

ICS 029.020

K 04

备案号: 44902-2014

NB

中华人民共和国能源行业标准

NB / T 41004 — 2014

电能质量现象分类

Power quality phenomenon classification

2014-03-18 发布

2014-08-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语与定义 1

4 电能质量现象 3

 4.1 电能质量特征 3

 4.2 电能质量现象及分类 3

5 电能质量问题相关参考资料 11

附录 A（资料性附录） 电能质量现象与基本电磁扰动现象 12

附录 B（资料性附录） 电能质量问题对设备的影响 13

附录 C（资料性附录） 基本电力/电气设备电能质量现象及其产生原因解释 16

附录 D（资料性附录） 部分行业电能质量现象及其产生原因解释 19

附录 E（资料性附录） 几种典型的电能质量控制设备及控制技术 23

附录 F（资料性附录） 电能质量与能源节约以及资源综合利用 26

参考文献 28

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准的某些内容可能涉及专利。本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准附录 A、附录 B、附录 C、附录 D、附录 E 和附录 F 为资料性附录。

本标准由全国电压电流等级和频率标准化技术委员会提出并归口管理。

本标准主要起草单位：四川大学、武汉国测科技股份有限公司、中机生产力促进中心、中国南方电网超高压输电公司检修试验中心、株洲变流技术国家工程研究中心有限公司、中铁上海设计院集团有限公司、北京交通大学、西安联诚电力工程有限公司、西安博宇电气有限公司、福禄克公司、山东大学。

本标准参加起草单位：北京英博电气股份有限公司、济南磁能科技有限公司、山西省电力公司电力科学研究院、中铁第一勘察设计院集团有限公司。

本标准主要起草人：杨洪耕、卜正良、张苹、肖遥、周方圆、罗利平、吴命利、焦莉、刘军成、何学农、刘淑琴。

本标准参加起草人：马丰民、李德广、王金浩、宫衍圣。

电能质量现象分类

1 范围

本标准描述了电力系统及其连接设备的电能质量现象，并给出了分类。
本标准适用于标称频率为 50Hz 的电力系统。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 12325—2008	电能质量	供电电压偏差
GB/T 12326—2008	电能质量	电压波动和闪变
GB/T 14549—1993	电能质量	公用电网谐波
GB/T 15543—2008	电能质量	三相电压不平衡
GB/T 15945—2008	电能质量	电力系统频率偏差
GB/T 24337—2009	电能质量	公用电网间谐波

3 术语与定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

电能质量 power quality

关系到供用电设备正常工作（或运行）的频率、电压、电流的状态值偏离理想值的程度。

3.2

公共连接点 point of common coupling (PCC)

电力系统中一个以上用户的连接处。

[GB/T 15543—2008，定义 3.6]

3.3

电压偏差 voltage deviation

实际运行电压对系统标称电压的偏差相对值，以百分数表示。

[GB/T 12325—2008，定义 3.4]

3.4

频率偏差 frequency deviation

系统频率的实际值和标称值之差。

[GB/T 15945—2008，定义 2.2]

3.5

基波（分量） fundamental (component)

对周期性交流量进行傅里叶级数分解，得到的频率与工频相同的分量。

[GB/T 14549—1993，定义 3.3]

3.6

谐波（分量） harmonic (component)

对周期性交流量进行傅里叶级数分解，得到频率为基波频率大于 1 的整数倍的分量。

[GB/T 14549—1993, 定义 3.4]

3.7

间谐波 (分量) inter-harmonic (component)

对周期性交流分量进行傅里叶级数分解, 得到频率不等于基波频率整数倍的分量。

[GB/T 24337—2009, 定义 3.6]

3.8

波形畸变 waveform distortion

稳态偏离理想工频正弦波形, 其特征采用频谱分布来表示。主要有直流偏置、谐波、间谐波、陷波和噪声五种基本形式。

3.9

不平衡度 unbalance factor

不平衡度指三相电力系统中三相不平衡的程度, 用电压、电流负序基波分量或零序基波分量与正序基波分量的方均根值百分比表示。

[GB/T 15543—2008, 定义 3.2]

3.10

电压变动 relative voltage change

电压方均根值曲线上相邻两个极值电压之差, 以系统标称电压的百分数表示。

[GB/T 12326—2008, 定义 3.5]

3.11

电压波动 voltage fluctuation

d

电压方均根值 (有效值) 一系列的变动或连续的改变。

[GB/T 12326—2008, 定义 3.3]

3.12

闪变 flicker

灯光照度不稳定造成的视感。

[GB/T 12326—2008, 定义 3.7]

