pi]$  分布的随机矢量求和问题转化为随机变量求和问题;文献[7]使用 Laguerre 正交多项式逼近求和概率密度,通过随机矢量幅值和高阶(原点)矩给出多项式系数,但只局限于求解具有  $[0, 2\pi]$  分布的随机矢量求和问题。现场测量结果证实大多数非线性负荷产生频次低于 11 次的谐波,且一般不具有  $[0, 2\pi]$  分布,表现为小于  $2\pi$  的扇形分布或椭圆分布。对于相位分布小于  $2\pi$  的随机矢量求和问题,可采用 Monte-Carlo 模拟法<sup>[6]</sup>或 Laguerre 多项式法<sup>[9~11]</sup>。前者要求已知概率分布特征和大量的统计样本,但用计算机产生的伪随机数只能模拟特定的概率密度函数;后者主要考虑多项式只能展开有限项的截断误差和递推计算高阶矩带来的误差。

下面将利用最大熵原理拟合概率密度函数的特点,用样本较低次阶(原点)矩(4 阶)计算拉格朗日乘子;通过多随机矢量的 X、Y 正交分量的各阶矩求

和过程得到和矢量幅值(简称和值)的各阶矩,从而得到以最大熵方法为基础的和值概率密度函数,进而获得相应的 95%超值概率值。

## 1 基于最大熵原理概率密度函数确定

### 1.1 信息量和信息熵的概念

1948年, C. E. Shannon首次提出了信息熵的概念,把熵作为一个随机事件的不确定性或信息量的量度。设 X是一随机独立变量,它的概率密度函数为 p(x),定义 I(x)为单位幅值上的信息量。即

$$I(x) = \ln \frac{1}{p(x)} = -\ln p(x) \quad (1)$$

它是随机变量 X取值不确定性的量度,是另一种简单的概率量度。

熵的定义为:

$$H(x) = - \int_R p(x) \ln p(x) dx \quad (2)$$

它是随机变量不确定性的量度,或者说是平均信息量。也就是说在可能的不确定性区间中,不确定性越大,其熵越大。

### 1.2 最大熵概率估计基本公式

1957年, E. T. Jaynes 提出了最大熵原理<sup>[12]</sup>(The maximum entropy principle 简称 MEP);最少为偏见的概率分布是这样一种分布,它使熵在已知信息的附加约束条件下达到最大化。可以简洁地理解为利用最大熵原理得到的概率分布是最无序的、最随机、含主观成分最少的概率分布。这个原理在数学上可表达为:

$$\max H(x) = - \int_R p(x) \ln p(x) dx \quad (3)$$

约束条件:

$$\int_R p(x) dx = 1 \quad (4)$$

$$\int_R p(x) dx = m_i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (5)$$

式中: H(x)是随机变量 x的熵; p(x)是随机变量的概率密度函数; m<sub>i</sub>为随机变量的第 i阶原点矩; R为积分区间。

为了使随机变量的熵 H(x)在满足式(4)、(5)的条件下取得最大值,特构造了如下所示的拉格朗日方程:

$$\bar{H} = H(x) + (\lambda_0 + 1) \left[ \int_R p(x) dx - 1 \right]$$

$$+ \sum_{i=1}^m \lambda_i \left[ \int_R p(x) dx - m_i \right] \quad (6)$$

式中, λ<sub>0</sub>、λ<sub>1</sub>、λ<sub>2</sub>、... λ<sub>N</sub>,是拉格朗日乘子。

当满足  $\frac{\partial \bar{H}}{\partial p_i} = 0$  时,可以得到:

$$p(x) = \exp(\lambda_0 + \sum_{i=1}^m \lambda_i x^i) \quad (7)$$

这就是最大熵概率密度函数的表达式。

通过建立求解 m+1个关于 λ 的方程组后,代入式(7)就可以得到随机变量的概率值了。

将式(7)代入式(4)有

$$\int_R \exp(\lambda_0 + \sum_{i=1}^m \lambda_i x^i) dx = 1 \quad (8)$$

整理后有

$$e^{-\lambda_0} = \int_R \exp(\sum_{i=1}^m \lambda_i x^i) dx \quad (9)$$

$$\lambda_0 = - \ln \left\{ \int_R \exp(\sum_{i=1}^m \lambda_i x^i) dx \right\} \quad (10)$$

将式(9)对 λ 微分,有

$$\frac{\partial \lambda_0}{\partial \lambda_i} = - \int_R x^i \exp(\lambda_0 + \sum_{i=1}^m \lambda_i x^i) dx = -m_i \quad (11)$$

将式(10)对 λ 微分可得

$$\frac{\partial \lambda_0}{\partial \lambda_i} = - \frac{\int_R x^i \exp(\sum_{i=1}^m \lambda_i x^i) dx}{\int_R \exp(\sum_{i=1}^m \lambda_i x^i) dx} \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可得

$$m_i = \frac{\int_R x^i \exp(\sum_{i=1}^m \lambda_i x^i) dx}{\int_R \exp(\sum_{i=1}^m \lambda_i x^i) dx} \quad (13)$$

通过式(13)可建立求解 λ<sub>1</sub>, ..., λ<sub>m</sub>的 m 个方程组,求出 λ<sub>1</sub>, ..., λ<sub>m</sub>后,可根据式(10)求出 λ<sub>0</sub>。

由式(7)、(10)、(13)可见,拉格朗日乘子可由随机变量 n阶矩(一般用 4阶就可作出很好的密度函数)和积分变量上下界值确定, n阶矩可现场谐波测量得到,因此可用于描述随机谐波的概率密度函数。

## 2 随机矢量和高阶矩的求取

F由各谐波源实测数据,计算各谐波源处样本的各阶矩,由各谐波源实测数据(即随机矢量)X、Y分量的高阶矩求和代替随机矢量求和运算,再用矩量平方换算给出矢量和(所求母线处)的 2n阶矩,使用递推算法估计测量统计值各分量的 n阶矩,其推导过程如下:

$$\dot{A}_T = \sum_{i=1}^n A_i \cos \theta_i + j \sum_{i=1}^n A_i \sin \theta_i = \sum_{i=1}^n X_i + j \sum_{i=1}^n Y_i \quad (14)$$

式中,  $\dot{A}_T$  为  $n$  个随机矢量  $\dot{A}_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) 的和;  $A_i$ 、 $\theta_i$  分别为  $\dot{A}_i$  的幅值和相角;  $X_i$ 、 $Y_i$  分别为  $\dot{A}_i$  的 X、Y 分量。由式 (14) 可进一步推导出

$$\begin{cases} X_T = \sum_{i=1}^n X_i \\ Y_T = \sum_{i=1}^n Y_i \\ A_T^2 = X_T^2 + Y_T^2 \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $X_T$ 、 $Y_T$  分别是和值  $A_T$  的 X、Y 分量。考虑到各分量相互独立, 因此有

$$\dot{w}_T^{(1)} = E(\sum_{i=1}^n X_i) = \sum_{i=1}^n \dot{w}_i^{(1)} \quad (16)$$

$$\dot{w}_T^{(2k)} = E(\sum_{i=1}^n X_i^{2k}) \quad (17)$$

式中,  $\dot{w}_T^{(1)}$ 、 $\dot{w}_i^{(1)}$  分别为  $X_T$  和  $X_i$  的 1 阶矩;  $\dot{w}_T^{(2k)}$  为  $X_T$  的  $2k$  阶矩, 它可由式 (18) 递推得到

$$\mu_{X_{m+1}}^{(2k)} = \mu_{X_m}^{(2k)} + \sum_{j=1}^{2k} C_{2k}^j \mu_{X_m}^{(2k-j)} \dot{w}_{m+1}^j \quad (18)$$

式中,  $C_{2k}^j = \frac{2k!}{(2k-j)!j!}$  是二项式系数;  $\mu_{X_{m+1}}^{(2k)}$  为  $m+1$  个 X 分量之和的  $2k$  阶矩;  $\dot{w}_{m+1}^j$  为第  $m+1$  个 X 分量的  $j$  阶矩。同理可推导出 Y 分量的  $\mu_{Y_{m+1}}^{(2k)}$  和  $\dot{w}_{m+1}^j$ , 进而得到

$$\dot{w}_{A_T}^{(2)} = \dot{w}_T^{(2)} + \dot{w}_T^{(2)} \quad (19)$$

$$\dot{w}_{A_T}^{(2k)} = \dot{w}_T^{(2k)} + \sum_{j=1}^k C_k^j \dot{w}_T^{(2k-2j)} \dot{w}_T^{(2j)} \quad (20)$$

求得矢量之和的各阶矩, 由此可算得  $\lambda_1, \dots, \lambda_m$  及  $\lambda_0$ , 最后得到谐波电压或者电流的概率分布函数。

全部计算过程如下: ①由各谐波源实测数据计算各阶矩; ②由式 (18) 求矢量之和在 X-Y 分量的  $2k$  阶矩, 由式 (19) 和式 (20) 合成矢量和幅值的  $2k$  阶矩; ③由式 (10)、(13) 求拉格朗日乘子; ④由式 (7) 得到矢量和 (幅值平方) 的 pdf; ⑤由得到的 pdf 计算 95% 概率值。

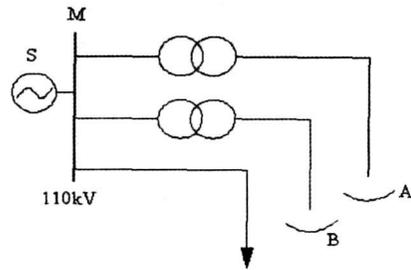


图 1 电弧炉供电系统简图

### 3 实测数据的应用分析

对在某电网内 110 kV 节点处所测数据进行分析, 电弧炉供电系统简图如图 1 所示。M 点母线带有 2 台 20 t 的电弧炉, 分别工作时用 TOPS 1000 电能质量监测仪采自变压器 110 kV 高压侧, 采用 3 s 均方值每 min 整理成一个数据, 1 d 内得到 1 440 个数据作为计算样本 (各谐波电流值为相对基波电流的百分值: 谐波电流 = 谐波电流值 / 基波电流值  $\times 100\%$ ),

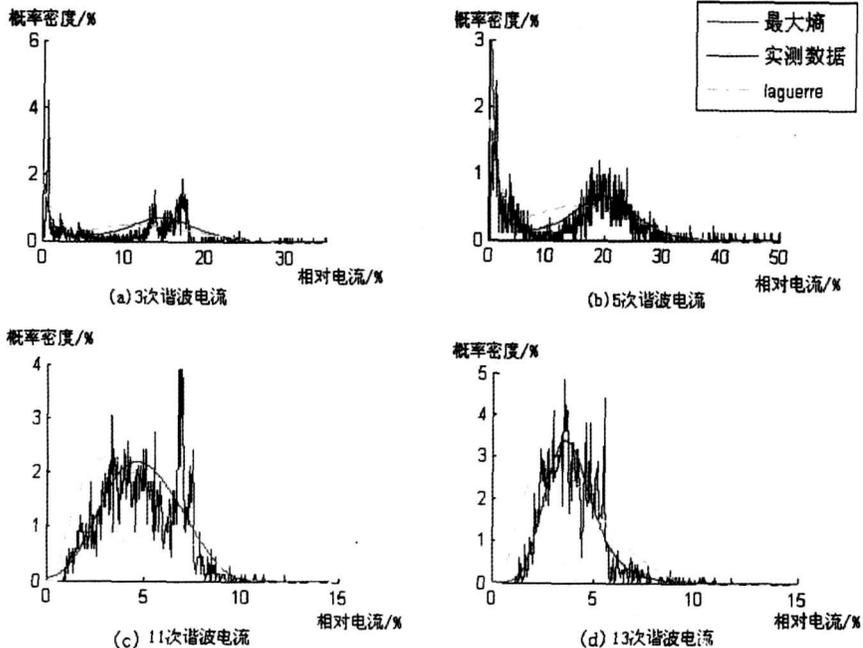


图 2 电弧炉谐波电流的概率密度函数

表 1 电弧炉谐波电流和的 95% 概率值

谐波次数	最大熵估计值	Laguerre 估计值	实测值	最大熵相对误差 (%)	Laguerre 相对误差 (%)
3 次	21.565	21.98	19.605	9.997	12.114
5 次	36.347	34.139	35.923	1.180	4.966
11 次	8.095	8.256 4	7.583 2	6.749	8.878
13 次	6.454 9	6.831 6	6.285 1	2.702	8.695
平均误差 (%)				5.157	8.663 3

电流单位:基波电流的百分比

表 2 电弧炉谐波电流和的 99% 概率值

谐波次数	最大熵估计值	Laguerre 估计值	实测值	最大熵相对误差 (%)	Laguerre 相对误差 (%)
3 次	24.715	24.756	24.60	0.467	0.634
5 次	43.53	42.346	45.355	4.024	6.634
11 次	9.500 1	10.20	9.091	4.500	12.199
13 次	8.450 1	8.950 9	8.741	3.328	2.401
平均误差 (%)				3.079 7	5.467

电流单位:基波电流的百分比

利用前述的方法求逼近两台电弧炉谐波电流和分布的概率密度函数(阶矩取到 8 阶)并作其曲线图,如图 2 中规则实线所示,与按照文献 [11] 的方法以 Laguerre 多项式拟合概率密度函数(阶数取到 20 阶),如图 2 中规则虚线所示,并与实际测量值求和统计得到的谐波电流分布曲线(图 2 中不规则曲线)进行比较,最后比较谐波电流的 95% 概率值和 99% 概率值,并计算相对误差,如表 1、表 2 所示。所分析的谐波次数取 3、5、11、13 次。相对误差 =  $\frac{\text{估计值} - \text{真实值}}{\text{真实值}} \times 100\%$ 。

由实例分析可以看出,由最大熵方法得到的逼近曲线和由 laguerre 多项式得到的逼近曲线都很好地拟合了谐波的实际分布。最大熵仅需样本 4 阶矩就能得到很好的逼近曲线,可以避免矢量和高阶矩的递推计算所带来的误差,同时避免 laguerre 多项式只能展开有限项出现的截断误差。测量数据的样本矩与利用积分公式直接积分得到的精确矩之间的误差,使得最大熵逼近概率密度函数与实际分布函数有一定差异。由以上计算结果可以看出最大熵方法得到的逼近函数的 95% 概率值与实际的 95% 统计值的平均相对误差仅为 5.157%,比由 laguerre 多项式得到的平均误差更小,因此,用此方法估计谐波的 95% 概率值是有效的。

## 4 结 论

利用最大熵原理能拟合随机变量和随机矢量(幅值)的 pdf 用前述的方法只要求的各随机矢量

在 X-Y 分量的 4 阶矩,就可以完成随机矢量求和计算并给出 pdf 不要求随机矢量具有在  $0 \sim 2\pi$  的概率分布。最后采用最大熵原理获得的随机矢量和幅值的近似 pdf 与 2 个实测值相加得到的 pdf 进行对比,证明该方法的有效性。谐波电流 95% 概率值产生误差的原因,一方面是积分上下界值的选取不准确所带来的误差,一方面是样本矩与精确矩存在一定误差,各阶矩的精确计算还有待进一步探讨。同时,积分上下界的准确选取还需要进一步研究。

## 参考文献

- [1] 吴竞昌. 供电系统谐波 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 杨洪耕, 肖先勇, 刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展 (二)——电网谐波的测量与分析 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(11): 1-4.
- [3] Campinelli G, Esposito T, Varibne P, et al Probabilistic Harmonic Power Flow for Percentile Evaluation—IEEE Int [A]. Conference on Technology for the Millennium Toronto (Canada); 2001.
- [4] 田卫东. 以高阶累积量和高阶正交多项式级数展开式为基础的电力生产随机概率模拟方法 [J]. 电网技术, 1995, 19(1): 31-34.
- [5] 张晶. 多谐波源系统谐波叠加方法的研究 [J]. 电网技术, 1995, 19(3): 23-27.
- [6] 杨洪耕, 秦东, 张正书, 王刚. 用 Laguerre 多项式描述谐波随机求和问题 [J]. 电网技术, 2005, 29(14): 26-29.

(收稿日期: 2008-11-23)

# 地区级电网负荷特性及其影响因素分析

尹琦, 刘青丽

(德阳电业局, 四川 德阳 618000)

**摘要:** 结合作者所在地区电网的实际, 详细分析了电网负荷特性及其影响因素, 综合考虑了各产业、水电机组、气候条件、产业结构与政策、电网规划与建设等多因素对实际电网负荷的影响。针对所在电网存在的问题, 提出了改善电网负荷特性的建议。

**关键词:** 负荷特性; 影响因素; 电网结构, 改进措施

**Abstract:** The load characteristics and its influence factors of Deyang Power Grid are analyzed in detail, and the proposals for improving the load characteristics of power grid are put forward.

**Key words:** load characteristics; influence factors; network structures; improvement action

**中图分类号:** TM714 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0065-04

在实际电网运行管理过程中, 必须结合电网实际, 认真考虑各种影响因素, 包括: 产业结构与政策、经济水平、地理位置、气候条件、负荷水平等, 存在很大的随机性和不确定性。在制定运行方式、检修方式和运行管理中, 对负荷特性及其影响因素的研究是保证电网安全经济运行的前提条件。结合中国西部较典型的地区级电网的实际, 重点研究负荷组成与结构、负荷变化趋势与规律、负荷影响因素及其与负荷的关系, 针对不同因素变化应采取的技术措施进行了研究, 期望通过研究提出适应地区级电网实际需要的负荷分析方法, 为四川电网乃至中国西部地区电网的安全经济运行提供参考。从实际电网出发, 为了全面掌握电网运行的实际情况, 了解负荷变化规律及变化趋势, 为电网的电力电量平衡计算、电网调峰规划及电网规划提供依据, 以提高电网运行的经济性。

## 1 历年负荷特性分析

在实施西部大开发战略的过程中, 产业结构和政策的调整对电网负荷结构有重要影响。在西部地区尤其是在四川, 重工业、高能耗产业的比重不断增多, 形成了电网的主要负荷。所研究的实际电网地处中国重型装备制造基地, 该地区的主要产业包括: 机械加工、钢铁、烧碱、黄磷、水泥等, 这些行业的用电量占全网用电市场的 70% 以上, 其中排名前 10 的大客户的用电量占全网售电能量的 30% 以

上。从总体上看, 黄磷受国家宏观经济政策调控影响较大, 其余工业企业的用电量更多取决于市场变化。

所研究的电网, 2000~2007 年用电比重变化如见表 1。其中, 2007 年第一产业用电由于农村生产排灌负荷增长大, 比重呈下降趋势; 第二产业由于结构调整, 用电比重有所下降, 但其占总供电能量比例大, 导致 2007 年供电能量增长缓慢; 第三产业若不考虑 2003~2007 年限电因素的影响, 应呈上升趋势; 居民生活用电比重呈上升趋势; 趸售电能量比重呈较快上升趋势。

表 1 各产业用电比重 (%)

年份	一产	二产	三产	居民	趸售
2000	6.4	73.8	5.5	10.3	4.1
2001	5.1	73.2	6.0	9.3	6.5
2002	3.2	72.4	8.0	9.0	7.4
2003	2.0	72.4	7.4	8.8	9.4
2004	2.0	75.6	6.3	8.0	8.2
2005	1.1	75.6	5.6	8.6	9.1
2006	1.7	70.4	5.8	9.8	12.3
2007	1.2	67.4	4.8	9.5	17.2

该电网 2000 年主网供电能量为 34.6 亿 kW·h, 2007 年为 70.98 亿 kW·h, 年均递增率 10.6%。2000 年主网最大供电负荷为 544 MW, 2007 年达 1164 MW, 年均递增率 11.42%。

2000~2005 年主网年平均最大负荷和年平均负荷显著增长, 但 2006 年由于受高耗能产品出口退税

政策的影响,什邡市和绵竹市电量有所波动,导致德阳电网主网年平均负荷较往年增长缓慢。见图 1。

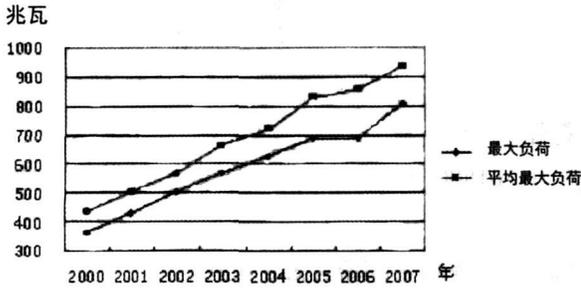


图 1 2000~2007 年平均最大负荷和平均负荷

德阳电网 2000~2007 年主网平均负荷率介于 0.82~0.90 (见图 2), 负荷均衡且波动小。其原因主要是由于德阳地区高耗能、黄磷企业多, 这些用户多半是三班制或二班制连续生产, 平均负荷较高。这些企业一般选择平段和谷段用电, 使得德阳地区平段和谷段的用电负荷不低反高。特别是在冬季, 低谷电价低, 德阳地区许多用电能量大的企业都采取避峰生产。

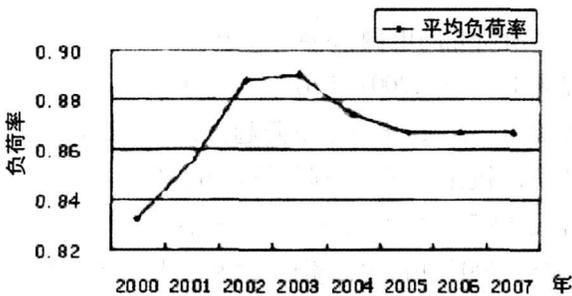


图 2 2000~2007 年平均负荷率

用电负荷增长的同时, 地区用电峰谷差也在逐年加大。虽然 2007 年最大峰谷差达 425 MW, 与 2006 年同期持平, 但从发展的角度看, 还有继续加大的趋势 (见表 2)。

表 2 2000~2007 年年最大峰谷差

年	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
最大峰谷差 (MW)	198	203	225	292	311	361	425	425

德阳地区用电峰谷差变化特点是夏季和冬季大于春、秋两季。这是由于德阳地处川西平原, 夏季闷热、冬季湿冷, 冬季无集中供暖设备, 采暖制冷均采用空调设备。这就决定了随着空调负荷的增长, 夏季高峰与冬季高峰的峰值十分接近。近年来人民生活水平的不断提高, 伴随第三产业的发展, 夏季和冬季空调负荷的快速增长, 德阳电网最大负荷发生在冬、夏两季。

## 2 影响德阳地区历年用电负荷的因素

### 2.1 德阳地区小水电对用电负荷的影响

截至 2007 年底, 德阳电网全口径并网电厂装机容量为 57.805 MW, 全是水电机组。2007 年度的丰水期上网平均负荷仅为 10.62 MW, 平水期上网平均负荷仅为 9.24 MW, 枯水期上网平均负荷仅为 4.11 MW, 占德阳地区丰、平、枯水期平均负荷的 1.36%、1.26%、0.58%, 影响较小。

### 2.2 气温及气候对用电负荷的影响

居民生活用电负荷、农村生产排灌用电负荷具有明显的季节波动特点, 在多数情况下, 直接影响系统峰值负荷的大小和出现时间。尤其是随着取暖器、空调、电风扇之类家用电器日益广泛地使用, 居民负荷变化对系统峰值负荷变化的影响越来越大。商业部门越来越广泛地采用空调、电风扇、制冷制热设备等, 使得商业用电负荷也同样具有季节性变动的特性, 并且这种趋势正在增长。相对来说, 大多数工业负荷一般都受气候影响较小。

2007 年德阳空调降温日用电量最高已接近 4 GWh, 并且还将继续增长。一般来说, 冬季气温在 8℃ 以下或夏季气温在 25℃ 以上时, 负荷的季节特性就会较明显的表现出来。

就德阳地区而言, 当气温降至 10℃ 以下时, 取暖负荷占总用电负荷的比重大大增加, 最高可达 15%; 当气温在 10℃~18℃ 之间时, 取暖负荷占总用电负荷的比重开始下降, 约占总用电负荷的 6%; 当气温在 18℃~25℃ 之间时, 降温负荷逐渐增加, 最高约占总用电负荷的 3%; 当气温高于 25℃ 时, 降温负荷大幅增加, 最高约占总用电负荷的 20%。

### 2.3 其他因素对用电负荷的影响

① 随着经济发展和产业结构调整的不断深入, 德阳 6 县 (市、区) 的招商引资工作逐渐向招商选资方向发展, 集中优势工业发展区的建设构想和战略目标, 使德阳市工业园区快速成为全市经济发展的闪亮点和增长点, 其中 2006 年以二重为龙头的重工业同比增长 47.7%, 以化肥为主的化工行业同比增长 21.1%。全市全社会投资完成额同比增长 10.41%, 其中商品房销售额增长幅度最大, 同比增幅为 78.42%。2007 年, 二重、美丰等大工业用电能量保持了 20% 以上的增幅。

② 由于高耗能行业不景气, 2006 年年平均日负荷率较往年有所降低, 但负荷率水平相对较高。

③ 枯水期由于电煤供应不足, 全省供电趋紧, 同时部分地区 (如川西北、川东北地区) 因网架薄弱联络线输送能力有限, 在峰平段出现供电能力不足, 电网被迫采取错峰、拉闸限电等需求侧管理措施。2006 年夏季, 受益地内百年不遇严重旱情的影响, 8 月份全网在峰水期出现了多年不见的以电量供应不足为主要特点的电力供需矛盾, 夏季日最大避峰负荷达 145 MW。2007 年汛期总降水量接近常年略偏少, 平均温度省内大部分地区较常年略偏高, 夏季降温负荷所占的比重加大, 但未出现限电。

④ 电网结构和输变电设备的限制。电网不能跟上负荷发展的需要, 主要表现为: 220 kV 变电容量不足, 110 kV 部分输变电设备不满足  $n-1$  要求, 配电网线径偏小且局部配电变压器容量不足。

### 3 2008 年影响德阳地区用电负荷特性的因素分析

#### 3.1 2008 年影响德阳地区用电负荷的因素

##### 3.1.1 大工业市场发展的影响

2008 年德阳地区经济工作重心仍是以重大装备制造为龙头, 在节能减排政策的带动下合理调整化工产业结构, 集中发展高新技术工业园区。因此 2008 年全局电力主要增长点仍表现为大工业用电的快速增长, 同时化工行业产业结构优化结果将逐渐减缓全局售电能量的增长速度。

##### 3.1.2 趸售区电力销售高速发展

从全局售电结构来看, 趸售电量占全局售电总量 17.18%, 为德阳局第二大用电市场, 同时也是德阳局增长最大的市场。

##### 3.1.3 居民用电的影响

2007 年居民用电增幅达 3.32%。预计 2008 年居民用电较往年有所增加, 但居民用电受温度、生活水平影响较大, 具有不确定因素。

#### 3.2 2008 年影响德阳地区供电能力的因素

1) 枯水期由于电煤供应不足、来水偏少, 主网电力电量供应无法满足所有用户需求。受主网与川西地区联络线潮流断面稳定限额的限制, 德阳电网枯水期供电形势依然严峻。

2) 受电网结构和输变电设备的限制。

##### 3.2.1 网络结构不合理

220 kV 变电站之间的 110 kV 联络线不足导致 220 kV 站全站失压或主变检修后大量负荷无法转移或依赖相邻电业局转移困难。

德阳电网 110 kV 线路串供变电站较多, 最为突出的是绵竹和中江电网。

单线单变、单线双变、多电源单变变电站共计 21 个, 电网供电可靠性降低。

110 kV 变电站电源进线不合理。如 110 kV 电源进线均在一段母线上, 造成电源进线段母线检修需对外停电。110 kV 电源一备一用, 主供电源一侧为刀闸进线, 备用电源一侧为开关进线。对于这种接线的变电站在主供电源线路检修时, 必须采用主变压器停电的方式, 才能将主变压器从主供电源倒至备用电源供电。

