

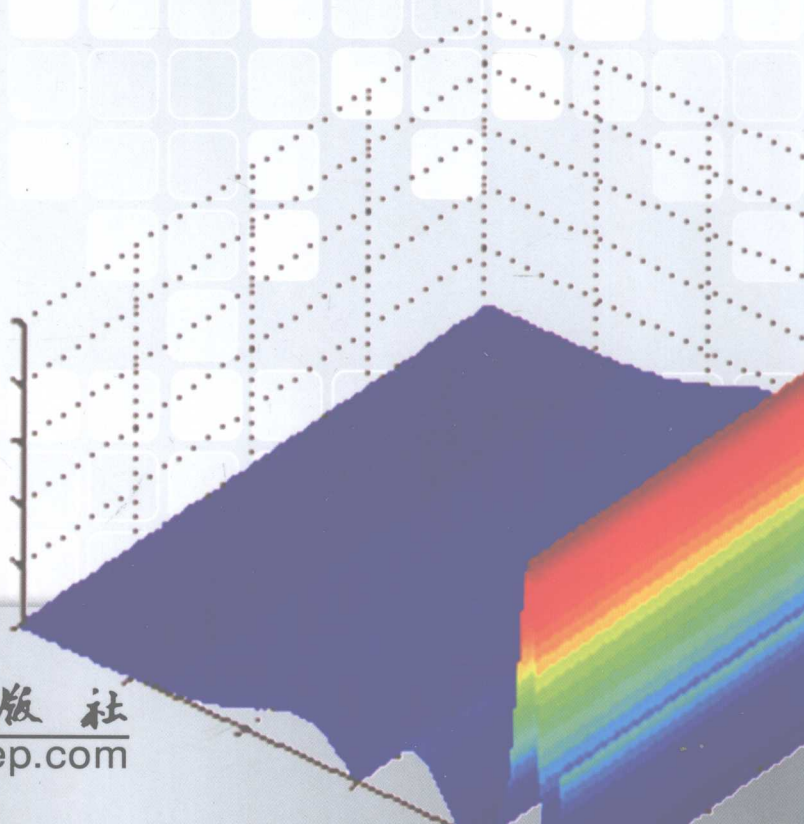
$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) w(\tau - t, f) e^{-j2\pi ft} dt$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) d\tau \right] e^{j2\pi ft} df$$

电力工程 信号处理应用

束洪春 著

$$w(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}}$$



科学出版社
www.sciencep.com

电力工程信号处理应用

束洪春 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合电力工程实际应用背景,系统阐述了电力工程信号、电力工程信号处理算法原理以及电力工程信号处理应用三个层面的内容。

本书信号处理核心内容包括傅氏算法、最小二乘算法、卡尔曼滤波、同步相量测量单元、相关分析、Prony 算法、小波分析、数学形态学、希尔伯特-黄变换、S 变换和分形。电力工程信号处理应用主要涉及电力系统工频频率测量、电力系统谐波检测、输电网故障选相、故障测距、配电网故障选线、变压器励磁涌流与内部故障识别、低频振荡检测、同步发电机参数辨识、高压电器和电力电缆局部放电检测、电能质量扰动检测、电力系统故障数据压缩、负荷预测以及风电场风速预测等。

本书理论联系实际,具有时代性和实用性,可作为高等院校电气类高年级本科生和研究生的专业课教材,也可供电力行业的工程技术人员为研习电力工程信号处理应用做参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力工程信号处理应用 / 束洪春著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-024445-1

I. 电… II. 束… III. 电力工程-信号处理 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 059986 号

责任编辑:刘俊来 余 江 潘继敏 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

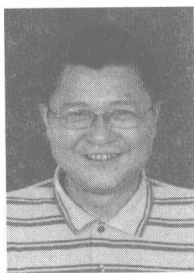
2009 年 2 月第一次印刷 印张:28 3/4

印数:1—2 000 字数:664 000

定价:69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

作者简介



束洪春,男,1961年9月10日生于江苏丹阳。博士,昆明理工大学教授,博士生导师,省级教学名师。哈尔滨工业大学兼职教授。

从事电力系统保护与控制的教研工作。承担国家自然科学基金项目4项,省部级科技攻关项目2项,省部级自然科学基金重点项目1项、面上项目6项。发表论文100余篇,其中EI收录93篇,出版专著3部。申请国家发明专利33项。拥有自主技术成果7项,有应用。发布企业标准1项。分别获省部级技术发明一等奖、科技进步三等奖、教学成果一等奖和二等奖各1项,排名第1。

中国电机工程学会高级会员、云南省电机工程学会副理事长、云南省水力发电学会常务理事、云南省电力行业协会常务理事、云南省电工行业协会常务理事;专业期刊《电工技术学报》、《电力系统及其自动化学报》、《电力系统保护与控制》、《电力科学与技术学报》、《水动力学研究与进展》、《昆明理工大学学报》编委。