3.13

短时间闪变值 short term severity

P_{st}

衡量短时间 (若干分钟) 内闪变强弱的一个统计量值, 短时闪变的基本记录周期是 10min。

[GB/T 12326—2008, 定义 3.8]

3.14

长时间闪变值 long term severity

P_{lt}

由短时间闪变值 P_{st} 推算出, 反映长时间 (若干小时) 闪变强弱的量值, 长时闪变的基本记录周期是 2h。

[GB/T 12326—2008, 定义 3.9]

3.15

电压暂降 voltage dip (sag)

电力系统中某点工频电压方均根值突然降低至 0.1p.u.~0.9p.u., 并在短暂持续 10ms~1min 后恢复正常的现象。

3.16

电压暂升 **voltage swell**

电力系统中某点工频电压方均根值暂时升高至 1.1p.u.~1.8p.u., 并在短暂持续 10ms~1min 后恢复正常的现象。

3.17

短时中断 **short interruption**

电力系统中某点工频电压方均根值突然降低到 0.1p.u.以下, 并在短暂持续 10ms~1min 后恢复正常的现象。

3.18

中性点接地 **neutral-point earthing**

三相交流电力系统中性点与大地之间的电气连接, 称为电网中性点接地。一般而言, 电网中性点接地方式也就是变电站中变压器的各级电压中性点接地方式。

3.19

直流偏置 **DC offset**

交流电力系统中存在直流电流或电压成分的现象称为直流偏置。

4 电能质量现象

4.1 电能质量特征

电能质量现象涉及频率偏差、电压偏差、电压波动与闪变、三相电压不平衡、波形畸变、电磁暂态、电压暂降、电压暂升、短时中断等。

衡量电能质量的主要指标是电压。电能质量标准主要围绕电压制定。

电能质量主要特征表现为:

- 频率: 工频频率变化, 以及出现除工频以外的其他频率分量。
- 幅值: 相对于标称值的偏差。如电压偏差、电压波动与闪变、三相电压不平衡、暂时或瞬态过电压、电压暂升或暂降。
- 波形: 波形畸变。如直流偏置、谐波、间谐波、电压缺口和噪声。
- 持续时间: 瞬态、暂态、短时间和长时间。

4.2 电能质量现象及分类

4.2.1 电能质量现象的分类和特性参数

表 1 给出了涉及电能质量的电磁现象的典型特征量, 从典型频谱、持续时间和典型值对电能质量进行量化分类。

表 1 涉及电能质量的电磁现象的分类和特性参数

分 类	典型频谱	典型持续时间	典型值
1 瞬态现象			
1.1 冲击			
1.1.1 纳秒级	5ns 上升	<50ns	
1.1.2 微秒级	1μs 上升	50ns~1ms	
1.1.3 毫秒级	0.1ms 上升	>1ms	
1.2 振荡			
1.2.1 低频	<5kHz	0.3ms~50ms	0~4p.u.
1.2.2 中频	5kHz~500kHz	20μs	0~8p.u.
1.2.3 高频	0.5MHz~5MHz	5μs	0~4p.u.

表 1（续）

分 类	典型频谱	典型持续时间	典型值
2 短时间方均根（有效值）变化			
2.1 瞬时（Instaneous）			
2.1.1 暂降		0.5 周波～30 周波	0.1p.u.～0.9p.u.
2.1.2 暂升		0.5 周波～30 周波	1.1p.u.～1.8p.u.
2.2 暂时（Momentary）			
2.2.1 中断		0.5 周波～3s	<0.1p.u.
2.2.2 暂降		30 周波～3s	0.1p.u.～0.9p.u.
2.2.3 暂升		30 周波～3s	1.1p.u.～1.4p.u.
2.3 短时（Temporary）			
2.3.1 中断		>3s～1min	<0.1p.u.
2.3.2 暂降		>3s～1min	0.1p.u.～0.9p.u.
2.3.3 暂升		>3s～1min	1.1p.u.～1.2p.u.
3 长时间方均根值变化			
3.1 持续中断		>1min	<0.1p.u.
3.2 低电压		>1min	0.8p.u.～0.9p.u.
3.3 过电压		>1min	1.1p.u.～1.2p.u.
3.4 电流过载		>1min	
4 不平衡			
4.1 电压		稳态	0.5%～2%
4.2 电流		稳态	1.0%～30%
5 波形畸变			
5.1 直流偏置		稳态	0～0.1%
5.2 谐波	0～9kHz	稳态	0～20%
5.3 间谐波	0～9kHz	稳态	0～2%
5.4 电压缺口		稳态	
5.5 噪声	宽带	稳态	0～1%
6 电压波动	<25Hz	间断的	0.1%～7% 0.2P _{st} ～2P _{st}
7 频率偏差		<10s	±0.10Hz