##### 3.2.2 变压器容量不足

220 kV 主变压器容量不足。2007 年 220 kV 新市、孟家变电站均出现主变压器过载现象, 新市主变压器最高时达到了 280 MW, 容载比仅有 0.97。

多台 110 kV 变压器重载。全局变压器重载的有斑竹等 4 个 110 kV 变电站。其中 110 kV 斑竹站主变压器容量容载比仅为 1.4; 民主枯水期负荷已经满载。

##### 3.2.3 配网问题

部分 10 kV 配网线径偏小, 联络能力不足。

表 3 德阳地区 2008 年主网供电负荷预测

月	月电量	最大负荷	平均最大负荷	平均最低负荷
1	6.09	960.00	895.00	648.00
2	4.69	905.00	815.00	587.00
3	6.34	965.00	905.00	656.00
4	6.54	1 019.00	950.00	685.00
5	7.25	1 093.00	1 013.00	737.00
6	6.65	1 129.00	1 029.00	743.00
7	6.45	1 140.00	1 042.00	759.00
8	6.49	1 186.00	1 066.00	780.00
9	6.42	1 048.00	970.00	701.00
10	6.32	1 064.00	981.00	708.00
11	7.02	1 268.71	1 156.00	856.00
12	7.70	1 321.09	1 196.00	896.00
合计	77.96	1 321.09	1 001.50	729.67

### 4 2008 年主网负荷需求预测

依据历史资料, 结合德阳电网供电能力, 计及限

电因素的影响,采用自然增长 + 显著增长的基本预测方法, 预计 2008 年 德阳电业局可实现售电能量 73. 439 亿 kW · h 同比增长 5. 48%; 力争实现售电能量 75. 0785 亿 kW · h 同比增长 7. 83%。2008 年各月负荷预测见表 3。

## 5 改善德阳电网负荷特性的主要措施

(1)加强设备停电管理, 实行《年度停电管理办法》。《年度停电管理办法》的核心就是将德阳电网所辖设备的大修、技改、预试和基建的停电工作都纳入电业局年度停电计划和供电局年度停电计划, “同一设备一年内原则上只安排一次停电计划”。大力推行带电作业和不停电作业。任何单位发生重复计划停电和非计划停电、停电延期, 电业局都将对其进行严格考核。

(2)加快电网建设。加快中江 220 kV 站及配套的 110 kV 输变电工程、绵竹 220 kV 九岭站及配套的 110 kV 输变电工程等一系列新建、扩建工程项目, 增加变电容量, 提高供电可靠性, 解决供电能力不足的问题。

(3)加快 10 kV 配电网改造, 适当增加配电变压

器, 对老旧线路进行更新改造, 并新建配电线路, 消除配网“卡脖子”现象。

(4)加强负荷预测工作。做好每日极值预测; 并根据季节、气温变化的特点进行负荷的预测, 提高负荷预测的准确率, 以减少拉闸限电。如夏季应注意空调负荷、气候突变对负荷变化的影响, 做好降温负荷预测; 冬季电力供应紧缺, 做好负荷预测, 指导用电客户根据供电形势有序用电。

(5)合理、科学安排运行方式; 及时掌握系统运行的情况、负荷水平、电网薄弱环节, 在此基础上合理安排设备停电检修方式。方式安排中, 杜绝电网设备过载运行。方式变化较大时, 应进行潮流计算, 了解系统潮流、电压的变化及可能对系统带来的影响。

(6)加强需求侧管理, 有效降低高峰时段的电力需求。

(7)充分发挥电价在削峰填谷、均衡用电方面的经济杠杆作用。进一步加大峰谷电价政策的执行力度, 区别不同行业的价差比例, 实行分时段按功率因数调整电费, 以增强各类用户对其的响应程度, 指导用户低谷用电, 提高电网负荷率。执行季节性电价、避开电网尖峰时段。

(收稿日期: 2008-11-10)

(上接第 12 页)

2007, 27 (1): 93-97.

[8] Cristaldi L, Ferrero A. Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality [J]. IEEE Trans on Instrum. and Meas. 1995, 44: 683-685.

[9] Wilsun Xu, Xian Liu, Yili Liu. An Investigation on the validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination [J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 2003, 18(1): 214-219.

[10] Li Chun, Xu Wilsun, Tayjasanant T. A critical impedance based method for identifying harmonic sources [J]. IEEE Trans on Power Delivery. 2004, 19 (2) : 671-678.

[11] Moustafa A A, Moussa A M, El-Gammal M A. Separation of Customer and Supply Harmonics in Electrical Power Distribution Systems [C]. Harmonics and Quality of Power 2000 Proceedings Orlando Florida. 2000, 3 (1): 1035-1040.

[12] Kandil M S, Farghal S A, Elmitwally A. Refined power quality indices [J]. IEE Proceedings - generation Transmission and Distribution. 2001, 148(6): 590-596.

[13] Antonio Dell'Aquila, Maria Marinelli, Vito Giuseppe Monopoli, Pericle Zanchetta. New power-quality assessment criteria for supply systems under unbalanced and non-sinusoidal conditions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 2004, 19(3): 1284-1290.

[14] 吴竞昌. 供电系统谐波 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[15] Mahdi M, El Arin A. A time domain load modelling technique and harmonics analysis [C]. 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power Athens Greece. 1998, 930-938.

[16] 何晓群, 刘文卿. 应用回归分析 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2001.

### 作者简介:

龚华鳞 (1985-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向: 电能质量及其控制技术。

肖先勇 (1968-), 男, 四川宜宾人, 副教授, 硕士生导师, 长期从事电能质量及其控制技术等方面的教学和研究。

(收稿日期: 2008-12-08)

# 基于多峰谱线插值的间谐波检测新方法

黄小佳<sup>1</sup>, 刘亚梅<sup>2</sup>, 廖学静<sup>1</sup>, 袁志坚<sup>1</sup>

(1. 德阳电业局, 四川 德阳 618000; 2. 四川大学, 四川 成都 610065)

**摘要:**插值 FFT 算法根据检测到的频率分布修正 FFT 结果, 而实际中间谐波频率很难确定, 当间谐波信号附近含幅值较大的谐波信号时, FFT 的栅栏效应可能降低检测精度。利用频率识别能力较强的线性调频 Z 变换 (CZT), 用检测得到的与估计值邻近的 4 条离散频谱幅值估计间谐波参数, 并根据多项式逼近推导了插值修正公式, 在 CZT 谱频率分布指导下进行插值修正, 使各次谐波和间谐波参数的检测精度得到一定程度提高, 仿真证明了该方法的可行性和正确性。

**关键词:**线性调频 Z 变换 (CZT); 间谐波; 四峰谱线

**Abstract:** Interpolation FFT algorithms correct the results of FFT according to the detected frequency distribution. However the distribution of interharmonics and harmonics in actual signal usually can not be ascertained beforehand. And when there are harmonic signals with large amplitude near interharmonic signal the inherent picket fence effect of FFT will reduce the precision of detection. A method for interharmonic measurement is presented based on chirp Z transform (CZT) and correction algorithm of four-peak spectral lines. The accurate estimated value of frequency distribution of interharmonic signal can be obtained by means of CZT and the parameter of interharmonics can be estimated to form the amplitude of four neighboring peak spectral lines. The polynomial approximation method is used to obtain the simple correction formula of Blackman-Harris window interpolation algorithm, and the interpolation and correction is carried out according to the distribution of CZT spectra. So the estimated results are modified and more accurate parameters of various orders of harmonics and interharmonics are obtained. The simulation results show that the proposed method is feasible and proper.

**Key words:** chirp Z transform (CZT); interharmonics; four-peak spectral line

**中图分类号:** TM714.1; TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0054-05

随着电力电子设备及非线性负荷的增多, 电力系统中谐波和间谐波 (非整数次谐波) 问题越来越突出<sup>[1~3]</sup>, 对其进行准确的检测成了重点课题。

间谐波检测法主要有: 小波检测法<sup>[4~6]</sup>、自回归模型 (autoregressive model AR) 检测法<sup>[7,8]</sup>、神经网络检测法<sup>[9,10]</sup>、奇异值分解 (singular value decomposition SVD) 及其改进法<sup>[11]</sup>、特征空间求根法<sup>[12]</sup>、快速傅立叶变换法等<sup>[13~17]</sup>。由于小波变换有良好的时频特性, 不少学者将其用于谐波和间谐波检测<sup>[4~6]</sup>, 但小波变换可能存在混频现象, 当谐波和间谐波频率较近时, 很难分离; 文献 [7,8] 用自回归模型谱确定频率分布, 由于 AR 谱估计隐含着数据和自相关函数的外推, 因此分辨率得到了提高, 但 AR 模型的阶数对谱分辨率有一定影响, AR 模型易受噪声干扰; 文献 [9,10] 提出用神经网络法分离频率相近的间谐波, 但学习时间长; SVD 改进法、特征空间求根法分辨率高, 频率检测精度高, 但易受噪声影响<sup>[11,12]</sup>。

快速傅里叶变换 (fast Fourier transform FFT) 及其改进法<sup>[13~16]</sup>, 根据间谐波的频率分布及频率附近

的谱线修正间谐波频率、幅值和相位, 有效地抑制了栅栏效应和频谱泄漏引起的误差, 但当某弱信号附近存在幅值较大的频率信号时, FFT 固有的栅栏效应仍会降低估计的准确度。

在现有线性调频 Z 变换<sup>[17~20]</sup> (chirp Z transform CZT) 的基础上, 为了进一步提高间谐波的检测精度, 采用四峰谱线加权平均修正的方法进行插值。利用 CZT 变换得到的频率分布规律指导谐波与间谐波参数的插值修正。详细推导了基于 Blackman-Harris 窗的四峰谱线插值修正公式, 仿真证明该方法有效地抑制了栅栏效应引入的误差, 提高了各次谐波和间谐波参数的检测精度。

## 1 基于 CZT 的间谐波频率检测

基于 DFT 或 FFT 的 N 点处频率检测结果实际上是 Z 平面内单位圆上 N 点等间隔采样; 而 CZT 检测的频谱则是 Z 平面内螺旋周线上的等间隔采样, 因此, CZT 对频率检测更细化<sup>[17,18]</sup>。设

$$X(\mathbf{z}) = \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \mathbf{z}^{-n} \quad (1)$$

式中,  $X(n)$  为长度为  $N$  的有限长序列。

检测  $Z$  平面上  $M$  点频谱的采样值时, 令  $\mathbf{z} = AW^{-k}$  ( $k=0 \sim M-1$ ), 则

$$X(\mathbf{z}) = \sum_{n=0}^{N-1} X(n) A^{-n} W^{nk} \quad (k=0 \sim M-1) \quad (2)$$

式中,  $A = A_0 \exp(j\varphi_0)$ ,  $A_0$  为起始采样矢量  $Z_0$  的半径,  $Z_0$  的相角  $\theta_0 = 2\pi f_0 / f_s$ ;  $W = W_0 \exp(-j\varphi_0)$ ,  $W_0$  为路径伸展趋势, 相邻采样点角度间隔  $\varphi_0 = 2\pi(f_1 - f_0) / (M f_s)$ ,  $f_0$ ,  $f_1$  和  $f_s$  分别为起始频率、截止频率和采样率,  $[f_0, f_1]$  为 CZT 的频带分析范围。沿螺旋周线以  $\varphi_0$  为等间隔采样可得其余的采样点。

间谐波检测中, 若  $A_0 = 1$ ,  $W_0 = 1$ ,  $\theta_0 = 2\pi f_0 / f_s = 0$ ,  $\varphi_0 = 2\pi(f_1 - f_0) / (M f_s) = 2\pi / N$  时, 则  $X(n)$  的 CZT 结果就是 FFT 的结果。当  $\varphi_0 = 2\pi(f_1 - f_0) / (M f_s) > 2\pi / N$  时, 则在同样采用长度下, CZT 的采样点多于 FFT, 即采样频率高于 FFT, 达到了细化的目的, 可获得较精确的频谱。但传统方法形成 CZT 结果的速度较慢, 这里采用作者在文献 [17] 中提出的 Bluestein 算法形成 CZT 的结果, 能提高检测速度。

## 2 基于四峰谱线的插值修正算法

采用旁瓣衰减大的窗函数, 长范围的频谱泄露近似于 0, 而短范围的栅栏效应通过插值算法修正。但当非同步采样失步较大, 而某幅值较小的谐波或间谐波附近存在幅值较大的谐波频率时, 对该弱谐波或间谐波的检测仍有误差, 这是由于幅值大的谐波频率对附近谐波或间谐波检测有干扰。由于该频率位于最大谱线与次最大谱线之间, 因此, 该频率的短范围泄露对最大、次最大谱线的影响最大。为此, 在选择最大、次最大谱线双的基础上, 同时选择其他含有幅值信息的谱线进行加权, 以减小栅栏效应带来的误差。

若  $T_s$  为采样间隔,  $f_s$  为采样频率, 对单一频率信号  $x(t)$  进行离散采样, 结果为:

$$x(n) = B \sin(2\pi f_s n T_s + \varepsilon_0) \quad (3)$$

式中,  $f_s$ ,  $B$  和  $\varepsilon_0$  分别为频率、幅值和初相角。

设截断信号窗函数的时域表达式为  $w(n)$ , 则加窗后  $x(n)$  的 FFT 结果为:

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) w(n) e^{-j2\pi f_n T_s} \quad (4)$$

用欧拉公式将式 (3) 展开, 并代入式 (4), 则:

$$X(f) = \frac{B}{2j} e^{j\varepsilon_0} W[2\pi T_s(f - f_0)]$$

$$- \frac{B}{2j} e^{-j\varepsilon_0} W[2\pi T_s(f + f_0)] \quad (5)$$

忽略负频点 ( $-f_0$ ) 频峰处旁瓣幅值的影响, 加窗信号的离散频谱为:

$$X(k \Delta f) = \frac{B}{2j} e^{j\varepsilon_0} W[2\pi T_s(k \Delta f - f_0)] \quad (6)$$

由式 (6) 可知, 离散谱线幅值与对应的窗函数的 DFT 值成正比, 而实际采样中, 很难对间谐波进行同步采样, 因此, 设峰值点落在第  $k_n$  和  $k_n + 1$  两谱线间, 则  $k_n$ ,  $k_n + 1$  为峰值点附近最大、次最大谱线。 $k_n$  左侧的第  $k_n - 1$  和  $k_n + 1$  右侧的第  $k_n + 2$  谱线的幅值减小, 而当  $n = k_n - N$  ( $N$  为大于 1 的整数) 或  $n = k_n + M$  ( $M$  为大于 2 的整数) 时, 谱线幅值迅速衰减, 所含信号幅值已很小, 若还存在与该间谐波频率相近的其他幅值较大的谐波分量, 虽然窗函数能有效抑制长范围的频谱泄露, 但该谐波信号的频谱仍可能分布在第  $k_n - N$  或  $k_n + M$  条谱线上, 这时不同频率的频谱很难分离。因此, 为了减小栅栏效应, 选择第  $k_n - 1$ ,  $k_n$ ,  $k_n + 1$ ,  $k_n + 2$  四谱线进行加权平均以估计间谐波参数。

为便于书写, 以下用  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  及  $k_4$  表示四条谱线, 从左到右, 峰值点在  $k_2$ ,  $k_3$  之间。各谱线幅值分别为:  $y_1 = |X(k_1 \Delta f)|$ ,  $y_2 = |X(k_2 \Delta f)|$ ,  $y_3 = |X(k_3 \Delta f)|$  和  $y_4 = |X(k_4 \Delta f)|$  其中  $k_2$  和  $k_3$  为峰值点附近最大和次最大谱线,  $k_1$  和  $k_4$  分别为  $k_2$  左侧和  $k_3$  右侧谱线, 且:  $k_1 \leq k_2 = k_1 + 1 \leq k_3 = k_2 + 1 \leq k_4 = k_3 + 1$ 。将  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  与  $y_4$  加权平均, 设:

$$\beta = (y_1 + y_2 - y_3 - y_4) / (y_1 + y_2 + y_3 + y_4), \text{ 则:}$$

$$\beta = \frac{|W[2\pi(k_1 - k_0)/N]| + |W[2\pi(k_2 - k_0)/N]| - |W[2\pi(k_3 - k_0)/N]| - |W[2\pi(k_4 - k_0)/N]|}{|W[2\pi(k_1 - k_0)/N]| + |W[2\pi(k_2 - k_0)/N]| + |W[2\pi(k_3 - k_0)/N]| + |W[2\pi(k_4 - k_0)/N]|} \quad (7)$$

设,  $\alpha = k_0 - k_2 - 0.5$ ,  $\alpha$  的取值范围为  $[-0.5, 0.5]$ , 则所求信号频率为:

$$f = k_0 \Delta f = [k_2 + \alpha + 0.5] f_s / N \quad (8)$$

式 (7) 可化为:

$$\beta = g(\alpha) = \frac{|W[2\pi(-1.5 - \alpha)/N]| + |W[2\pi(-\alpha - 0.5)/N]| - |W[2\pi(-\alpha + 0.5)/N]| - |W[2\pi(1.5 - \alpha)/N]|}{|W[2\pi(-1.5 - \alpha)/N]| + |W[2\pi(-\alpha - 0.5)/N]| + |W[2\pi(-\alpha + 0.5)/N]| + |W[2\pi(1.5 - \alpha)/N]|} \quad (9)$$

为修正峰值点处的幅值, 对  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  与  $y_4$  进行加权平均:

$$B = (B_1 |W[2\pi(-1.5 - \alpha)/N]| + B_2 |W[2\pi(-$$

$$\begin{aligned} & \alpha - 0.5) / N] | + B_3 | W[2\pi(-\alpha + 0.5) / N] | + B_4 \\ & | W[2\pi(1.5 - \alpha) / N] | / ( | W[2\pi(-1.5 - \alpha) / N] | \\ & + | W[2\pi(-\alpha - 0.5) / N] | + | W[2\pi(-\alpha + 0.5) / N] | \\ & + | W[2\pi(1.5 - \alpha) / N] | ) \\ & = 2(y_1 + y_2 + y_3 + y_4) / ( | W[2\pi(-1.5 - \alpha) / N] | \\ & + | W[2\pi(-\alpha - 0.5) / N] | + | W[2\pi(-\alpha + 0.5) / N] | \\ & + | W[2\pi(1.5 - \alpha) / N] | ) \quad (10) \end{aligned}$$

当  $N$  较大时,用多项式逼近法求式 (10) 中分母的多项式逼近式  $\lambda(\alpha)$ ,从而幅值修正式为:

$$B = N^{-1}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4)\lambda(\alpha) \quad (11)$$

同理可得相位修正公式。

### 3 基于 Blackman-Harris 窗的四峰谱线插值修正

间谐波频谱分析要求窗函数主瓣宽度窄、旁瓣幅值衰减快,这里用 Blackman-Harris 窗截取间谐波信号<sup>[17]</sup>,其时域表达式为:

$$\begin{aligned} \omega(n) = & 0.35875 - 0.48829 \cos\left\{\frac{2\pi n}{N-1}\right\} + \\ & 0.14128 \cos\left\{\frac{4\pi n}{N-1}\right\} - 0.01168 \cos\left\{\frac{6\pi n}{N-1}\right\} \quad (12) \end{aligned}$$

式中,  $n=0 \sim N-1$ 。由于  $\alpha$  的取值范围为  $[-0.5, 0.5]$ ,任取一组值代入式 (9),可得一组  $\beta$ 。用 Matlab 拟合函数 `polyfit` 求多项式系数,若多项式的最高阶数为 7,忽略影响很小的系数项,可得修正公式。

### 4 仿真实验

设一组频率接近的间谐波含信噪比为 20 dB 的高斯白噪声,参数如表 1。采样频率 1 250 Hz 对信号进行加窗截断,采样长度  $N=2\ 048$  点,先进行 CZT 谱估计 (CZT 参数:  $f=0, f_k=f/2, M=N$ ),详见文献 [17],间谐波 CZT 谱如图 1。

由图 1 可见,间谐波有 9 个频率分量,由谱峰对应 9 个频率分量的频率估计值: 25.02 Hz, 50.35 Hz, 150.1 Hz, 174.9 Hz, 250.2 Hz, 260.3 Hz, 350.3 Hz, 360.4 Hz, 450.1 Hz。其中两个频率最近的分量为 250.2 Hz 与 260.3 Hz 以及 350.3 Hz 与 360.4 Hz 均为 10.1 Hz。由于用 Blackman-Harris 窗,两个最邻近频率的最短频率间距要求有  $6\Delta f^{[7]}$ ,因此,要求 FFT

频率分辨率为  $\Delta f=10.1/6=1.683$  Hz。在 1 250 Hz 的采样频率下,加窗插值所需最小采样长度  $N=1\ 250/1.683=742.72$ ,实测时取  $N=1\ 024$ 。

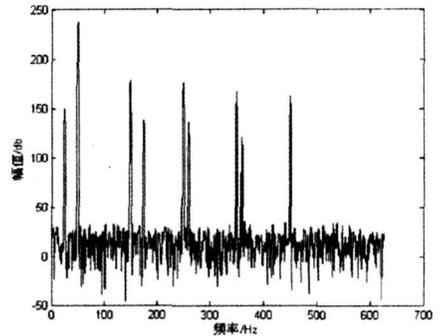


图 1 采用 CZT 方法得到的功率谱

表 1 谐波参数

类型	频率 (Hz)	幅值 (V)	相位 ( $^{\circ}$ )
间谐波	25	4.88	20
基波	50	380	10
间谐波	75	3.9	15
3 次谐波	150	21	5
间谐波	175	2.72	30
5 次谐波	250	18.2	100
间谐波	260	2.52	120
7 次谐波	350	11.4	150
间谐波	360	1.14	180
9 次谐波	450	9.6	210

对该间谐波信号取采样频率 1 250 Hz 采样长度  $N=1\ 024$  点,进行加窗截断,并由 FFT 计算出离散频谱  $X(k\Delta f)$ ,由 CZT 谱得 9 个频率分量,在离散频谱  $X(k\Delta f)$  中找出 9 个谱峰对应位置的最大、次最大谱线,并分别找出最大、次最大谱线左、右侧的谱线,确定  $k_1, k_2, k_3, k_4$  和  $y_1, y_2, y_3, y_4$ ,然后由式 (10) 求间谐波幅值、频率和初始相角,并与文献 [14] 的单谱线插值算法、文献 [7] 的双谱线插值算法对比,偏差见表 2。

由表 2 可知,噪声背景下,对间谐波各个频率分量,特别是对频率很相近的间谐波检测,所提出的方法仍能得到较精确的间谐波参数,说明该方法是一种有效的谐波、间谐波检测方法,具有良好的抗噪能力。与文献 [7] 比较,该方法对间谐波幅值、频率和相位的检测精度得到了明显提高。而对于文献 [14] 的双峰谱线的算法,文中的检测精度也更高,说明文中方法有效地抑制了栅栏效应带来的误差。

### 5 结论

表 2 间谐波的偏差估计结果

类型	频率偏差 (%)			幅值偏差 (%)			相位偏差 (%)		
	文献 [14]	文献 [7]	本文	文献 [14]	文献 [7]	本文	文献 [14]	文献 [7]	本文
间谐波	$2.8 \times 10^{-2}$	$-2.03 \times 10^{-3}$	$-5.19 \times 10^{-4}$	-0.4	$2 \times 10^{-2}$	$4 \times 10^{-3}$	0.35	0.31	0.24
基波	$1.3 \times 10^{-2}$	$-2 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-6}$	$-1.89 \times 10^{-3}$	$-1.3 \times 10^{-4}$	$-1.1 \times 10^{-4}$	1.6	$1 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$
3 次谐波	$1.99 \times 10^{-3}$	$3.9 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$	$2.3 \times 10^{-2}$	$-1.57 \times 10^{-2}$	$-1.55 \times 10^{-2}$	0.64	-0.25	-0.29
间谐波	$-1.7 \times 10^{-3}$	$6.5 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-3}$	-0.2	$8.7 \times 10^{-2}$	$5.4 \times 10^{-2}$	0.7	$4 \times 10^{-2}$	$2.5 \times 10^{-2}$
5 次谐波	$8.4 \times 10^{-4}$	$-3.6 \times 10^{-5}$	$-1.2 \times 10^{-5}$	$5.5 \times 10^{-2}$	$5.4 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$	0.1	$4.4 \times 10^{-3}$	$3.69 \times 10^{-3}$
间谐波	$8.46 \times 10^{-3}$	$2.88 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-3}$	-0.31	-0.25	-0.2	-0.68	-0.67	-0.55
7 次谐波	$-3.4 \times 10^{-4}$	$-6.8 \times 10^{-5}$	$-8.2 \times 10^{-5}$	$-7.3 \times 10^{-2}$	$3.3 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-2}$	$8 \times 10^{-2}$	$7.2 \times 10^{-2}$	$7.1 \times 10^{-2}$
间谐波	$-9.2 \times 10^{-4}$	$-6.25 \times 10^{-4}$	$-5.7 \times 10^{-4}$	-1.4	-0.72	-0.64	$6 \times 10^{-2}$	$-4.4 \times 10^{-2}$	$2.1 \times 10^{-2}$
9 次谐波	$8.8 \times 10^{-4}$	$2.02 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-4}$	$5.7 \times 10^{-2}$	$7.29 \times 10^{-3}$	$-3 \times 10^{-3}$	$2.3 \times 10^{-2}$	$-1.88 \times 10^{-2}$	$-1.58 \times 10^{-2}$

(1)与 FFT、AR 模型法相比, CZT 在不延长采样长度和采样周期的情况下,通过增加输出序列 M 可明显提高间谐波频率分布的检测精度<sup>[17~19]</sup>。

(2)由 CZT 频谱确定频率分布,指导插值修正,并与单峰、双峰谱线算法对比,证明该方法能有效地检测间谐波参数,抑制栅栏效应带来的误差,且检测精度更高,是间谐波检测的一种完备、有效的方法。

(3)在噪声背景下,该方法检测频率接近的间谐波时,仍能获得较高精度,具有良好的抗噪性。

以上提出了一种基于 CZT 与四谱线插值的谐波和间谐波检测方法,为用多谱线插值检测间谐波开辟了新道路,进一步提高检测精度,以及在检测频率时如何判断、选取加权平均的最佳谱线数是需进一步研究的课题。

### 参考文献

[1] Chun Li Wilson Xu. On the ambiguity of defining and measuring Inter-Harmonics [J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(7): 56-57.

[2] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇.电能质量问题的研究和技术进展(二)——电网谐波的测量与分析[J].电力自动化设备,2003,23(11):1-4.

[3] 郝江涛,刘念,辛晋渝,薄丽雅,陈卓.电力系统间谐波分析[J].电力自动化设备,2004,24(12):36-39.

[4] Keoachantrano T, Boonseng C. Harmonics and interharmonics estimation using wavelet transform [C]. Asia Pacific IEEE/PES 2002 Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Yokohama, Japan, 2002.

