



21 世纪电力系统及其自动化规划教材

# 电能质量监控

赵丽平 周勇 解绍锋 编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪电力系统及其自动化规划教材

# 电能质量监控

## Monitoring and Control of Power Quality

赵丽平 周 勇 解绍锋 编  
李群湛 主 审



机械工业出版社

本书是电力系统及其自动化规划教材之一，内容包括电能质量概述、电能质量的分析与监测、电能质量的控制、不同干扰负荷对电能质量的影响等。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化专业的教学用书，也可供本专业研究生、高等职业院校相关专业使用，以及供从事电力工程专业工作的技术人员自学。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册下载。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电能质量监控/赵丽平, 周勇, 解绍锋编. —北京: 机械工业出版社, 2011. 8

21 世纪电力系统及其自动化规划教材  
ISBN 978 - 7 - 111 - 35269 - 3

I. ①电… II. ①赵…②周…③解… III. ①电能 - 质量控制 - 教材  
IV. ①TM60

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 131190 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 贡克勤 责任编辑: 贡克勤

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈秀丽

封面设计: 王伟光 责任印制: 杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2011 年 9 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 10.75 印张 · 261 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 35269 - 3

定价: 24.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 21 世纪电力系统及其自动化规划教材 编 委 会

主任委员：熊信银

副主任委员：尹项根 韩学山 李庚银 刘究林

李 扬 陈少华 贡克勤 杨德先（兼秘书）

委 员：（以姓氏笔划排序）

尹项根 毛承雄 车仁飞 文明浩 文劲宇

叶俊杰 刘学东 刘究林 孙丰奇 许 珉

李 扬 李庚银 吴耀武 陆继明 张 利

张 波 杨国旺 杨宛辉 杨淑英 杨德先

陈 卫 陈少华 罗 毅 房俊龙 易长松

赵书强 赵玉林 赵丽平 姜素华 栗 然

盛四清 常鲜戎 梁振光 韩学山 游志成

熊信银 魏 萍

# 前 言

本书是电力系统及其自动化专业规划教材之一，适合高等学校电气工程及其自动化专业的教学，也可供本专业研究生及电力工程技术人员参考使用。

本书较详细地介绍了与电能质量监控相关的内容。共5章，第1章简要介绍电能质量的起因、定义与分类，电能质量指标，国内外电能质量的发展等基本问题；第2章详细介绍电能质量分析的数学基础，包括时域仿真、频域分析和基于变换的分析方法；第3章介绍电能质量的监测与管理；第4章介绍电能质量控制技术，包括各种控制原理及方法；第5章分析不同干扰负荷的特征，并介绍各种干扰负荷对电能质量的影响。

作者根据多年科研实践和教学要求，相对传统教材，在结构上对本书进行了一些调整，使其更符合教师的教学需求及学生的学习心理；根据专业的发展和需要介绍了目前电能质量监控的发展前景及相关知识，舍弃了部分较繁琐的理论推导过程。

本书由西南交通大学赵丽平、解绍锋，郑州大学周勇编写，西南交通大学李群湛教授主审。其中，第1、2章由赵丽平编写，第4章和第5章5.1、5.2、5.4节由解绍锋编写，第3章和第5章5.3、5.5、5.6、5.7节由周勇编写。全书由赵丽平统稿。

本书在编写过程中得到了西南交通大学教务处和电气工程学院、郑州大学电气工程学院等单位的有关人士的大力支持，同时还借鉴了许多专家的研究成果，在此一并表示诚挚感谢！

由于作者水平有限，错误在所难免，如果您在阅读过程中发现有错误或表达不够准确的地方，请及时发送电子邮件至[lpzhao@swjtu.cn](mailto:lpzhao@swjtu.cn)，以便及时纠正和完善，我们向您表示衷心感谢！

作 者

# 目 录

## 前言

## 第1章 电能质量概述 ..... 1

- 1.1 电力污染源与电能质量现象 ..... 1
  - 1.1.1 电能质量问题的起因 ..... 1
  - 1.1.2 稳态及瞬态电能质量现象 ..... 2
- 1.2 电能质量的定义和分类 ..... 3
  - 1.2.1 电能质量的定义 ..... 3
  - 1.2.2 电能质量的扰动种类 ..... 3
- 1.3 电能质量指标的确定 ..... 5
  - 1.3.1 电力系统的频率偏差 ..... 6
  - 1.3.2 供电电压允许偏差 ..... 6
  - 1.3.3 电压波动与闪变 ..... 7
  - 1.3.4 三相电压（电流）的不平衡度 ..... 11
  - 1.3.5 电网谐波 ..... 12
- 1.4 国内外电能质量发展概况 ..... 13

## 第2章 电能质量分析的数学基础 ..... 15

- 2.1 概述 ..... 15
- 2.2 傅里叶变换与快速傅里叶变换 ..... 16
  - 2.2.1 非正弦周期信号分解为傅里叶三角级数 ..... 17
  - 2.2.2 连续傅里叶变换 ..... 18
  - 2.2.3 离散傅里叶变换 ..... 18
  - 2.2.4 快速傅里叶变换 ..... 19
- 2.3 均匀抽样定理与频谱混叠 ..... 21
- 2.4 小波变换及瞬态电能质量扰动辨识 ..... 23
  - 2.4.1 连续小波变换 ..... 23
  - 2.4.2 离散小波变换 ..... 24
  - 2.4.3 多分辨分析 ..... 24
  - 2.4.4 Mallat 算法 ..... 26
- 2.5 矢量变换与瞬时无功功率理论 ..... 27
  - 2.5.1 矢量变换 ..... 27
  - 2.5.2 瞬时无功功率理论 ..... 31
  - 2.5.3 瞬时无功功率理论的应用 ..... 34