4.2.2 瞬态

4.2.2.1 概述

瞬态可分为两类：冲击和振荡。

4.2.2.2 冲击

电压或者电流的短暂突变。冲击主要由幅值、上升时间和下降时间（衰减时间）来描述。

雷电是导致电力系统冲击电压、冲击电流的常见原因之一。标准雷电波冲击电压波形如图 1 所示。 $T_1=1.2\mu\text{s}$ 和 $T_2=50\mu\text{s}$ 是指波前时间和半峰时间，表示为 1.2/50。图 2 给出雷电引起的一种典型冲击电流。由于频率高，冲击暂态能量通过电路中电阻快速衰减。

冲击能激发电力系统产生共振和振荡瞬态。同一类设备在不同位置的瞬态特性有显著差异。冲击电压可能导致电力设备的绝缘损坏。

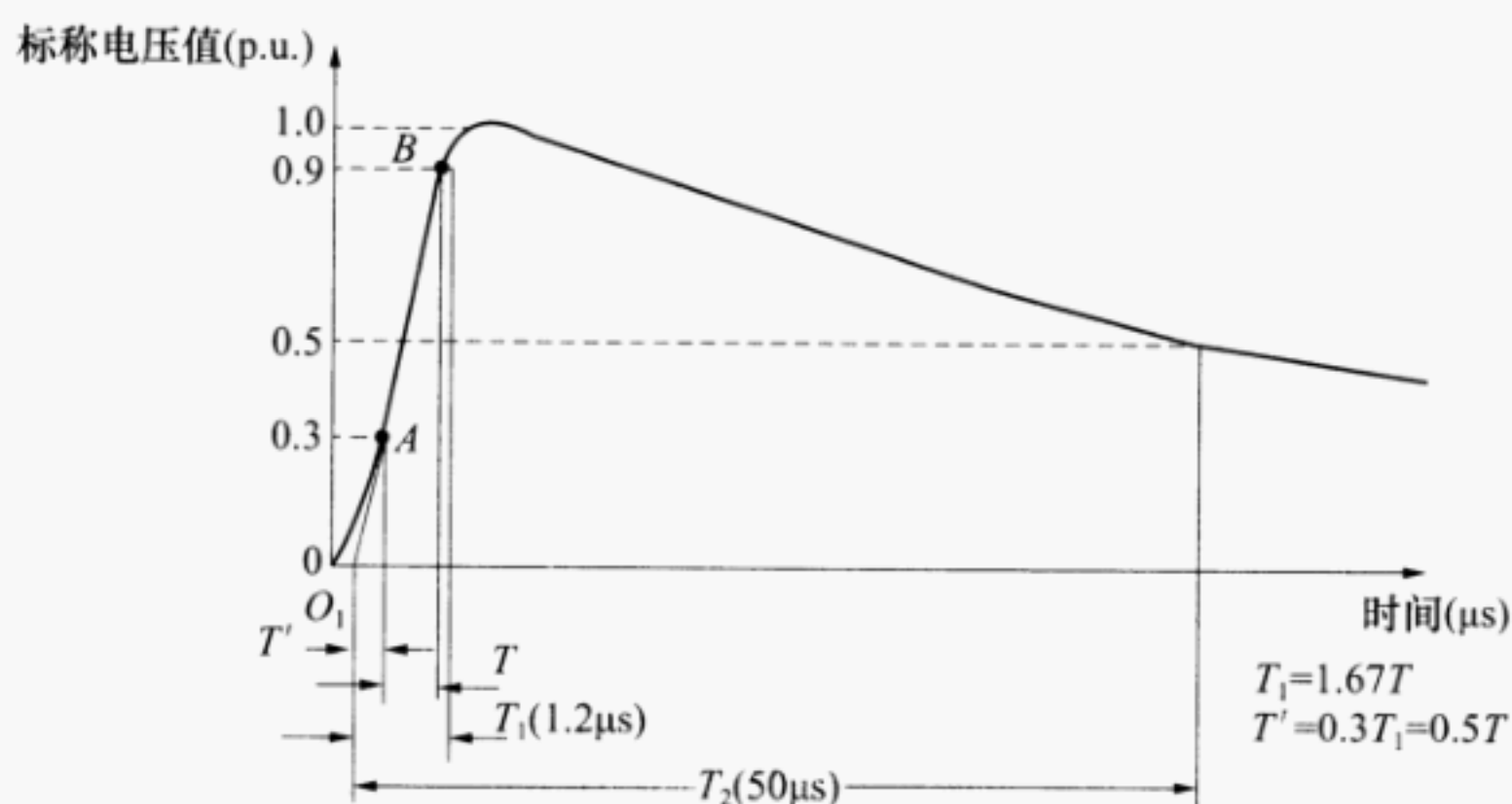