2001年获“全国优秀教师”称号;2004年获“云南省中青年学术和技术带头人”称号(二层次);2005年获云南省政府津贴;2006年获云南省“云岭优秀职工”称号;2007年获“全国模范教师”称号;2008年获“全国五一劳动奖章”,首批“云南省高校教学、科研带头人”称号和第二届“云南省高等学校教学名师”称号。

前言

信号处理技术是随着信息学科和计算机学科的发展而快速发展的一门学科,它的重要性在各个领域的应用中日益彰显出来。电力工程信号处理正是在这样的背景下提出的,同时算法的不断发展亦促进电力工程信号处理的内容逐渐丰富。但对于有着电气类专业教育背景的学生往往表现为在线性系统方面的知识较为扎实,而信号分析处理的知识掌握偏弱的状况。为了适应学科发展,我校在电气类专业高年级开设“数字信号处理技术在电力系统的应用”课程已近十年,主要涉及傅氏算法、最小二乘算法、卡尔曼滤波、相关分析、Prony 算法、小波分析、数学形态学以及分形理论等及其在电力系统中的应用。在此基础上,通过总结多年的教学实践和科研心得,研习同行学者成果,补充了同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)、希尔伯特-黄变换(HHT)、S 变换等内容,撰写了这本“电力工程信号处理应用”专著。

第 1 章,介绍有近 200 年历史的傅氏算法,也是目前电力系统应用较为成熟的算法,特别是在微机保护、故障测距、频率跟踪检测等方面的应用。第 2 章,最小二乘算法阐述将输入的暂态电气量与一个预设的含有非周期分量及某些谐波分量的函数按最小二乘方(或称最小平方误差)原理进行拟合。使被处理的函数与预设函数尽可能逼近,其总方差 E^2 或最小均方差 $E_{\min}/N$ 为最小,从而求出输入信号中的基频及其他暂态周期分量的幅值和相角。第 3 章,卡尔曼滤波算法是在最小均方差条件下给出信号最佳估计的一种算法,它采用前一个估计值和最近一个观察数据,通过状态方程和递推方程来估计信号的当前值。第 4 章,同步相量测量单元(PMU)是以傅氏算法为核心算法,基于全球卫星定位系统(GPS)授时信号,由众多 PMU 构成 WAMS 系统可完成同步采集广域电网的实时运行参数。借此,电力系统的控制系统由使用本地量测、局部量测发展到使用全系统关键点的全局量进行全局控制成为可能;亦由使用静态信息到使用广域动态信息,算法由逻辑运算、事前离线计算实时匹配、在线计算实时匹配,发展到实时计算实时控制等成为可能。

倘若最小二乘算法的模型只含有基波分量,即把暂态噪声分量线性化为零,同时取时间窗为一个基波周期,那么最小二乘算法将退化为常见的傅氏算法,从这个角度而言傅氏算法是最小二乘算法的一个特例。倘若卡尔曼滤波算法噪声模型退化为白噪声模型,则卡尔曼滤波即为最小二乘算法。因此,傅氏算法、最小二乘算法和卡尔曼滤波算法可以看做是互相联系的基础性算法。而 PMU 正是基于这些基础算法而实现为电力系统提供全网同步采样及计算的同步相量测量单元,可用于全网动态安全分析和广域智能保护的数据源。

第 5 章,相关分析阐述的是两个信号的互相关函数,是一个有用的统计量,它可以用来了解两个未知(随机的或非随机的)信号之间的相似程度,或者两个已知(相似或相同)信号之间的时间关系,理论上,可以用于配电网故障选线、输电线路故障选相、变压器励磁涌流鉴别等相关方面。第 6 章,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。通过这样的模型可完成参数辨识、低频振荡曲线的

拟合等工程应用问题。第7章,小波分析是一种杰出而典型的时-频分析,它不仅在频域和时域同时具有良好的局部化性质,而且由于高频成分在时域中采用逐渐精细的采样步长,从而可以聚焦到对象的任意细节。从这个意义上说,小波变换被誉为“数学显微镜”,可用于电力系统在线检测、故障诊断、保护与测距、负荷预测等工程课题。第8章,数学形态学是建立在集合论上,以开、闭等为主要运算的一种时域滤波算法。本章主要阐述了数学形态学在电能质量检测、故障选相、故障选线、变压器涌流鉴别以及设备局部放电信号检测等方面的应用。第9章,希尔伯特-黄变换(HHT)阐述的是将复杂信号用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)算法分解成一种称为固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)的单分量信号。根据这样的思路给出其在配电网故障选线、电力系统低频振荡检测、设备局部放电信号检测等问题的算法实现步骤和算例分析。第10章, S变换可视为是以 Morlet 小波为基本小波的连续小波变换的延伸,相当于加归一化高斯窗的短时傅氏变换或经相位校正的小波变换,它继承和发展了连续小波变换和短时傅氏变换的局部化思想,但它又不是严格意义上的小波变换。它具有和频率相关的分辨率,其变换结果可通过时频矩阵表达。其在电力系统的应用研究主要集中在对电能质量扰动特征的提取、(间)谐波检测、配电网故障选线、低频振荡模态分解、行波波头识别等范围。第11章,分形算法是将信号用分形维数的概念分解出来,根据波形奇异程度不同表现的维数差异进行有效区分,来实现电力系统中的配电网故障选线、输电网故障选相、变压器涌流鉴别、电力电缆局部放电信号检测以及负荷预测等应用问题。

