

# 电力系统电能质量

〔美〕 Alexander Kusko 著  
Marc T. Thompson

张一工 谭伟璞 刘晋 译  
徐永海 审

- ① IEEE 相关标准解读及阐释
- ② 电能质量问题的定位与校正
- ③ 电能质量问题的解决方案
- ④ 电能质量优化的最新研究进展



科学出版社  
www.sciencep.com

# 电力系统电能质量

〔美〕 Alexander Kusko 著  
Marc T. Thompson

张一工 谭伟璞 刘 晋 译  
徐永海 审

科学出版社

北 京

图字：01-2008-1297 号

## 内 容 简 介

本书通过众多的实例讨论电力系统电能质量问题。全书共 14 章, 主要内容包括电能质量标准、电压畸变、谐波与间谐波、电力滤波器、开关电源、不间断电源、动态电压补偿、电动机驱动设备、备用电源系统、电能质量的测量等。通过学习本书, 读者能够定位并校正电能质量问题、理解 IEEE 标准、掌握向所有用户提供优质电力所需的最新工程技术。

本书既可供对电力系统电能质量感兴趣的电气工程师和管理者阅读, 也可供高等院校相关专业的师生学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

电力系统电能质量/(美)Alexander Kusko, Marc T. Thompson 著;  
张一工, 谭伟璞, 刘晋译; 徐永海审. —北京: 科学出版社, 2009  
ISBN 978-7-03-023559-6

I. 电… II. ①A…②M…③张…④谭…⑤刘…⑥徐… III. 电力系统-  
电能-质量分析 IV. TM92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 190749 号

---

责任编辑: 刘红梅 杨 凯 / 责任制作: 董立颖 魏 谨

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

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 3 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2009 年 3 月第一次印刷 印张: 13 3/4

印数: 1—4 000 字数: 199 000

定 价: 36.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

**Alexander Kusko, Marc T. Thompson: Power Quality in Electrical Systems**

**ISBN: 0-07-147075-1**

Copyright © 2007 by the McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by Science Press and McGraw-Hill Education(Asia)Co.

本书中文简体版由科学出版社和美国麦格劳·希尔教育(亚洲)出版公司合作出版,未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

## 著 者 简 介

Alexander Kusko 博士,IEEE 终身会员,Exponent 公司副总裁,曾任麻省理工学院(MIT)助理教授,并且曾经在起草 IEEE 519-1981 标准(关于电力系统谐波控制)的委员会工作。Kusko 博士获得过多个奖项,其中包括普渡大学杰出校友奖和 IEEE William E. Newell 电力电子学奖。

Marc T. Thompson 博士,Thomposon 咨询公司总裁。该公司是一家开展电力电子、磁器件设计、模拟电路与系统等方面业务的咨询公司。Marc T. Thompson 博士是美国伍斯特理工学院电气工程兼职教授,还是哈佛(马萨诸塞)消防队的消防员。

# 前 言

本书的读者对象是对新兴的电力系统电能质量问题感兴趣的现场电气工程师和管理者。本书取材于相关的文献和作者的工程实际经验,汇集众多实例,从现实世界的角度讨论问题。

本书中的仿真计算采用 Microsim 公司的 PSPICE 8.0 评估版。

感谢 IEEE 允许我们引用 IEEE 标准中的图表。

作 者

# 目 录

<b>第 1 章 绪 论</b> .....	1
1.1 引 言 .....	2
1.2 理想电压波形 .....	3
1.3 非线性负载——整流器 .....	4
1.4 电能质量的定义 .....	6
1.4.1 劣质电能质量的例子 .....	7
1.4.2 校正的必要性 .....	8
1.5 本书的安排 .....	9
1.6 关于参考文献的说明 .....	10
参考文献 .....	11
<b>第 2 章 电能质量标准</b> .....	15
2.1 IEEE 519 标准和 IEEE 1159 标准 .....	16
2.2 ANSI C84 标准 .....	18
2.3 CBEMA 与 ITIC 曲线 .....	18
2.4 高频 EMI 标准 .....	20
2.5 小 结 .....	23
参考文献 .....	23
<b>第 3 章 电压畸变</b> .....	25
3.1 电压暂降 .....	26
3.2 电压暂升 .....	30
3.3 脉冲暂态过程 .....	31
3.4 振荡暂态过程 .....	33
3.5 供电中断 .....	35
3.6 缺 口 .....	35