[5] Sangeethapriya S, Prabhakar M. Harmonic detection using wavelet transform [C]. Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks Montreal, Canada, 2005.

[6] 邵振国,堵俊.一种提取电力系统谐波的快速算法[J].

电力自动化设备,2003,23(2):5-7.

[7] 王波,杨洪耕.基于 AR 谱估计和插值 FFT 的间谐波检测方法[J].继电器,2006,34(4):49-52.

[8] 马秉伟,刘会金,周莉,等.一种基于自回归模型的间谐波谱估计的改进算法[J].中国电机工程学报,2005,25(15):79-83.

[9] 李波,张林利,王广柱,李石青.用于 APF 的神经网络自适应谐波电流检测方法[J].电力自动化设备,2004,24(5):38-40.

[10] 向东阳,王公宝,马伟明,张文博.基于 FFT 和神经网络的非整数次谐波检测方法[J].中国电机工程学报,2005,25(9):35-39.

[11] 徐志向,侯世英,周林,吕厚余.基于奇异值分解的电力系统谐波状态估计[J].电力自动化设备,2006,26(11):28-31.

[12] 沈睿俊,杨洪耕.基于特征空间求根法的非整数次谐波估计方法[J].中国电机工程学报,2006,26(24):72-76.

[13] 刘开培,张俊敏.基于 DFT 的瞬时谐波检测方法[J].电力自动化设备,2003,23(3):8-10.

[14] 祁寸君,王小海.基于插值 FFT 算法的间谐波参数估计[J].电工技术学报,2003,18(1):92-95.

[15] 赵文春,马伟明,胡安.电机测试中谐波分析的高精度 FFT 算法[J].中国电机工程学报,2001,21(12):83-87,92.

[16] 钱昊,赵荣祥.基于插值 FFT 算法的间谐波分析.中国电机工程学报[J],2005,25(21):87-91.

[17] 王楠,肖先勇,曾颂崎,顾威.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.

[18] 王楠,顾威,马继山,曾颂崎,肖先勇.基于 CZT 双谱线插值的间谐波检测方法研究.四川电力技术,2007,(4):9-13.

[19] Massimo A, Antonio C, Nuccio S. A chip-Z transform based synchronizer for power system measurements[C]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement Technology Conference USA, 2002.

ment for harmonics and interharmonics measurement in power supply systems[J]. Measurement 2004, 35 (4): 371-380.

(收稿日期: 2008-10-29)

[20] Massimo A, Antonio C, Salvatore N. A PC-based instru-

(上接第 44 页)

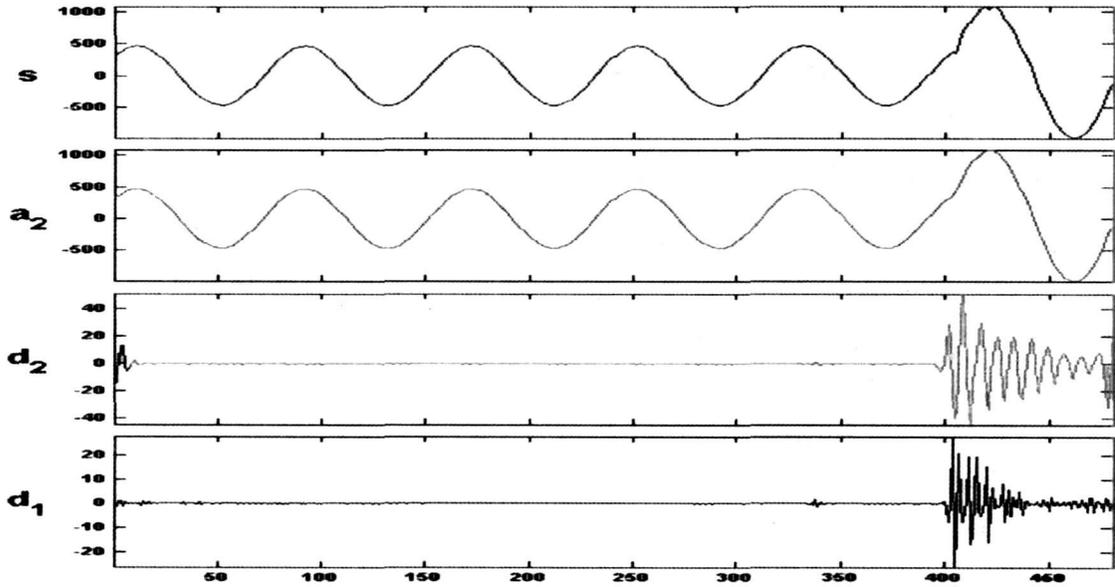


图 5 A 相距 M 侧 270 km 处故障 DB4 小波分解图

## 4 结 论

线路故障后的暂态行波中包含着故障信息,其故障特征是信号的突变,分析了利用小波变换作为故障判别启动判据的方法。它利用小波分析对突变信号的敏感性,采用对采集的数据进行小波变换后寻找奇异点的方法判别故障的发生,以此来启动故障测距或录波系统。通过 MATLAB 中的小波工具箱对上述方法进行的仿真表明了本方法的有效性<sup>[7]</sup>。

### 参考文献

[1] 贺家李,葛耀中. 超高压输电线故障分析与继电保护[M]. 北京: 科学出版社, 1987.  
[2] 金玉生,杨敏中,王晓蓉,等. 高压架空输电线路的故障测距方法[J]. 电网技术, 2000, 24 (4): 27-33.

[3] 董新洲. 小波理论应用于输电线路故障测距研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1996.  
[4] 蒋涛,陆于平. 基于小波变换的单端输电线路行波故障测距[R]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十二届学术年会.  
[5] 李友军,王俊生,郑玉平,等. 几种行波测距算法的比较[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (14): 36-39.  
[6] 贾俊国,范云鹏,李京,等. 利用线路行波的线路故障测距技术及应用[J]. 电网技术, 1998, 22 (8): 63-66.  
[7] 董新洲,贺家李,葛耀中,等. 基于小波变换的行波故障选相研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (1): 20-22.

### 作者简介:

刘 扬 (1986-),男,汉族,湖北襄樊人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制,武汉大学电气工程学院。

(收稿日期: 2008-12-15)

# 基于改进粒子群算法的高中压配电网 实时电压无功优化

包永金

(宜宾电业局, 四川 宜宾 644000)

**摘要:**针对高中压配电网电压无功优化中的开关设备动作次数问题,提出了基于改进粒子群算法的实时电压无功优化方法。该方法将带有记忆与指导信息的活性因子加入适应度函数,根据配电网特点初始化粒子种群,实现实时优化计算中动作次数约束的考虑。在速度更新公式中引入约束指导分量,将位于不可行域内的粒子尽快拉回可行域,减少粒子在无效空间的搜索。对粒子群进行分群寻优,通过采取不同的适应度计算策略加速了算法的收敛。对某一实际高压配电系统进行了实时电压无功优化计算仿真测试,结果表明算法在改善系统电压、降低网损和控制动作次数方面是令人满意的。

**关键词:**配电网;电压无功优化;动作次数;改进粒子群算法

**Abstract:** Aiming at the problem of the action times of switching equipment in voltage/reactive power optimization for high and medium voltage distribution networks, a real time voltage/reactive power optimization methods based on the modified particle swarm optimization is presented. An active factor with memory and guidance is added to the fitness function, and the particles are initialized according to the characteristics of distribution networks, so that the action times could be considered in real time optimization. The constraint guidance component is introduced in the speed updating formula, which will bring back the particles located in the infeasible domain as soon as possible to reduce the search in the invalid space. The convergence of the algorithm will be accelerated by means of grouping the particles for optimization, and adopting different strategies for fitness calculation. The proposed algorithm is simulated in a high voltage distribution network for the real time voltage/reactive power optimization. The results show that the algorithm for improving the system voltage, reducing loss and controlling the action times are satisfied.

**Key words:** distribution network; voltage/reactive power optimization; action times; modified particle swarm optimization

**中图分类号:** TM761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0059-06

配电网电压无功优化是保证电网安全、经济运行的有效手段,其主要通过对有载调压变压器、并联电容器等开关设备进行调度以达到提高电压质量和降低网损的目的。通常无功优化都是针对某一负荷断面来进行,考虑电压约束条件,片面追求有功网损的绝对最小值<sup>[1]</sup>,即所谓的静态无功优化。随着负荷的波动,这种静态优化将导致有载调压变压器和并联电容器等带机械开关的设备频繁动作,由于受当前制造工艺等方面的限制,开关设备的动作次数具有一定的限制,使得在实际运行中不能直接使用优化结果。通过在数学模型中引入变压器和并联电容器的动作次数约束以避免开关设备频繁动作的动态无功优化逐渐引起了人们的关注<sup>[2]</sup>。由于配电网电压无功优化本身就是一个复杂的多变量、多约束的非线性规划

问题,将动作次数约束引入优化,从而使得动态无功优化问题具有了时间和空间复杂性。

针对开关设备动作次数约束问题,文献[3]将动态规划法用于求解考虑动作次数约束的变电站内变压器和电容器动作优化问题,其在理论上可以找到最优解,但随着系统规模的扩大易陷入“维数灾”。文献[2]将静态优化的最优曲线进行分段等值,然后对相应的负荷进行划分、等值,使得负荷的分段自动满足动作次数的约束,将动态优化问题转化为静态优化问题,但此算法要求开关设备的动作具有同时性。文献[4~5]用不同的负荷分段方法将动态优化问题转化为静态优化问题求解。文献[6]直接按静态优化问题求解,然后对最优补偿容量按动作次数进行融合分段,其对结果的后处理带来了误差。这些方法在一

定程度上降低了问题的规模,但仍然不够理想。

处理电压无功优化问题通常的方法是解析法如线性规划等<sup>[1]</sup>,其主要的两个问题就是离散变量被作为连续变量处理和本质上存在近似,这可能使得求出的解是不适当的,也使得很难对设备动作次数进行优化处理。近年来,基于人工智能的优化方法由于不要求优化问题的目标函数线性、连续或者可微,也不要求变量必须是连续等特点而发展迅速,但计算量大计算时间长是其主要缺点。美国学者 Kennedy 和 Eberhart 受鸟群觅食的启发于 1995 年提出的粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)<sup>[7]</sup>,由于算法简单、参数少、收敛速度快等特点很适合处理电力系统问题<sup>[8]</sup>。粒子群算法应用于无功优化问题已在一些期刊上发表,但其主要目标是网损优化<sup>[9-10]</sup>。

针对高中压配电网中最复杂的一类问题——考虑开关设备动作次数限制的电压无功优化问题提出了一种基于改进粒子群算法 (Modified Particle Swarm Optimization, MPSO) 的实时电压无功优化方法。该方法通过引入活性因子以考虑动作次数的前后关联,利用粒子群算法固有的记忆能力和快速随机搜索能力,快速实现动作次数受约束的电压无功优化。在 PSO 算法中引入约束指导分量将不可行域的粒子快速拉回可行域,减少粒子的无效搜索。根据粒子的“好”、“坏”进行分群寻优,通过采用不同的适应度计算策略,加速了算法的收敛。

## 1 高中压配电网实时电压无功优化模型

### 1.1 实时优化模型

高中压配电网实时电压无功优化的目标就是在分段优化计算中考虑开关设备的动作次数限制,在动作次数约束下改善电压水平和降低网络损耗,其目标函数为

$$\min F = P_{\text{loss } t} = \sum_{j \in i} G_{ij} (U_{i,t}^2 + U_{j,t}^2 - 2U_{i,t}U_{j,t} \cos \theta_{ij,t}) \quad (1)$$

式中,  $t$  为当前时刻且  $t \in T$ ,  $T$  为一天中的控制时段数;  $P_{\text{loss } t}$  为当前时刻  $t$  的有功网损;  $j \in i$  表示  $\Sigma$  号后标号为  $j$  的节点必须和节点  $i$  直接相连,但不包括  $j=i$  的情况;  $G_{ij}$  为当前时刻节点  $i$  与节点  $j$  的电导;  $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$  分别为当前时刻节点  $i$  和节点  $j$  的电压幅值;  $\theta_{ij,t}$

为当前时刻节点  $i$  与节点  $j$  相角之差。

等式约束条件即为潮流方程

$$P_{i,t} - U_{i,t} \sum_{j \in i} U_{j,t} (G_{ij,t} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij,t} \sin \theta_{ij,t}) = 0 \quad (2)$$

$$Q_{i,t} - U_{i,t} \sum_{j \in i} U_{j,t} (G_{ij,t} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij,t} \cos \theta_{ij,t}) = 0 \quad (3)$$

式中,  $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$  分别为当前时刻  $t$  节点  $i$  注入的有功功率和无功功率;  $j \in i$  表示  $\Sigma$  号后的标号为  $j$  的节点必须和节点  $i$  直接相连,并包括  $j=i$  的情况;  $B_{ij}$  为当前时刻节点  $i$  与节点  $j$  的电纳,其他同上。

控制变量与状态变量必须满足的不等式约束

$$T_{j \min,t} \leq T_{j,t} \leq T_{j \max,t} \quad j = 1, 2, \dots, N_T \quad (4)$$

$$Q_{CK \min,t} \leq Q_{CK,t} \leq Q_{CK \max,t} \quad Q_{CK} = K_{CK} Q_{UK} \quad k = 1, 2, \dots, N_C \quad (5)$$

$$U_{i \min,t} \leq U_{i,t} \leq U_{i \max,t} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

式中,  $N_T$ 、 $N_C$ 、 $N$  分别为变压器的总台数,并联电容器数和系统总的节点数;  $T_{j,t}$ 、 $Q_{CK,t}$ 、 $K_{CK,t}$ 、 $U_{i,t}$  分别为当前时刻  $t$  变压器  $j$  的分接头挡位,电容器  $k$  的投入容量,投入组数和节点  $i$  的电压幅值;  $Q_{UK}$  为电容器  $k$  的单组容量;  $T_{j \min,t}$ 、 $T_{j \max,t}$ 、 $Q_{CK \min,t}$ 、 $Q_{CK \max,t}$ 、 $U_{i \min,t}$ 、 $U_{i \max,t}$  分别为当前时刻变压器  $j$  的分接头挡位限值、电容器的投入容量限值和节点  $i$  的电压幅值限值。

由于变压器和电容器在一天中的动作次数受到了限制,所以一天中的动作次数还应该满足以下的“软约束”

$$\sum_{t=1}^T |K_{k,t+1} - K_{k,t}| \leq M_{CK} \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^T |T_{k,t+1} - T_{k,t}| \leq M_{TK} \quad (8)$$

式中,  $K_{k,t}$  为  $t$  时刻补偿电容器  $k$  投入的电容器组数;  $M_{CK}$  为补偿电容器  $k$  在一天中允许投切的次数;  $T_{k,t}$  为变压器  $k$  的第  $t$  时刻变压器挡位;  $M_{TK}$  为变压器  $k$  在一天中允许调挡的次数。

### 1.2 活性因子

根据负荷预测曲线,对各变电站的负荷曲线进行简单分段。首先计算出无功  $Q_k$  在一天内的变化量总和为

$$Q_{k\Sigma} = \sum_{i=1}^{24} |\dot{Q}_{k,t} - \dot{Q}_{k,t-1}| \quad (9)$$

每一分段中无功  $Q_k$  的变化量即为  $\Delta Q_k = Q_{k\Sigma} / M_{CK}$ 。从第一个时间点开始累加各时间段无功变化量的值,当变化值累加到  $\Delta Q_k$  时将所累积的时

段作为一个分段,则得到该分段内电容器允许动作的次数为

$$z_k = Q_{k \in (l_k, i)} \triangle Q_k \quad (10)$$

式中,  $Q_{k \in (l_k, i)}$  为变电站  $k$  的第  $i$  分段无功变化量的累加值,  $l_k$  为变电站  $k$  的第  $i$  分段, 包括  $m$  到  $n$  时段,  $1 \leq m \leq i \leq 24$ 。

在  $t$  时刻的实时电压无功优化中, 通过对负荷预测曲线分析得出后一时刻变电站无功需求的大致变化情况, 这里定义两个概念: 梯度  $\Delta_{k, t}$  和活性因子  $\eta_{k, t}$ 。

$$\Delta_{k, t} = \frac{Q_{k, t} - Q_{k, t-1}}{Q_{Uk}} \quad (11)$$

式中,  $Q_{k, t}$  为补偿电容器  $k$  所在变电站  $t$  时刻的无功负荷;  $Q_{k, t-1}$  为变电站  $t-1$  时刻的无功负荷;  $Q_{Uk}$  为变电站内电容器的单组容量。梯度其实质为无功负荷数据两时段之差所对应的电容器组数, 它的正负也代表了电容器组是具有投入还是切除的趋势。活性因子定义如下

$$\eta_{k, t} = (z_k - z_{k, t}) \times \frac{\Delta_{k, t}}{|\Delta_{k, t}| + \dots + |\Delta_{k, n}|} \quad (12)$$

式中,  $z_k$  为变电站电容器该分段允许动作总次数;  $z_{k, t}$  为变电站  $t$  时刻所属分段内已经动作的累计次数。

由活性因子的定义可以看出其记忆了当前为止该分段的动作情况, 利用了负荷预测数据的梯度使其带有了部分预测信息, 从而使得活性因子具有了记忆与指导的作用。活性因子的大小表示了变电站电容器组参与调节的活跃程度, 即电容器组参与调节的可能性大小。由于电压也主要受负荷波动的影响, 因此对变压器动作次数的分配可以参照电容器进行。

## 2 改进粒子群算法

### 2.1 标准粒子群算法模型

PSO 是一种群体智能进化计算技术, 其通过模拟群体的社会行为与记忆能力引导粒子搜索解空间中的最优区域。首先随机初始一个种群, 每一个潜在解被称为一个粒子, 具有一个随机的速度在问题解空间中飞行。粒子具有记忆能力, 每一个粒子记忆自己之前所经历过的最好位置, 这一位置被称为个体极值以

$p_{id}$  来代表。所有粒子的个体极值中的最好值称为全局极值以  $p_{gd}$  来代表。PSO 技术的基本观点就在于在每一步中都加速每一粒子向  $p_{id}$  和  $p_{gd}$  飞行, 至于加速量则是以随机权重的方式给出。下面的步骤解释了标准 PSO 算法的计算过程。

- 1) 在解空间中随机初始粒子的位置和速度;
- 2) 对每一粒子进行适应度评估;
- 3) 每一粒子的当前值与自身的个体极值进行比较, 如果当前值好于个体极值则将个体极值设为当前值;
- 4) 更新后的个体极值与以前的全局极值作比较, 如果个体极值好于全局极值, 则更新全局极值;
- 5) 根据式 (13) 和 (14) 分别计算粒子新的速度和位置,  $v_{id}$  和  $x_{id}$  分别代表粒子  $i$  的第  $d$  分量的速度和位置,  $\text{rand}_1$  和  $\text{rand}_2$  是一个 0 到 1 之间的随机函数;
- 6) 重复步骤 2) 直到指定的终止原则满足, 通常为一足够好的适应度值或者是达到了最大迭代次数。

式 (13) 中  $w$  称为惯性因子, 控制着粒子进行邻域与全局搜索。速度应限制在某一范围,  $v_{\max}$  是粒子的最大允许速度, 如果  $v_{\max}$  太大, 粒子可能飞过最好解, 如果  $v_{\max}$  太小, 粒子则可能陷入局部最小。 $c_1$  和  $c_2$  分别为认知分量和社会分量的加速常数, 其可以分别改变飞向  $p_{id}$  和  $p_{gd}$  的速度。

### 2.2 实时优化的适应度函数

PSO 算法中粒子飞行位置的好坏由适应度来评价, 因此适应度函数的选取至关重要。根据高中压配电网实时电压无功优化的要求, 在开关设备动作次数满足要求和电压水平在合理范围的基础上, 以每个时刻网损最小化来选取适应度函数。为了约束开关设备的动作次数, 利用活性因子定义一适应度分量使开关设备动作次数不至于过多。

$$\lambda_2 \left( \sum_{k=1}^{N_C+N_T} Y_k \right) / \sum_{k=1}^{N_C+N_T} (z_k - z_{k, t}) \quad (15)$$

式中,  $\lambda_2$  为动作次数超过预测动作次数的罚因子;  $Y_k$  定义如下

$$Y_k = \begin{cases} Y_k = 0 & |x_k| \leq (z_k - z_{k, t}) \\ Y_k = (|x_k| - z_k + z_{k, t}) / \eta & |x_k| > (z_k - z_{k, t}) \end{cases} \quad (16)$$

为了限制这一分量过大或过小,  $\eta$  在 0.1~10 的

范围内取值。各节点电压约束作为罚函数引入适应度函数中, 得出 PSO 的适应度函数为

$$f = C - 100P_{\text{loss } t} / P_{\text{loss } t} - \lambda_1 \sum_{i=1}^N (V_{i,t} - V_{\text{lim},t})^2 - 100\lambda_2 \sum_{k=1}^{N_C + N_T} Y_k \quad (17)$$

式中,  $C$  为一足够大的常数, 以保证适应度为正值;  $\lambda_1$  为节点电压越界罚因子;  $V_{\text{lim},t}$  定义如下

$$V_{\text{lim},t} = \begin{cases} V_{i \max} & V_i > V_{i \max} \\ V_{i \min} & V_i < V_{i \min} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

需要注意的是寻优的前提是解必须满足电压等约束条件, 为了保证电压越 0.01 pu 造成的惩罚比开关设备动作次数造成的惩罚大,  $\lambda_1$  应满足大于  $10^6 \lambda_2 (N_C + N_T) \max\{M_C, M_T\}$  的要求。

### 2.3 初始粒子定制策略

由于 PSO 具有记忆功能, 故上一时刻的控制变量作为一个初始粒子可以使得 PSO 可能记忆控制变量的大量良好信息。为了加快 PSO 的收敛速度, 基于无功就地平衡思想, 控制变量为电容器的分量用梯度值  $\Delta$  对粒子的每一分量分别赋值得到  $N_C$  个初始粒子。电压无功优化控制中有载调压变压器一次调档次数一般不超过 3 档, 同时由于优化的目标之一在于减少开关设备动作, 故粒子的变压器分量采用在上一时刻变压器分量的基础上分别叠加  $\pm 3 \times \text{rand}(0, 1)$  得到  $N_T$  个初始粒子。剩余粒子采用标准 PSO 完全随机初始化的方法。

### 2.4 约束指导寻优

在 PSO 进化的前期, 由于大量粒子的随机分布, 使得不少粒子处于不可行解的位置, 为了避免粒子过多的在无效空间搜索, 对引起状态变量越限的粒子根据配电网无功优化的特点在式中引入一约束指导分量。如变压器低压侧电压过高, 则按照就地控制的原则切除一组电容器, 或降低一档分接头挡位, 反之亦然。

$$v_{id} = w \times v_{id} + c_1 \times \text{rand}_1 \times (p_{id} - x_{id}) = c_2 \times \text{rand}_2 \times (p_{id} - x_{id}) + \text{round}(\text{rand}_3) \times \text{sgn}(dx) \quad (19)$$

式中,  $\text{round}$  为四舍五入函数;  $\text{rand}_3$  为 0 到 1 间的随机数;  $\text{sgn}$  为符号函数;  $dx$  为约束指导分量。通过约束指导寻优可以将位于不可行域内的粒子快速拉回可行域, 提高了 PSO 算法的收敛效率。

### 2.5 分群寻优

如前所述, PSO 算法在进化初期通常有一些适应

度很高的“超级粒子”, 这些粒子因竞争力太突出从而控制了飞行方向, 影响了算法的全局优化性能; 而在 PSO 进化的中后期如其他智能算法一样由于粒子的差异性变小, 进化速度很慢, 最终可能导致局部最优解或次优解。为了克服这一问题, 提出了根据粒子适应度的大小将粒子群分成两个子群: 基本群与激励群, 思想为不同群体采用不同的策略。基本群就是标准 PSO 的粒子群, 而激励群为一极具开拓力的群体, 其始终保持较为活跃的状态, 因而能在更为广泛的解空间中搜索最优解从而解决算法前期的“超级粒子”问题和中后期粒子的群聚倾向问题。适应度计算占了整个算法的大部分, 由此有必要对两个群体进行分群计算。基本群的适应度计算采用潮流算法为核心, 而激励群的适应度计算则以灵敏度计算为核心, 这样减少了适应度的计算量, 加快了 PSO 算法的收敛速度。

### 2.6 改进 PSO 流程

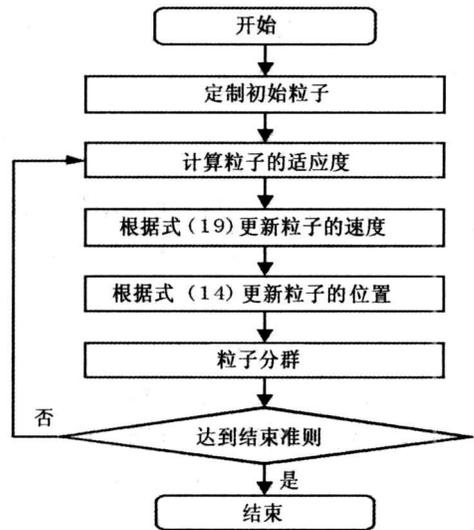


图 1 改进 PSO 流程图

## 3 算例及其分析

为了验证所提方法的有效性, 将某一实际高压配电网作为测试系统, 该系统包括三个 110 kV 变电站和一个 220 kV 枢纽变电站, 其优化控制范围从变电站 220 kV 进线端到 10 kV 出线端。状态变量母线电压的上下限值分别为 1.07 和 0.98, 其开关设备配置情况见表 1, 网络示意图如图 2 所示。

表 2 显示了利用标准 PSO 进行分时段静态优化和 MPSO 进行实时优化的综合结果比较。从表中可以

看出 PSO 和 MPSO 都改善了系统电压, 但 MPSO 的网损优化效果比 PSO 好 3.29%, 计算时间快了近 3 倍。

表 1 开关设备配置情况

变电站名称	电容器(组)	每组容量(p.u)	变压器挡位
龙头站(T <sub>1</sub> )	6	0.10 008	8×±1.25
巡场站(T <sub>2</sub> )	4	0.024	8×±1.5
竹海站(T <sub>3</sub> )	1	0.03	8×±1.5
红桥站(T <sub>4</sub> )	1	0.03	8×±1.25

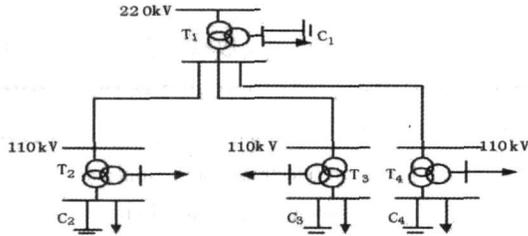


图 2 网络拓扑示意图

表 2 综合结果比较表

方法	优化前	PSO	MPSO
电压越限次数 次·天 <sup>-1</sup>	14	0	0
网损下降率 %	—	11.94	15.23
电容器动作次数 次·天 <sup>-1</sup>	—	72	8
变压器动作次数 /·天 <sup>-1</sup>	—	162	5
计算时间 /s	—	21.24	8.40

图 3 显示了电容器组 C<sub>1</sub> 的投入情况, 图 4 显示了变压器 T<sub>2</sub> 的调挡情况。从以上两幅图可以清楚看出 MPSO 的电容器和变压器动作次数比 PSO 少了许多, 且动作更为平稳, 动作次数得到了有效抑制。图 5 显示了优化前、使用 PSO 进行分时段优化和使用 MPSO 进行实时优化后的网损曲线。这些测试结果表明所提方法不仅在恢复电压水平、降低网络损耗而且在控制开关设备动作次数方面都获得了较为满意的结果。

## 4 结论

在所提高中压配电网实时电压无功优化模型的基础上, 提出改进粒子群算法实现在提高系统电压水平、降低网络损耗的同时控制开关设备的动作次数。在所提方法中, 改进 PSO 考虑配电网无功优化特点, 通过活性因子进行记忆与指导寻优, 引入约束指导分量提高了算法的搜索效率, 对粒子进行分群计算进一步提高了算法的计算速度。

实际测试系统表明所提方法在改善电压水平、降低网络损耗与减少动作次数方面简单、有效, 计算时

间对于实时运行已基本满足要求。文中采用了一天 24 时段的负荷进行实时优化, 方法可以轻易推广到目前供电企业所采用的 48、96 等时段的系统中。

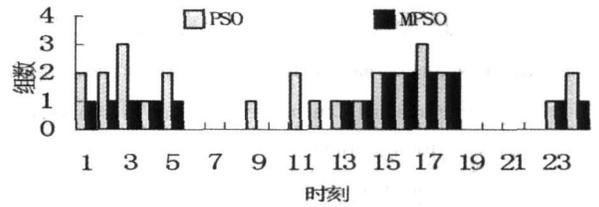


图 3 电容器投入情况

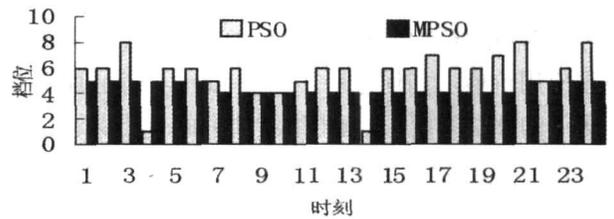


图 4 变压器挡位情况

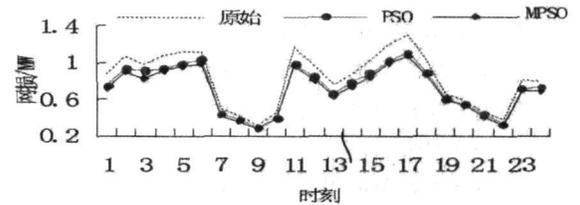


图 5 网损对比曲线

由于带动作次数约束的电压无功优化是一个具有时间和空间复杂性的非线性优化问题, 所提的 MPSO 方法进行记忆与指导寻优在一定程度上对时间进行了解耦, 但如何更好地利用历史和预测信息, 开发更合适的算法进行更富有成效的优化将是下一步应深入讨论的两个问题。

## 参考文献

- [1] 刘明波, 陈学军, 程劲晖. 三种无功优化线性规划建模方法的比较 [J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(2): 31-36.
- [2] 邓佑满, 张伯民, 田田. 虚拟负荷法及其在配电网动态优化中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(4): 241-244.
- [3] Lu FC, Hsu Y Y. Reactive power/voltage control in a distribution substation using dynamic programming [J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 1995, 142(6): 639-645.
- [4] 胡泽春, 王锡凡. 配电网无功优化的分时段控制策略

[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(6): 45—49.