本书为电气类专业在校高年级本科学生、研究生和从事电气工程相关专业技术人员编写,重点阐述电力工程信号处理算法的基本概念、基本原理和基本设计方法,并引导读者尽快了解学科前沿,书中对一些复杂、烦琐的数学推导和证明,尽可能用简洁的方式及其应用示例表述,对其理论推导感兴趣的读者可以查阅有关的参考文献。书中带*部分属于与本书核心内容有区别,但电力工程信号处理应用中又需要结合的部分,可将其视为更宽泛的信号处理内容。书中的算例,一部分是为了描述算法基本原理、基本方法的实现步骤而给出的,另一部分是为示例电力工程信号处理应用。

本书得到国家自然科学基金项目(90610024, 50847043, 50467002, 50347026)、云南省自然科学基金项目(98E0409M, 2002E0025M, 2004E0020M)、云南省科技攻关项目(2003GG10, 2000B2-02)、云南省自然科学基金重点项目(2005F005Z)的资助,作者对此表示由衷的感谢!同时,本书部分内容借鉴了许多学者的研究成果,作者对此深表谢意!

全书本着以问题为中心的教育理念,以电力工程信号为研究对象,以电力工程信号处理算法原理和实现为着力点,以电力工程信号处理应用为落脚点。每一章试图阐述清楚概念、方法、主要应用和结果等四个层面。既启迪思路,又解决实际问题,这是本书的出发点,也是作者的初衷;同时由于信号处理的文献浩若烟海,所涉及的知识面也非常广泛,再加上作者学识有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2009年1月

目 录

前言

绪论	1
参考文献	10
第 1 章 傅氏算法	11
1.1 引言	11
1.2 数字滤波器基础	12
1.3 傅氏算法基本原理	14
1.4 常用改进傅氏算法	17
1.5 电力系统频率测量数字算法	23
1.6 傅氏变换下的频率精确测量	26
1.7 基于傅氏算法的工频量测距	31
1.8 半周傅氏算法分析及其改进	39
1.9 半周傅氏算法在补偿电网接地选线保护中的应用	42
1.10 小矢量算法的基本原理	45
1.11 纵联差动保护	47
1.12 基于小矢量算法的输电线路纵联差动保护	51
1.13 基于小矢量算法的快速距离保护	55
1.14 发电机不对称故障保护的小矢量算法	59
参考文献	61
第 2 章 最小二乘算法	62
2.1 引言	62
2.2 最小二乘算法基本原理	62
2.3 基于递推最小二乘算法的工频频率测量	66
2.4 基于最小二乘算法最佳噪声模型的快速距离保护	69
2.5 自适应变步长最小二乘滤波算法	73
* 2.6 自适应滤波在信号处理中的应用	75
2.7 基于最小二乘算法的同杆双回线故障测距	78
* 2.8 人工神经网络算法	84
* 2.9 最小二乘递推的正交傅里叶基神经网络滤波算法	86
* 2.10 基于主成分分析的最小二乘支持向量机	88
* 2.11 基于 PCA 的 LS-SVM 短期负荷预测	91
* 2.12 基于最小二乘支持向量机算法的风电场短期风速预测	94
* 2.13 最小二乘在非线性状态估计中的应用	96

参考文献	99
第 3 章 卡尔曼滤波	100
3.1 引言	100
3.2 卡尔曼滤波算法	101
3.3 自适应卡尔曼滤波算法	111
3.4 扩展卡尔曼滤波算法	114
3.5 电力系统负荷预测	116
3.6 基于卡尔曼滤波的电力负荷预测	119
3.7 基于卡尔曼滤波算法的变压器差动保护	121
3.8 基于卡尔曼滤波的电流畸变正序分量估计	125
3.9 卡尔曼滤波算法的电压凹陷检测	129
3.10 基于卡尔曼滤波的风电场风速预测	133
参考文献	134
第 4 章 同步相量测量单元	136
4.1 引言	136
4.2 PMU 结构	136
4.3 同步相量测量常用算法	138
4.4 同步相量测量误差	141
4.5 基于 PMU 的线路电压电流测量	144
4.6 基于 PMU 的发电机功角测量	146
4.7 PMU 量测信息的应用	147
参考文献	156
第 5 章 相关分析	157
5.1 引言	157
5.2 相关分析理论基础	157
5.3 基于相关分析的配电网故障选线	161
5.4 高压输电线路故障序分量选相的相关分析法	164
5.5 变压器励磁涌流	169
5.6 基于相关分析的变压器涌流检测	173
5.7 基于相关分析的输电线路暂态差动保护	175
5.8 同步测量电压闪变的相关分析法	179
5.9 基于相关分析的中长期负荷预测	183
参考文献	184
第 6 章 Prony 算法	185
6.1 引言	185
6.2 Prony 算法的基本理论	185
6.3 Prony 算例分析	191
6.4 Prony 算法中的参数选择	193