目 录

3.7	电压波动与闪变	39
3.8	电压不平衡	40
3.9	小 结	41
	参考文献	42
<b>第4章</b>	<b>谐波与间谐波</b>	<b>43</b>
4.1	引 言	44
4.2	周期波形与谐波	44
4.2.1	有效值(均方根值)	47
4.2.2	直流电流	47
4.2.3	纯正弦波	48
4.2.4	方 波	48
4.2.5	直流波形+纹波	49
4.2.6	三角波纹波	49
4.2.7	脉冲波形	50
4.2.8	带有纹波的脉冲波形	51
4.2.9	三角波形	51
4.3	分量有效值与总有效值	51
4.4	总谐波畸变率	52
4.5	峰值系数	52
4.6	小 结	58
	参考文献	59
<b>第5章</b>	<b>谐波电流源</b>	<b>61</b>
5.1	引 言	62
5.2	单相整流器	62
5.3	三相整流器	67
5.3.1	6脉动整流器	67
5.3.2	12脉动整流器	69
5.4	高频荧光灯镇流器	70
5.5	变压器	70
5.6	其他产生谐波电流的装置	72

5.7 小 结 .....	72
参考文献 .....	73
<b>第 6 章 电力滤波器</b> .....	<b>75</b>
6.1 引 言 .....	76
6.2 典型电力系统 .....	76
6.3 IEEE 519-1992 标准 .....	78
6.4 进线电抗器 .....	79
6.5 并联无源滤波器 .....	82
6.6 多重滤波器 .....	86
6.7 无源滤波器中要考虑的实际问题 .....	93
6.8 有源谐波滤波器 .....	94
6.9 混合滤波器 .....	95
6.10 小 结 .....	96
参考文献 .....	96
<b>第 7 章 开关电源</b> .....	<b>99</b>
7.1 引 言 .....	100
7.2 隔离电源 .....	100
7.2.1 直-直换流器的高频开关波形及间谐波的产生 .....	103
7.2.2 针对传导电磁干扰的试验 .....	105
7.2.3 改善传导 EMI 的校正措施 .....	106
7.3 小 结 .....	107
参考文献 .....	107
<b>第 8 章 校正电能质量问题的方法</b> .....	<b>109</b>
8.1 引 言 .....	110
8.2 校正方法 .....	110
8.2.1 各种电压扰动与相应的校正方法 .....	111
8.2.2 可靠性 .....	113
8.2.3 负载设备的设计 .....	114
8.2.4 供电系统的设计 .....	116
8.2.5 电力谐波滤波器 .....	117



目 录

8.2.6	动态电压补偿器 .....	117
8.2.7	不间断电源 .....	118
8.2.8	变压器 .....	119
8.2.9	备用电力系统 .....	123
8.3	小 结 .....	123
	参考文献 .....	124
<b>第 9 章</b>	<b>不间断电源 .....</b>	<b>125</b>
9.1	引 言 .....	126
9.2	发展历史 .....	127
9.3	UPS 装置的类型 .....	129
9.3.1	商品化装置 .....	130
9.3.2	储 能 .....	133
9.3.3	蓄 电 池 .....	134
9.3.4	飞 轮 .....	135
9.3.5	燃 料 电 池 .....	137
9.3.6	超 级 电 容 .....	140
9.4	小 结 .....	140
	参考文献 .....	140
<b>第 10 章</b>	<b>动态电压补偿器 .....</b>	<b>143</b>
10.1	引 言 .....	144
10.2	工作原理 .....	144
10.2.1	按照 ITIC 曲线运行 .....	147
10.2.2	扰动的检测和控制 .....	148
10.2.3	商用设备 .....	149
10.3	小 结 .....	150
	参考文献 .....	150
<b>第 11 章</b>	<b>电能质量事件 .....</b>	<b>151</b>
11.1	引 言 .....	152
11.2	个人电脑 .....	152
11.2.1	电能质量特性 .....	154