[5] 方兴, 郭志忠. 配电网时变无功电压优化方法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 40—44.

[6] 吴文传, 张伯明. 能量损耗最小的无功补偿动态优化算法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 68—73.

[7] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]. IEEE International Conference on Neural Networks Perth Australia 1995, 4: 1942—1948.

[8] 袁晓辉, 王乘, 张勇传, 等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28(19): 14—19.

[9] Mantawy A H, Al-Ghandi M S. A new reactive power optimization algorithm [C]. IEEE Bologna Power Tech Conference Bologna, Italy, 2003(4): 1—6.

[10] 唐剑东, 熊信银, 吴耀武, 等. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 81—84.

作者简介:

包永金 (1975—), 男, 宜宾电业局营销部配网运行工程师, 主要从事配电网的研究和管理工作。

(收稿日期: 2008—10—10)

(上接第 22 页)

际, 评估精度较高, 具有一定的理论价值和明显的工程应用价值。如何进一步研究和开发满足真实系统所需的评估系统, 是值得继续研究的重要课题。

参考文献

[1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[2] 王宾, 潘贞存, 徐丙垠. 配电系统电压跌落问题的分析 [J]. 电网技术, 2004, 28(2): 56—59.

[3] 陶顺, 肖湘宁, 刘晓娟. 电压暂降对配电系统可靠性影响及其评估指标的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 63—69.

[4] Milanovic J V, Aung M T, Gupta C P. The influence of fault distribution on stochastic prediction of voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 278—285.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 赵剑锋, 王浔, 潘诗锋. 用电设备电能质量敏感度测试系统研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 32—37.

[10] Pema C D, Olgun G, Verde P, et al. On probabilistic system indices for voltage dips [C]. 2004 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems Ames USA, 2004, 9: 796—800.

[11] Martínez J A, Martín-Amedo J. Voltage sag stochastic prediction using an electromagnetic transients program [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1975—1982.

[12] Bollen M H J. Fast assessment method for voltage sags in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications 1996, 32(6): 1414—1423.

[13] Qader M R, Bollen M H J, Allan R N. Stochastic prediction of voltage sags in a large transmission system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications 1999, 35(1): 152—162.

[14] Moschakis M N, Hatziangyrio N D. Analytical calculation and stochastic assessment of voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1727—1734.

[15] Chang-Hyun Park, Gilsoo Jang, Thomas R J. The influence of generator scheduling and time-varying fault rates on voltage sag prediction [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2008, 23(2): 1243—1250.

[16] 王彬. 熵与信息 [M]. 西安: 西北工业出版社, 1994.

[17] 朱成骥, 孙宏斌, 张伯明. 基于最大信息熵原理的短期负荷预测综合模型 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 1—6.

[18] 马超, 肖先勇, 李勇. 线路故障引起电压凹陷的频次最大熵评估 [J]. 中国电机工程学报 (已录用).

[19] 姚建刚, 付维生, 陈庆祺, 等. 电力市场中电价与能源及环境保护的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 71—75.

[20] Juarez E E, Hernandez A. An analytical approach for stochastic assessment of balanced and unbalanced voltage sags in large systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1493—1500.

作者简介:

马超 (1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 电能质量及其控制技术。

肖先勇 (1968—), 男, 副教授, 长期从事电能质量及其控制技术的教学与研究。

(收稿日期: 2008—12—08)

# 影响电力负荷避峰的关联因素分析

刘凌川, 段登伟, 邓 华  
(成都电业局, 四川 成都 610016)

**摘要:**提高电力负荷避峰的效率既是需求侧管理的重要内容,也是改善电网运行的需要。分析了影响负荷避峰的多种因素,根据成都地区负荷避峰的实际情况,用灰色关联分析方法对各种关联因素进行了关联系数分析,确定了影响负荷避峰的因素序列,为负荷避峰管理提供了定量分析的依据。计算结果表明该方法能够较好分析出各种因素的作用大小。

**关键词:**电力负荷;避峰;需求侧管理;灰色理论

**Abstract:** Improving the efficiency of power peak load averting is an important part of demand side management as well as the necessary of power grid operation. The multiple factors which affect the load averting are analyzed. Based on the actual situation of load averting in Chengdu area, the grey relation analysis method is utilized to analyze the related factors. And the sequences of factors which influence load averting are determined also, which provide the supports for quantitative analysis on load management. Simulation results show that the proposed method is feasible for analyzing the effect of multiple factors.

**Key words:** power load; peak averting; demand side management; grey theory

**中图分类号:** TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0069-05

近年来,中国电力负荷增长迅速,不少地区出现了电力供需的矛盾,特别是在迎峰度冬(夏)期间,高峰负荷往往受到发电能力和电网安全的限制,需要合理安排电力负荷避峰以充分利用电能,缓解电网压力。电力负荷避峰涉及到发、供电企业和用户各方的利益,既是电力调度部门关心的问题,也日益受到各方面的广泛关注。

负荷避峰是电力需求侧管理的重要内容,它与限电拉闸等负荷控制方法不同。拉闸限电往往是通过在很短的时间切除指定的电力负荷实现负荷控制;而负荷避峰则需要正确估计避峰量的大小,合理安排避峰时段,负荷下降需要一定的响应时间,不同性质的负荷响应时间也不相同。拉闸限电方法对生产生活的影 响较大,负荷避峰则主要通过调整生产时间来控制工业负荷,对人民生活用电影响很小。因此,在实际的负荷控制中,供电企业通常是采取“先避峰,后限电”的方法,以尽可能保证全社会有序用电。不仅如此,通过合理安排用电企业进行避峰用电也可以为企业节省一定的生产费用,市场条件下通过电价也可以实现负荷避峰<sup>[1,2]</sup>。目前,湖北、江苏等地已开展了针对负荷高峰的需求侧管理工作并积累了一定的经验<sup>[3,4]</sup>。文献[5]对发达国家的需求侧管理工作进

行了介绍,所提供的国外经验对中国开展需求侧管理工作有一定的参考价值。文献[6]指出中国开展电力需求侧管理有显著的效益,在分析传统负荷管理的基础上,介绍了开展需求侧管理(DSM)的主要措施,对基于DSM的负荷管理系统及其与电网调度、电力营销和信息管理的系统集成的相互关系进行论述。

实际上,影响负荷避峰的因素较多,比如提前通知时间、避峰时段、避峰量大小、温度和天气等等,这些影响因素相互关联且不易量化,因此如何评价各种因素对避峰效果的影响成为研究负荷避峰的难题之一。为了解决上述问题,这里引入灰色关联分析方法对成都电业局2006~2007年冬季的负荷避峰数据进行了分析,将电力负荷避峰的主要指标与避峰效果进行了关联分析,得到了相关因素对避峰能力影响情况的量化数据,并提出了进一步改进负荷避峰工作方法。

## 1 灰色关联分析方法

为了提高效率,减少不必要的工作量,使负荷避峰达到更理想的效果,就需要对各种因素进行分析。问题在于影响负荷避峰的各种因素相互交差、彼此关

联,在这些关联因素中,利用常规数学方法找出具有决定性作用的 1 种或多种因素比较困难。灰色关联分析法为解决这类关联问题提供了一种有效方法,利用这种方法可对影响结果的各种因素及其相对作用进行分析和比较,从而找出决定性的影响因素。灰色关联分析的主要步骤包括:

(1)分析与结果有关系的各种元素,用对结果有重要影响的各种元素的量化指标形成影响空间  $W(x_i', y_i')$ 。

(2)影响空间应具有可比性、可接近性和极性一致。为解决影响空间的可比性问题,可对  $W(x_i', y_i')$  作数值变换,建立灰关联因子空间  $X(x_i)$ 。

(3)建立灰关联差异信息空间  $\Delta_G$ 。

$$\Delta_G = (\Delta, \zeta \Delta_{li}(\max), \Delta_{li}(\min))$$

式中,  $\Delta$  是差异信息集;  $\zeta$  是分辨系数  $\zeta \in [0, 1]$ ;

$\Delta_{li}(\max)$ ,  $\Delta_{li}(\min)$  分别为  $\Delta$  上的两级上环境参数和下环境参数。

其中,差异信息  $\Delta_0$  的计算公式为:

$$\Delta_{0i} = |x_0(k) - x_i(k)|$$

环境参数为:

$$\Delta_{li}(\max) = \max_i \max_k \Delta_{li}(k)$$

$$\Delta_{li}(\min) = \min_i \min_k \Delta_{li}(k)$$

(4)计算灰关联系数  $\gamma(x_0(k), x_i(k))$  及灰关联度  $\gamma(x_0, x_i)$ 。

灰关联系数  $\gamma(x_0(k), x_i(k))$  的计算公式为:

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k \Delta_{li}(k) + \zeta \max_i \max_k \Delta_{li}(k)}{\Delta_{li}(k) + \zeta \max_i \max_k \Delta_{li}(k)}$$

灰关联度  $\gamma(x_0, x_i)$  的计算公式为:

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \gamma(x_0(k), x_i(k))$$

(5)进行灰关联度排序。

若有  $\gamma(x_0, x_i) > \gamma(x_0, x_j) > \gamma(x_0, x_l) > \dots > \gamma(x_0, x_p)$ , 则  $x_i > x_j > x_l > \dots > x_p$ , 称为  $x_i$  强于  $x_j$ ,  $x_j$  强于  $x_l$ ,  $\dots$ , 表示因子  $x_j$  对于参考列  $x_0$  的灰关联度小于  $x_i$  对于参考列  $x_0$  的灰关联度。

只要能够计算出影响负荷避峰的各种因素的灰关联度并对其进行关联度进行排序,就可以比较科学地分析出主要因素和次要因素,从而改进和提高负荷避峰工作。

## 2 成都地区负荷避峰方案

成都市作为省会城市实行负荷控制对社会经济的影响较大,为了合理安排负荷控制工作,相关部门根据不同时期制定了不同的负荷控制方案。如 2006~2007 年成都地区负荷控制实行“先错峰,后避峰,再限电”的方式,冬季枯水期采取四级负荷避峰预案。根据电网运行中负荷缺额的不同发布不同的避峰预警信息。为方便公众了解缺电信息、协调各部门的负荷管理工作,避峰方案采用黄、橙、红、黑四种颜色分别表示负荷缺额的紧迫程度。每种颜色分别代表不同的负荷避峰数量级,如表 1 所列,颜色越深相应的负荷避峰量越大。

表 1 2006 冬至 2007 春枯水期四川省电网避峰表

预警颜色	避峰用户数	最大避峰负荷 (kW)	占最大负荷比例 (%)	供需缺口 (MW)
黄色	718	228 088	15	1 000 以下
橙色	816	351 482	20	1 000~1 500
红色	1 512	532 925	25	1 500~2 000
黑色	1 713	717 275	30	2 000

表 2 2007 年 1、2 月份成都地区负荷避峰情况

日期	通知时间 (时、分)	避峰时段 (时、分)	避峰 (MW)	避峰方案	备注
1月 5日	12: 50	12: 50~24: 00	180		削计划
1月 6日	01: 40	2: 00~24: 00	180		削计划
1月 10日	21: 20	21: 20~24: 00	180		削计划
1月 11日	23: 38	0: 00~7: 00	180		削计划
	07: 50	7: 00~24: 00	180		削计划
1月 12日	08: 20				红色 避峰
1月 13日	07: 30	7: 30~17: 00	275		红色 削计划
1月 16日	01: 22	1: 45~24: 00	180		削计划
1月 18日	10: 10	10: 10~24: 00	170		削计划
1月 19日	00: 09	0: 15~23: 45	170		削计划
	08: 06				黑色
1月 23日	09: 26	9: 45~24: 00	150		削计划
	15: 22	15: 30~24: 00	100		削计划
	16: 00				黑色 超计划
1月 24日	11: 00				红色
1月 25日	09: 00				红色 避峰
2月 2日	08: 20	8: 45~24: 00	150		削计划
2月 11日	10: 36	10: 45~24: 00	165		削计划

2006 年冬至 2007 年春季成都地区负荷避峰取得了一定的效果。尽量避免影响居民生活用电,更多采用避峰、错峰用电等方法进行负荷控制。2007 年 1 月到 2 月通过调度口径下达了一系列负荷避峰的通知(如表 2 所列),表中数据表明负荷避峰的安

排是根据电网运行情况,当日通知或提前一日通知进行避峰,通常负荷避峰指定了避峰量或避峰等级,但提前通知时间、避峰时段有明显的不同。如果能够正确分析评价各种相关因素对避峰的确切影响,将有利于提高负荷避峰的效率,改进和完善负荷避峰工作。

### 3 负荷避峰因素的关联分析

灰色关联分析方法已被成功用于多因素统计分析,对负荷避峰这类多因素问题同样可利用该方法进行分析。这里选取表 2、表 3 所列由调度口径统计的 14 天数据作为研究对象,其中表 3 列出了负荷避峰情况的原始数据。考虑到研究数据中天气数据不易精确量化,且当地冬季天气对避峰负荷的影响相对较小,故在后面的计算中不考虑天气因素的影响,而避峰负荷率则是由总避峰电能量和最大避峰负荷经过计算得到,不是一个独立的影响因素或结果,在计算

中也不再单独计及。以下的负荷避峰分析只选取了原始数据中的避峰小时数、提前通知时间、最低气温、最高气温、达到最大值的时间、计划避峰负荷、日最大负荷、日电能量、最大避峰负荷、总避峰电能量作为影响因素,分别设为  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$ ,将最大避峰负荷和总避峰电能量作为被影响的结果,分别设为  $y_1, y_2$ ,研究各影响因素 ( $x_1, x_2, \dots, x_8$ )对避峰结果 ( $y_1, y_2$ )的影响大小。从表 3 的数据中可以看出,负荷避峰通常是电网运行的实时情况提出的,有时提前通知避峰,有时则是从通知时刻起就要求避峰,没有进行提前通知。负荷避峰的持续时间也各不相同,持续避峰时间从 9~24 h 不等。由于各影响因素相互关联,负荷避峰的大小往往不是某个单独因素作用的结果,这里采用灰色关联分析方法,希望能从中找出产生作用最大的一种或多种因素,以便改进负荷避峰工作,提高工作效率。

表 3 负荷避峰情况的原始数据 (2007 年 1 月 ~2 月)

日期	避峰小时数 (h)	提前通知时间 (h)	达到最大值的时间 (h)	天气	最低气温 (°C)	最高气温 (°C)	计划避峰负荷 (MW)	日最大负荷 (MW)	日电能量 (MW·h)	避峰负荷率	最大避峰负荷 (MW)	总避峰电能量 (MW·h)
1月 5日	11.17	0	6	阴间多云	3	7	180	3 292	6 414	19.3	183	388
1月 6日	22.00	0.333	10	阴有短时多云	3	8	180	3 303	6 137	-14.8	95	-309
1月 10日	2.67	0	1	多云间晴有霜	1	10	180	3 326	6 570	63.5	95	181
1月 11日	24.00	0.367	12	阴转零星小雨	3	6	180	3 315	6 464	22.8	262	1 433
1月 12日	15.67	0	11	阴转零星小雨	3	6	266	3 250	6 538	48	263	1 892
1月 13日	9.50	0	9	阴有间断性小雨	3	5	275	3 280	6 411	25.3	314	716
1月 16日	22.25	0.383	16	阴转零星小雨	3	6	180	3 335	6 368	37.1	445	3 634
1月 18日	13.82	0	13	阴转零星小雨	3	6	170	3 195	6 237	-9.2	83	-99.11
1月 19日	23.50	0.1	10	多云间阴	1	11	170	3 139	6 130	22.7	293	1 528
1月 23日	14.25	0.317	11	多云间阴	1	11	150	3 205	6 323	34.1	183	874
1月 24日	13.00	0	9	多云有雾	2	11	266	3 224	6 416	11.7	203	310
1月 25日	15.00	0	10	多云有雾	2	10	266	3 229	6 096	63.5	217	2 067
2月 2日	15.25	0.417	14	多云间阴有雾	5	14	150	2 851	5 702	42.7	391	2 505
2月 11日	13.25	0.15	12	多云间晴	5	18	165	2 488	4 948	61.9	792	6 371

表 4 选取的计算指标 (2007 年 1 月 ~2 月)

日期	避峰小时数 (h)	提前通知时间 (h)	最低气温 (°C)	最高气温 (°C)	达到最大值的时间 (h)	计划避峰负荷 (MW)	日最大负荷 (MW)	日电能量 (MW·h)	最大避峰负荷 (MW)	总避峰电能量 (MW·h)
1月 5日	1.00	0	3	7	6	180	3 292	6 414	183	388
1月 6日	1.97	0.333	3	8	10	180	3 303	6 137	95	-309
1月 10日	0.24	0	1	10	1	180	3 326	6 570	95	181
1月 11日	2.15	0.367	3	6	12	180	3 315	6 464	262	1 433
1月 12日	1.40	0	3	6	11	266	3 250	6 538	263	1 892
1月 13日	0.85	0	3	5	9	275	3 280	6 411	314	716
1月 16日	1.99	0.383	3	6	16	180	3 335	6 368	445	3 634
1月 18日	1.24	0	3	6	13	170	3 195	6 237	83	-99.11
1月 19日	2.10	0.1	1	11	10	170	3 139	6 130	293	1 528
1月 23日	1.28	0.317	1	11	11	150	3 205	6 323	183	874
1月 24日	1.16	0	2	11	9	266	3 224	6 416	203	310
1月 25日	1.34	0	2	10	10	266	3 229	6 096	217	2 067
2月 2日	1.37	0.417	5	14	14	150	2 851	5 702	391	2 505
2月 11日	1.19	0.15	5	18	12	165	2 488	4 948	792	6 371

表 5 影响因素与结果的关联系数

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$y_1$	$y_2$	
$x_1$	0.00	0.641	0.667	0.63	0.608	0.654	0.648	0.672	0.579	0.624
$x_2$	0.64	0	0.596	0.628	0.7	0.687	0.595	0.57	0.647	0.609
$x_3$	0.67	0.596	0	0.484	0.644	0.597	0.659	0.654	0.598	0.587
$x_4$	0.63	0.628	0.484	0	0.673	0.596	0.551	0.57	0.572	0.539
$x_5$	0.61	0.7	0.644	0.673	0	0.597	0.656	0.664	0.625	0.554
$x_6$	0.65	0.687	0.597	0.596	0.597	0	0.564	0.571	0.56	0.585
$x_7$	0.65	0.595	0.659	0.551	0.656	0.564	0	0.725	0.662	0.63
$x_8$	0.67	0.57	0.654	0.57	0.664	0.571	0.725	0	0.661	0.626
$y_1$	0.58	0.647	0.598	0.572	0.625	0.56	0.662	0.661	0	0.62
$y_2$	0.62	0.609	0.587	0.539	0.554	0.585	0.63	0.626	0.62	0

从表 5 可以看出影响最大避峰负荷  $y_1$  的相关因素的关联系数从大到小的排序依次是： $\gamma(y_1, x_7) > \gamma(y_1, x_8) > \gamma(y_1, x_2) > \gamma(y_1, x_5) > \gamma(y_1, x_3) > \gamma(y_1, x_1) > \gamma(y_1, x_4) > \gamma(y_1, x_6)$ 。即对最大避峰负荷影响大小的排序为：日最大负荷，日电能量，提前通知时间，达到最大值的时间，最低气温，避峰小时数，最高气温，计划避峰负荷。同样可以得到影响总避峰电能量  $y_2$  的相关因素的关联系数排序依次是： $\gamma(y_2, x_7) > \gamma(y_2, x_8) > \gamma(y_2, x_1) > \gamma(y_2, x_2) > \gamma(y_2, x_3) > \gamma(y_2, x_6) > \gamma(y_2, x_5) > \gamma(y_2, x_4)$ ，各种因素从大到小排序为：日最大负荷，日电能量，避峰小时数，提前通知时间，最低气温，计划避峰负荷，达到最大值的时间，最高气温。

对上述结果进行分析表明：日最大负荷和日电能量依次为影响负荷避峰的两个最重要因素，因为两者反映了当天各类负荷的用电水平，在总用电负荷较高的条件下，其中的可避峰负荷也随之增加，避峰能力因此提高；日电能量中所包含的可避峰电能量也会随着总电能量的增加而增加。此外，避峰小时数是影响总避峰电能量的第三重要因素，因为避峰时间越长受影响的负荷越多。而影响最大避峰负荷的第三因素是提前通知时间，可见负荷避峰是需要一定的准备时间的。对总避峰电能量影响最小的是最高气温，而对最大避峰负荷影响最小的是计划避峰负荷，前者是因为冬季最低气温对用电的影响较最高气温的影响更大，后者是因为下达计划时未建立计划值与避峰负荷值之间的关联关系。

#### 4 改进负荷避峰的建议

成都市作为省会城市在负荷避峰问题上有一定

困难，但通过以上的分析不难发现在提高负荷避峰能力方面还可以对负荷避峰工作进行一些针对性的改进措施。

(1) 在下达负荷避峰的计划前对当天负荷的避峰能力进行一个全面的分析，包括对当天用电能量的估计和用电负荷的预测，使下达的避峰负荷或避峰电能量与日电能量和日最大负荷之间建立更加紧密的关联关系，从而提高负荷避峰能力。

(2) 提前一定时间通知负荷避峰，便于用户安排生产，进行有规律的负荷控制，将有利于提高避峰负荷的数值。

(3) 如果需要提高总避峰电能量，则可以采取适当延长负荷避峰时间的方法。

(4) 冬季最低气温对负荷避峰的影响高于最高气温的影响，在分析负荷避峰能力时，应充分考虑最低气温的影响。

#### 5 结 语

电网负荷避峰的时间、比例、负荷控制量的大小，都会造成相应的社会影响和经济影响，因此负荷避峰问题是涉及到电力企业社会责任和经济效益的重要问题，值得深入研究。前面根据成都地区电网负荷的特点，通过灰色关联分析方法，对影响负荷避峰的各种关联因素进行了分析。通过分析得到以下的结论：  
① 计算得到的灰色关联系数比较合理地反映了各个因素对避峰结果的影响大小。  
② 关联系数为评价负荷避峰手段提供了一种可以量化的方法。  
③ 通过加强主要因素，改进负荷控制的各环节，可以提高负荷控制的效率。

### 参考文献

[1] 段登伟,刘俊勇,吴集光.计及风险的配电公司最优分时零售电价模型[J].电力系统自动化,2005,(3):8-12.

[2] 段登伟,刘俊勇,刘继春,等.基于激励原理的可中断负荷.四川大学学报(工程科学版),2005,37(3):143-148.

[3] 黄海峰,田华,吴巍.2006年湖北电网迎峰度夏电力需求侧管理[J].湖北电力,2005,30(1):91-94.

[4] 田诺,仇新宇.供需平衡时期电力供应应急预案编制的探索[J].电力需求侧管理,2007,9(1):16-19.

[5] 中国赴欧洲电力需求侧管理培训团.欧洲电力需求侧

管理对中国的启示(上)——来自中国赴欧洲电力需求侧管理的培训报告[J].电力需求侧管理,2007,9(2):13-18.

[6] 王明俊.市场环境下的负荷管理和需求侧管理[J].电网技术,2005,29(5):1-5.

#### 作者简介:

刘凌川(1974—),男,硕士,工程师,从事电力运行管理工作;

段登伟(1974—),男,博士,高级工程师,从事电网调度管理工作,研究方向为电力市场、需求侧管理;

邓华(1973—),男,硕士,工程师,从事继电保护工作。

(收稿日期:2008-10-29)

(上接第 41 页)

由文献[9]可知,四川本地的低频振荡模式有 6 个,将 2 个区域间模式列于表 2。

按 3.1 中方法,在川云潭 31 号发电机出口变压器高压侧施加扰动,在它与远处的托托电 G3 机组功角曲线上可以检测到频率为 0.21 Hz 的振荡模式,而且该模式占主导作用。

表 2 四川电网区域间主导模式

序号	模式	频率 (Hz)	衰减阻尼比 (%)
1	$-0.0389 \pm j1.333$	0.21	2.9
2	$-0.0706 \pm j2.576$	0.41	2.7

同样,在川二滩 04 号发电机出口变压器高压侧施加扰动,在它与远处的鲁菏泽厂 5 号机组功角曲线上,可以检测到频率为 0.41 Hz 的振荡模式,而且该模式占主导作用。

### 4 结论

介绍了 Prony 方法的理论基础和 Prony 算法主要特点及其适用范围,通过试验信号证明了 Prony 方法适于分析振荡信号。最后通过仿真验证,证明 Prony 算法完全可以分析低频振荡数据特征,是一种有效的分析工具。

### 参考文献

[1] 吴敬儒,徐永禧.我国特高压交流输电发展前景[J].电网技术,2005,29(3):1-4.