6.5	电力系统低频振荡	197
6.6	基于 Prony 算法的低频振荡检测	202
6.7	参数辨识简述	204
6.8	Prony 算法辨识同步电机参数	206
6.9	基于 Prony 算法的电力系统谐波检测	209
6.10	基于 Prony 特征提取的故障选线	213
	参考文献	216
第 7 章	小波分析	217
7.1	引言	217
7.2	小波变换相关理论	218
7.3	小波熵理论	224
7.4	小波消噪	228
7.5	基于小波分析的直流输电线路边界保护	229
7.6	基于小波变换的输电线路行波故障测距	233
7.7	基于小波变换的输电线路行波测距式距离保护	237
7.8	基于小波-相关分析的高压电缆双端故障测距	243
7.9	基于连续复小波变换的频率法故障测距	248
7.10	基于小波变换的行波故障选相	252
7.11	基于小波变换的电力变压器励磁涌流鉴别	256
7.12	基于全频带小波能量相对熵的配网故障选线方法	260
7.13	基于小波变换的高压电器局部放电信号检测	266
7.14	基于小波变换的同步电机参数辨识	269
7.15	电能质量	272
7.16	基于小波变换的电能质量检测	275
7.17	基于小波变换的电力系统短期负荷预测	278
7.18	基于小波分析的电力系统故障数据压缩	282
	参考文献	286
第 8 章	数学形态学	288
8.1	引言	288
8.2	数学形态学原理	289
8.3	数学形态学滤波器	291
8.4	基于形态学信号奇异性检测的故障测距	296
8.5	形态学在电能质量扰动信号处理中的应用	298
8.6	基于小波-形态学融合算法的设备局部放电信号检测	302
8.7	基于形态学-小波包分解的相对能量故障选线自适应算法	307
8.8	形态谱在配电网故障选线中的应用	311
8.9	基于形态学梯度的输电线路快速选相元件	313
8.10	变压器涌流鉴别的形态学方法	317

参考文献	321
第 9 章 希尔伯特-黄变换	323
9.1 引言	323
9.2 经验模态分解	323
9.3 希尔伯特变换	325
9.4 固有模态函数	326
9.5 HHT 的几个关键问题	329
9.6 基于 HHT 的信号滤波	334
9.7 信号奇异性检测的 HHT 算法	336
9.8 基于 HHT 的低频振荡检测	339
9.9 基于 HHT 的电能质量检测	342
9.10 基于 HHT 的同步电机参数辨识	345
9.11 基于 HHT 的局部放电在线检测	347
9.12 基于 HHT 的中压配网故障选线	349
9.13 基于 HHT 的超高速方向保护	352
9.14 配电网铁磁谐振和谐波谐振产生机理分析	356
9.15 基于 HHT 的铁磁谐振过电压辨识	359
参考文献	361
第 10 章 S 变换	363
10.1 引言	363
10.2 S 变换基本理论	363
10.3 S 变换的性质	366
10.4 广义 S 变换	367
10.5 基于 S 变换的行波波头识别	369
10.6 基于 S 变换的配网缆-线混合线路故障选线	372
10.7 低频振荡模态的 S 变换检测	377
10.8 基于 S 变换的电能质量扰动分析	381
10.9 基于 S 变换的间谐波检测	389
* 10.10 基于 S 变换与神经网络的涌流识别	392
* 10.11 基于 S 变换和神经网络的输电线路故障分类和定位	394
* 10.12 基于 S 变换和支持向量机的电能质量扰动分析	397
参考文献	400
第 11 章 分形	402
11.1 引言	402
11.2 分形基本理论	403
11.3 基于分形滤波的信号处理	409
11.4 输电线路故障类型识别的分形算法	411
11.5 同步发电机局部放电分形维数计算	417

11.6	基于小波变换的多重分形小电流接地系统故障选线·····	420
11.7	基于分形理论的中压电网过电压识别·····	425
11.8	基于分形理论的变压器励磁涌流鉴别·····	428
11.9	电能质量扰动检测的分形指数-小波识别算法 ·····	431
11.10	同步发电机定子绕组内部故障分析和保护的分形算法 ·····	438
11.11	基于分形理论的负荷预测 ·····	442
11.12	基于分形理论的交联聚乙烯绝缘电缆局部放电检测 ·····	444
	参考文献·····	448

绪 论

信号处理技术是发展非常迅速的一门重要学科,它以 CPU 为硬件支撑,附之专门的处理程序实现信号处理。信号处理技术涉及众多学科知识,又应用于众多学科领域,既有较为完整的理论体系,又要求较强的工程实践。信号处理技术的重要性日益在各应用领域中彰显出来,电力工程信号处理正是基于此背景而提出的。为使读者尽快了解本书的概貌,以下讨论三个基本问题:电力工程信号、电力工程信号处理惯常应用和电力工程信号处理常用算法。