11.2.2	运行异常类型 .....	156
11.2.3	对于电压暂降和供电中断的敏感度 .....	156
11.2.4	校正措施 .....	158
11.3	控制器 .....	158
11.4	交流接触器和继电器 .....	161
11.4.1	运 行 .....	161
11.4.2	电压扰动的影响 .....	163
11.4.3	校正方法 .....	165
11.5	小 结 .....	165
	参考文献 .....	165
<b>第 12 章</b>	<b>电动机驱动设备 .....</b>	<b>167</b>
12.1	电动机 .....	168
12.2	感应电动机 .....	168
12.2.1	运 行 .....	169
12.2.2	危 害 .....	169
12.2.3	现 象 .....	169
12.2.4	保 护 .....	170
12.3	调速驱动装置 .....	172
12.3.1	应 用 .....	172
12.3.2	电压扰动 .....	174
12.3.3	电压不平衡 .....	175
12.3.4	保护措施 .....	176
12.4	小 结 .....	181
	参考文献 .....	182
<b>第 13 章</b>	<b>备用电源系统 .....</b>	<b>183</b>
13.1	备用电源系统设计需考虑的因素 .....	184
13.2	备用电源系统的部件 .....	184
13.3	备用电源系统实例 .....	185
13.4	内燃机-发电机组 .....	189
13.4.1	标 准 .....	189

## 目 录

13.4.2	E/G 机组中的部件 .....	190
13.4.3	操 作 .....	191
13.4.4	转移开关 .....	192
13.5	小 结 .....	194
	参考文献 .....	194
<b>第 14 章</b>	<b>电能质量的测量 .....</b>	<b>195</b>
14.1	万用表 .....	196
14.2	示波器 .....	197
14.3	电流探头 .....	198
14.4	探测线圈 .....	198
14.5	电能质量表和分析仪 .....	199
14.6	电流互感器的详细分析 .....	201
14.7	小 结 .....	206
	参考文献 .....	207

## 1.1 引言

近年来,工厂企业、商业建筑以及居民的供电质量日益引起关注和重视<sup>[1~15]</sup>。这在一定程度上是大量应用产生谐波装置的结果。调速驱动装置、开关型电源、电弧炉、电子镇流器以及其他产生谐波的装置都对电力系统必须承受的谐波负担有所“贡献”<sup>[15~17]</sup>。此外,系统的正常投切操作和故障切除产生的扰动也会影响供电质量。在应对这些问题时,电力与电子工程师学会(IEEE)做了大量的工作,这些工作涉及电能质量事件的定义、检测以及减轻其影响等方面。

当今应用的多数设备都对劣质的电能质量引起的故障或供电中断比较敏感<sup>[28]</sup>。每个使用计算机的人都经历过计算机的非正常停机和重启,从而使工作前功尽弃。通常这是由于120V供电线路的劣质的电能质量引起的。在后面的章节中我们还将看到,劣质的电能质量还影响工厂、办公室的电力设备和其他设备的效率和正常运行。

一些卫生组织对杂散磁场和电场的研究比较感兴趣,并制定了针对杂散磁场和电场的指导方针。由于电流产生磁场,因此通过减小线路导体中的谐波电流可减弱交流磁场。

电力线路上的谐波污染程度可通过总谐波畸变率<sup>1)</sup>(THD: Total Harmonic Distortion)来定量衡量。高谐波畸变率会对公共配电网带来负面的影响,可能引起电机的额外发热,从而导致电机提早失效。在导线的绝缘中也会产生额外发热,从而导致绝缘破坏和失效。运行温升的增加在其他设备中也会出现,导致设备发生故障和提早失效。此外,供电线路上的谐波可能导致计算机重启,并会对敏感的模拟电路产生不利的影响<sup>[32]</sup>。

电能质量问题日益引起人们的研究兴趣,归纳原因如下:

- ① 计量。劣质的电能质量可能影响电力计量的精度。
- ② 继电保护。劣质的电能质量可能引起继电保护功能失灵。
- ③ 停机。劣质的电能质量可能引起设备停机和/或损坏,导致生产率下降。
- ④ 费用。劣质的电能质量可能由于上述种种问题导致费用增加。