[2] 王海林,黎岚,吴安平,高万良,四川“十一五”电网规划及远景展望[J].四川电力技术,2007,30(1):5-7.

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

[4] 王铁强,贺仁睦,徐东杰,王昕伟. Prony 算法分析低频振荡的有效性研究[J].中国电力,2001,43(11):38-41.

[5] 芦晶晶,郭剑,田芳,吴中习.基于 Prony 方法的电力系统振荡模式分析及 PSS 参数设计[J].电网技术,2004,28(15):31-34.

[6] 刘剑,刘天琪. Prony 在电力系统稳定控制领域中的应用[J].现代电力,2005,22(6):27-31.

[7] 曹维,翁斌伟,陈陈.电力系统暂态变量的 Prony 分析[J].电工技术学报,2000,15(6):56-60.

[8] 邓集祥,涂进,陈武晖.大干扰下主导低频振荡模式的鉴别[J].电网技术,2007,31(7):36-41.

[9] 邓集祥,贺建明,姚天亮.大区域联网条件下四川电网低频振荡分析[J].电网技术,2008,32(17):78-83.

#### 作者简介:

白洋(1981—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制。

李国庆(1981—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制。

姚天亮(1979—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制。

邓集祥(1947—),男,博士,教授,研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期:2008-12-10)

# 配电系统继电保护操作电源的选用

李俊<sup>1</sup>, 杨莉<sup>2</sup>

(1. 德阳电业局, 四川 德阳 618000; 2. 映秀湾发电总厂, 四川 都江堰 611830)

**摘要:**通过对几种常见的配电系统继电保护操作电源的技术经济性比较,分析了它们的优缺点,并对配电系统操作电源的选用提出了自己的看法。

**关键词:**配电系统;操作电源;选用

**Abstract:** The advantages and disadvantages of several familiar operational power supplies of relay protection in distribution system are analyzed and their technical economy is compared. Then the opinions are proposed about choosing the operational power supply used in distribution system.

**Key words:** distribution system; operational power supply; selection

**中图分类号:** TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0074-03

继电保护及安全自动装置是保证电力系统安全稳定运行的最基本、最重要、最有效的技术手段,而继电保护系统能否正常工作在很大程度上依赖于操作电源的可靠性,所以操作电源的重要性是不言而喻的。

电力系统包括发、变、输、配、用电等单元,电力企业承担着除用电以外所有单元的运行任务,对各单元运行可靠性要求相当高,所以操作电源的选用以可靠性为主,经济性尚在其次;然而,电力用户尤其是中小型用户对其配电系统的资金投入有限,他们往往比较重视一次设备的可靠性而忽略了操作电源等二次设备的重要性,另一方面,用户电气运行人员技术水平参差不齐,有的用户甚至没有专门的值班电工,难以对结构较复杂的操作电源系统进行正确的管理和运行维护。

近年来,由于用户电气设备故障导致主网停运的现象时有发生,其中有一部份就是由于没有配置可靠、合适的操作电源导致继电保护不能正确出口所致。在近期的一座用户 10 kV 变电站预试中,发现其蓄电池组直流系统由于长期疏于维护已经完全瘫痪。配电系统操作电源的合理配置已经成为亟待解决的问题。

操作电源可以简单地分为直流操作电源和交流操作电源两大类。

## 1 直流操作电源

目前电力系统中常见的直流操作电源系统有以

下几种:蓄电池组直流系统、硅整流电容储能直流系统和复式整流直流系统。

### 1.1 蓄电池组直流系统

蓄电池组直流系统通过接于一次电路的硅整流装置对蓄电池组充电,蓄电池组在一次交流电源故障甚至完全消失的情况下仍能可靠工作,所以它是独立的电源系统,具有很高的供电可靠性。此外,蓄电池组输出电压平稳,容量较大,供电质量好。蓄电池组直流系统的主要缺点是价格昂贵、结构复杂,早期的蓄电池组运行维护工作量较大,但随着微机控制的免维护蓄电池组直流系统的出现,其运行维护工作量大大降低了,这种直流操作电源系统在整个电力系统中得到了十分广泛的应用,已经成为电力企业各发电厂和变电所的标准配置。

但是,很多电力用户尤其是中小型用户对蓄电池组直流系统的认可度不高,最主要的原因就是价格昂贵,他们需要的是经济、实惠、可靠的操作电源系统;此外,虽然免维护蓄电池组的运行维护工作量已经大大降低了,但对于技术水平普遍有限的用户电气运行人员来讲,仍需要加强培训才能胜任此项工作。所以,蓄电池组直流操作电源一般应用在一些大中型用户配电系统中,很少应用在中小型用户配电系统中。

### 1.2 硅整流电容储能直流系统和复式整流直流系统

硅整流电容储能直流系统与复式整流直流系统省去了价格昂贵的蓄电池组,使造价降低,但结构仍然比较复杂,并且是非独立的电源系统,只适用于中、

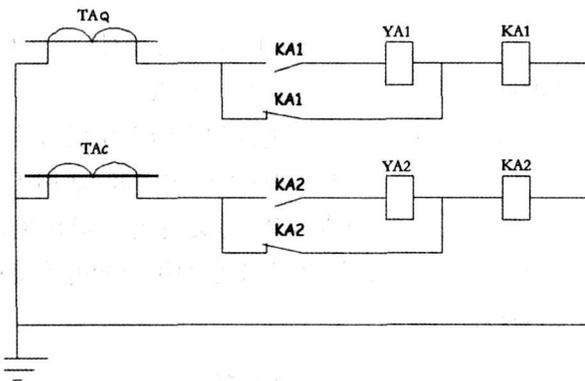
小型变电所中,应用较少,近年来新建的配电系统中几乎难觅踪影。

## 2 交流操作电源

交流操作电源又可分为交流电流操作电源和交流电压操作电源两种。

### 2.1 交流电流操作电源

所谓交流电流操作电源,实指利用短路电流流过电流互感器时,在其二次侧感应出一个很大的电流,该电流供给断路器过流脱扣线圈作跳闸之用。这类操作电源只能在短路或负荷电流较大时供继电保护作跳闸之用,不能在系统正常运行时提供断路器的分合闸电源、储能电源及信号电源。图 1 以 GL-15 型过流继电器构成的间接动作式去分流跳闸保护为例,说明这类操作电源的工作原理。



TA<sub>Q</sub>、TA<sub>C</sub>: 电流互感器

KA1、KA2: GL-15 过流继电器

YA1、YA2: 过流脱扣线圈

图 1 操作电源工作原理图

如图 1 所示,假设系统发生三相短路,电流互感器二次侧感应出强大的短路电流,KA1 和 KA2 动作,通过 GL-15 型继电器强力过渡转换触点的切换,继电器常闭触点断开,常开触点闭合,接通 YA1 和 YA2 过流脱扣线圈回路,过流脱扣动作,断路器实现事故跳闸。

这类继电保护操作电源结构简单、动作可靠、投资很小(电流互感器属于系统已有设备)、经济性好。但由于其最终依靠断路器过流脱扣线圈动作实现分闸,过流脱扣线圈的额定动作电流参数对保护能否可靠动作至关重要,而该脱扣线圈的额定动作电流一般为 5 A,也就是说 TA 二次电流必须达到 5 A 以上保护才能动作,若继电保护的整定值恰在 5 A 以下,就

会出现继电器动作而脱扣器不动作的情况,此时保护将形同虚设,同时这类继电保护的動作时限较难精确整定,因此,上下级断路器的動作电流、動作时限配合变得较为困难,继电保护的选择性及速动性达不到要求限制了它的应用。所以,这类操作电源一般应用在断路器较少、接线简单的中小型用户配电系统中,同时,由于其简单可靠的特点,在德阳电业局 10 kV 配电网柱上真空断路器中也广泛采用。

### 2.2 交流电压操作电源

交流电压操作电源结构简单,一般从站用变压器或电压互感器二次侧引入电源,电压互感器的二次电压需经控制变压器变换成断路器操动机构及保护装置的额定电压。这种电源独立性差,往往依赖于一次系统的运行状态,可靠性不高,为提高供电可靠性,交流电源最好有两个,可采取站用变压器和电压互感器电源互为备用的方式,也可引入外接电源作为备用,两个电源之间通过接触器实现自动切换。

下面介绍两类交流电压操作电源。

#### 2.2.1 不带充电储能装置的交流电压操作电源

这类操作电源只适用于系统正常运行或接近正常运行的情况,不适用于发生短路事故情况。因为当发生短路时,整个系统母线电压都将下降,由电压互感器或站用变压器供给的操作电源电压降低,继电保护及断路器操作机构将无法正确动作,保护形同虚设。因此这类操作电源仅能提供正常运行状态下的分合闸电源、储能电源及信号电源,不能可靠实现事故跳闸。但它恰能弥补交流电流操作电源的缺点,所以一般在用户 10 kV 及以下的中小容量变电站中,常常将这两类操作电源结合使用。

#### 2.2.2 带充电储能装置(UPS)的交流电压操作电源

近年来,交流不间断电源(UPS)在很多供电可靠性要求很高的场合广泛应用,如果在前述的交流电压

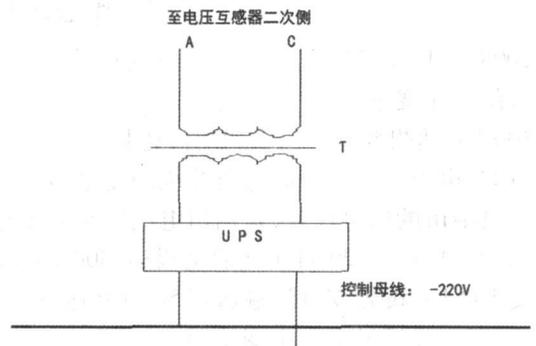


图 2 交流电压操作电源示意图

表 1 几种操作电源的特性比较

名称	可靠性	经济性	结构复杂性	易维护性	满足继电保护的要求	适用范围
蓄电池组直流系统	高	低	复杂	一般	完全满足	电力企业各发电厂和变电所的标准配置,大中型用户配电系统
硅整流电容储能直流系统和复式整流直流系统	一般	一般	复杂	较差	一般	应用很少,逐渐淘汰
交流电流操作电源	高	高	简单	好	选择性、速动性不能较好满足	断路器较少、接线简单的中小型用户配电系统, 10 kV 配网柱上真空开关
不带充电储能装置的交流电压操作电源	低	高	简单	好	不能满足	不能单独使用,一般与交流电流操作电源结合一起应用在用户 10 kV 及以下的中小容量变电站中
带 UPS 的交流电压操作电源	高	较高	简单	好	较好地满足	在中小型用户配电系统中推荐使用

操作电源系统中加入 UPS 装置,就能很好地解决供电可靠性的问题。以电压互感器、控制变压器、UPS 等构成的交流电压操作电源示意图如图 2 所示。

这类操作电源要求合理选择 UPS 装置的容量,目前,低能耗的弹簧操动机构在 10 kV 配电系统中广泛应用,对操作电源容量要求较高的电动操动机构已基本淘汰,所以,大中容量的 UPS 装置已能满足正常运行状态下的操作、储能及信号电源要求。在系统发生短路的瞬间,虽然 UPS 的输入电压降低,但由于其具备储能功能,输出电压在一定时间内尚能保持恒定,完全能满足继电保护正常工作及跳闸需要,所以,它能较好地解决操作电源供电可靠性的问题。

另一方面,从图 2 可以看出,增加的投资仅仅是 UPS 装置的费用,这种操作电源系统的经济性较好;同时,UPS 装置体积小,UPS 甚至可以安装在高压开关柜内,UPS 维护方便,它具备故障指示灯,如果损坏,更换方便,费用不高。

但是,由于 UPS 自身容量毕竟有限,限制了其在大中型配电系统中的应用,但带 UPS 的交流电压操

作电源在中小型用户配电系统中不失为一个好的选择。

### 3 总 结

表 1 将上述几类操作电源从可靠性、经济性、易维护性、适用范围等几方面作一比较。

从表 1 可以看出,蓄电池组直流系统已成为电力企业各发电厂和变电所的标准配置,同时适用于大中型用户配电系统;而带 UPS 的交流电压操作电源是值得推荐的操作电源,其在中小型用户配电系统中能得到较好应用。

### 参考文献

[1] 高友权. 配电系统继电保护 [M]. 中国电力出版社.

#### 作者简介:

李 俊 (1982—),男,2001 年 7 月参加工作,现为德阳电业局城区供电局综合队队长,注册安全工程师,中级专业技术资格,变电检修高级工。(收稿日期:2008—10—24)

## 达州 500 kV 变电站投运

2008 年 12 月 29 日,四川达州电网建设规模最大的第一座 500 kV 变电站整体投运一次成功,结束了达州无高等级电压变电站、线路的历史,为达州、巴中市经济建设提供了强大的电力支撑。

500 kV 达州变电站位于达州市达县木子乡 7 组,占地面积 104 亩,整个工程及配套设施投资总计约 7 亿元,是达州电业局第一座高电压等级的变电站,也是解决川东地区电网可靠运行的关键工程。该站主要担负达州市和巴中市的供电任务,是四川电网中重要变电站之一。整个工程从 2006 年开始设计,2007 年 12 月开始施工,2008 年 12 月 29 日正式启动投运,500 kV 进出线为 2 回,220 kV 线路 5 回,本次启动投运线路 1 回,电源从广安 500 kV 黄岩变电站输送至 500 kV 达州站,主电总容量为 150 万 kVA,本次投运 1 台 75 万 kVA 主变压器,未来还将投运另 1 台主变压器。

(摘自《西南电力报》)

# 某市 2008~2012 年电力负荷预测

邹汝杰

(四川省电力公司眉山公司, 四川 眉山 620010)

**摘要:**首先介绍了几种常用的负荷预测方法及其特点,并且结合某市电网的实际情况,对电网 2008~2012 年负荷进行了预测。预测结果可为某市电网的规划提供参考。

**关键词:**电力系统;中长期负荷预测;规划

**Abstract:** First several common methods of load forecasting and their features are introduced. Then the load of the power grid in a city from 2008 to 2012 is forecasted according to the actual situation of the city. The forecasting results can give a reference to the planning of power grid of the city.

**Key word:** power system; medium and long term load forecasting; planning

**中图分类号:** TM714 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0077-02

负荷预测是电力系统规划建设的依据,是在满足一定精度的条件下,依据负荷的过去和现在推测未来的情况。负荷预测具有不确定性、条件性、时间性及多方案性,可以分为超短期、短期和中、长期负荷预测。中、长期负荷预测结果用于确定是否安装新机组及装机容量的大小,电网的增容和扩建以及电网的发展趋势,因此其准确程度将直接影响到投资、网络布局 and 运行的合理性。常用的负荷预测方法较多,这些方法各有优缺点和适用范围。通过对某市 2000~2007 年的地区发展和用电情况进行分析,选取产值单耗法、人均电能法、弹性系数法及灰色预测法等方法对某市电网 2008~2012 年及 2020 年远景负荷进行预测。

## 1 预测方法

### 1.1 产值单耗法

产值单耗法即根据过去某行业单位产值所消耗的电能来预测未来该行业的用电能量。常采用综合电耗法和产业电耗法。综合电耗法利用电能与整个区域的国民生产总值(Gross Domestic Product GDP)之间的关系对电能进行预测,而产业电耗法根据各产业(第一、二、三产业)及居民生活用电单耗来预测。

### 1.2 人均电能法

根据历史年人均用电能量情况对将来的人均用

电能量进行预测,并结合政府部门对未来人口的增长情况对总电能量进行预测。年总用电能量=人口数×年人均用电能量。

### 1.3 弹性系数法

弹性系数  $k$  是电能量的年均增长率与 GDP 年均增长率的比值。由于电力与国民经济发展之间存在着一定的关系,因此,电力弹性系数的变化一般具有规律性。该方法需要已知 GDP 的增长情况,因此首先要根据某市“十一五”规划提供的数据并结合“十一五”期间该城市的发展情况对 GDP 年增长率进行预测,然后得到电能量预测值。

$$W_i = W_{i-1} (1 + k_i v_i) \quad i=1, 2, 3, \dots$$

式中:  $W_i$  为预测的第  $i$  年末的电能量;  $W_{i-1}$  为第  $i-1$  年末的电能量;  $k_i$  为预测的第  $i$  年电能量弹性系数;  $v_i$  是预测的第  $i$  年的 GDP 年增长率。当预测期各年的 GDP 增长率和电能量弹性系数相等时,则上式变为

$$W_i = W_0 (1 + kv)^i \quad i=1, 2, 3, \dots$$

预测中  $W_0$  则取 2007 年末的电能量作为基准。

### 1.4 灰色预测法

灰色系统理论是一种通过数生成技术去寻求样本数据发展规律的预测方法。它能够在只具有较少样本数据的条件下,发现样本的潜在发展规律,从而对未来的发展做出预测。将采用 GM(1,1) 模型对电能进行预测,该模型是常用的一种灰色模型,它是由一个只包含单变量的一阶微分方程构成的模型,是作为电力预测的一种有效模型。

### 1.5 曲线拟合法

该方法是用数学曲线对比较有规律性的样本数据进行拟合,并通过曲线外推出预测期的值。在一定条件下,电力负荷存在明显的变化趋势,因此该方法也是电力预测中常用的一种。

## 2 某市电网电能量预测

对中、长期负荷预测来说,没有哪种单一的预测方法能够准确地给出预测结果,一般都是通过对历史数据进行分析后选取几种比较适合的方法做出预测值,然后再对各种预测方法的结果进行分析、筛选,并选取合理的综合预测模型得到最终的预测结果。应该指出,电力负荷预测,尤其是、长期预测不是通过几个数学方法进行了数学运算就能轻而易举取得的,它不仅要求预测人员对大量相关资料进行分析、整理,还要求预测人员能够准确把握未来的发展趋势。因为电力的发展受地区经济的发展和国家政策的影响

都较大,所以这就要求预测人员对这些方面都要有深入的了解,才能提高预测的准确性。

首先对某市电网的历史和现状数据进行了详尽的收集整理,同时亦对某市政府“十一五”规划报告和地区发展现状进行了研究,并取得了国民经济各行业的历史和现状数据。某市国民经济发展及电网相关历史数据分别见表 1 和表 2。通过对这些数据的分析,对 GDP 的发展趋势进行了新的预测(即根据政府“十一五”规划报告和“十一五”期间的发展情况及政府近期发展规划对“十一五”规划进行滚动预测),并得到不计铝厂电能量情况下的电能量弹性系数预测值及综合电耗和产业电耗预测值。同时也通过曲线拟合和灰色预测方法,得到不计铝厂情况下电能量的未来发展趋势。各种方法预测的各年电能量值见表 3。

表 3 中的电能量预测值为不计铝厂时的电能量预测值。各种方法预测的电能量发展趋势见图 1。结合某市未来发展规划得到的不含铝厂及含铝厂情况下最终电能量及最大负荷预测值见表 4。

表 1 2000~2006 年某市经济发展主要历史指标

年 份	GDP		第一产业		第二产业		第三产业	
	产值(亿元)	增长率(%)	产值(万元)	增长率(%)	产值(万元)	增长率(%)	产值(万元)	增长率(%)
2000	124.80	7.50	41.50	2.60	44.90	11.20	38.40	8.40
2001	134.89	8.10	41.30	0.90	49.90	12.40	43.70	10.70
2002	149.50	10.80	43.40	3.50	58.90	17.10	47.20	10.40
2003	174.05	13.60	47.47	4.30	72.83	23.00	53.75	12.80
2004	216.82	14.60	59.18	6.60	96.39	21.50	61.25	12.00
2005	245.07	13.60	64.66	6.80	113.10	21.50	67.30	7.60
2006	280.80	13.60	67.54	3.60	137.09	20.80	76.20	11.20
2007	320							

表 2 2000~2006 年某市行业用电分类统计表

项 目	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年
供电能量	15.48	16.85	19.16	22.59	38.73	45.89	52.94
全社会用电能量	13.79	14.98	17.17	20.80	36.78	43.38	50.94
1 第一产业	1.29	1.09	1.14	1.72	1.27	1.32	0.60
2 第二产业	8.35	8.90	10.63	13.84	29.89	35.80	41.91
其中:铝厂	/	/	/	1.66	16.48	19.12	19.77
3 第三产业	0.76	0.87	0.93	1.04	1.27	1.48	1.69
4 城乡居民生活用电	3.39	4.12	4.47	4.21	4.34	4.78	6.74
最大供电负荷	369	399	452	625	782	853	978
其中:铝厂	/	/	/	140	270	270	270
最大负荷利用小时	4 196	4 221	4 241	3 614	4 951	5 379	5 411

表 3 2008~2012 年某市电能量预测值

预测方法	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
弹性系数法	38.89	48.02	55.65	68.69	80.25
综合电耗法	40.23	52.32	59.62	71.20	82.12
灰色预测法	40.47	49.56	60.68	74.30	90.97
人均电能量法	39.69	50.12	57.89	70.32	81.21
曲线拟合法	39.03	46.73	55.94	66.97	80.18

(下转第 94 页)

求比较严格,当网关故障时,两套系统可以分开独立运行,可靠性较高,但是投资也比较高。从长远看,电力系统监控系统应该采用图 2(c)的方案,主要侧重于 WAMS/SEMS 系统,而原有系统更多地做为后备系统。

对现有系统的改造方案,需要更为详细的技术经济比较。从投资上看,如果资金比较充足,则可以先实现方案 (b),即先将相对独立的 WAMS/SEMS 的框架搭建出来,将通信通道一步到位组建好,下一步再将 RTU 接入新建通道,实现底层的融合。如果投资较小,则可以先选择方案 (a),即先将 PMU 接入原有网络,逐步过渡,时机成熟时再将 WAMS/SEMS 单列出来。

## 4 结 论

针对 SCADA/EMS 系统与 PMU/WAMS 系统的整合问题,在比较两套系统特点的基础上,分析了 3 种整合方案并给出两套系统整合的方法与步骤,以提高电力系统数据处理、信息提取与协调决策能力,达

到提高性能、节省投资的目的。

## 参考文献

- [1] 王英涛,印永华,蒋宜国,张道农,张文涛,王兆家.我国实时动态监测系统的发展现状及实施策略研究[J].电网技术,2006,29(11):44-48.
- [2] 于尔铿.电力系统状态估计[M].中国水利水电出版社,北京,1985.
- [3] KODSIK M, Sameh CANIZARES A, Claudio Model-ing and Simulation of IEEE 14 Bus System with FACTS Controllers Technical Report University of Waterloo Canada March 2003.
- [4] Milano F. An Open Source Power System Analysis Tool-box IEEE Transactions on Power Systems 2005, 20(3): 1199 - 1206.
- [5] RICE J Mark HEYDT T Gerald Power Systems State Estimation Accuracy Enhancement through the Use of PMU Measurements 2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 1

(收稿日期:2008-10-09)

(上接第 78 页)

表 4 综合预测结果

预 测 项	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2008~2012年均增长率(%)
电能量综合预测值(不含铝厂)	39.6	51.2	56.3	71.2	81.6	15.56
铝厂电能量预测值	40	50	80	80	80	
总电能量预测值	79.6	101.2	136.3	151.2	161.6	15.21
最大负荷预测值(不含铝厂)	900	1 067	1 126	1 201	1 296	7.57
铝厂最大负荷预测值	540	810	1 080	1 080	1 080	
最大负荷预测值	1 440	1 877	2 206	2 281	2 376	10.53

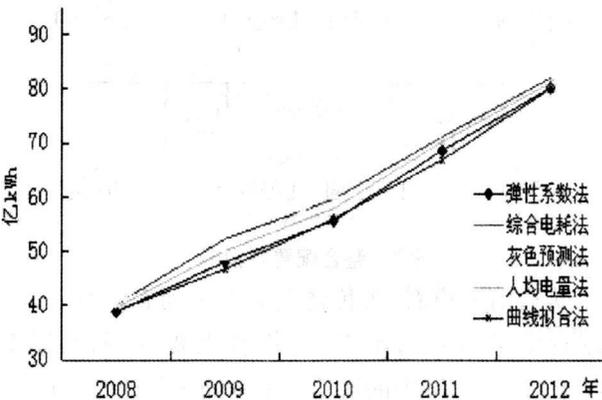


图 1 某市电能量预测发展趋势

## 3 结 论

应用了电力负荷预测研究领域的多种经典预测方法对某市 2008~2012 年的电能量及最大负荷进

行了预测(未对某市即将新增大的点负荷进行预测),并结合某市的未来发展规划得到了未来几年的综合预测值(如有特殊增加大的点负荷,数据应进行相应的调整)。作为对某市电网规划中负荷预测的滚动修正,期望能够为某市的未来电网规划提供依据。

## 参考文献

- [1] 牛东晓.电力负荷预测技术及其应用[M].北京:中国电力出版社,1998.
- [2] 肖国泉.电力负荷预测[M].北京:中国电力出版社,2001.
- [3] 吴煜红,杨继旺.几种电力负荷预测方法及其比较[J].广东电力,2004,17(2):178-21.

作者简介:

邹汝杰(1973-),男,籍贯四川眉山,1995年毕业于四川大学电气工程系,工程师,研究方向电力系统自动化。

(收稿日期:2008-10-10)

# 快速多目标无功优化方法在实际系统中的应用

张 建<sup>1</sup>, 牛 霞<sup>1</sup>, 刘晓东<sup>1</sup>, 张安安<sup>2</sup>, 潘家和<sup>3</sup>

(1. 广汉供电局, 四川 广汉 618300; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

3. 宜宾电业局, 四川 宜宾 644002)

**摘 要:** 多目标进化算法 (MOEA) 已经被应用到电力系统无功优化这一问题的求解, 但是由于 MOEA 算法需要相当长的寻优时间, 同时其优化结果针对性不强, 因此难以用于电网的无功电压自动实时控制。将以  $\epsilon$ -支配域为基础的多目标优化方法应用到实际系统的无功电压自动实时控制中, 该方法包括多目标模糊评价函数、自适应  $\epsilon$ -MOEA 优化算法以及后评价模糊控制器。通过在一个实际 35 节点系统上的应用, 验证了所提方法的有效性与实用性。

**关键词:** 区域无功电压自动控制; 无功优化; 多目标优化;  $\epsilon$ -MOEA

**Abstract:** The MOEA methods have been used in reactive power optimization but due to its shortcomings such as time consuming computation and poor applicability, it is difficult to be used in actual control. A fuzzy multi-objective reactive power optimization approach based on  $\epsilon$ -domination including new fuzzy multi-objectives function, adaptive  $\epsilon$ -domination algorithm and post-evaluation fuzzy logic controller has been used to overcome those shortcomings. Its application to a real 35 nodes system shows the method can maintain good search results and save a lot computation time.