1. 电力工程信号

现代电力系统是一个庞大的人造实体系统,其电气设备分为一次设备和二次设备。一次设备(也称主设备)是构成电力系统的主体,它是直接生产、输送和分配电能的设备,包括发电机、电力母线、电力变压器、断路器、隔离开关、电力电缆和输电线路等。一次设备电压电流通过电压互感器和电流互感器传送到二次设备。二次设备是对一次设备进行测量、计量、保护、调节和控制,它包括测量仪表、继电保护、自动装置以及控制回路。一次设备及其连接的回路称为一次回路。二次设备按照一定的规则连接起来以实现某种电气功能的回路称为二次回路。

电力系统运行一般可分为安全正常状态、不安全正常状态(警戒状态)、紧急状态和恢复状态四种状态。电力系统的正常状态可以用式(0-1)表示。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, y) \\ g(x, y) = 0 \\ h(x, y) \leq 0 \end{cases} \quad (0-1)$$

式中, x 为描述系统动态特性的状态变量; y 为描述系统的运行参量; $\dot{x}(t) = f(x, y)$ 为系统的状态微分方程; $g(x, y) = 0$ 为系统正常运行时应该满足的等式约束条件,包括系统有功平衡约束和无功平衡约束; $h(x, y) \leq 0$ 为系统正常运行时应该满足的不等式约束,包括系统每个节点正常运行时应该满足的不等式约束,包括系统每个节点正常运行的电压上下限,每条线路应该满足的传输功率极限和各电厂发电机的运行极限。

通常情况下要求一次系统运行在安全正常状态,如果一次系统安全水平降低低于某一适当的界限,就需要对其进行校正控制,通过系统可控变量再调整使运行状态恢复到安全状态。目前常用的校正控制措施有调整发电机出力、调整网络运行架构、SVC 电压控制、电容器或电抗器的投入、有载调压变压器(OLTC)分接头调节以及切负荷等。提高系统安全性的校正控制策略主要有两类:一类是利用有约束最优化方法,主要包括有功校正控制和无功校正控制;另一类是利用灵敏度分析和最小二乘法,主要包括线路过负荷和系统电压异常问题。

上述过程都涉及运行工况信息变化,并且这些信息通过电压互感器或电流互感器传送到二次系统。无论是正常状态下要完成对一次系统的计量和监控,还是运行状态转换

时需要对出现的暂态信息的分析,都是从电力工程信号测量开始。另外,电力设备运行状态在线检测,甚至电力系统规划、负荷建模都涉及电力工程信号处理应用。面对已逐步形成的区域互联电力系统,无论是目前应用较为成熟的 RTU/SCADA/EMS,还是发展的 PMU/WAMS/SA,其前端也都是从电力工程信号采集、处理、传输开始。据此,可以说电力工程信号处理是伴随着电力系统的成长而逐步发展和不断完善的一个比较宽泛的学科领域。

尽管电力工程信号的特征根据处理问题模型的要求各不相同,各种信息所表现的特征也各有其特殊性,一般分为电气量和非电气量两种,而电气量信号根据其物理意义分为电压信号、电流信号和频率信号三类。

电力系统工频频率一方面作为衡量电能质量的指标,需加以动态监测;另一方面作为实施安全稳定控制的重要状态反馈量,要求能实时量测。因此,对工频频率的测量成为电力系统运行控制的重要技术之一。目前电力系统的频率测量算法一般是建立在信号观测模型之上,信号观测模型就是对电力系统频率概念及其数学描述。

基于工频量的保护越来越难适应特高压远距离输电技术发展的要求。基于故障暂态信息的继电保护原理上已逐渐成熟,利用故障暂态量可实现输电线路继电保护和故障测距,这种新的故障暂态量保护原理具有响应速度快、准确性高的优点,同时不受 CT 饱和、系统振荡、过渡电阻等因素影响,甚至有可能仅利用单端电气量即可实现无通道的线路速动保护。因此,基于故障暂态分量来实现对特高压输电线路快速切除故障、故障准确定位,此为电力系统线路保护研究的热点。而暂态信号的检测、提取和应用是继电保护和故障测距的首要问题,也就是说其关键仍然是对暂态信号的处理,即如何有效、可靠、快速提取出区分区内和区外故障单端电气量的特征差异,满足可靠性的同时又要求唯一性。如果对超(特)高压输电线路故障暂态信号的处理能满足上述要求,同样对研究自适应重合闸的故障选相环节也是一个质的突破。

大型电力变压器的主保护一般是由纵联差动保护和瓦斯保护构成,其中纵联差动保护除了要可靠区分区内和区外故障之外,还要有效识别变压器励磁涌流和内部故障,此也正是制约变压器差动保护不能像线路那样做到理论上无时延全线速动的一个关键因素。因此,从 1892 年英国学者 Fleming 发现励磁涌流现象,人们就没有间断过对涌流的研究。目前识别涌流的方法一般还是基于涌流的三个特征:涌流中包含很大成分的非周期分量,往往使电流波形偏离时间轴;涌流中包含以二次谐波为主的大量高次谐波;波形在一个周期中出现间断角。常用的谐波比例含量是检测二次谐波含量和基波含量在一个周期内比值是否大于 1.15,或者是判别一个周期内是否出现两次 $65^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 的间断角,其关键仍可以看做是对故障信号的有效可靠提取和处理应用。