---

1) THD及其他电能质量指标将在第4章中讨论。

⑤电磁兼容性。劣质的电能质量可能引起电磁兼容性问题<sup>[33~39]</sup>和噪声问题。

## 1.2 理想电压波形

电源向负载供电的理想电能质量可表示为图 1.1 所示的单相电压波形和图 1.2 所示的三相电压波形。电压的幅值、频率以及波形的任何畸变都应在规定的限制范围内。

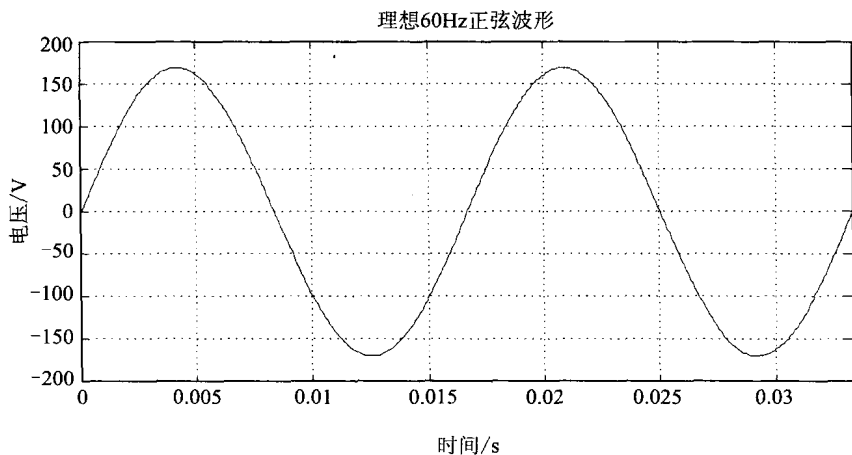


图 1.1 理想单相电压波形(峰值为+170V,有效值为120V,频率为60Hz)

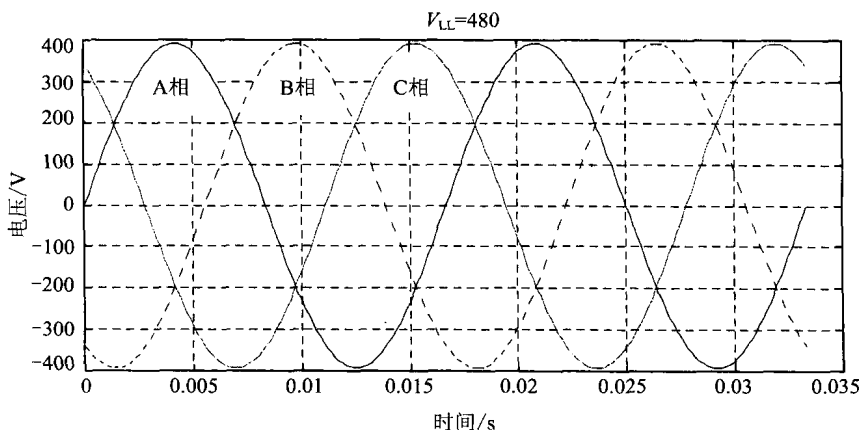


图 1.2 理想三相电压波形(频率60Hz,线电压有效值480V。图中为各相相电压波形<sup>1)</sup>)

1) 线电压有效值为480V;相电压为 $480/\sqrt{3}\approx 277\text{V}$ 。因此,相电压的峰值为 $277\text{V}\times\sqrt{2}\approx 392\text{V}$ 。

当如图 1.1 和图 1.2 所示的电压加在电气负载上时,负载电流所具有的频率和幅值取决于负载的阻抗或其他特性。如果负载电流波形仍然是正弦波,则称负载是“线性”的。如果负载电流发生了畸变,则称负载是“非线性”的。畸变波形的负载电流可能导致供电系统电压的畸变,这正是劣质电能质量的特征。

### 1.3 非线性负载——整流器

作为将交流电变换为直流电的设备,整流器是电力系统中最常见的非线性装置。整流器的容量从个人电脑中的数百瓦量级到大型调速设备中的数万千瓦量级。三相桥式整流器的电原理图如图 1.3(a)所示。理想情况下 6 个二极管中的每个二极管在  $360^\circ$  周期中导通  $120^\circ$ 。对应于理想电感负载的情形,负载表示为一个电流源,从而保持负载电流为一固定值  $I_L$ 。三相电压源的波形如图 1.2 所示。整流器相电流波形如图 1.3(b)所示。与正弦波形相比,电流波形是严重畸变的,这有可能导致供电系统电压波形的畸变。