## 第3章 电能质量的监测与管理 ..... 37

- 3.1 电能质量的标准 ..... 37
  - 3.1.1 电能质量标准化 ..... 39

- 3.1.2 国内外电能质量标准简介 ..... 40
- 3.2 电能质量的监测与评估 ..... 49
  - 3.2.1 对电能质量监测的基本要求 ..... 49
  - 3.2.2 电能质量的监测方式 ..... 50
  - 3.2.3 电能质量指标监测点的设置 ..... 50
  - 3.2.4 电能质量监测装置简介 ..... 51
  - 3.2.5 电能质量监测的误差 ..... 53
  - 3.2.6 电能质量的评估 ..... 54
- 3.3 电能质量的监督与管理 ..... 57
  - 3.3.1 建立电能质量的监督与管理 体系 ..... 57
  - 3.3.2 电能质量监督的主要内容 ..... 60
  - 3.3.3 电力市场环境下的电能质量 监管 ..... 65

## 第4章 电能质量控制技术 ..... 69

- 4.1 电能质量控制技术的研究意义 ..... 69
- 4.2 电能质量控制技术的分类 ..... 69
- 4.3 电能质量控制装置原理 ..... 70
  - 4.3.1 无功补偿电容器和 LC 滤波器 ..... 70
  - 4.3.2 静止无功补偿器 ..... 74
  - 4.3.3 有源电力滤波器 ..... 79
  - 4.3.4 动态电压恢复器 ..... 84
  - 4.3.5 统一电能质量调节器 ..... 86
- 4.4 电能质量控制装置的控制方法 ..... 89
  - 4.4.1 PID 控制 ..... 89
  - 4.4.2 滞环比较控制 ..... 91
  - 4.4.3 空间矢量控制 ..... 92
  - 4.4.4 无差拍控制 ..... 94
  - 4.4.5 自适应控制 ..... 96
  - 4.4.6 模糊控制 ..... 98
  - 4.4.7 人工神经网络 ..... 100

## 第5章 干扰负荷对电能质量的影响 ..... 103

- 5.1 电气化铁道牵引负荷 ..... 103
  - 5.1.1 电气化铁道牵引负荷的基本 原理 ..... 103

## VI

5.1.2 牵引负荷引起的谐波 .....	104	5.4.1 旋转电机的基本原理 .....	138
5.1.3 牵引负荷引起的三相不平衡 .....	108	5.4.2 旋转电机引起的谐波 .....	140
5.1.4 牵引负荷引起的电压波动和 闪变 .....	111	5.5 变压器 .....	142
5.1.5 牵引负荷引起的电压偏差 .....	112	5.5.1 变压器的基本原理 .....	142
5.2 交流调压电路 .....	114	5.5.2 变压器引起的电压暂降 .....	143
5.2.1 交流调压电路的基本原理 .....	115	5.5.3 变压器引起的谐波 .....	144
5.2.2 单相交流调压器 .....	116	5.6 整流设备的谐波 .....	146
5.2.3 移相控制三相交流调压电路 .....	119	5.6.1 蓄电池充电器 .....	146
5.3 电弧炉 .....	125	5.6.2 三相可控整流设备 .....	147
5.3.1 电弧炉的工作过程 .....	125	5.6.3 中频炉引起的谐波 .....	150
5.3.2 电弧炉引起的三相不平衡 .....	126	5.7 低压电器的谐波 .....	152
5.3.3 电弧炉引起的谐波 .....	129	5.7.1 电视机和计算机引起的谐波 .....	153
5.3.4 电弧炉引起的电压波动和 闪变 .....	136	5.7.2 调光灯引起的谐波 .....	155
5.3.5 电弧炉的功率因数 .....	137	5.7.3 荧光灯引起的谐波 .....	157
5.4 旋转电机 .....	137	5.7.4 节能灯引起的谐波 .....	158
		5.7.5 低压电器的电磁兼容 .....	160
		<b>参考文献</b> .....	<b>162</b>

# 第 1 章 电能质量概述

现代社会中，电能是一种使用最为广泛的能源，其应用程度是一个国家发展水平的主要标志之一。在电力市场条件下，供电表现为一种商业服务行为。电能作为一种商品，同其他商品一样具有质量属性。电能具有特殊性，即不能储存，而是发、供、用电同时完成并由用电的多少来决定发电与供电的多少，因此，对用户连续不断供电是电能质量的一个重要指标。作为供电部门，以最小的成本提高电能质量是电力市场的客观需要，只有供电的价格与供电质量相联系才能建立一个真正的电力市场。同时，对人民生活的供电是一种公益事业，保证良好的供电质量，也是促进社会文明、安定的重要因素。