同步发电机是电力系统的重要设备,准确的同步电机参数对研究和分析电力系统运行、控制系统设计等问题有着重要的意义。其中,反映同步电机暂态过程的瞬态参数与电力系统的稳定性有密切的关系。对同步发电机参数的准确辨识正是建立在对电力工程信号处理的基础上完成的。

我国中压配网系统大都采用中性点不接地或非有效接地方式,这种系统发生单相接地故障时,根据规程允许带故障运行 1~2h。但是出现上述故障时,由于非接地相电压将升高 1.732 倍,这对线路的绝缘是一个很大的考验,若在带故障运行期间,另一点的绝缘

再被击穿,系统故障将扩大为两相接地短路。为了避免事故的扩大,一般要求在带故障运行期间选出故障线路予以排除。但目前微机故障选线装置的选线准确率一直不太理想,经常出现误判。如果能对这种接线方式的系统故障暂态信号特征做到可靠有效提取,利用暂态分量进行选线,将有可能从原理和方法上克服选线困难。

高压电器局部放电检测的一个重要目的是根据检测结果判断设备绝缘劣化的部位和程度,从而为检修维护提供依据。研究表明,局部放电脉冲波形与放电源的性质有直接关系。因此可以从脉冲波形提取放电特征,再借助模式识别工具对放电信号进行识别,像电力变压器等大型一次设备是电力系统中最重要、最昂贵的设备之一,电力变压器内部发生局部放电现象,将会减少内部材料的绝缘寿命,影响其运行的安全性。因此对其局部放电的检测有着较强现实意义。

电缆局部放电检测主要针对的是目前配电网应用较为广泛的交联聚乙烯(XLPE)电缆。交联聚乙烯电缆的绝缘层内部及其界面存在空洞、夹杂物和隆凸不平缺陷,当在有水、离子水及电场作用等外部条件的影响下,它会出现树状裂缝,称为“电树”、“水树”或“电化树”。随着树的生长,到穿透电缆绝缘层时,电缆的绝缘就会加速失效。因此,对上述“水树”的检测就显得至关重要,而目前建立的“水树”模型都是基于对电缆绝缘层通过的局放电流谐波分量的有效提取。

近年来,随着电力系统非线性负荷的增加,如大规模电力电子应用装置、大功率的电力拖动设备、电化工业设备、电气化铁道、炼钢电弧炉等,对电能质量的影响越来越大,电能质量问题逐渐引起了人们的重视。同时由于系统中发生短路故障、大容量电动机启动、电容器组投切等引起扰动,也会造成电能质量的恶化。另一方面由于工业自动化水平的提高,微处理器和电力电子等智能器件越来越多地应用于工业过程控制,而这些精细过程控制更容易受到电能质量的影响。因此,动态电能质量问题已成为近年来各方面关注的焦点,对电能质量进行有效地分析和检测不仅必要而且十分迫切。电能质量的量化指标一般包括额定电压、额定频率、正弦波形、电压暂升、电压暂降、电压中断、暂态振荡等。因此,对电能质量的分析仍是有效提取上述指标的电气特征,此乃电力工程信号处理典型应用。

电力负荷是典型的非线性时间序列,同时受到宏观和微观的多层次多因素约束,对其预测过程更加依赖于对现有信息的合理分析和处理,也是一个复杂的过程。负荷预测是依据历史数据,设计合理算法对将来的负荷情况进行预测。由于历史数据庞杂,负荷预测往往需要进行“坏”数据的剔除,这个过程也是一个电力工程信号处理的过程。另外,负荷预测中还常常需要解超定方程、最优化求解,这些亦可视为电力工程信号处理应用。

风力发电技术迅速发展,被公认为是一种理想的可再生能源发电方式。风力发电的输出功率与风电场风速有很大关系,风速呈现很强的随机性。对风电场风速进行较为准确的预测,对于电力部门及时调整调度计划,衡量风电场的容量可信度,进而确定合适的风电上网价格,具有重要的现实意义。而风电场风速预测首先要准确采集历史数据,设计合理的算法模型。这些过程也体现了电力工程信号处理应用。

2. 电力工程信号处理惯常应用

频谱分析是信号分析中最常用的方法之一,其实质是将信号从时域变换到频域中去,

以研究其频率成分和含量,一般地,可以在时域内解决的问题也可以在变换域(实频域或复频域)内解决。但由于在变换域后,可以将微积分转换为乘或除以某个算子的运算,将求解微分方程的问题转化为求解代数方程的问题,将卷积积分转化为普通的乘法,将多度耦合的复杂系统转化为单独独立的简单系统的叠加。从而提高了计算速度和精度,同时也便于硬件实现。

频谱分析首先可用于电力系统的谐波分析,如在高压直流输电系统中,换流站的换相以及故障就会产生大量的谐波。为了避免这些谐波的不良影响,有必要对其进行分析和抑制,频谱分析就是将此类信号以不同频率的成分分解出来,这样就会比较明显地表现出这些高频、奇异高次谐波信号的特征。