**Key words:** area voltage/V ar control; reactive power optimization; multi-objective optimization;  $\epsilon$ -MOEA

**中图分类号:** TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0079-05

无功和电压控制问题对电力系统的安全运行和经济操作而言具有十分重要的意义。其本质是通过诸如发电机端电压、变压器挡位以及并联电容器组等控制变量的适度调节, 使得系统电压水平保持在可以接受的范围之内, 同时尽量减小系统网损。

对这样一个多目标、多约束非线性混合规划问题的求解, 国内外学者采用了大量的方法, 做了许多有益的尝试。根据其目标函数的处理方法, 这里将这些方法大致分为两类: 先评价方法和后评价方法。所谓先评价方法是指通过对多个目标函数的比较, 根据某种倾向度将这多个目标函数转化为单目标函数求解, 其最经典的方法就是权重法和罚函数法。权重法通过一组和为 1 的权重因子将多个目标函数合成为一个目标函数<sup>[1, 2, 6, 7~9]</sup>; 罚函数法则将某些目标函数作为惩罚项与基本目标函数相加<sup>[6]</sup>, 是一种特殊化的权重法。但权重法在将多目标优化问题简单化时也带来了两个根本性的问题<sup>[11]</sup>: ①难以选择一组合理的权重矢量, 使寻优结果收敛到 Pareto 最优解集前沿; ②权重法不能解决非凸空间寻优问题。而多目标无功优化问题的目标空间正是一个多维、离散并且不一定为凸的空间, 因而用权重法处理多目标无功优化问题并不是最好的选择。后评价方法是通过首先找

到问题的 Pareto 最优解集, 然后再根据具体要求选取最优的单个解。与先评价方法相比, 后评价方法具有以下优点: ①能得到优化问题的 Pareto 最优解集; ②对非凸、离散空间也有良好的搜索能力<sup>[10]</sup>。目前, 一些学者分别运用了基于免疫算法的后评价方法<sup>[3]</sup>, 以及基于遗传算法 NSGA II<sup>[4]</sup>、SPEA2<sup>[5]</sup>的后评价方法求解了多目标无功优化问题, 而基于遗传算法的各种多目标进化算法 (Multi-Objective Evolutionary Algorithm, MOEA) 被公认为寻找 Pareto 最优解集, 能力最强, 应用也最为广泛。这里, 将一种基于  $\epsilon$ -支配域的 MOEA 方法应用于实际系统, 克服了目前后评价多目标优化方法普遍存在的寻优时间长的问題<sup>[12]</sup>, 并通过模糊控制器实现 Pareto 非受支配最优解的选择。

## 1 无功优化模型

### 1.1 模糊多目标函数

参考文献 [1] 所提出的模糊网损和电压水平模糊隶属度函数, 根据文中的具体应用将其做最小化调整, 0 代表满意度最大, 1 代表满意度最小。

(1) 网损模糊隶属度函数

$$F_p(p_i) = \begin{cases} 0 & (p_i \leq p_{min}) \\ 0.5 \times \frac{p_i - p_{min}}{p_{ori} - p_{min}} + 0.5 & (p_{min} < p_i \leq 2(p_{ori} - p_{min})) \\ 1 & (p_i > 2(p_{ori} - p_{min})) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_i$  表示系统优化后的有功网损;  $P_{ori}$  为系统优化前的网损;  $P_{min}$  则是系统的理论最小网损, 根据文献 [1] 的定义, 可以用系统无功电流分量为 0 时的有功网损代替  $P_{min}$ 。

(2) 电压合格水平模糊隶属度函数

$$F(V_i) = \begin{cases} 0 & (V_{L1} \leq V_i \leq V_{U1}) \\ 1 - \frac{V_{U0} - V_i}{V_{U0} - V_{U1}} & (V_{U1} \leq V_i \leq V_{U0}) \\ 1 - \frac{V_i - V_{L0}}{V_{L1} - V_{L0}} & (V_{L0} \leq V_i < V_{L1}) \\ 1 & (\text{others}) \end{cases} \quad (2)$$

$$F_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F(V_i) \quad (3)$$

其中,  $V_i$  为第  $i$  节点的电压幅值;  $V_{U0}$ ,  $V_{L0}$  分别为节点电压的“不能接受”上、下限;  $V_{U1}$ ,  $V_{L1}$  分别为“可以接受”的电压上、下限;  $N$  为节点总数。最后得到的隶属度函数是各个节点电压水平的平均反应, 其值的大小直接反映了系统电压偏离期望电压上、下限的程度, 值越大, 则偏离程度越严重。图 1 是这两个隶属度函数的图形。

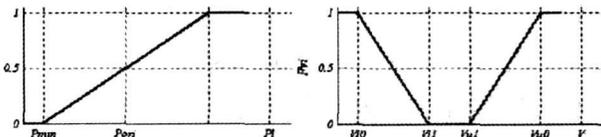


图 1 目标函数分量隶属度函数图形

### 1.2 约束条件

$$\begin{cases} P_i = P_{Li} + e_i \sum_{j \in I_i} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j \in I_i} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ (i=1, \dots, N) \\ Q_{Gi} = Q_{Li} + f_i \sum_{j \in I_i} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j \in I_i} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ (i=1, \dots, N) \\ T_{min} \leq T_i \leq T_{max} \quad (i=1, \dots, N_T) \\ V_{iD} \leq V_i \leq V_{i0} \quad (i=1, \dots, N) \\ Q_{Gmin} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gmax} \quad (i=1, \dots, N_G) \\ Q_{Cmin} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Cmax} \quad (i=1, \dots, N_C) \\ V_{Gmin} \leq V_{Gi} \leq V_{Gmax} \quad (i=1, \dots, N_G) \end{cases} \quad (4)$$

上式中的等式约束为直角坐标下的潮流方程,  $e_i$  与  $f_i$  分别为节点电压的实部和虚部,  $N$  为节点总数,

$N_T$ ,  $N_G$ ,  $N_C$  分别为变压器支路数, 发电机节点数和并联无功补偿装置的节点数。  $T_i$ ,  $V_i$ ,  $Q_{Gi}$ ,  $Q_{Ci}$ ,  $V_{Gi}$  分别为变压器档位、节点电压幅值、发电机无功出力、补偿电容器无功容量以及发电机端电压。下标带有  $max$  和  $min$  的量表示对应变量的最大、最小值。

因此, 无功优化的总目标函数为:

$$\begin{cases} \min(F) = \min(F_p, F_v, F_s)^T \\ \text{s.t.} \quad (4) \end{cases} \quad (5)$$

## 2 自适应 $\epsilon$ -MOEA 算法

Deb 等人在  $\epsilon$ -支配域思想的基础上提出了一种  $\epsilon$ -MOEA 算法 [12]。但是将其应用到电力系统无功优化中时, 寻优结果有时并不能满足系统调节的实际需要。因此, 提出了一种针对系统各目标函数分量的受重视程度, 实现  $\epsilon$  的自适应调节, 以改善寻优结果的方法。

### 2.1 $\epsilon$ -支配域

这里对  $\epsilon$ -支配域的定义与文献 [13] 定义相同, 只是采用的是最小化目标函数的形式。

定义 1: 对于  $m$  维矢量  $f, g \in R^m$ , 对某一  $\epsilon_i > 0$ , 如果对所有的  $i \in \{1, \dots, m\}$  有  $f_i - \epsilon_i \leq g_i$ , 则  $f$  被称为  $\epsilon$ -支配  $g$  表示为  $f \succ_{\epsilon} g$ 。

定义 2: 有矢量集  $F \subseteq R^m$  及  $\epsilon > 0$ , 如果任意矢量  $g \in F$  都被至少一个  $f \in F_{\epsilon}$  所  $\epsilon$ -支配, 则矢量集  $F_{\epsilon}$  被称为  $F$  集的一个  $\epsilon$ -近似 Pareto 集。即  $\forall g \in F, \exists f \in F_{\epsilon}$  使得,  $f \succ_{\epsilon} g$ 。

经典的 MOEA 方法是力求在整个目标空间中找出一组 Pareto 非受支配解集, 即多目标优化的全局最优解集, 而基于  $\epsilon$ -支配域的方法则是搜索一组  $\epsilon$ -近似 Pareto 集。图 2 以一二维目标空间的例子说明了这一差异。解向量  $P \in F_{\epsilon}$  支配了整个目标空间  $ABCD$ , 而根据经典 MOEA 对支配域的定义,  $P$  只能支配空间  $PECF$ 。显然基于  $\epsilon$ -支配域的搜索计算复杂度较经典的 MOEA 大大降低了。

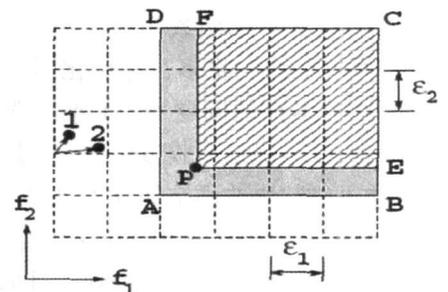


图 2  $\epsilon$ -支配域图形说明

## 2.2 自适应 $\epsilon$ -支配域

通过将目标空间按  $\epsilon_i$  划分为一系列的“超格”(hyper-box), 简化了要搜索空间的复杂度。但是这样也出现了一个新的问题, 即应该怎样选择  $\epsilon_i$ 。根据  $\epsilon$  的定义,  $\epsilon_i$  反映了对目标函数  $f_i$  的“容忍度”, 也就是说当两个解的第  $i$  维目标函数之差小于  $\epsilon_i$  时, 对用户而言这两个解是没有差别的。结合电力系统多目标无功优化的实际情况, 显然这种“容忍度”不应该是固定不变的。例如, 当系统电压水平不理想, 或是运行中电压上下限值发生改变而使得电压靠近电压限值时, 对电压水平这一目标函数分量变化大小就应该更加敏感, 在电压水平目标函数分量方向上的搜索也应该更精细; 而当系统电压稳定裕度情况不理想时, 则应该降低对电压稳定裕度分量的“容忍度”。也就是说应该根据系统在进行优化时刻的各目标函数分量的水平, 动态地决定  $\epsilon$  的取值。在这一思想基础上, 设计了如下的模糊逻辑控制器, 实现  $\epsilon$  的自适应调整。首先根据第 1 节的模糊隶属度函数定义, 分别对三种目标函数分量的输入论域进行模糊划分, 定义三种语言变量分别为“正大”(PB)、“正中”(PM)和“零”(ZE), 如图 3(a)所示。同时, 再对  $\epsilon$  的模糊输出论域进行模糊划分, 定义三种语言变量分别为“负小”(NS)、“负中”(NM)和“零”(ZE), 如图 3(b)所示, 其中横坐标  $k$  为以 10 为底的对数值,  $\epsilon = 10^k$ ,  $-n \leq k \leq 0$ ,  $n$  为指定的一整数。

由以上所定义的输入与输出论域的模糊分区, 采用如表 1 的模糊规则。去模糊化采用质心法。这样, 就可以根据系统的各种不同运行情况得到不同的  $\epsilon_i$ , 并且由于该方法设计的模糊隶属度函数能准确地反映系统各目标函数分量的实际情况, 因此各  $\epsilon_i$  的相互比较, 能反映出系统目前各目标函数分量的“受重视程度”的不同。

## 2.4 后评价模糊控制器

当完成对  $\epsilon$ -近似 Pareto 解集的搜索后, 只是完

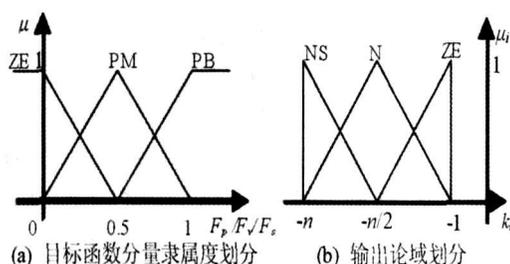


图 3 目标函数分量隶属度划分

表 1  $\epsilon$  模糊规则

$F_p, F_v$ 或 $F_s$	ZE	PM	PB
K	NS	NM	ZE

成了多目标优化问题最优解第一阶段的任务, 还应该通过对系统信息进一步的分析, 选取一个与所求解问题最适合的解<sup>[10]</sup>。特别是将 MOEA 算法运用到实际问题的分析与处理中时, 如何选择最适合的解显得尤为重要。正如第 2.2 节指出的, 所设计的自适应  $\epsilon$ -支配域能反映出系统目前各目标函数分量的“受重视程度”, 因此可以将作为最优解选择的依据。考虑到网损是一个最基本的目标函数分量, 并且人们总是希望在保证系统稳定的基础上尽量减少网损, 因此这里将网损重要程度固定为  $1/3$ 。针对另外两个目标函数分量  $F_v$  和  $F_s$ , 设计如图 4 所示的模糊权重输出分区以及如表 2 所示的模糊规则, 则  $F_v$  和  $F_s$  的模糊权重分别为  $\omega_{v/s} 2/3$  和  $(1 - \omega_{v/s}) 2/3$ 。通过这样一个模糊逻辑控制器, 可在  $\epsilon$ -近似 Pareto 解集中选出一个最优解。

表 2  $\omega_{v/s}$  模糊规则

$\omega_{v/s}$	$F_v$			
	ZE	PM	PB	
$F_s$	ZE	PB	PB	PR
	PM	PM	PM	PB
	PB	PS	PM	PM

## 3 实际应用

为了验证所提出的改进算法在电力系统电压无功优化计算中的有效性, 将自适应  $\epsilon$ -MOEA (表示为 AeMOEA) 算法以及  $\epsilon$ -MOEA (表示为 eMOEA) 的多目标无功优化程序针对某实际地区电网系统进行了优化计算仿真, 电网的接线图如图 5。该电网包括一座 220 kV 枢纽变电站和 7 座 110 kV 终端变电站, 两座 35 kV 变电站, 调节设备包括 14 台有载调压变压器和 24 组并联补偿电容器。220 kV 和 110 kV 母线电压范围限定为  $1.00 \sim 1.07$  (pu), 35 kV 和 10 kV 母线电压范围限定为  $0.98 \sim 1.07$  (pu)。功率基值都为 100 MVA, 编码方式与文献 [3] 相同。

优化计算前该电网有功损耗为 28.04 MW。表 3 列出了优化结果的比较情况, eMOEA 算法其网损下降率为 12.81%, 而且还以开关设备的频繁动作作为代价; 而 AeMOEA 算法的网损下降率为 18.34%, 开关

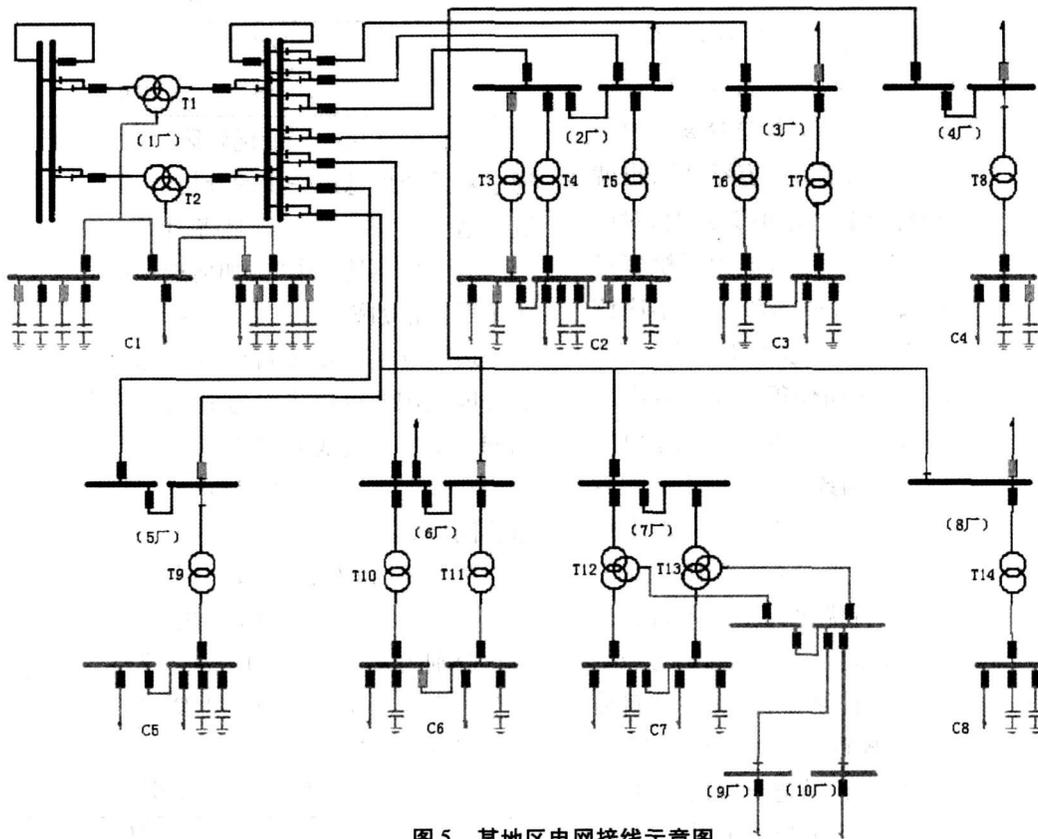


图 5 某地区电网接线示意图

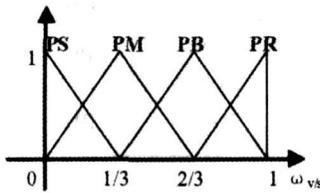


图 4 模糊权重输出分区

表 3 优化结果比较

方法	eMOEA	AeMOEA
损耗下降量 (MW)	3.59	5.14
变压器最大动作次数	65	5
电容器组最大动作次数	28	8
平均计算时间 (s)	56.47	53.18

设备的动作较少且较为平稳。AeMOEA 实时优化以较低的开关设备动作代价取得了较为满意的优化效果,既保证了电力系统的经济运行,又减少了开关设备故障率,确保了电网的稳定运行,其优化计算时间在分钟以内,基本满足了实时电压无功控制对计算时间的要求。

## 4 结 论

AeMOEA 和 eMOEA 都能满足实际运用的需要,并且 AeMOEA 方法优化结果更好,因此能很好地运

用于区域无功、电压自动控制系统。

## 参 考 文 献

- [1] Jiachuan Shi and Yutian Liu. Fuzzy Evaluation Based Multi-objective Reactive Power Optimization in Distribution Networks [J]. Lecture Notes in Artificial Intelligence 2005, (3613): 11-19.
- [2] W. Zhang and Y. Liu. Fuzzy Logic Controlled Particle Swarm for Reactive Power Optimization Considering Voltage Stability[C]. IEEE 7<sup>th</sup> International Power Engineering Conference 2005, (1): 1-5.
- [3] 熊虎岗,程浩忠,李宏仲. 基于免疫算法的多目标无功优化 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (11): 102-108.
- [4] 冯士刚,艾 芊. 带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 146-151.
- [5] 冯士刚,艾 芊. 利用强度 Pareto 进化算法的多目标无功优化 [J]. 高电压技术, 2007, 33(9): 115-119.
- [6] 姜素华,李 研,吴耀武,熊信银. 多目标电网无功优化的量子遗传算法 [J]. 高电压技术, 2005, 31(9): 69-83.
- [7] Xu Guiguang Wang Xing Yu Erkeng. A Fuzzy Multi-

- Objective Approach to Optimal Voltage/Reactive Power Control [C]. IEEE 1998 International Conference on Power System Technology 1998, vol 2, 1443-1447.
- [8] Lou Suhua, Wu Yaowu, Xiong Xinyin, Tu Guangyu. A Parallel PSO Approach to Multi-Objective Reactive Power Optimization with Static Voltage Stability Consideration [C]. IEEE Conference Proceeding of PES TD, 2006, 172-176.
- [9] Takahide Nimura, Ryuichi Yokoyama and Brian J. Cory. A Fuzzy Coordination Approach for Multi-objective Voltage and Reactive Power Schedule of An Electrical Power System [C]. Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems 1993, vol 1, 267-272.
- [10] Edmund K. B., Graham K. Search Methodologies - Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques [M]. Springer Science Business Media LLC.
- [11] K. Deb, A. Pratap, S. Agawal and T. Meyarivan. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm; NSGA-II [J]. IEEE TRANS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 2002, 6(2): 182-197.
- [12] K. Deb, M. Mohan and S. Mishra. Evaluating the  $\epsilon$ -Domination Based Multi-Objective Evolutionary Algorithm for a Quick Computation of Pareto-Optimal Solutions [J]. Evolutionary Computation, 2005, 13(4): 501-525.
- [13] M. Laumanns, L. Thiele, K. Deb and E. Zitzler. Combining Convergence and Diversity in Evolutionary Multiobjective Optimization [J]. Evolutionary Computation, 2002, 10(3): 263-282.
- 作者简介:**  
张安安 (1977-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为多目标无功优化, 电压稳定与控制。
- (收稿日期: 2008-10-29)

## 《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, 主要刊登电力生产、科研、设计、施工和设备运行、改造等方面的研究报告、专题论述、应用研究、经验交流、技术讨论等文稿。本刊热忱欢迎投稿。根据科技论文规范化的要求, 本刊对来稿提出以下要求。

(1) 文稿内容应具有实用性、内容切题、重点突出、论点明确、数据可靠、层次分明、文句简练、数学推导简明扼要, 篇幅不超过 5000 字。

(2) 文稿须写中文摘要、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。同时, 文章附作者简介与联系电话。

(3) 文稿的表格、插图应结构简洁。插图应清晰, 少而精, 能用文字或表格描述的尽可能不用插图。表格上方应标有表序和表题, 插图下方应标有图序和图题。

(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) 来稿须为清晰的打印稿, 并通过 E-mail 提供电子文件, 稿件上请注明详细地址、邮政编码、联系电话, 并请自留底稿, 本刊一律不退稿。作者在 6 个月内未见文章发表, 可自行处理。

(7) 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。

(8) 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, 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

**邮编:** 610072 **电话:** (028)87082037 **E-mail:** cdsclj@163.com

# 两种神经网络在变压器油色谱故障诊断中的应用

周亚明<sup>1</sup>, 田野<sup>1</sup>, 陈斌<sup>2</sup>, 董书勇<sup>3</sup>

(1 宿迁供电公司, 江苏 宿迁 223800; 2 绍兴电力局修试工区, 浙江 绍兴 312000;

3 萧山供电局, 浙江 萧山 311201)

**摘要:**分析了 Levenberg-Marquardt(L-M)算法和 RPROP 算法的原理, 并将它们应用于充油电气设备故障诊断神经网络的训练。构造了满足要求的神经网络, 分别使用了 L-M 算法和 RPROP 算法进行训练和诊断。结果表明, 两种神经网络均能快速收敛到较高的精度; 对训练所得网络分别使用没有训练过的样本进行诊断, 两种算法的诊断准确率分别是 86.47%、92.00%。

**关键词:**变压器; 故障诊断; 神经网络

**Abstract:** The principles of the two algorithms Levenberg-Marquardt (L-M) algorithm and RPROP algorithm are introduced. Then they are used to diagnose the fault of transformer based on DGA. The suitable ANN structure is constructed and the above-mentioned two algorithms are used to train the ANN. The result indicates that both of them have the high accuracy and the fast convergence speed. The trained ANN is used to diagnose the fault of transformer and the accuracies of these two algorithms are 86.47% and 92.00%, respectively.