高质量的电能对于保证电网和电气设备安全、经济运行，提高产品质量和保障居民正常生活有着重要的意义。

## 1.1 电力污染源与电能质量现象

### 1.1.1 电能质量问题的起因

理想的三相交流电力系统应以恒定的频率和正弦波形、按规定的电压水平向用户供电，各相的电压和电流应处于幅值大小相等、相位互差  $120^\circ$  的对称的理想状态。然而实际上，由于各元件参数的非线性和非对称性，负荷性质各异且变化的随机性，调控手段的不完善性，以及运行操作、外来干扰和各种故障等原因，这种理想状态并不存在。因此，就产生了电能质量问题。

根据国内外调查结果，95% 的电能质量问题产生于用户侧（相对于计量点），而电力系统侧引起的电能质量问题只占 5%，因此用户侧是引起电能质量问题的主要原因。现代电路系统中，用电负荷结构发生了重大变化，诸如半导体整流装置、晶闸管调压及变频调速装置、炼钢电弧炉、电气化铁路和家用电器等负荷已经迅速发展起来。这些用电负荷的非线性、冲击性以及不平衡的用电特性，会使电网的电压发生畸变或引起电压波动和闪变以及三相不平衡，甚至引起系统频率波动等，对供电质量造成严重的干扰或“污染”。

电能质量问题大致分为电压质量和电流质量问题。电压质量问题指的是会影响用户设备正常运行的不理想的系统电压，包括电压的闪变（Flick）、瞬时过电压（Swell）、谐波畸变（Harmonics）、各种电压不平衡（Unbalance）等情况；电流质量问题指的是电力电子设备等非线性负荷给电网带来的电流畸变，包括流入电网的谐波电流以及无功、不平衡负荷电流、低频负荷变化造成的闪烁等。此外，频率不稳定也属于电能质量问题。

造成电能质量问题的原因很多，其中电力电子技术的广泛应用所引入的大量非线性负荷对电网的冲击是一个重要的原因。电力电子装置自 20 世纪 70 年代以来给现代工业带来了节能和能量变换技术，但同时也给电能质量带来了新的损害，如今，它已成为电网的主要谐波污染源。



谐波畸变和瞬时过电压会对通信设备和电子设备产生严重干扰，导致通信质量降低或信息丢失；谐波会令电能的生产、传输和利用的效率降低，使电气设备过热、产生振动和噪声、绝缘老化、寿命缩短、甚至发生故障或烧毁；谐波会引起电力系统局部发生并联谐振或串联谐振，使谐波含量被放大，致使电容器等设备烧毁等；这些对电力系统内部的危害势必更进一步加剧供电质量的恶化。

三相电力系统中产生电能质量问题的原因主要可以归纳为事故性和正常性两类。

事故性电能质量问题主要是由电力系统运行的内外故障引起的，如各种短路故障、人为误操作、电网故障时发电机及其励磁系统的工作状态的改变、故障保护装置中的电力电子设备的起停等，都将造成各种电能质量问题。

正常性电能质量问题主要是由负荷的非线性和电力系统设备的非线性两方面引起的。负荷的非线性是电力系统谐波问题的主要来源：工业负荷中，电弧炉造成的电能质量问题明显，主要是由起弧的时延和电弧的严重非线性引起的；居民生活负荷中，荧光灯是电能质量问题的主要原因，其伏安特性具有严重非线性，引起的谐波电流是非常严重的，其中以3次谐波的含量最高；大功率整流和变频装置也会产生严重的谐波，引起功率因数偏低，同时对电网的正常供电造成不良影响，比较显著的就是电力机车，电力机车通过牵引供电系统供电，交-直型电力机车是整流型的，富含各种奇次谐波（现在大力发展的交-直-交型电力机车或动车组有很大改善），电力机车通过牵引变电所供电，通常还有负序问题。电力系统设备的非线性引起谐波的来源主要是发电机、变压器、直流输电设备等；此外，输电线路（特别是超高压输电线路）和变电站的并联电容补偿装置还可能对谐波产生放大作用；直流输电也是目前电力系统最大的谐波源。

### 1.1.2 稳态及瞬态电能质量现象

电力系统中各种扰动引起的电能质量问题主要可分为稳态和暂态两大类：稳态电能质量问题以波形畸变为特征，主要包括谐波、间谐波、波形下陷以及噪声等；暂态电能质量问题通常以频谱和暂态持续时间为特征，可分为脉冲暂态和振荡暂态两大类。

电力系统中各种电能质量问题，包括扰动的性质、特征指标、产生原因、后果以及解决办法见表1-1。

表 1-1 电能质量问题及解决方法

类 型	扰动性质	特征指标	产生原因	后 果	解 决 办 法
谐波	稳态	谐波频谱电压、电流波形	非线性负荷、固态开关负载	设备过热、继电保护误动、设备绝缘损坏	有源、无源滤波
三相不对称	稳态	不平衡因子	不对称负载	设备过热、继电保护误动、通信干扰	静止无功补偿
陷波	稳态	持续时间、幅值	调速驱动器	计时器计时错误、通信干扰	电容器、隔离电感器
电压闪变	稳态	波动幅值、出现频率、调制频率	电弧炉、电动机启动	伺服电动机运行不正常	静止无功补偿

(续)