频谱分析还可以用于谐振过电压检测,电力系统中不论是高压系统的中性点接地方式或者是中压系统的不接地和非有效接地方式,发生谐振过电压都只是在有限的频率范围,因此,可以研究其受到外部激励时的共振频率范围,从而使问题简化;同样的思路也可用于电力系统低频振荡的检测。

信号的频谱分析还用于电力设备运行状态监视和故障诊断。电力设备的状态监视和故障诊断也就是对电力系统基本设备在运行中产生的各种电磁、机械等物理信号进行分解和处理,实时地判别其状态,以期在故障初期或在故障时(有的甚至在故障前有异常情况时)发出报警。电力设备在正常运行时发出的电磁信号较为平稳,一旦状态异常,则必然出现奇异信号,通过频谱图将奇异信号分解出来,即可明显地找到故障信息。该方法在同步发电机故障诊断和电动机转子断条中都有所应用。另外还可以根据特定旋转机械的噪声谱,了解旋转机械运转是否正常外,还能寻找其来源;对于特定的旋转部件振动谱查找振动原因,也可以用于工作情况的判断及寻找产生的原因,掌握机器的载荷谱才能合理设计旋转机械。

故障诊断一般是通过信号检测、特征量提取、状态识别和诊断决策四个步骤实现。可见特征量提取也是电力工程信号处理的又一个常用方法,如在汽轮发电机表面出现振动时,由于表面振动是发动机缸内气体压力、活塞撞击、气阀冲击和不平衡力等激励源经过水套、机体和汽缸盖等元件传递而形成的复合振动,其谐波构成极为复杂。设计合理的算法从湮没在强大背景噪声中的微弱故障特征量提取出来。这样一个过程就是特征量的提取过程。又如基于故障暂态量的继电保护,其判据的形成过程也是要对隐藏在大量干扰信号的有用信号的特征量进行有效的提取来构成保护元件的判据,即找到唯一且可靠的状态特征信息。特征量提取在电力工程信号处理应用较为广泛,大量问题的处理都是从对出现的异常信息的特征进行有效的提取开始。如在负荷预测中,从分析负荷之间的相关系数可以看出,负荷之间存在很强的相关性及大量的冗余信息,若直接利用预测日之前的负荷进行预测,将不利于负荷精度的进一步提高,因此,就需要对负荷的特征量进行有效提取。大量的实际电力工程问题中都会面临出现冗余信息的状况,而通过设计合理的算法进行特征信息提取是解决这类问题的一个主要步骤。特征量的提取是根据实际问题的要求不同而不同。既有稳态量特征提取,又有暂态信息的特征提取。

电力系统正常运行时,电网频率随电力负荷变化而不断变化(很小),变化速率很慢;电网发生事故出现有功功率不平衡时,系统频率变化速率加快,这时电网频率及其变化率的快速跟踪测量对事故处理和电网安全十分重要。例如,一个外送型电网,如果外送断面

出现故障而导致外送受阻时,送端系统将会有大量的有功功率剩余,此势必造成送端系统频率升高,这时有可能需要通过对频率的跟踪检测而切除送端系统部分电源,以使频率恢复到正常水平,这就是所谓的高周切机。受端系统由于突然失去大量有功功率的支撑,势必造成受端系统频率下降,这样有可能需要切除负荷使受端系统的频率恢复,这就是所谓的低周减载。上述过程正是通过对频率的可靠跟踪来完成的。因此,频率跟踪也是电力信号处理的一个惯常应用。

由于电网频率并不是固定不变,当其发生变化时就不能保证其他电气量量测的准确性,以及谐波分析中的计算周期是否与电网周期同步,这样将会引起信号较大的测量误差和频谱泄漏。对于频谱泄漏的解决方法主要有以下两个:一个是采用适当的窗函数来降低泄漏效应的影响,但是,这种方法同时也增加了计算量,对庞大数据处理并不适用;另一个是设计有效的频率跟踪电路,使采样频率实时跟踪信号的基波频率,这也是目前较为实用和有效的解决办法。常用频率跟踪一般有以下两种:一种是硬件方法,比如由集成电路的锁相环 CD4046 实现。该方法采用锁相环实时跟踪信号频率变化从而实时调整采样频率,实现同步采样,但其可靠性不高,当波形畸变时测量存在较大误差,而且硬件较复杂,器件的延迟、漂移等也将引入新的误差。另一种是软件法,被测信号经去噪处理后,首先测取被测信号的周期,计算采样周期并确定定时器的计数值,然后在定时中断服务程序中采样,并对定时器重置计数值。该方法简化了硬件电路,其精度要高于硬件锁相方法,且频率跟踪时间的可控性强,但目前软件同步法一般由微处理器实现,需要进行实时跟踪计算,增加微处理器的计算量,并且在这一过程中由于微处理器中计数器量化误差和中断响应时间的分散性也必然会导致较大的采样误差。