图1 标准雷电波冲击电压波形

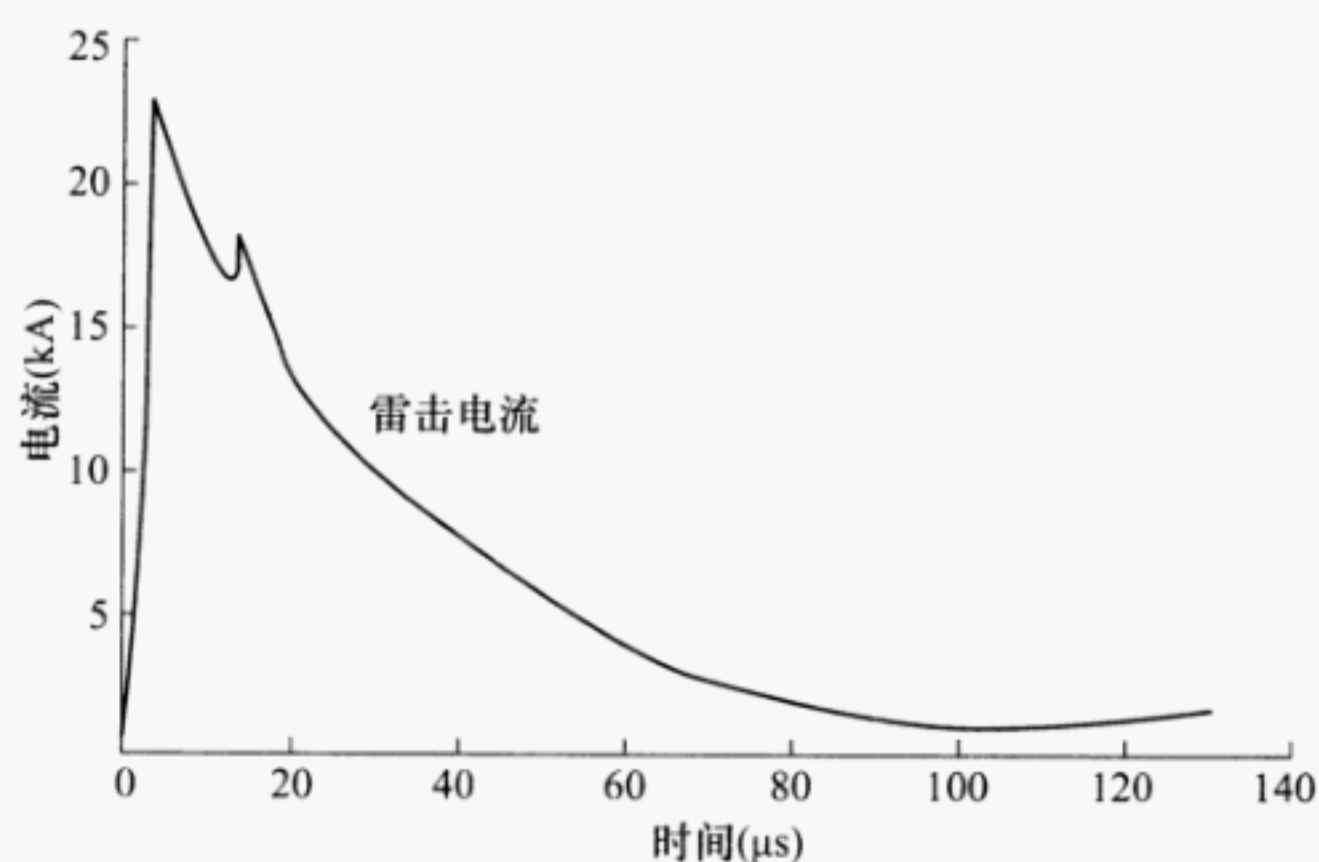


图2 雷击引起的电力系统冲击电流

4.2.2.3 振荡

振荡瞬态是电压或电流在稳态条件下突然发生的非工频的正极性和负极性变化。这种瞬时值和极性的迅速变化通过幅值、持续时间和频谱分量（主要频率）来描述。电力系统的各种振荡瞬态现象可分为高频、中频和低频频谱区段。

与冲击瞬态一样，振荡瞬态可能含有（或不含有）基频分量。表征瞬态时，表明是否含有基频分量很重要。

持续时间大于 $1\mu\text{s}$ 、频率大于 500kHz 的振荡瞬态称为高频振荡瞬态。这些瞬态几乎总是由于某些开关投切引起的。高频振荡瞬态通常是局部电力系统对某个冲击的响应结果。