类 型	扰动性质	特征指标	产生原因	后 果	解 决 办 法
谐振暂态	暂态	波形、峰值、持续时间	线路、负载和电容器组的投切	设备绝缘破坏、损坏电力电子设备	滤波器、隔离变压器、避雷器
脉冲暂态	暂态	上升时间、峰值、持续时间	闪电电击线路、感性电路开合	设备绝缘破坏	避雷器
瞬时电压上升/下降	稳态/暂态	幅值、持续时间、瞬时值/时间	远端发生故障、电动机启动	设备停运、敏感负载不能正常运行	不间断电源、动态电压恢复器
噪声		幅值、频谱	不正常接地、固态开关负载	微处理器设备不正常运行	正确接地、滤波器

## 1.2 电能质量的定义和分类

### 1.2.1 电能质量的定义

由于人们看问题的角度不同所致，至今未能有一个准确统一的电能质量定义。电气与电子工程师协会（IEEE）标准化协调委员会已正式采用“Power Quality（电能质量）”这一术语，并给出了相应的技术定义：合格的电能质量，是指提供给敏感设备的电力和为其设置的接地系统是适合于该设备正常工作的。但是，国际电工委员会（IEC）并没有采用“Power Quality（电能质量）”这一术语，而是提出使用“EMC（电磁兼容）”这一术语，指出和强调设备与设备之间的相互作用和影响，以及电源与设备之间的相互作用和影响。在IEC提出的电磁兼容概念中，采用排放（Emission）来表示由设备产生的电磁污染，它反映了电流质量问题，采用抗扰（Immunity）来表示设备免除电磁污染的能力，它与电压质量相关。并以此为基础，制定出一系列相关的电磁兼容标准。电磁兼容术语与电能质量术语有很大重叠性，在它们中间有许多的同义词。

由于电能质量问题的研究是由电力用户的生产需求推动的，用户的衡量标准应占有优先位置，基于这种角度，有专家主张采用如下的定义：任何引起电压、电流或频率的偏差并由此导致用户设备故障或误动作的电能问题。

此外，还有一些其他的定义。总之，不论如何表达，从技术含义上讲电能质量问题主要包括以下两个方面：

1) 电压质量和供电可靠性，这主要是对供电部门的供电要求。包括：过电压、欠电压、频率偏差、电压跌落、电压突升、电压波动、电压波形畸变、三相电压不平衡、电压中断等。

2) 电流质量，主要是对电力用户的用电要求。包括：电流谐波、无功电流、三相电流不平衡等。

### 1.2.2 电能质量的扰动种类

为了系统地分析研究电能质量问题，从而找出引起电能质量问题的原因并采取针对性的

解决办法, 将电能质量扰动进行详细的分类是很重要的。

IEEE 第 22 标准协调委员会 (Standards Coordinating Committee 22) 和其他国际学术委员会最新采用 11 种专用术语来表达电能质量的主要扰动, 如图 1-1 所示 (图中示出了 8 种)。

1) 电压中断或断电 (Interruption, Outage)。在一定时间内, 一相或多相完全失去电压 (低于 0.1 p. u.) (p. u. 表示标么值, 后同) 称为断电。断电按持续时间长短分为三类: 瞬时断电 (0.5 周期 ~ 3s)、暂时断电 (3 ~ 60s)、持续断电 (大于 60s)。

2) 频率偏差 (Frequency Deviation)。

3) 电压跌落 (电压凹陷或电压下跌) (Sag, Dip)。持续时间为 0.5 周期 ~ 1min, 幅值为 0.1 ~ 0.9 p. u., 系统频率为标称值。

4) 电压突升 (Swell)。持续时间为 0.5 周期 ~ 1min, 幅值为 1.1 ~ 1.8 p. u., 系统频率为标称值。

5) 瞬时脉冲或突波 (Impulse, Transient)。瞬时脉冲是在极短时间内在两个连续稳态之间发生的一种电压变化。瞬时脉冲可以是任一极性的单方向脉冲, 也可能是发生在任一极性的阻尼振荡波第一个尖峰。

6) 电压波动与闪变 (Voltage Fluctuation and Flicker)。电压波动是在包络线内的电压的有规则变动, 或是幅值通常不超过 0.9 ~ 1.1 p. u. 电压范围的一系列电压随机变化。闪变则是指电压波动对照明灯的视觉影响。

7) 电压切痕 (Notch)。电压切痕是一种持续时间小于 0.5 周期的周期性电压扰动。电压切痕主要是由于电力电子装置在相关的两相间发生瞬时短路时电流从一相转换到另一相而产生的。电压切痕的频率很高, 用常规的谐波分析仪很难测量出来。这也是为什么过去从未有过此项电压扰动内容, 直到最近才正式列入的原因。

8) 谐波 (Harmonics)。含有基波整数倍频率的电压或电流称为谐波。谐波是由于电力系统和电力负荷的非线性特性造成的。

9) 间谐波 (Interharmonics)。含有基波非整数倍频率的电压或电流称为间谐波。小于基波频率的分数次谐波也属于这一类。其主要来源是静止变频器和电弧发生装置等。间谐波会使显示装置发生视觉闪变。

其他扰动还有:

10) 过电压 (Overvoltage)。过电压是指电压幅值超过标称电压且持续时间大于 1min。过电压的幅值为 1.1 ~ 1.2 p. u., 频率仍为标称值。

11) 欠电压 (Undervoltage)。欠电压是指电压幅值小于标称电压且持续时间大于 1min。欠电压的幅值为 0.8 ~ 0.9 p. u., 频率仍为标称值。