**Key words:** transformer; fault diagnosis; ANN

**中图分类号:** TM855 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0084-04

大型电力变压器是电力系统中重要的输变电设备, 在电力系统中处于枢纽地位, 电力变压器的故障不仅影响电力系统的输电能力, 还可能造成电力系统的大规模停电, 给电力系统和国民经济带来巨大损失<sup>[1]</sup>。因此准确诊断变压器故障具有较大的理论意义和实用价值。

目前电力系统中的大型变压器大多是以精炼矿物油作为绝缘和冷却的介质, 不同类型的故障及不同严重程度故障产生气体的类型和浓度是不同的, 其中一些气体能反映变压器故障的情况, 通常称这些气体为特征气体, 它们是 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>。变压器油中溶解气体分析 (Dissolved Gas in-oil Analysis 简称 DGA)<sup>[2~3]</sup>就是根据气相色谱方法获得油中各种特征气体的浓度, 然后根据获得的各种气体浓度判断故障的一种方法。由于油中溶解气体分析方法对于判断慢性局部潜在性缺陷十分有效, 而且该方法无需停电试验, 方便用于在线监测, 因此, 在 1997 年颁布执行的电力设备预试规程中, 把变压器油中溶解气体分析放到了首要的位置。

由于变压器油中溶解气体的形成涉及复杂的机理, 而且与电、热、机械等方面的作用相互耦合, 通过理论方法无法完全精确地确定从变压器油中溶解的

特征气体浓度到变压器所属的故障类型及严重程度之间的映射关系。多层前馈神经网络<sup>[4~5]</sup>具有形成非线性映射、自学习、自适应等优点, 非常适合于逼近故障特征气体浓度到故障类型的映射, 所以它在基于油中溶解气体分析的变压器故障诊断中有着十分广泛的应用。下面使用了 Levenberg-Marquardt 算法<sup>[6,7]</sup>和 RPROP 算法<sup>[8,9]</sup>训练的多层前馈神经网络对变压器进行故障诊断, 构造了网络模型, 使用例子验证了两种算法的有效性。

## 1 L-M 算法

多层前馈神经网络出现的一种比较有效的算法是 BP 算法, 但 BP 算法从数学原理上是基于一阶偏导数, 存在着以下两个问题: ①学习步长选择困难。过小的学习步长导致收敛速度慢, 过大的学习步长导致振荡, 很难选择一个在全局范围内都合适的最优步长。②容易陷入局部极小点。网络误差曲面上存在许多局部极小点, 这些点上网络误差最小误差较大, 但权值和阈值对误差的偏导数却很小, BP 算法权值和阈值的调整量是它们对误差的一阶偏导数与学

习步长的乘积,所以在局部极小点上权值和阈值的调整量很小,导致网络很难跳出局部极小点。虽然人们采用变学习速率和加动量项进行了改进,但以上两个问题在一定程度上仍存在。

为此,引入了具有二阶收敛速度的 L-M 算法,该算法是一种专门用于误差平方和最小化的神经网络训练算法。设样本数目为 M、输出神经元数目为 L 则网络误差的平方和

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M e_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^L \epsilon_{ij}^2 \quad (1)$$

式中,  $e_i$  为第 i 个样本输出误差的平方和;  $\epsilon_{ij}^2$  为第 i 个样本在第 j 个输出层神经元的误差。

设 W 为网络的可变参数组成的列向量,网络可变参数为 N 个,则其形状为  $N \times 1$ ,它也是函数 E 的自变量,对函数 E 进行泰勒展开式取二阶近似并考虑平稳点,则有

$$W(k+1) = W(k) - H(k)^{-1} \frac{\partial E}{\partial W}(k) \quad (2)$$

式中, H 称为 Hessian 矩阵,  $H_{ij} = \frac{\partial^2 E}{\partial w_i \partial w_j}$ , 其形状为  $N \times N$ ; 如果直接计算 Hessian 矩阵则称为牛顿法。但 Hessian 矩阵的直接计算及求逆都很麻烦,而且常常是病态的,所以 L-M 算法用下式对 Hessian 矩阵进行近似:

$$H = J^T J + \lambda I \quad (3)$$

式中, J 称为 Jacobian 矩阵,其元素  $J_{ij} = \frac{\partial \epsilon_i}{\partial w_j}$ , 其形状为  $ML \times N$ ;  $\lambda$  为引入的可变参数。

网络可变参数的调整公式为:

$$W = W - (J^T J + \lambda I)^{-1} J^T \epsilon(W) \quad (4)$$

式中,  $\epsilon$  为由误差组成的矩阵,其形状为  $ML \times 1$ 。

该算法根据误差 E 的变化情况自动调整  $\lambda$ , 当  $\lambda$  很小时,变为牛顿法;当  $\lambda$  很大时则变为 BP 算法,此时步长为  $\lambda^{-1}$ 。

L-M 算法根据网络误差的变化情况在基于一阶偏导数的标准 BP 算法和基于二阶偏导数的牛顿法之间自适应变化,它的收敛速度比 BP 算法快,而且网络训练陷入局部极小点的可能性小。且式 (3) 中的 Jacobian 矩阵 J 基于一阶偏导,即上式仅有一阶计算量,故该算法的计算量相对 Newton 算法要小一些。

## 2 RPROP 算法原理

除了基于二阶改进算法的 L-M 算法可以用于多层前馈神经网络的训练,基于启发式改进的 RPROP 算法也能提高神经网络的性能。

多层前馈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的变化十分剧烈,有些区域非常平滑,应该选择较大的学习步长;有些区域非常陡峭,应该选择较小的学习步长<sup>[5]</sup>。但标准 BP 算法在训练中学习步长保持恒定,导致了学习步长选择困难;学习步长过大则网络容易振荡;学习步长过小则网络收敛速度太慢。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较大,但可变参数对误差的一阶偏导数接近于 0 由于 BP 算法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,这使网络经过多次训练后仍不能跳出局部极小点,训练不收敛。

设 n 为迭代次数,  $\Delta_{ij}^{(n)}$  为网络可变参数调整量的幅值,  $\frac{\partial E^{(n)}}{\partial w_{ij}}$  为网络可变参数对网络误差的一阶偏导数,  $\Delta w_{ij}^{(n)}$  为网络可变参数的调整量。  $\Delta_{ij}$  的调整公式如下:

$$\Delta_{ij}^{(n)} = \begin{cases} \eta^+ * \Delta_{ij}^{(n-1)}, & \text{当 } \frac{\partial E^{(n-1)}}{\partial w_{ij}} * \frac{\partial E^{(n)}}{\partial w_{ij}} > 0 \\ \eta^- * \Delta_{ij}^{(n-1)}, & \text{当 } \frac{\partial E^{(n-1)}}{\partial w_{ij}} * \frac{\partial E^{(n)}}{\partial w_{ij}} < 0 \\ \Delta_{ij}^{(n-1)}, & \text{否则} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\eta^+$  通常取 1.2;  $\eta^-$  通常取 0.5。在计算出  $\Delta_{ij}$  后,可用式 (6) 计算出可变参数的调整量:

$$\Delta w_{ij}^{(n)} = \begin{cases} -\Delta_{ij}^{(n)}, & \text{当 } \frac{\partial E^{(n)}}{\partial w_{ij}} > 0 \text{ 且 } \frac{\partial E^{(n)}}{\partial w_{ij}} * \frac{\partial E^{(n-1)}}{\partial w_{ij}} > 0 \\ +\Delta_{ij}^{(n)}, & \text{当 } \frac{\partial E^{(n)}}{\partial w_{ij}} < 0 \text{ 且 } \frac{\partial E^{(n)}}{\partial w_{ij}} * \frac{\partial E^{(n-1)}}{\partial w_{ij}} > 0 \\ -\Delta w_{ij}^{(n-1)}, & \text{当 } \frac{\partial E^{(n)}}{\partial w_{ij}} * \frac{\partial E^{(n-1)}}{\partial w_{ij}} < 0 \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (6)$$

网络的可变参数用式 (7) 调整:

$$w_{ij}^{(n+1)} = w_{ij}^{(n)} + \Delta w_{ij}^{(n)} \quad (7)$$

BP 算法的  $\Delta w_{ij}^{(n)}$  等于  $\frac{\partial E^{(n)}}{\partial w_{ij}}$  与学习步长的乘积,

而 RPROP 算法的  $\Delta w_{ij}^{(n)}$  是由  $\Delta w_{ij}^{(n-1)}$  与  $\frac{\partial E^{(n)}}{\partial w_{ij}}$  和  $\frac{\partial E^{(n-1)}}{\partial w_{ij}}$  的符号决定, 与  $\frac{\partial E^{(n)}}{\partial w_{ij}}$  和  $\frac{\partial E^{(n-1)}}{\partial w_{ij}}$  的幅值无关, RPROP 算法与前者主要区别在于后者。当网络处于局部极小点或误差曲面较平的区域时 (即  $\frac{\partial E}{\partial w_{ij}}$  的幅值很小),  $\Delta w_{ij}$  不受  $\frac{\partial E}{\partial w_{ij}}$  的影响仍然保持相对较大的值, 所以网络更有可能跳出局部极小点而收敛于全局极小点。同时  $\frac{\partial E}{\partial w_{ij}}$  仅表示  $w_{ij}$  按照  $\frac{\partial E}{\partial w_{ij}}$  方向使用足够小的步长时网络误差有最快的下降速度,  $\frac{\partial E}{\partial w_{ij}}$  的幅值与最优调整步长并没有必然的联系。RPROP 算法使用  $\frac{\partial E}{\partial w_{ij}}$  的符号信息, 而没有使用  $\frac{\partial E}{\partial w_{ij}}$  的幅值信息, 能根据网络训练情况自适应调整  $\Delta w_{ij}$ , 避免了次要信息的干扰, 加快了网络的收敛。

与 BP 算法需要确定网络的学习步长不同, RPROP 算法不需要用户确定学习步长。  $\eta^+$  和  $\eta^-$  选择缺省值即可, 需要用户确定的只有  $\Delta w_{ij}^{(0)}$ , 而且网络训练对于  $\Delta w_{ij}^{(0)}$  不敏感, 将它初始化为任何大于零的随机数网络也能快速地调整到最优值<sup>[8]</sup>, 通常将  $\Delta w_{ij}^{(0)}$  全部初始化为一个较小的数, 比如 0.1。网络参数的高度自适应避免了用户通过不断试验取最优值的过程, 是 RPROP 算法相对于 BP 算法的优点之一。

RPROP 算法的计算步骤如下。

- ① 令网络迭代次数  $n=0$ ,  $\Delta w_{ij}^{(0)}=0.1$ ,  $\eta^+=1.2$ ,  $\eta^-=0.5$ , 确定训练目标  $E_g$ 、最多可能迭代次数  $N_{max}$ 。
- ② 计算网络可变参数对网络误差的一阶偏导数  $\frac{\partial E^{(n)}}{\partial w_{ij}}$ , 根据式 (5) 计算  $\Delta w_{ij}^{(n)}$ 。
- ③ 根据式 (6) 计算网络可变参数的调整量, 根据式 (4) 对网络可变参数进行调整。
- ④ 计算所有样本的误差平方和  $E_n$ ,  $n=n+1$ , 如果  $E < E_g$  或  $n > N_{max}$  则训练结束; 否则, 跳至 ②。

### 3 神经网络的实现及训练和诊断效果

#### 3.1 网络结构

##### 3.1.1 输入层

输入信息是氢气、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔 5 种气体的浓度, 用 5 个神经元表示。输入的形式有直接输入各种气体浓度和对样本进行归一化两种方式, 前者容易导致样本空间过大, 进而导致网络的规模过大, 影响网络的正常训练和诊断; 文中选用后一种方式, 将上述 5 种气体浓度与气体浓度总和的比值作为网络的输入。

##### 3.1.2 隐层

这里使用通常采用的单隐层前馈神经网络。网络隐层神经元数目对网络的学习能力和泛化能力有着很大的影响, 考虑到神经网络的样本数目是 50 个, 综合考虑了学习能力和泛化能力, 通过试验确定隐层使用 12 个神经元。

##### 3.1.3 输出层

有 6 个神经元, 分别表示网络能诊断的 6 种故障类型, 即低温过热、中温过热、高温过热、局部放电、低能放电和高能放电。输出为 1 表示属于此类故障, 0 则表示不属于此类故障。

#### 3.2 网络训练和诊断

为了比较 L-M 算法和 RPROP 算法的效果, 使用 50 个变压器油中溶解气体分析样本, 使用各种算法训练或构建网络 10 次, 所得训练误差与所需时间的平均值如表 1 所示。

表 1 多种算法的训练效果

	L-M 算法	RPROP 算法
训练误差平方和	5.26	5.00
所用时间平均值 (s)	28.31	42.57

从表 1 中可以看出 L-M 算法和 RPROP 算法训练所得误差平方和比较接近, 训练所需时间也比较接近。

使用基于 L-M 算法、RPROP 算法的神经网络对 150 组变压器油中溶解气体数据进行诊断 (使用 10 个训练所得网络诊断结果和作为最终结果), 准确率分别为 86.47%、92.00%, 选取 3 个典型的故障变压器油中溶解气体数据的诊断结果进行说明, 其相应的油中溶解气体含量如表 2 所示。

表 2 故障变压器油中溶解气体含量 ( $\mu\text{L/L}$ )

	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
S <sub>1</sub>	195.7	58	16.4	91.6	96.9
S <sub>2</sub>	242.8	76.29	44.44	173.06	0
S <sub>3</sub>	408.8	56.1	4.6	93.6	282.6

表中: S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub> 分别表示样本 1、2、3。

神经网络诊断是采用 10 个神经网络训练而得, 将 10 次诊断结果输出的平均值计算, 得到故障情况如表 3、4 所示。使用两种神经网络对这 3 台变压器诊断结果分别为高能放电、高温过热和高能放电, 这与这 3 台变压器的吊罩检查结果是一致的, 表明了神经网络诊断结果的准确性。但比较而言, RPROP 算法训练的神经网络的诊断精度要稍高于 L-M 算法训练的神经网络的诊断结果。结论如下:

1 号变压器: 吊罩检查故障原因为变压器绕组第 10 匝间换位处, 因短路而使 A 相低压线圈局部严重烧伤, 内层大面积烧黑, 绝缘破损, 铁心片上有局部变黑现象。

2 号变压器: 吊罩检查故障原因为 A、B 相分接开关引线头过热, 包缠的绝缘纸被烧焦, 分接开关接触不良。

3 号变压器: 吊罩检查故障原因为选择开关静触头支撑板条变形, 触头接触不良, 造成严重的拉弧放电; 切换开关 A 相保护间隙击穿或短路, 环流烧断过渡电阻。

表 3 L-M 神经网络诊断所得结果

变压器	低温 过热	中温 过热	高温 过热	局部 放电	低能 放电	高能 放电
1 号	0.05	0.08	0.04	0.12	0.04	0.85
2 号	0.04	0.06	0.83	0.04	0.20	0.04
3 号	0.04	0.06	0.05	0.04	0.21	0.70

表 4 RPROP 神经网络诊断所得结果

变压器	低温 过热	中温 过热	高温 过热	局部 放电	低能 放电	高能 放电
1 号	0.06	0.07	0.04	0.04	0.05	0.90
2 号	0.04	0.06	0.89	0.06	0.05	0.04
3 号	0.06	0.08	0.80	0.12	0.09	0.08

## 4 结 论

使用 L-M 算法训练的 L-M 神经网络和使用 RPROP 算法训练的 RPROP 神经网络经过训练能有效获得色谱数据中隐藏的故障诊断规则, 训练精度能满足要求。对训练所得神经网络对未训练过实例进行的诊断表明, 神经网络能有效诊断变压器故障。但从训练速度上看 L-M 算法更快一些, 从诊断结果上看 RPROP 算法准确性更高一些。

## 参考文献

- [1] 王昌长. 电力设备的在线监测与故障诊断. 北京: 清华大学, 1996.
- [2] 操敦奎. 变压器油中气体分析与诊断 [M]. 武汉: 中国水利电力企业管理协会, 1987.
- [3] 孙才新, 陈根伟, 李俭, 等. 电气设备油中气体在线监测与故障诊断技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [4] 王胜财, 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.
- [5] 黄鞠铭, 朱子述, 胡文华, 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.
- [6] Hagan M T, Menhaj M. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. IEEE Transactions on Neural Networks 1994, 5(6): 989-993.
- [7] 赵登福, 林 谋, 李彦明, 等. 用 L-M 算法的神经网络诊断充油设备绝缘故障 [J]. 高电压技术, 2004, 30(7): 4-6, 16.
- [8] M Riedmiller, H Braun. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm. IEEE International Conference on Neural Networks San Francisco CA, USA, 1993, 586-591.
- [9] 章剑光, 周浩, 盛晔. 基于 RPROP 神经网络算法的主变 DGA 故障诊断模型 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 63-66.

(收稿日期: 2008-10-14)

# 节约能源 保护环境

# 影响电力负荷避峰的关联因素分析

刘凌川, 段登伟, 邓 华  
(成都电业局, 四川 成都 610016)

**摘要:** 提高电力负荷避峰的效率既是需求侧管理的重要内容, 也是改善电网运行的需要。分析了影响负荷避峰的多种因素, 根据成都地区负荷避峰的实际情况, 用灰色关联分析方法对各种关联因素进行了关联系数分析, 确定了影响负荷避峰的因素序列, 为负荷避峰管理提供了定量分析的依据。计算结果表明该方法能够较好分析出各种因素的作用大小。

**关键词:** 电力负荷; 避峰; 需求侧管理; 灰色理论

**Abstract:** Improving the efficiency of power peak load averting is an important part of demand side management as well as the necessary of power grid operation. The multiple factors which affect the load averting are analyzed. Based on the actual situation of load averting in Chengdu area, the grey relation analysis method is utilized to analyze the related factors. And the sequences of factors which influence load averting are determined also, which provide the supports for quantitative analysis on load management. Simulation results show that the proposed method is feasible for analyzing the effect of multiple factors.

**Key words:** power load; peak averting; demand side management; grey theory

**中图分类号:** TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0069-05

近年来, 中国电力负荷增长迅速, 不少地区出现了电力供需的矛盾, 特别是在迎峰度冬(夏)期间, 高峰负荷往往受到发电能力和电网安全的限制, 需要合理安排电力负荷避峰以充分利用电能, 缓解电网压力。电力负荷避峰涉及到发、供电企业和用户各方的利益, 既是电力调度部门关心的问题, 也日益受到各方面的广泛关注。

负荷避峰是电力需求侧管理的重要内容, 它与限电拉闸等负荷控制方法不同。拉闸限电往往是通过在很短的时间切除指定的电力负荷实现负荷控制; 而负荷避峰则需要正确估计避峰量的大小, 合理安排避峰时段, 负荷下降需要一定的响应时间, 不同性质的负荷响应时间也不相同。拉闸限电方法对生产生活的影 响较大, 负荷避峰则主要通过调整生产时间来控制工业负荷, 对人民生活用电影响很小。因此, 在实际的负荷控制中, 供电企业通常是采取“先避峰, 后限电”的方法, 以尽可能保证全社会有序用电。不仅如此, 通过合理安排用电企业进行避峰用电也可以为企业节省一定的生产费用, 市场条件下通过电价也可以实现负荷避峰<sup>[1,2]</sup>。目前, 湖北、江苏等地已开展了针对负荷高峰的需求侧管理工作并积累了一定的经验<sup>[3,4]</sup>。文献[5]对发达国家的需求侧管理工作进

行了介绍, 所提供的国外经验对中国开展需求侧管理工作有一定的参考价值。文献[6]指出中国开展电力需求侧管理有显著的效益, 在分析传统负荷管理的基础上, 介绍了开展需求侧管理(DSM)的主要措施, 对基于 DSM 的负荷管理系统及其与电网调度、电力营销和信息管理的系统集成的相互关系进行论述。

实际上, 影响负荷避峰的因素较多, 比如提前通知时间、避峰时段、避峰量大小、温度和天气等等, 这些影响因素相互关联且不易量化, 因此如何评价各种因素对避峰效果的影响成为研究负荷避峰的难题之一。为了解决上述问题, 这里引入灰色关联分析方法对成都电业局 2006~2007 年冬季的负荷避峰数据进行了分析, 将电力负荷避峰的主要指标与避峰效果进行了关联分析, 得到了相关因素对避峰能力影响情况的量化数据, 并提出了进一步改进负荷避峰工作方法。

## 1 灰色关联分析方法

为了提高效率, 减少不必要的工作量, 使负荷避峰达到更理想的效果, 就需要对各种因素进行分析。问题在于影响负荷避峰的各种因素相互交差、彼此关

联,在这些关联因素中,利用常规数学方法找出具有决定性作用的 1 种或多种因素比较困难。灰色关联分析法为解决这类关联问题提供了一种有效方法,利用这种方法可对影响结果的各种因素及其相对作用进行分析和比较,从而找出决定性的影响因素。灰色关联分析的主要步骤包括:

(1)分析与结果有关系的各种元素,用对结果有重要影响的各种元素的量化指标形成影响空间  $W(x_i', y_i')$ 。

(2)影响空间应具有可比性、可接近性和极性一致。为解决影响空间的可比性问题,可对  $W(x_i', y_i')$  作数值变换,建立灰关联因子空间  $X(x_i)$ 。

(3)建立灰关联差异信息空间  $\Delta_G$ 。

$$\Delta_G = (\Delta, \zeta \Delta_{li}(\max), \Delta_{li}(\min))$$

式中,  $\Delta$  是差异信息集;  $\zeta$  是分辨系数  $\zeta \in [0, 1]$ ;

$\Delta_{li}(\max)$ ,  $\Delta_{li}(\min)$  分别为  $\Delta$  上的两级上环境参数和下环境参数。

其中,差异信息  $\Delta_0$  的计算公式为:

$$\Delta_{0i} = |x_0(k) - x_i(k)|$$

环境参数为:

$$\Delta_{li}(\max) = \max_i \max_k \Delta_{li}(k)$$

$$\Delta_{li}(\min) = \min_i \min_k \Delta_{li}(k)$$

(4)计算灰关联系数  $\gamma(x_0(k), x_i(k))$  及灰关联度  $\gamma(x_0, x_i)$ 。

灰关联系数  $\gamma(x_0(k), x_i(k))$  的计算公式为:

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_k \min_i \Delta_{li}(k) + \zeta \max_k \max_i \Delta_{li}(k)}{\Delta_{li}(k) + \zeta \max_k \max_i \Delta_{li}(k)}$$

灰关联度  $\gamma(x_0, x_i)$  的计算公式为:

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \gamma(x_0(k), x_i(k))$$

(5)进行灰关联度排序。

若有  $\gamma(x_0, x_i) > \gamma(x_0, x_j) > \gamma(x_0, x_l) > \dots > \gamma(x_0, x_p)$ , 则  $x_i > x_j > x_l > \dots > x_p$ , 称为  $x_i$  强于  $x_j$ ,  $x_j$  强于  $x_l$ ,  $\dots$ , 表示因子  $x_j$  对于参考列  $x_0$  的灰关联度小于  $x_i$  对于参考列  $x_0$  的灰关联度。

只要能够计算出影响负荷避峰的各种因素的灰关联度并对其进行关联度进行排序,就可以比较科学地分析出主要因素和次要因素,从而改进和提高负荷避峰工作。

## 2 成都地区负荷避峰方案

成都市作为省会城市实行负荷控制对社会经济的影响较大,为了合理安排负荷控制工作,相关部门根据不同时期制定了不同的负荷控制方案。如 2006~2007 年成都地区负荷控制实行“先错峰,后避峰,再限电”的方式,冬季枯水期采取四级负荷避峰预案。根据电网运行中负荷缺额的不同发布不同的避峰预警信息。为方便公众了解缺电信息、协调各部门的负荷管理工作,避峰方案采用黄、橙、红、黑四种颜色分别表示负荷缺额的紧迫程度。每种颜色分别代表不同的负荷避峰数量级,如表 1 所列,颜色越深相应的负荷避峰量越大。

表 1 2006 冬至 2007 春枯水期四川省电网避峰表

预警颜色	避峰用户数	最大避峰负荷 (kW)	占最大负荷比例 (%)	供需缺口 (MW)
黄色	718	228 088	15	1 000 以下
橙色	816	351 482	20	1 000~1 500
红色	1 512	532 925	25	1 500~2 000
黑色	1 713	717 275	30	2 000

表 2 2007 年 1、2 月份成都地区负荷避峰情况

日期	通知时间 (时、分)	避峰时段 (时、分)	避峰 (MW)	避峰方案	备注
1月 5日	12: 50	12: 50~24: 00	180		削计划
1月 6日	01: 40	2: 00~24: 00	180		削计划
1月 10日	21: 20	21: 20~24: 00	180		削计划
1月 11日	23: 38	0: 00~7: 00	180		削计划
	07: 50	7: 00~24: 00	180		削计划
1月 12日	08: 20				红色 避峰
1月 13日	07: 30	7: 30~17: 00	275		红色 削计划
1月 16日	01: 22	1: 45~24: 00	180		削计划
1月 18日	10: 10	10: 10~24: 00	170		削计划
1月 19日	00: 09	0: 15~23: 45	170		削计划
	08: 06				黑色
1月 23日	09: 26	9: 45~24: 00	150		削计划
	15: 22	15: 30~24: 00	100		削计划
	16: 00				黑色 超计划
1月 24日	11: 00				红色
1月 25日	09: 00				红色 避峰
2月 2日	08: 20	8: 45~24: 00	150		削计划
2月 11日	10: 36	10: 45~24: 00	165		削计划

2006 年冬季至 2007 年春季成都地区负荷避峰取得了一定的效果。尽量避免影响居民生活用电,更多采用避峰、错峰用电等方法进行负荷控制。2007 年 1 月到 2 月通过调度口径下达了一系列负荷避峰的通知(如表 2 所列),表中数据表明负荷避峰的安

排是根据电网运行情况,当日通知或提前一日通知进行避峰,通常负荷避峰指定了避峰量或避峰等级,但提前通知时间、避峰时段有明显的不同。如果能够正确分析评价各种相关因素对避峰的确切影响,将有利于提高负荷避峰的效率,改进和完善负荷避峰工作。

### 3 负荷避峰因素的关联分析

灰色关联分析方法已被成功用于多因素统计分析,对负荷避峰这类多因素问题同样可利用该方法进行分析。这里选取表 2、表 3 所列由调度口径统计的 14 天数据作为研究对象,其中表 3 列出了负荷避峰情况的原始数据。考虑到研究数据中天气数据不易精确量化,且当地冬季天气对避峰负荷的影响相对较小,故在后面的计算中不考虑天气因素的影响,而避峰负荷率则是由总避峰电能量和最大避峰负荷经过计算得到,不是一个独立的影响因素或结果,在计算

中也不再单独计及。以下的负荷避峰分析只选取了原始数据中的避峰小时数、提前通知时间、最低气温、最高气温、达到最大值的时间、计划避峰负荷、日最大负荷、日电能量、最大避峰负荷、总避峰电能量作为影响因素,分别设为  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$ ,将最大避峰负荷和总避峰电能量作为被影响的结果,分别设为  $y_1, y_2$ ,研究各影响因素 ( $x_1, x_2, \dots, x_8$ )对避峰结果 ( $y_1, y_2$ )的影响大小。从表 3 的数据中可以看出,负荷避峰通常是电网运行的实时情况提出的,有时提前通知避峰,有时则是从通知时刻起就要求避峰,没有进行提前通知。负荷避峰的持续时间也各不相同,持续避峰时间从 9~24 h 不等。由于各影响因素相互关联,负荷避峰的大小往往不是某个单独因素作用的结果,这里采用灰色关联分析方法,希望能从中找出产生作用最大的一种或多种因素,以便改进负荷避峰工作,提高工作效率。

表 3 负荷避峰情况的原始数据 (2007 年 1 月 ~2 月)

日期	避峰小时数 (h)	提前通知时间 (h)	达到最大值的时间 (h)	天气	最低气温 (°C)	最高气温 (°C)	计划避峰负荷 (MW)	日最大负荷 (MW)	日电能量 (MW·h)	避峰负荷率	最大避峰负荷 (MW)	总避峰电能量 (MW·h)
1月 5日	11.17	0	6	阴间多云	3	7	180	3 292	6 414	19.3	183	388
1月 6日	22.00	0.333	10	阴有短时多云	3	8	180	3 303	6 137	-14.8	95	-309
1月 10日	2.67	0	1	多云间晴有霜	1	10	180	3 326	6 570	63.5	95	181
1月 11日	24.00	0.367	12	阴转零星小雨	3	6	180	3 315	6 464	22.8	262	1 433
1月 12日	15.67	0	11	阴转零星小雨	3	6	266	3 250	6 538	48	263	1 892
1月 13日	9.50	0	9	阴有间断性小雨	3	5	275	3 280	6 411	25.3	314	716
1月 16日	22.25	0.383	16	阴转零星小雨	3	6	180	3 335	6 368	37.1	445	3 634
1月 18日	13.82	0	13	阴转零星小雨	3	6	170	3 195	6 237	-9.2	83	-99.11
1月 19日	23.50	0.1	10	多云间阴	1	11	170	3 139	6 130	22.7	293	1 528
1月 23日	14.25	0.317	11	多云间阴	1	11	150	3 205	6 323	34.1	183	874
1月 24日	13.00	0	9	多云有雾	2	11	266	3 224	6 416	11.7	203	310
1月 25日	15.00	0	10	多云有雾	2	10	266	3 229	6 096	63.5	217	2 067
2月 2日	15.25	0.417	14	多云间阴有雾	5	14	150	2 851	5 702	42.7	391	2 505
2月 11日	13.25	0.15	12	多云间晴	5	18	165	2 488	4 948	61.9	792	6 371

表 4 选取的计算指标 (2007 年 1 月 ~2 月)

日期	避峰小时数 (h)	提前通知时间 (h)	最低气温 (°C)	最高气温 (°C)	达到最大值的时间 (h)	计划避峰负荷 (MW)	日最大负荷 (MW)	日电能量 (MW·h)	最大避峰负荷 (MW)	总避峰电能量 (MW·h)
1月 5日	1.00	0	3	7	6	180	3 292	6 414	183	388
1月 6日	1.97	0.333	3	8	10	180	3 303	6 137	95	-309
1月 10日	0.24	0	1	10	1	180	3 326	6 570	95	181
1月 11日	2.15	0.367	3	6	12	180	3 315	6 464	262	1 433
1月 12日	1.40	0	3	6	11	266	3 250	6 538	263	1 892
1月 13日	0.85	0	3	5	9	275	3 280	6 411	314	716
1月 16日	1.99	0.383	3	6	16	180	3 335	6 368	445	3 634
1月 18日	1.24	0	3	6	13	170	3 195	6 237	83	-99.11
1月 19日	2.10	0.1	1	11	10	170	3 139	6 130	293	1 528
1月 23日	1.28	0.317	1	11	11	150	3 205	6 323	183	874
1月 24日	1.16	0	2	11	9	266	3 224	6 416	203	310
1月 25日	1.34	0	2	10	10	266	3 229	6 096	217	2 067
2月 2日	1.37	0.417	5	14	14	150	2 851	5 702	391	2 505
2月 11日	1.19	0.15	5	18	12	165	2 488	4 948	792	6 371