持续时间大于 $10\mu\text{s}$ 、频率为 $5\text{kHz}\sim 500\text{kHz}$ 的振荡瞬态称为中频振荡瞬态。在一组或多组电容器组已经运行时又投入一组电容器，新投入电容器中会产生高于 10kHz 的瞬态扰动电流，合闸涌流远比单组独立投入时严重。图3说明这种条件下新投入电容器组产生的瞬态电流响应。电力电缆投切产生的瞬态扰动电流频率与电容器投入相同。中频瞬态是电力系统对某个冲击的响应结果。

由于换流桥换相和 RLC 电路作用，电力电子装置会产生振荡瞬态电压。这时振荡瞬态可在数千赫兹范围内，持续几个工频周期，每周期重复若干次（取决于装置的触发次数），幅值高达工频幅值的 10%。

主频率成分小于 5kHz 且持续时间 $0.3\text{ms}\sim 50\text{ms}$ 的振荡称为低频振荡。这种低频振荡现象经常出现在输配电系统，可由多种类型的事件引起。例如，电容器组接入会导致频率为 250kHz 和 750kHz 的振荡电压。振荡电压的峰值通常是 $1.3\text{p.u.}\sim 1.5\text{p.u.}$ ，最高时可以接近 2.0p.u. ；根据系统阻尼情况，持续时间在 0.5 周波 \sim 3 周波之间，如图4所示。