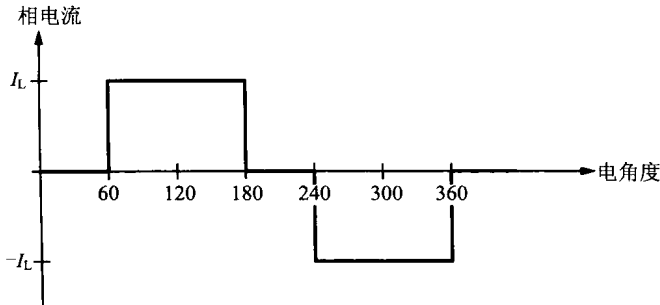
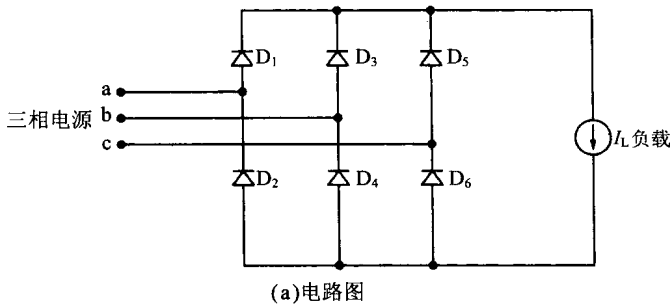


图 1.3 三相桥式整流器

在第4章中我们将会讨论整流器的方波负载电流可以用傅里叶级数描述为一系列谐波电流的集合。在三相整流器(通常称为6脉动整流器)场合,各分量分别为基波分量、5次、7次、11次、13次(以及更高次数)的谐波分量。3的倍数次谐波被消去了<sup>1)</sup>。在电能质量分析过程中,各谐波电流可以分别处理。

IEEE<sup>2)</sup> 519标准(IEEE Std. 519-1992)制定于1981年(1992年修订),给出了在电力系统中进行谐波控制的推荐实施准则<sup>[21]</sup>。IEEE还颁布了IEEE 1159标准(IEEE Std. 1159-1995),这个标准给出了测量和监控电能质量的推荐方法<sup>[23]</sup>。

随着时间的推移,越来越多的产生谐波的设备进入电力系统;另一方面,越来越多的对于谐波敏感、可能导致功能失灵的設備被应用。电脑、通信设备以及其他设备都可能由于谐波的影响而运行不正常或降低效率。

例如,在电动机中,谐波电流会引起铁心和绕组中的交流损耗,这会导致铁心发热、绕组发热、力矩脉动,并使得电动机的效率降低<sup>3)</sup>。谐波还会造成电动机及变压器<sup>4)</sup>的可听噪声增大,并可能激发电动机及其负载的机械振动。

谐波电压和电流还可能引起接地故障断路器(GFCI; Ground Fault Circuit Interrupter)的误动,GFCI在住宅中普遍采用,用来在局部范围内保护用电设备。GFCI的误动是令终端用户讨厌的事情。

谐波会影响仪器仪表、继电保护的准确度,可能导致断路器的误动。谐波还可能影响电力计量,产生或正或负的误差。

高频开关电路,如开关电源、功率因数校正器以及调速驱动装置,会产生非工频整倍数的高频谐波分量。例如,工作频率为75kHz的开关电源产生的谐波为开关频率75kHz的整倍数,如图1.4所示。这种频率的谐波通常称为“间谐波”,以区别于频率为工频整倍数的谐波。另一些国际性的标准规定了允许注入电力系统的谐波噪声的量值。IEC-1000-2-1<sup>[40]</sup>对间谐波所作的定义如下:

- 
- 1) 3倍频为3、9等次数的谐波。
  - 2) 电气与电子工程师学会。
  - 3) 铜线绕组中的损耗是由于集肤效应。铁心中的损耗是由于涡流和“磁滞”损耗。
  - 4) IEEE C57.12.00-1987标准推荐,对于变压器而言,电流畸变因数应小于5%。

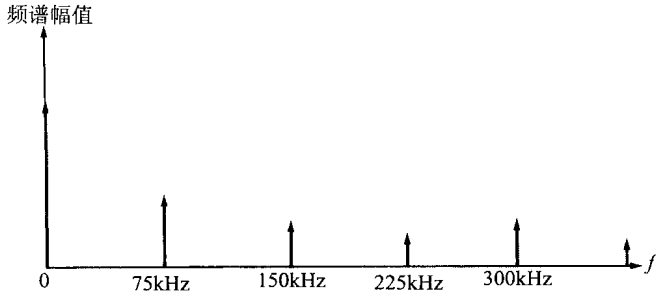


图 1.4 开关频率为 75kHz 的开关电源产生的典型的间谐波频谱(间谐波频率为 75kHz 的整数倍)