上述的各种电能质量扰动以及三相电压 (电流) 不平衡 (含有负序、零序分量) 会造成生产、生活的非计划停电或设备损坏, 使用户遭受相当大的经济损失。

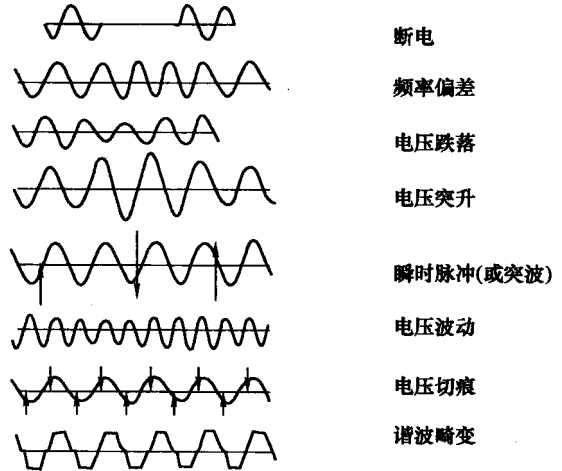


图 1-1 电能质量的主要扰动

### 1.3 电能质量指标的确定

一个理想的电力系统应该以恒定的频率（50Hz）和正弦的波形，按规定的电压水平对用户供电。在三相交流电力系统中，各相的电压和电流应处于幅值大小相等，相位互差120°的对称状态。理想对称三相电源的波形图和相量图如图 1-2 所示。

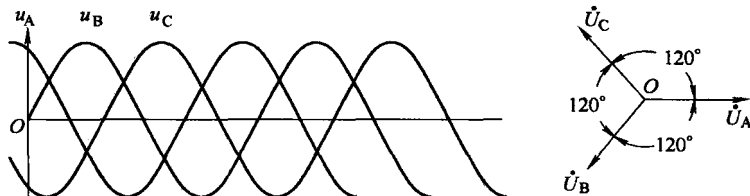


图 1-2 理想对称三相电源的波形图和相量图

对于理想的三相交流电力系统来说，有

$$\begin{cases} u_A = \sqrt{2}U\cos(\omega t + \phi) \\ u_B = \sqrt{2}U\cos(\omega t - 120^\circ + \phi) \\ u_C = \sqrt{2}U\cos(\omega t + 120^\circ + \phi) \end{cases} \quad (1-1)$$

但在实际上，电力系统是处于动态平衡中，而且电力系统真实物理信号的动态变化也非常复杂。例如：对电源来讲，三相发电机产生的电压或多或少与正弦波形有些差别，因此就包含一定的谐波分量；变压器的励磁电流是非正弦的，也含有一定大小的 3 次谐波分量；对负载来讲，非线性负荷的大量增加使得电力系统的电压和电流波形发生了严重畸变，给电力系统带来了很大“污染”。还有，当系统或用户内部发生短路故障、开关操作、变压器或电容器组的投切时，会引起暂时过电压和瞬态过电压以及电压跌落和短时供电中断等电能质量扰动问题。因此，电力系统三相电压、电流的观测模型远非以上式（1-1）可以描述。

从对理想的三相交流电力系统的分析不难看出，对电能质量的衡量可以从以下几个方面来考虑：

- 1) 对三相制来讲， $u_A$ 、 $u_B$ 、 $u_C$  存在是否平衡的问题。
- 2) 对电压来讲，存在是否发生波动与闪变及偏离额定电压的程度。
- 3)  $\omega = 2\pi f$ ，频率偏差有其动态属性。
- 4) 波形是否发生畸变，呈现为周期性的非正弦波。
- 5) 电能质量是否发生扰动，呈现为电压凹陷（Voltage Sag）、电压骤升（Voltage Swell）、周期性陷波（Periodical Notch）等。

综上所述，电能质量主要包括稳态指标和暂态扰动。其中稳态指标包括：电力系统的频率偏差、电压波动与闪变、三相电压（电流）不平衡度、电网谐波含量。暂态扰动包括：暂时过电压和瞬态过电压以及电压跌落和短时供电中断等。其中，电压和频率偏差基本上取决于供求平衡关系，而波动和闪变、不平衡度、谐波及暂态扰动则不仅与电力系统有关，而且受用户负荷性质的影响。因此，电能质量监测与分析系统不仅应安装在电力系统的枢纽变电站中，还应对重要用户和特殊用户（产生波形畸变的用户）进行监测与分析。

### 1.3.1 电力系统的频率偏差

频率是指单位时间内事物周期性运动的次数。在电力系统稳定运转的状态下，负荷功率的增减，发电机出力的变动不断发生，系统中不同节点的频率可能产生不同程度的波动，这是一种企求系统能量均衡的动态过程，在不破坏系统稳定的前提下，在各节点同时检测，不易觉察到波动的差异。从概率统计的意义上看，各节点的频率是相等的，并在做同步变化，在此条件下，任意点测得的频率，均为系统频率。

电力系统频率一方面作为衡量电能质量的指标，需要加以动态监测，另一方面作为实施安全稳定控制的重要状态反馈量，要求能实施重构。另外，频率同步也是实现高精度谐波分析的重要措施之一。

从测量的角度讲，定间隔采样难以同时满足计算量大、跟踪速度快和计算精度高的要求，而自适应调整采样间隔，即根据信号当前的频率随时调整采样间隔，则可以有效地消除由于频率变化带来的误差。