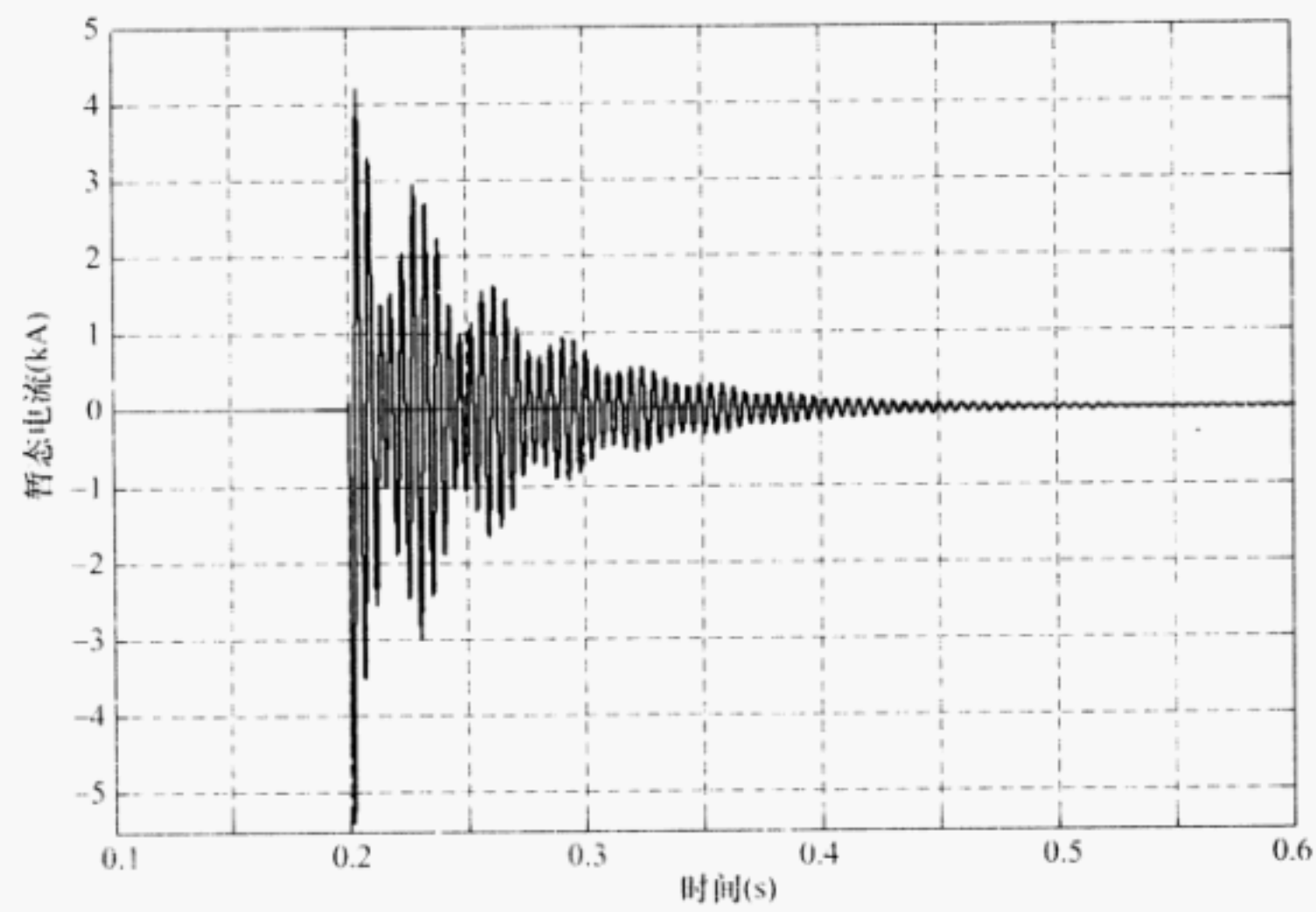


图 3 电容器组接入引起的低频振荡

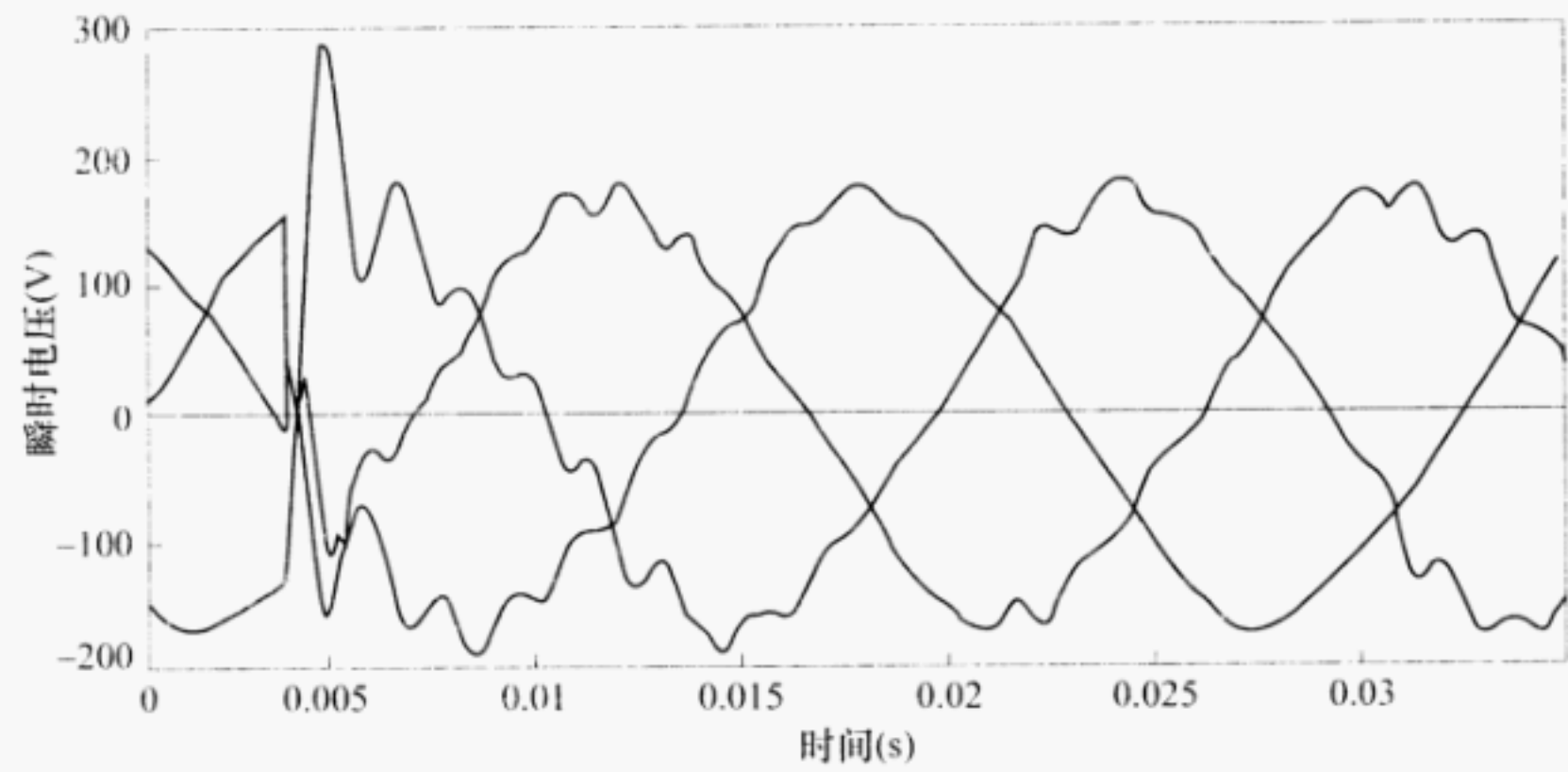


图 4 电容器组接入引起的低频振荡瞬态

频率低于 250Hz 的振荡瞬态也会出现在配电系统中，主要是接入变压器的铁磁谐振引起（见图 5）。电容器组投入造成的瞬态过程也属于这一类。系统共振引起的变压器浪涌电流的低频分量会产生低频瞬态振荡（例如二次和三次谐波）。