在对应于工频电压和电流的谐波频率之间,还可观测到非基波频率整数倍的其他谐波,可能表现为离散频率或宽频带的频谱。

其他可能的间谐波源包括周波变换器、电弧炉及其他与电力系统频率非同步工作的负载<sup>[41]</sup>。

高频谐波分量可能与附近电子装置相互影响,并加剧电磁干扰(EMI)。医用电子设备对于 EMI 特别敏感,这是因为它所测量的信号特别微弱。电话的传输也会受到 EMI 感应噪声的影响。

近年来,对于净化供电电力的重视导致了一个新的研究领域的诞生:电能质量。

## 1.4 电能质量的定义

电能质量的不严格的定义为:以电子系统的供电和接地作为研究对象,以保证对于该系统供电的完善。IEEE 1159<sup>1)</sup>标准中对电能质量的定义为<sup>[23]</sup>:

涉及敏感设备供电和接地的方法的概念,这种方法有利于敏感设备的运行。

在 IEEE 标准术语权威词典(IEEE 100)中,电能质量的定义为(参见文献[42],第 855 页):

涉及电子设备供电和接地方法的概念,这种方法有利于电子设备的运行,并使其兼容于供电系统及其连接的其他设备。

1) IEEE 1159-1995 标准,3.1.47 节,第 5 页。



同样, *Standard Handbook of Electrical Engineers* 第 14 版(2000)给出如下论述(参见文献[43],第 18~117 页):

优质的电能质量是难于定义的,这是因为对于电冰箱电机为优质的电能质量,未必足以满足当今的个人电脑或其他敏感负载对电能质量的要求。例如,短暂(瞬间)停电对于电机、照明是无关紧要的,但可能会引起数字电子钟、磁带录像机的明显干扰。

### 1.4.1 劣质电能质量的例子

劣质电能质量通常在电能质量定义的“供电”部分中确定,定义为电压波形偏离于如图 1.1 所示的理想波形的状况。一组典型的扰动波形如图 1.5 所示,这些波形包括实测的、计算的和实验设备产生的波形。

以下为劣质电能质量的例子以及对于劣质电能质量“事件”的描述,在叙述中,我们将按照 IEEE 的定义解释。

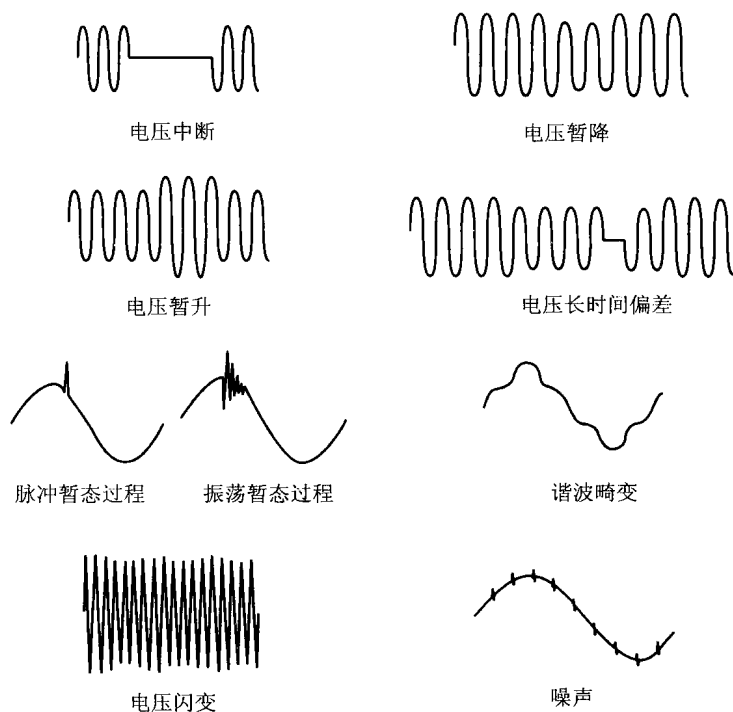


图 1.5 典型的电力扰动<sup>[2]</sup>(©1997 IEEE,经允许引用)