从整个电力系统来讲，系统低频或高频运行对电厂、负荷都有不利的影响。概括地说，偏差在  $\pm 0.5\text{Hz}$  之内主要是经济问题，即设备的效率降低；偏差值大于  $\pm 0.5\text{Hz}$ ，则不仅仅使设备的效率降低，还会危及设备的安全，引起设备的累计性损伤，损坏设备，甚至导致系统瓦解以致崩溃。

在正常运行工况下，电力系统的频率应在标称频率下运行。但由于电力系统的负荷在不断变动，电源出力及其调节系统跟随负荷变化又有一定的惯性，致使系统频率一直处于变动的状态之中，因此运行中的系统频率相对于标称频率的偏差应限制在一定的范围之内，以确保系统运行的可靠性和经济性。

所谓频率偏差是指电力系统频率的实际值  $f$  和标称值  $f_0$  ( $50\text{Hz}$ ) 之差，即

$$\Delta f = f - f_0 \quad (1-2)$$

电力系统的频率允许偏差是指系统正常运行的频率允许偏差范围，它决定着电力系统发电、输变电设备和负荷的运行频率。系统频率允许偏差是通过安全、质量和经济三方面进行综合考虑、统一协调而确立的。

### 1.3.2 供电电压允许偏差

电压允许偏差是指电力系统电压缓慢变化时，实际电压与系统标称电压之差。通常指电压变化率小于每秒 1% 时实际电压值与系统标称电压值之差，可用有名值或标么值表示，即

$$\text{电压偏差}(\%) = \frac{\text{实际电压} - \text{系统标称电压}}{\text{系统标称电压}} \times 100\% \quad (1-3)$$

电压变动指的是供电电压在两个相邻的、持续一定时间的电压方均根值  $U_1$  和  $U_2$  之间的差值。通常以额定电压的百分数来表示电压变动的相对百分值  $\Delta V$ ，即

$$\Delta V = \frac{U_1 - U_2}{U_N} \times 100\% \quad (1-4)$$

在同方向小于 30ms 的快速变化不计入电压变动。小于 30ms 期间内，同方向的电压方均根值的变动只算作一次变动。在单位时间内电压变动的次数为电压变动的频度。一般以

1/min 或  $s^{-1}$  为单位。

电压偏差过大造成的危害主要有以下几点：

1) 对用电设备的危害。用电设备设计在额定电压时性能最好、效率最高，电压偏离额定值时，其性能和效率都会降低，有的还会减少使用寿命。电压偏差超过一定值时，会引起设备的损坏。

2) 对电网稳定、经济运行有不良的影响。

### 1.3.3 电压波动与闪变

#### 1. 电压波动

电压波动 (Voltage Fluctuation) 定义为电压方均根值的一系列相对快速变动或连续改变的现象。电压波动值为电压方均根值的两个极值  $U_{\max}$  和  $U_{\min}$  之差  $\Delta U$ ，通常以其额定电压  $U_N$  的百分数表示其相对百分值，即

$$d = \frac{\Delta U}{U_N} \times 100\%$$

$$d = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\% \quad (1-5)$$

为检测出电压波动分量，将电压波动看成是以工频电压为载波，其电压的方均根值或峰值受到以电压波动分量作为调幅波的调制。对于任何波形的调幅波均可看作是由各种频率分量合成，为使分析简化又不失一般性，研究电压波动的监测方法可只分析单一频率的调幅波对工频载波的调制。

将电压的瞬时值解析式写成

$$u(t) = A(1 + m\cos\Omega t)\cos\omega t \quad (1-6)$$

式中  $A$ ——工频载波电压的幅值；

$\omega$ ——工频载波电压的角频率；

$m$ ——调幅波电压的幅值；

$\Omega$ ——调幅波电压的角频率。

求电压波动只需解调出调幅波

$$v(t) = m\cos\Omega t \quad (1-7)$$

IEC 推荐二次方检测方法，即将  $u(t)$  二次方，然后利用带通滤波器检测出调幅波

$$u^2(t) = \frac{A^2}{2} \left( 1 + \frac{m^2}{2} \right) + mA^2 \cos\Omega t + \frac{A^2}{2} \left( 1 + \frac{m^2}{2} \right) \cos 2\omega t - \frac{m^2 A^2}{4} \cos 2\Omega t$$

$$+ \frac{m^2 A^2}{8} \cos 2(\omega + \Omega)t + \frac{m^2 A^2}{8} \cos 2(\omega - \Omega)t + \frac{m A^2}{2} \cos(2\omega + \Omega)t$$

$$+ \frac{m A^2}{2} \cos(2\omega - \Omega)t + \dots \quad (1-8)$$

电压波形经二次方后，输出信号  $u^2(t)$  包含了三个部分，即直流分量、与调谐波频率相关的分量及与电网基波频率相关的分量。其中，与调幅波频率相关的主要部分为  $m A^2 \cos\Omega t$ 。这一部分包含了调幅波的所有信息。