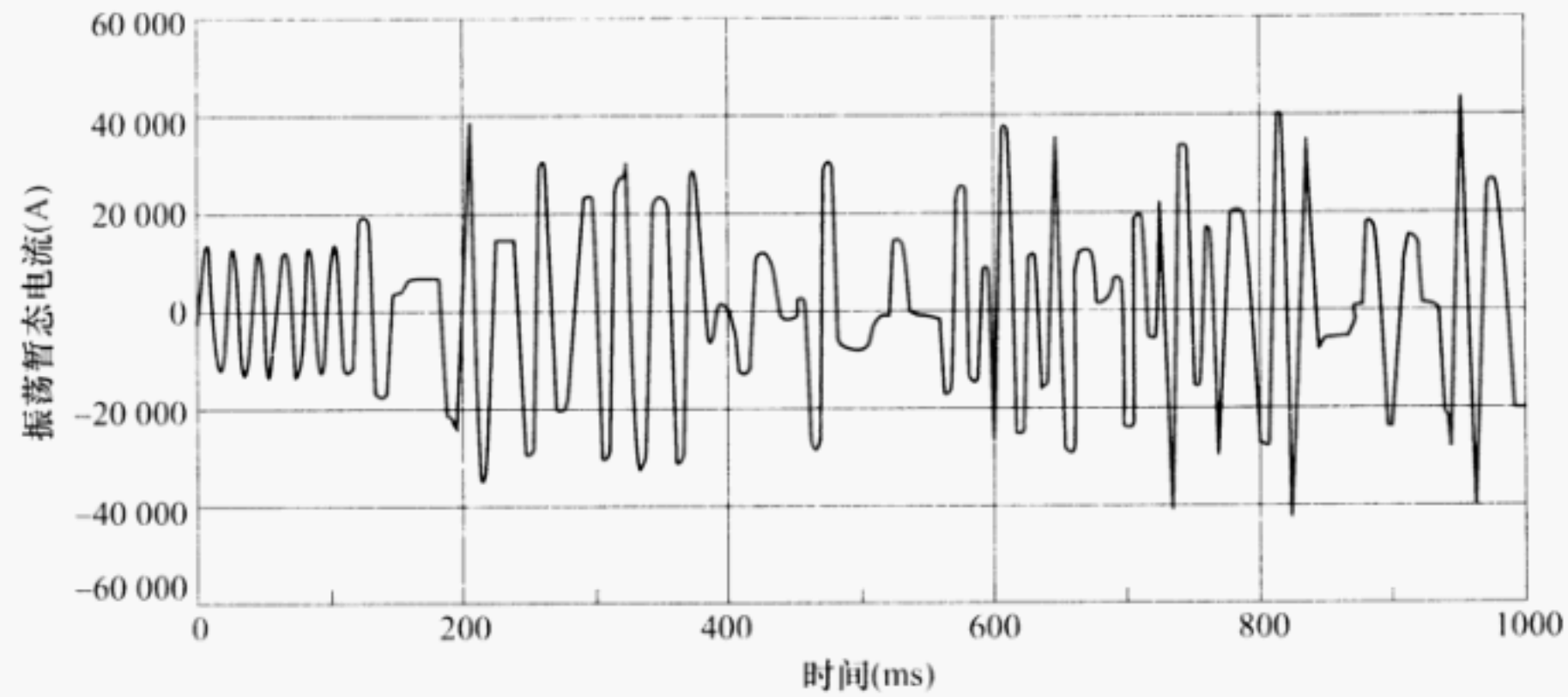


图 5 空载变压器铁磁谐振引起的低频振荡瞬态

4.2.3 短时间方均根值变化

4.2.3.1 概述

短时间方均根值变化包括电压暂降、电压暂升和短时中断。从时间上又划分为瞬时变化、暂时变化

和短时变化，如表 1 所示。

短时间电压变化往往是由故障或大负荷启停引起的。根据故障类型和系统状态，故障可引起暂时性的电压升高（暂升）、电压跌落（暂降）或电压完全丧失（中断）。短时间电压变化还包括电流幅值与持续时间上的变化。

4.2.3.2 短时中断

电力系统故障、设备故障、控制失灵均会引起短时中断。短时中断是根据电压方均根值小于标称值的 10%的持续时间来衡量的。系统故障持续时间由保护装置动作时间或特殊事件过程时间决定。设备故障的中断持续时间是不同的。