过电压是电力系统中的多发事件,引起过电压的原因是多方面的,若无可靠信息,难以对事故的内在原因做出正确的判断。因此,需要在线监测系统电压的变化,并能自动追踪记录过电压的波形、幅值及发生时间的装置,为事故分析和处理提供依据。过电压在线监测的一个重要环节就是要保证实时监测系统频率的变化并实时调整数据采样的时间间隔。这样才能保证对出现的过电压现象做到实时监测。将频率跟踪技术应用于电能质量检测装置中,作为数据采集的触发信号,完成对电网电压、电流、有功功率、无功功率的测量,以及进行电能质量分析。另外,对谐波、简谐波的分析也都是建立在对频率可靠跟踪的基础上。可以说,正是对工频频率的有效跟踪,使电力工程信号处理应用有了一个标尺。

数据的扩展和压缩也是信号分析处理的一个常用手段,根据频域-时域变换的时间展缩性质,频率标尺的扩展(或压缩)对应时间标尺的压缩(或扩展),从而可以通过改变一个标尺来达到压缩或扩展另一个标尺的目的。

为了说明“时间压缩”的原理,我们设想用一个磁带记录仪记录振动信号,然后再把它记录的信号重放并送到带通滤波器进行频率分析。设记录时磁带带速为 v ,重放时加速到 nv (n 为正整数)。这样,原来 $1s$ 的时间,在重放时被“压缩”为 $\frac{1}{n} s$ 。原来振动信号频率为 f 的分量,在重放的信号中其频率变为 nf 。从这里可以看出,要实现“时间压缩”除了必须有一个信号存储器外,还必须以不同的速度“存入”和“取出”信号,运用数字技术能够很容易地实现这种过程。

时间压缩式分析原理的采用,大大改进了工程技术中的动态分析工作。利用它可以对电力系统稳态和瞬态的工程信号做在线、实时分析,可以研究频谱的时间历程,现已成为电力系统动态分析不可缺少的工具之一。在故障分析和测距中就要对大量的录波数据进行压缩、上传和变换,进行故障分析以及在测量端分析得到准确的故障位置。

信号中包含着实际系统运动或状态的大量数据,既有有用的数据,也有干扰数据,一般称干扰数据为“坏数据”。对于不同的问题,它们的有用程度并不一样,如何把所需要的那一部分分离出来,这就是信息提取与识别的任务。对“坏数据”的剔除和辨识也是对所需数据可靠提取的一个保证。信息提取与识别是数据压缩的进一步应用,让信号在进行提取和识别之前经过压缩处理(以保证处理的实时性),从压缩后的信号中提取信息特征,再经比较、判断、识别出所需的信息。

电力系统中可以应用数据的这种辨识来进行区分正常运行状态信号和故障信号,比如利用信号数据辨识的方法鉴别变压器差动保护中的励磁涌流和内部故障,通过发电机参数的辨识来判断其运行状况、重负荷输电线故障和突然甩负荷的识别等。

工程信号处理的另一个主要目的就在于分析已有的有序观测数据的相互关系,揭示其发展趋向并进行预测或者预报。事实上,为什么人们要根据系统的观测数据对系统进行分析,其主要原因是为了能够预测、预报或外推出系统在未来时刻的特性,而对系统特性的处理或控制也必须根据预测,所以预测是控制的关键,预测的进一步发展就是预测控制,即是电力系统校正控制研究的新动向。在电力负荷的预测方面,由于电力负荷具有特殊的周期性,负荷以天、周、年为周期发生波动,大周期中嵌套小周期。因此可以通过电力负荷历史数据的这种周期关系构造数学模型,然后对未来负荷状况进行预测。电力负荷预测分为中长期预测和短期预测,目的不同,所建模型也不同,相应数据的提取和处理方式也不同。

3. 电力工程信号处理常用算法

数字处理是在 16 世纪的经典数值分析技术基础上迅速发展起来的新兴学科。直至 20 世纪 60 年代开始提出了若干高效的信号处理算法,其中最主要的是出现了一批高效的数字滤波算法和数字相关谱分析算法。尤其重要的是,这一时期所提出的快速傅氏变换(FFT)算法,为工程信号数字处理技术的发展提供了理论和技术基础,下面我们就从傅氏算法开始来逐步认识有关算法。

傅氏算法是基于傅氏变换的基础上提出的,在工程应用分析中有着近 200 年的应用历史,其基本上思路就是针对式(0-2)所示的经典故障模型信号进行滤除衰减直流非周期分量的处理。提取工频相量信号的实部和虚部,从而求解出相量的幅值和相位,作为工频量保护或测距所用的信息。

$$f(t) = Ae^{-\alpha t} + \sum_{n=1}^N I_m(n) \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (0-2)$$

围绕如何减小或消除衰减直流分量的影响派生出了一系列的改进算法,大致可分为在原有数据窗的基础上,增加采样点数,对相邻的各数据窗进行傅氏变换,并以此为基础进行校正;增加采样点数进行校正,但不进行多次傅氏变换,而是直接将衰减直流分量计算出来进行滤除,以及不增加采样点数进行校正这三类。在傅氏算法的基础上,根据采样