经过 0.05 ~ 35Hz 的带通滤波器滤去直流分量和工频及以上的分量，便可检测出调幅波即电压波动分量，其输出为

$$A^2 v(t) \approx mA^2 \cos \Omega t \quad (1-9)$$

调幅波的倍频分量  $\frac{m^2 A^2}{4} \cos 2\Omega t$ ，由于  $m \ll 1$ ，存在的调幅波电压的倍频分量幅值远小于调幅波的幅值，可忽略不计

$$v'(t) \approx mA^2 \cos \Omega t = 0.35A^2 d$$

## 2. 闪变

电压闪变 (Flicker) 是指人眼对由电压波动所引起的照明异常的视觉感受。荧光灯和电视机等设备对电压的敏感度远低于白炽灯，如果电压波动的大小不足以引起白炽灯闪变，则可以肯定不会使电视机和荧光灯工况异常。所以，选用白炽灯的工况作为电压波动值是否被接受的依据。

闪变的主要决定因素有：①供电电压波动的幅值、频度和波形；②照明装置，其中白炽灯的照度波动影响最大，而且与白炽灯的瓦数和额定电压等有关；③人们对闪变的主观感觉。

闪变的发生是由以上几方面的因素共同作用而成的。由于每个人的感光特性和大脑的反映特性不同，对灯光照度变化的感觉存在差异，决定闪变的因素也比较复杂，难以对电压波动和闪变建立精确的数学模型，因此，闪变的评价方法是通过对同一观察者反复进行闪变实验和对不同观察者的闪变视感程度进行抽样调查，经统计分析后找出相互间有规律性的关系曲线，最后利用函数逼近的方法获得闪变特性的近似数学描述来实现的。

(1) 闪变觉察率  $F(\%)$  和瞬时闪变视感度  $S(t)$

为了解闪变对人的视觉反应程度，IEC 推荐采用不同波形、频度、幅值的调幅波和工频电压作为载波向工频 230V、60W 白炽灯供电照明，经观察者抽样调查，闪变觉察率  $F(\%)$  的统计公式为

$$F = \frac{C + D}{A + B + C + D} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中  $A$ ——没有觉察的人数；  
 $B$ ——略有觉察的人数；  
 $C$ ——有明显觉察的人数；  
 $D$ ——不能忍受的人数。

如果闪变觉察率超过 50%，说明半数以上的实验观察者对电压波动有明显的或难以忍受的视觉反应。将  $F \geq 50\%$  定为闪变限值，则对应的电压变动值为该实验条件下电压波动允许值。

为反映人的瞬时闪变感觉水平，用闪变强弱的瞬时值随时间变化来描述，即瞬时闪变视感度  $S(t)$  (Instantaneous Flicker Sensation Level)。通常规定闪变觉察率  $F = 50\%$  为瞬时闪变视感度的衡量单位，对应的称为  $S(t) = 1$  觉察单位 (Unit of Perceptibility)。与  $S = 1$  觉察单位相对应的电压波动值  $d(\%)$  如图 1-3 所示。图 1-3 所示的  $S = 1$  觉察单位的正弦和矩形电压波动波形与频度的关系曲线是研究闪变的试验依据。

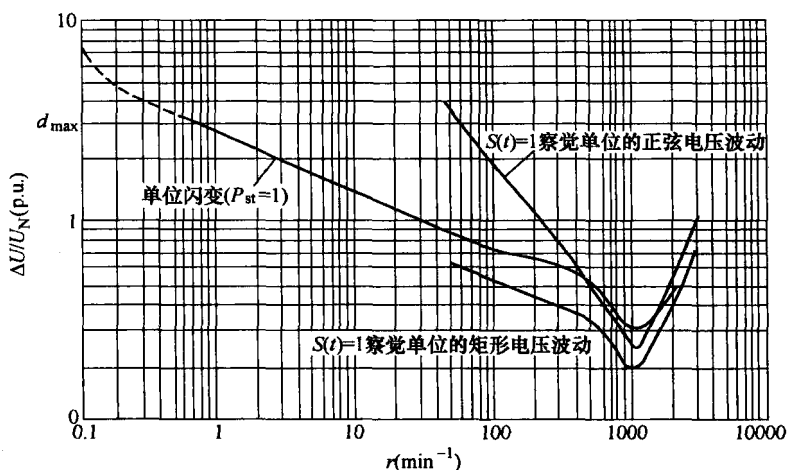


图 1-3  $S=1$  觉察单位的正弦和矩形电压波动与频度的关系曲线

## (2) 视感度系数 $K(f)$ 和灯—眼—脑环节的传递函数

人脑神经对照度变化需要有最低的记忆时间，高于某一频率的照度波动，普通人便觉察不到，这一频率称为停闪频率。根据统计，人的眼和脑对白炽灯照度波动的视感，对于 230V、60W 白炽灯的闪变觉察范围约为 1~25Hz，闪变敏感的频率范围约为 6~12Hz，正弦波幅值在 8.8Hz 的照度波动最为敏感。人对照度波动的最大觉察频率范围为 0.05~35Hz，这两个频率限制称为截止频率。截止频率的上限也称为停闪频率。

闪变是经过灯—眼—脑环节反映人对照度波动的主观视感，引入视感度系数  $K(f)$  可以更为本质地描述灯—眼—脑环节的频率特性。

IEC 推荐的视感度系数为

$$K(f) = \frac{S(t)=1 \text{ 觉察单位的 } 8.8\text{Hz 正弦电压波动值}}{S(t)=1 \text{ 觉察单位的频率为 } f \text{ 的正弦电压波动值}} \quad (1-11)$$

图 1-4 给出了在正弦电压波动条件下，由试验数据描绘出的视感度系数的频率特性曲线，它反映了不同频率正弦电压波动所引起的灯光闪烁在人眼和大脑中产生的主观感觉相对强弱的程度。