表 5 影响因素与结果的关联系数

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$y_1$	$y_2$	
$x_1$	0.00	0.641	0.667	0.63	0.608	0.654	0.648	0.672	0.579	0.624
$x_2$	0.64	0	0.596	0.628	0.7	0.687	0.595	0.57	0.647	0.609
$x_3$	0.67	0.596	0	0.484	0.644	0.597	0.659	0.654	0.598	0.587
$x_4$	0.63	0.628	0.484	0	0.673	0.596	0.551	0.57	0.572	0.539
$x_5$	0.61	0.7	0.644	0.673	0	0.597	0.656	0.664	0.625	0.554
$x_6$	0.65	0.687	0.597	0.596	0.597	0	0.564	0.571	0.56	0.585
$x_7$	0.65	0.595	0.659	0.551	0.656	0.564	0	0.725	0.662	0.63
$x_8$	0.67	0.57	0.654	0.57	0.664	0.571	0.725	0	0.661	0.626
$y_1$	0.58	0.647	0.598	0.572	0.625	0.56	0.662	0.661	0	0.62
$y_2$	0.62	0.609	0.587	0.539	0.554	0.585	0.63	0.626	0.62	0

从表 5 可以看出影响最大避峰负荷  $y_1$  的相关因素的关联系数从大到小的排序依次是： $\gamma(y_1, x_7) > \gamma(y_1, x_8) > \gamma(y_1, x_2) > \gamma(y_1, x_5) > \gamma(y_1, x_3) > \gamma(y_1, x_1) > \gamma(y_1, x_4) > \gamma(y_1, x_6)$ 。即对最大避峰负荷影响大小的排序为：日最大负荷，日电能量，提前通知时间，达到最大值的时间，最低气温，避峰小时数，最高气温，计划避峰负荷。同样可以得到影响总避峰电能量  $y_2$  的相关因素的关联系数排序依次是： $\gamma(y_2, x_7) > \gamma(y_2, x_8) > \gamma(y_2, x_1) > \gamma(y_2, x_2) > \gamma(y_2, x_3) > \gamma(y_2, x_6) > \gamma(y_2, x_5) > \gamma(y_2, x_4)$ ，各种因素从大到小排序为：日最大负荷，日电能量，避峰小时数，提前通知时间，最低气温，计划避峰负荷，达到最大值的时间，最高气温。

对上述结果进行分析表明：日最大负荷和日电能量依次为影响负荷避峰的两个最重要因素，因为两者反映了当天各类负荷的用电水平，在总用电负荷较高的条件下，其中的可避峰负荷也随之增加，避峰能力因此提高；日电能量中所包含的可避峰电能量也会随着总电能量的增加而增加。此外，避峰小时数是影响总避峰电能量的第三重要因素，因为避峰时间越长受影响的负荷越多。而影响最大避峰负荷的第三因素是提前通知时间，可见负荷避峰是需要一定的准备时间的。对总避峰电能量影响最小的是最高气温，而对最大避峰负荷影响最小的是计划避峰负荷，前者是因为冬季最低气温对用电的影响较最高气温的影响更大，后者是因为下达计划时未建立计划值与避峰负荷值之间的关联关系。

#### 4 改进负荷避峰的建议

成都市作为省会城市在负荷避峰问题上有一定

困难，但通过以上的分析不难发现在提高负荷避峰能力方面还可以对负荷避峰工作进行一些针对性的改进措施。

(1) 在下达负荷避峰的计划前对当天负荷的避峰能力进行一个全面的分析，包括对当天用电能量的估计和用电负荷的预测，使下达的避峰负荷或避峰电能量与日电能量和日最大负荷之间建立更加紧密的关联关系，从而提高负荷避峰能力。

(2) 提前一定时间通知负荷避峰，便于用户安排生产，进行有规律的负荷控制，将有利于提高避峰负荷的数值。

(3) 如果需要提高总避峰电能量，则可以采取适当延长负荷避峰时间的方法。

(4) 冬季最低气温对负荷避峰的影响高于最高气温的影响，在分析负荷避峰能力时，应充分考虑最低气温的影响。

#### 5 结 语

电网负荷避峰的时间、比例、负荷控制量的大小，都会造成相应的社会影响和经济影响，因此负荷避峰问题是涉及到电力企业社会责任和经济效益的重要问题，值得深入研究。前面根据成都地区电网负荷的特点，通过灰色关联分析方法，对影响负荷避峰的各种关联因素进行了分析。通过分析得到以下的结论：

- ① 计算得到的灰色关联系数比较合理地反映了各个因素对避峰结果的影响大小。
- ② 关联系数为评价负荷避峰手段提供了一种可以量化的方法。
- ③ 通过加强主要因素，改进负荷控制的各环节，可以提高负荷控制的效率。

### 参考文献

[1] 段登伟,刘俊勇,吴集光.计及风险的配电公司最优分时零售电价模型[J].电力系统自动化,2005,(3):8-12.

[2] 段登伟,刘俊勇,刘继春,等.基于激励原理的可中断负荷.四川大学学报(工程科学版),2005,37(3):143-148.

[3] 黄海峰,田华,吴巍.2006年湖北电网迎峰度夏电力需求侧管理[J].湖北电力,2005,30(1):91-94.

[4] 田诺,仇新宇.供需平衡时期电力供应应急预案编制的探索[J].电力需求侧管理,2007,9(1):16-19.

[5] 中国赴欧洲电力需求侧管理培训团.欧洲电力需求侧

管理对中国的启示(上)——来自中国赴欧洲电力需求侧管理的培训报告[J].电力需求侧管理,2007,9(2):13-18.

[6] 王明俊.市场环境下的负荷管理和需求侧管理[J].电网技术,2005,29(5):1-5.

#### 作者简介:

刘凌川(1974—),男,硕士,工程师,从事电力运行管理工作;

段登伟(1974—),男,博士,高级工程师,从事电网调度管理工作,研究方向为电力市场、需求侧管理;

邓华(1973—),男,硕士,工程师,从事继电保护工作。

(收稿日期:2008-10-29)

(上接第 41 页)

由文献[9]可知,四川本地的低频振荡模式有 6 个,将 2 个区域间模式列于表 2。

按 3.1 中方法,在川云潭 31 号发电机出口变压器高压侧施加扰动,在它与远处的托托电 G3 机组功角曲线上可以检测到频率为 0.21 Hz 的振荡模式,而且该模式占主导作用。

表 2 四川电网区域间主导模式

序号	模式	频率 (Hz)	衰减阻尼比 (%)
1	-0.038 9 ± j 0.333	0.21	2.9
2	-0.070 6 ± j 0.576	0.41	2.7

同样,在川二滩 04 号发电机出口变压器高压侧施加扰动,在它与远处的鲁菏泽厂 5 号机组功角曲线上,可以检测到频率为 0.41 Hz 的振荡模式,而且该模式占主导作用。

### 4 结 论

介绍了 Prony 方法的理论基础和 Prony 算法主要特点及其适用范围,通过试验信号证明了 Prony 方法适于分析振荡信号。最后通过仿真验证,证明 Prony 算法完全可以分析低频振荡数据特征,是一种有效的分析工具。

### 参考文献

[1] 吴敬儒,徐永禧.我国特高压交流输电发展前景[J].电网技术,2005,29(3):1-4.

[2] 王海林,黎岚,吴安平,高万良,四川“十一五”电网规划及远景展望[J].四川电力技术,2007,30(1):5-7.

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

[4] 王铁强,贺仁睦,徐东杰,王昕伟. Prony 算法分析低频振荡的有效性研究[J].中国电力,2001,43(11):38-41.

[5] 芦晶晶,郭剑,田芳,吴中习.基于 Prony 方法的电力系统振荡模式分析及 PSS 参数设计[J].电网技术,2004,28(15):31-34.

[6] 刘剑,刘天琪. Prony 在电力系统稳定控制领域中的应用[J].现代电力,2005,22(6):27-31.

[7] 曹维,翁斌伟,陈陈.电力系统暂态变量的 Prony 分析[J].电工技术学报,2000,15(6):56-60.

[8] 邓集祥,涂进,陈武晖.大干扰下主导低频振荡模式的鉴别[J].电网技术,2007,31(7):36-41.

[9] 邓集祥,贺建明,姚天亮.大区域联网条件下四川电网低频振荡分析[J].电网技术,2008,32(17):78-83.

#### 作者简介:

白洋(1981—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制。

李国庆(1981—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制。

姚天亮(1979—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制。

邓集祥(1947—),男,博士,教授,研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期:2008-12-10)

# 变电站直流电源远程监控技术

汪守贵

(乐山电业局, 四川 乐山 614000)

**摘要:**采用计算机和电力通讯网络技术,对变电站直流电源系统进行远程在线监控和分析,实时掌握变电站直流系统运行工况,预防因直流系统设备故障而造成事故。

**关键词:**变电站;直流系统;远程监控

**Abstract:** Using computer and electric power communication network technology, the direct current power system in substation is on-line monitored remotely and analyzed to master the real operating condition of the direct current power system of substation in time, which can avoid the accidents caused by the fault of devices of direct current system.

**Key words:** substation; direct current system; remote monitoring

**中图分类号:** TM764 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0088-03

随着电网建设快速发展,变电站直流系统的负载设备也急剧增加,直流系统一旦故障,将中断变电站的继电保护、电力通讯、调度自动化、信息网络等系统的正常运行。为了预防因直流电源系统设备故障而造成事故,对直流电源系统运行工况进行远程在线监控分析,显得越发迫切和重要。

服务器可采用一台或两台,为两台配置时,服务器互为热备用,当主服务器出现故障时,备用服务器会自动启动,担任服务器的功能。

## 1 系统的组成

变电站直流电源监控系统采用在变电站直流设备屏内安装通信管理机,采集直流电源系统的遥测、遥信等运行数据,并将不同厂家的电源设备通过通信管理机进行规约转换,再通过通讯光纤或局域网的方式实时传送到主站。它是一种实时、多功能、具有可生成各种曲线和报表等功能的远程实时在线监控系统。它集计算机网络技术、实时技术、异步互联网技术、开放的数据库平台等技术为一体,是新一代实时、多功能、性能稳定的变电站环境综合监控系统。

### 1.1 系统网络框图

系统由主站端监控系统、子站端数据采集器(THC)、通讯传输介质三大部分组成,如图 1 所示。

### 1.2 主站端监控系统

主站服务监控程序,是整个监控系统的核心。采用 DOS 或 linux 平台,用 MFC 结合 COM 开发,主要负责对各子站上传的数据进行处理,同时将数据根据用户设置保存至数据库及响应各客户端的数据请求。

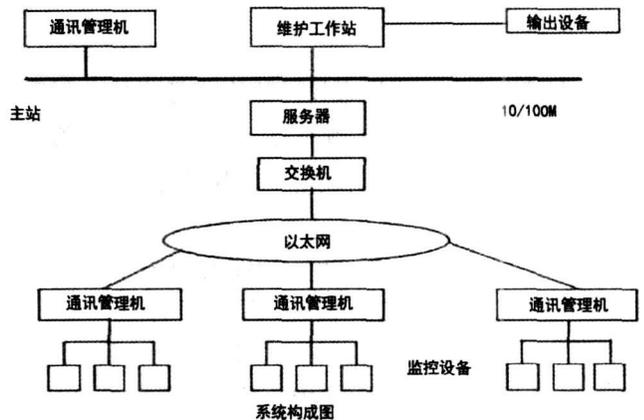


图 1 系统构成图

客户端程序、客户端和服务器是真正的基于“客户——服务器”模式,采用 RPC(远程进程调用)的计算机分布式网络系统,人机界面功能全部集中至客户端,充分利用网络系统中各部的优势,实现了信息资源的高度共享,大大提高了整个系统的性能,其原理如图 2 所示。另外,这种分布式结构使得系统的配置十分灵活,系统的扩充和升级也非常方便。任何参数的修改均通过客户端完成,参数修改后,服务器与客户端不需要重启。客户端与服务器之间的数据交换通过 TCP/IP 协议,同一个局域网的任何一台 PC 机都可安装客户端程序;客户端只需要经过简单的配置,就可以实现维护工作站、打印工作站、报警工作站

的功能,如图 2 所示。

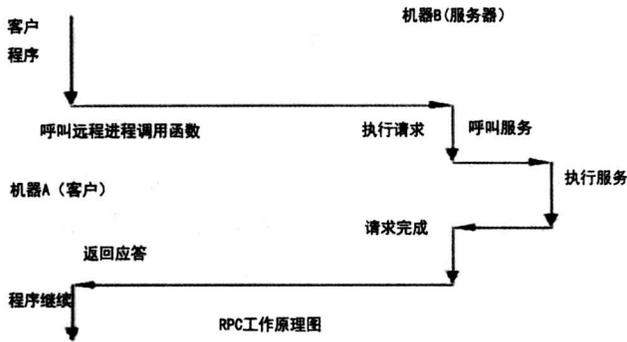


图 2 RPC工作原理图

### 1.3 子站端监控软件

子站端由数据采集器和通讯通道组成。子站端数据采集器硬件配置:一般有 13 个通讯通道,其中 8 个 RS-485 通道、4 个 RS-232 通道、1 个 10/100 Mbps 以太网通道。

数据采集器,负责将各传感器采集到的数据整理,然后通过串口传至系统服务器。数据采集器采用基于 ARM 的嵌入式开发平台和采用 Linux 内核作为基础平台,实现多任务开发,速度快,稳定可靠,CPU 速度可以达到 203 MHz 以上,功耗小于 5 W,支持多种通讯方式 (RS232、RS485、以太网),每个通道都可以采用不同的通讯规约,如图 3 所示。

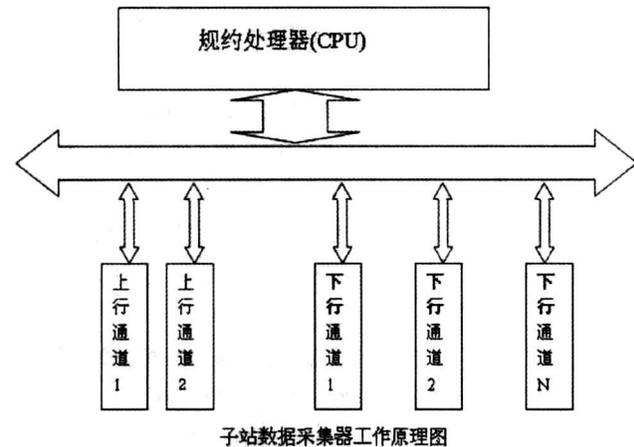


图 3 子站数据采集器工作原理图

### 1.4 传输系统

对于变电站有网络接口的采用局域网方式,通过 TCP/IP 协议将遥测和遥信数据传送到主站;对于没有网络接口的变电站采用 2 M 转以太网方式,通过协议转换 (TCP/IP 和 RS232、RS485),将数据上传到主站。

## 2 系统组网方式

组网方式灵活,大致上可分为 3 种:局域网方式、串口方式、2 M 转以太网方式。通常是 2 种或 3 种方式混合使用。

局域网方式:要求各监控的子站点能够给通讯管理机提供固定 IP 及专用传输通道,此连接相当于各子站点的通讯管理机与主站端的服务器在同一个局域网上。此种组网方式节约硬件成本,通讯速率高 (可达到 10 M 传输速度),各子站点与主站端相当于点对点通讯,因此推荐使用此方式。

串口方式:各监控子站点不能提供固定 IP,可根据传输介质 (光纤或通信双绞线),各子站端增加光 Modem 或电力 Modem,主站端需要增加 Modem 池设备 (如果是双服务器需要增加通道切换装置),服务器需要增加串口装置 (Moxa 公司的 Nport),增加了硬件的投资,通讯方式是点对点,但通讯速率低 (一般为 9600 bps)。

2 M 转以太网方式:在主站端增加一套综合业务平台,将 2 M 分为 30 个 64 k。每个子站点增加一个 2 M 转 RS232 或 IP 的转换器。

## 3 系统功能及作用

(1)实时采集功能:系统通过终端采集模块,实时采集变电站通讯机房交流和直流遥测和遥信信息,并经处理后通过串口传至系统服务器,使变电站直流系统的维护人员实时掌握其运行信息。

(2)短信报警功能:一旦变电站通讯机房交流系统或直流系统停运,系统将通过短信平台将停运信息发到有关维护人员的手机上,维护人员将迅速赶到变电站进行处理恢复。该功能可有效地预防因交流停电,使蓄电池放电过度而中断直流系统的事故发生,从而导致通讯和自动化等系统中断的恶性事故的发生。

(3)报表打印功能:将变电站直流系统或交流系统及通道运行信息,以报表形式打印归档,便于维护人员分析电源系统和通道系统的运行水平,及时安排检修。本功能可将变电站电源系统故障消除在萌芽状态。

## 4 系统特点

### 4.1 开放性

监控系统网络通讯协议符合国际网络协议标准 (TCP/IP), 操作系统选用国际通用 Windows 操作平台, 数据库系统选用通用的大型关系型数据库系统 (Microsoft SQL Server 2000), 方便系统的维护、扩充和升级。

### 4.2 扩充性

系统的软硬件设计符合国际工业监控与开放式设计标准, 采用模块化及标准化模块接口, 便于系统适应不同规模及功能要求的监控网络系统, 便于与其他系统进行接口。

### 4.3 安全性

硬件设备的设计采用可靠的电气隔离, 保护系统的软硬件在任何情况下, 均不会影响被监控对象运行的安全性。

软件系统的设计对系统管理和维护人员进行权限管理, 以区分限制各级别用户对系统的访问和操作能力, 保护系统操作的安全性。监控系统为用户对系

统所做的任何操作均记录在数据库中, 以备系统日后出现运行事故提供辅助分析功能及追究相关的事故责任。保证数据的完整性和一致性, 防止其他人员误操作。

### 4.4 实时性

变电站直流系统的告警信息与短信平台接口, 告警信息可及时发送到有关维护人员的手机上, 以便及时检修, 将事故消除在萌芽状态。

## 5 结 论

变电站直流电源远程监控系统实现了对变电站直流电源设备的在线监控和分析, 实时掌握变电站直流系统的运行工况, 加强了变电站直流系统设备的预检预修工作, 提高了变电站直流电源设备的运行管理水平, 保障了变电站保护、通讯、调度自动化和信息网络等系统运行的稳定性和安全性, 预防了因直流设备故障而造成事故。系统投运后变电站直流电源系统故障明显下降, 产生了良好的经济效益, 提高了变电站安全稳定运行水平。

(收稿日期: 2008—10—22)

(上接第 4 页)

相失败的发生, 但由于直流系统的高度可控性, 换相失败经历的时间极为短暂, 在故障切除后, 直流系统的恢复情况良好。由此说明  $\pm 800$  kV 特高压直流输电系统具有良好的动态响应性能, 能够满足长距离大容量的输电需求。

## 参考文献

- [1] 中国南方电网公司.  $\pm 800$  kV 直流输电技术研究 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006. 2—60.
- [2] 李立涅. 特高压直流输电的技术特点和工程应用 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 5—6.
- [3] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景 [J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1—3.
- [4] 陈潜, 张尧, 钟庆, 等.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电系统运行方式的仿真研究 [J]. 继电器, 2007, 35(16): 27—32.
- [5] 王晶芳, 王智冬, 李新年, 等. 含特高压直流的多馈入交直流系统动态特性仿真 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 97—102.
- [6] 浙江大学直流输电科研组. 直流输电 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1985.

- [7] 荆勇, 欧开健, 任震. 交流单相故障对高压直流输电换相失败的影响 [J]. 高电压技术, 200, 30(3): 60—62.
- [8] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [9] Thio C V, Davies J B, Kent K L. Commutation failures in HVDC transmission systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 946—957.
- [10] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败判断标准的仿真分析 [J]. 电网技术, 2007, 31(1): 20—24.
- [11] 林凌雪, 张尧. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述 [J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40—46.
- [12] 夏道止. 电力系统分析 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1995.

### 作者简介:

刘 建 (1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向电力系统稳定与控制。

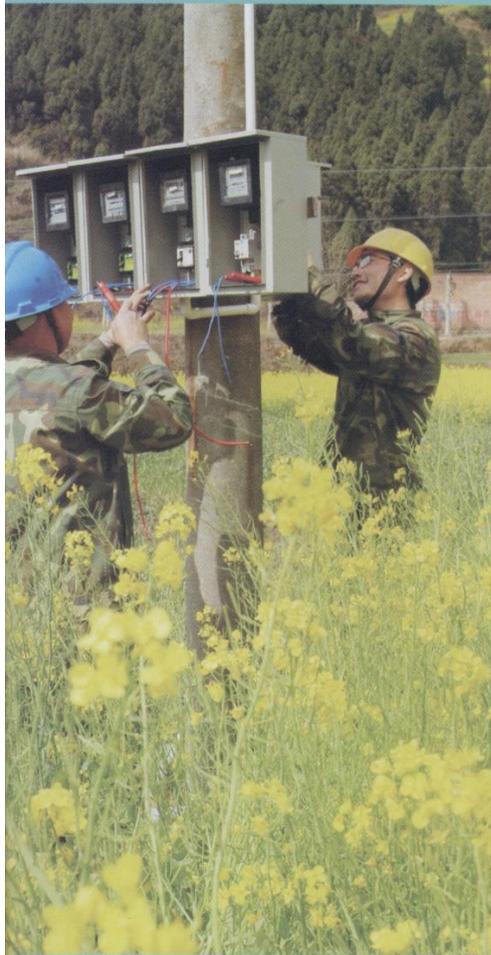
李兴源 (1945—), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制等方面的研究工作。

(收稿日期: 2008—12—20)

# 广元电业局

广元电业局是四川省电力公司所属大型一类供电企业，系国家电网公司“文明单位”、中央文明委“全国精神文明建设工作先进单位”。主要担负旺苍、苍溪、青川、剑阁四县和利州、朝天、元坝三区及宝成铁路江油大炉山至陕西图阳段的供电任务。职工总数2873人，供电半径90公里，供电面积1.63万平方公里，供电人口304万。

广元局从1984年12月28日成立以来，始终沐浴着改革开放的春风，全面推进企业上台阶，成为广元地区首个产值突破10亿元的骨干企业，为地方经济发展和社会事业进步作出了显著贡献。今天，广电人正围绕“坚定超常规加速电网发展新目标，实现统筹城乡电网发展新跨越”和“建设西部经济发展高地，电亮广元城市乡村文明”总体取向，为建设“一强三优”现代企业，构建和谐社会而不懈努力着。



## 四川省电机工程学会 2009年新春团拜会隆重召开

2009年1月15日，一个阳光灿烂的日子，上午10:00四川省电机工程学会在三圣乡名雅山庄举行了隆重的新春团拜会。出席会议的有四川省电力公司副总经理、四川省电机工程学会理事长王平，四川省电力公司总工程师张伟，四川省科协学会部部长唐礼华，四川省民政厅社团处处长罗百益，四川省民政厅民间组织服务中心副主任石福树，国家电网公司企业管理协会四川省电力公司分会秘书长涂辉、副秘书长但传江，王尊相、何荣钦、晏玉清、林浩垣等老领导共110余位出席了团拜会。团拜会由学会副理事长刘俊勇主持。



四川省电力公司副总经理、四川省电机工程学会理事长王平发表了热情洋溢的讲话，对奋斗在电机工程事业的科技工作者提出了殷切的希望，并对学会工作做出卓越贡献的老科技工作者、四川省电机工程学会名誉副理事长滕福生教授多年来对四川电力事业做出的贡献表示衷心的感谢和追忆！

在会场上，各位老领导、学会理事、秘书长们畅所欲言，叙友情，话发展，欢聚一堂。

团拜会在张灯结彩，洋溢着热闹、喜庆的气氛中落下帷幕，预示着农历牛年马上就要到来，在这个充满希望和欢乐的时刻，让我们共同展望学会美好的明天！



# 四川省电机工程学会 第六届八次常务理事会议纪要

四川省电机工程学会第六届八次常务理事会议于2009年1月15日下午13:30在成都市三圣乡名雅山庄召开。参加会议的有:张伟、刘俊勇、白家棣、辛晓光、冉群、严平、廖学静、王永兴、朱康、胡灿、姜光学、钟利军、李敬雄、何尔文等。肖行途、林双庆、龙洲、许保卫、张维群、白仕雄、邹永祥、姚阆、杨文毅、徐红兵、张苏川等派代表参加了会议;学会副秘书长朱国俊、王卓、方文弟;理事李世平、秘书张云等列席了会议。

会议由副理事长刘俊勇主持,王卓副秘书长汇报了四川省电机工程学会2008年工作总结及2009年工作计划;会议通过调整副理事长兼秘书长事宜;朱国俊副秘书长对学会评选的先进集体和先进个人进行了情况说明。副秘书长方文弟汇报了2008年学会经费收支情况。与会代表充分肯定了电机工程学会2008年以来在电机工程事业中所发挥的作用。对有关的建议进行了审议,对学会2008年的总结和2009年的工作计划提出了意见和建议。

新当选副理事长兼秘书长张伟在会上作了发言,他首先非常感谢大家的信任,他说:很高兴被推举为四川省电机工程学会的副理事长兼秘书长,相信在王理事长的带领下,与各位理事、秘书长、学会工作的老领导一起努力,一定能把学会的工作搞好。

过去的一年,学会做了很多工作,今后希望大家继续发挥优势,努力工作,要加大学会的影响,开展各种学术活动,群策群力,共同奋斗,努力把四川省电机工程学会工作推向一个新的发展阶段。积极帮助解决电力建设和生产运行中的技术难题,为提高电网安全运行水平、促进我省电力工业加快发展做出更大的贡献。

1. 四川电网将在三至五年内,成为交直流混联的特高压电网,这是一个大课题,学会可以在其中发挥一定的作用。
2. 四川电力“西电东送”、四川电网的丰水期、枯水期如何保证电力工作,学会可做些相关研究。
3. 研究大电网的联网运行以及大机组和大电网之间协调问题。
4. 在冰灾、地震后,研究如何利用科学技术提高我们电网的抗灾能力。
5. 针对社会上对电力的热点问题,如:电磁环境问题,可以从专业的、科普的角度,向广大公众宣传。学会是讲科学的地方,实事求是、以人为本。
6. 扩大学会影响。特别是《四川电力技术》要不断提高质量,要面向基层、面向生产力、面向高科技、面向全国,面向国际。国网公司和四川省电力公司都肯定了四川省电机工程学会的工作,将继续支持学会,今后学会可多做些软课题。下一步将靠各市学会、专(工)委会、学会咨询公司,共同努力,把工作做好。

新春佳节即将来临,祝大家新年快乐!身体健康!

会议经过认真讨论形成以下决议:

- 一、原则上通过了秘书处起草的2008年工作总结和2009年工作计划,修改后发各理事、市(州)学会、分会、各专(工)委会。
- 二、通过了关于调整学会副理事长兼秘书长事宜。
- 三、审议并同意2008年度先进集体和先进个人的名单。
- 四、通过了学会2008年度财务报告。





## 四川省电力公司220kV仪陇变电站

四川省电力公司220kV仪陇变电站位于仪陇县城郊，隶属于南充电业局管辖。由南充恒通电力有限公司总承包，公司立足自主创新、自主设计、自主施工理念，在建设过程中采用多项新技术、新工艺，建成后一次性通过省公司验收合格，一次性投运成功，在省公司优质工程评选过程中名列第二，取得行内一致好评。