根据自动控制理论分析，电压波动对电灯照度波动的影响可用传递函数对灯—眼—脑环节从本质上进行表述，这使研究闪变对人的主观视感的影响提高到适当的理论高度。为得到具有一定理论高度且在工程上有实际价值的传递函数，用自动控制理论中的 5 个典型环节（比例环节、微分环节、惯性环节、比例微分环节、振荡环节）来逼近图中的  $K(f)$  曲线，各环节的系数根据方均差值最小的原则来确定。得到的人眼的闪变视觉

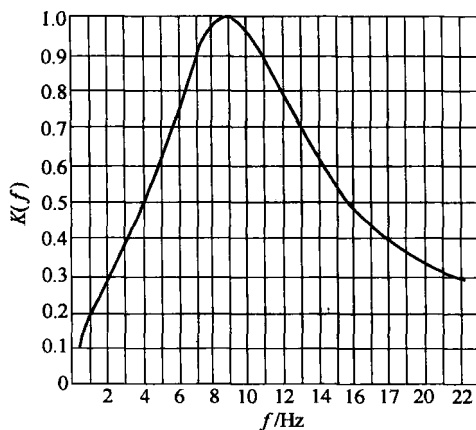


图 1-4 视感度系数  $K(f)$  的频率特性



系统数学模型，用传递函数表示为

$$K(s) = \frac{K\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)} \quad (1-12)$$

式中

$$K = 1.41802, \lambda = 2\pi \times 4.05981, \omega_1 = 2\pi \times 9.15494$$

$$\omega_2 = 2\pi \times 2.27979, \omega_3 = 2\pi \times 1.22535, \omega_4 = 2\pi \times 21.9$$

(3) 短时间闪变值  $P_{st}$

$P_{st}$ 是一个统计分析量值，用来作为评判闪变严重度的指标。在观察期内，对瞬时闪变视感度  $S(t)$  作递增分级处理，并计算各级瞬时闪变视感水平所占总检测时间长度之比，可获得概率直方图。然后采用 IEC 推荐的累计概率函数，即水平分级状态时间算法，对该段时间的闪变严重度作出评定。

由  $S(t)$  计算  $P_{st}$  的一般过程可用图 1-5 ~ 图 1-7 说明。

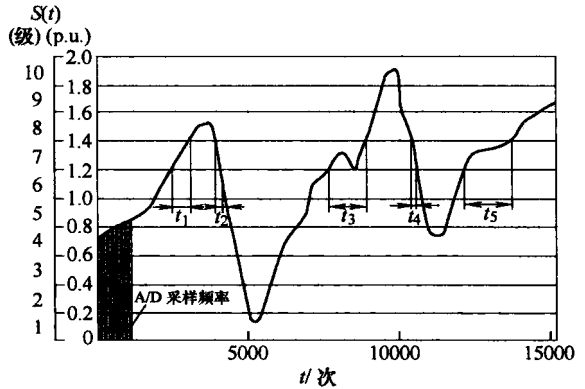


图 1-5  $S(t)$  分级计时

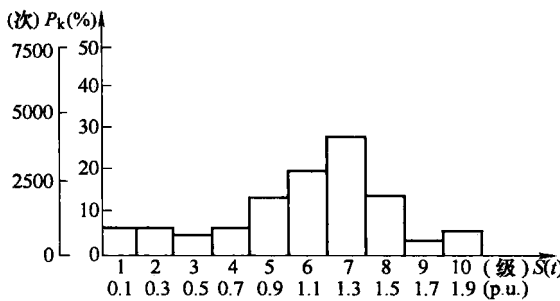


图 1-6  $S(t)$  统计计时的概率分布直方图

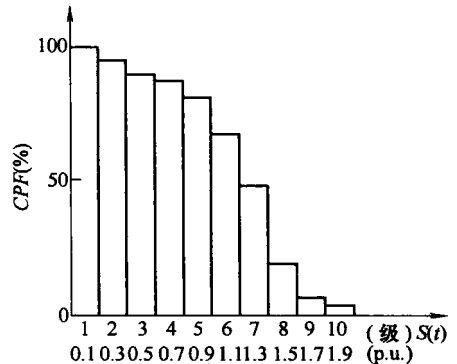


图 1-7 将  $S(t)$  分成 10 级的 CPF 曲线

设图 1-5 中的曲线为 10min 内瞬时闪变视感度  $S(t)$  的曲线，现对其进行均匀采样，共得 15000 个数据。同时将  $S(t)$  的值等分为 10 级。例如  $S(t)$  在 0 ~ 2p. u. 范围，那么每级级差为 0.2p. u.。图中给出第 7 级 (1.2 ~ 1.4p. u.) 统计计算示例。处于第 7 级的时间总和为

$$T_7 = \sum_{i=1}^5 t_i = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 = 4350\tau$$

因此第 7 级瞬时闪变视感水平所占总检测时间长度之比，即概率分布

$$P_k = p_7 = \frac{T_7}{T} \times 100\% = (4350\tau / 15000\tau) = 29\%$$

依次可计算出各级的概率分布直方图，如图 1-6 所示。

将 1-6 图中的直方图进行累积可得到图 1-7 所示的累积概率函数 (CPF)，根据 CPF 便