图 6 显示了一个电压下降到零且持续时间约 1.8s 的短时中断，图 6 a) 描述了整个事件中电压方均根值的变化，图 6 b) 跟踪事件开始阶段的瞬时电压。从图 6 中看出，短时中断开始时的瞬时电压波形不是立即下降到零，其残余电压是由异步电动机线路中断后的感应电动势引起的。

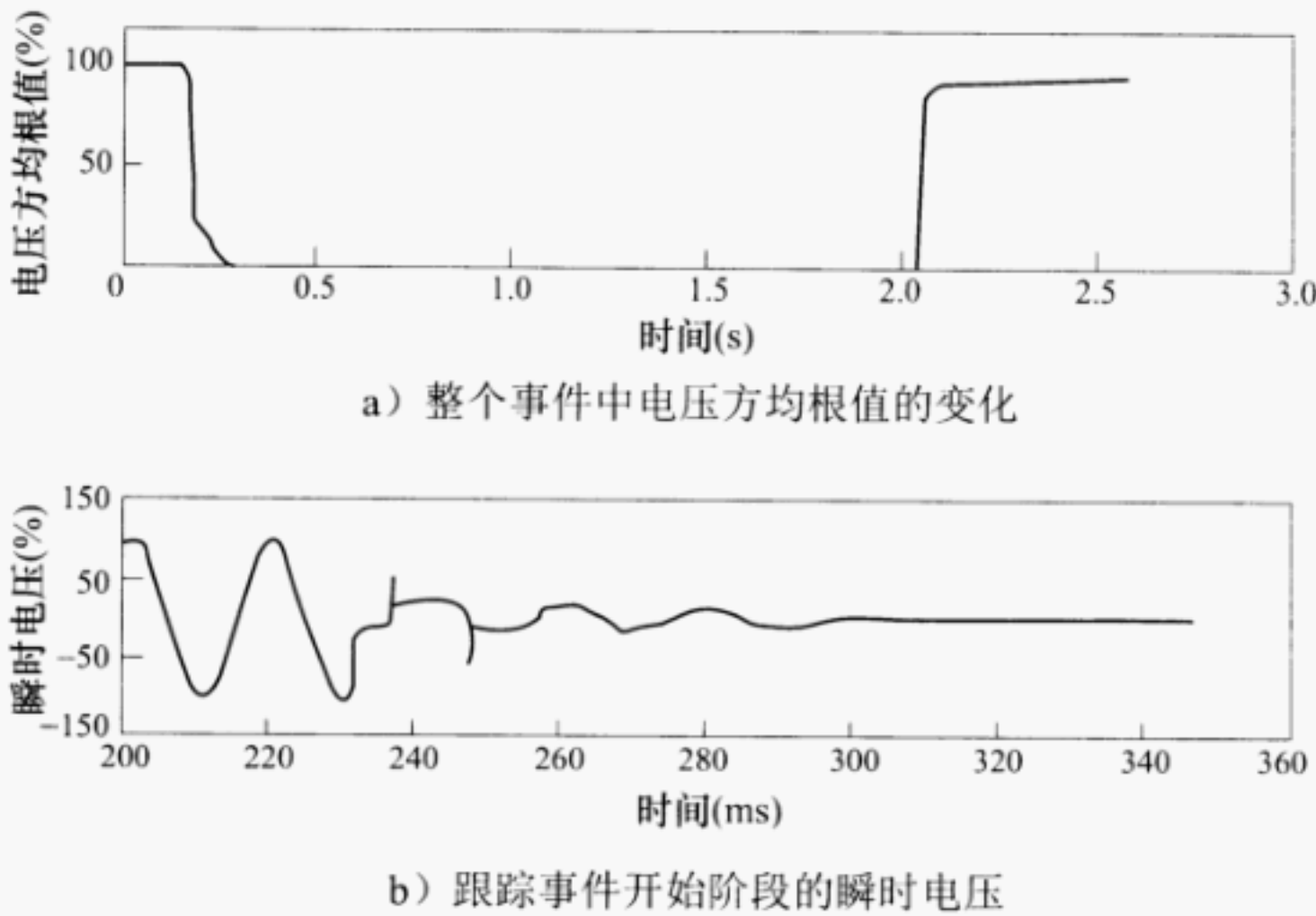


图 6 故障和重合闸操作引起的瞬时中断

4.2.3.3 电压暂降

电压暂降通常与系统故障有关，也可以由大容量感应电动机启动或变压器空载激磁等原因产生。图 7 显示了单相接地故障（SLG）的保护装置动作产生的典型电压暂降。典型故障的清除时间范围是 3 周波~30 周波，由保护类型和断路器动作特性决定。

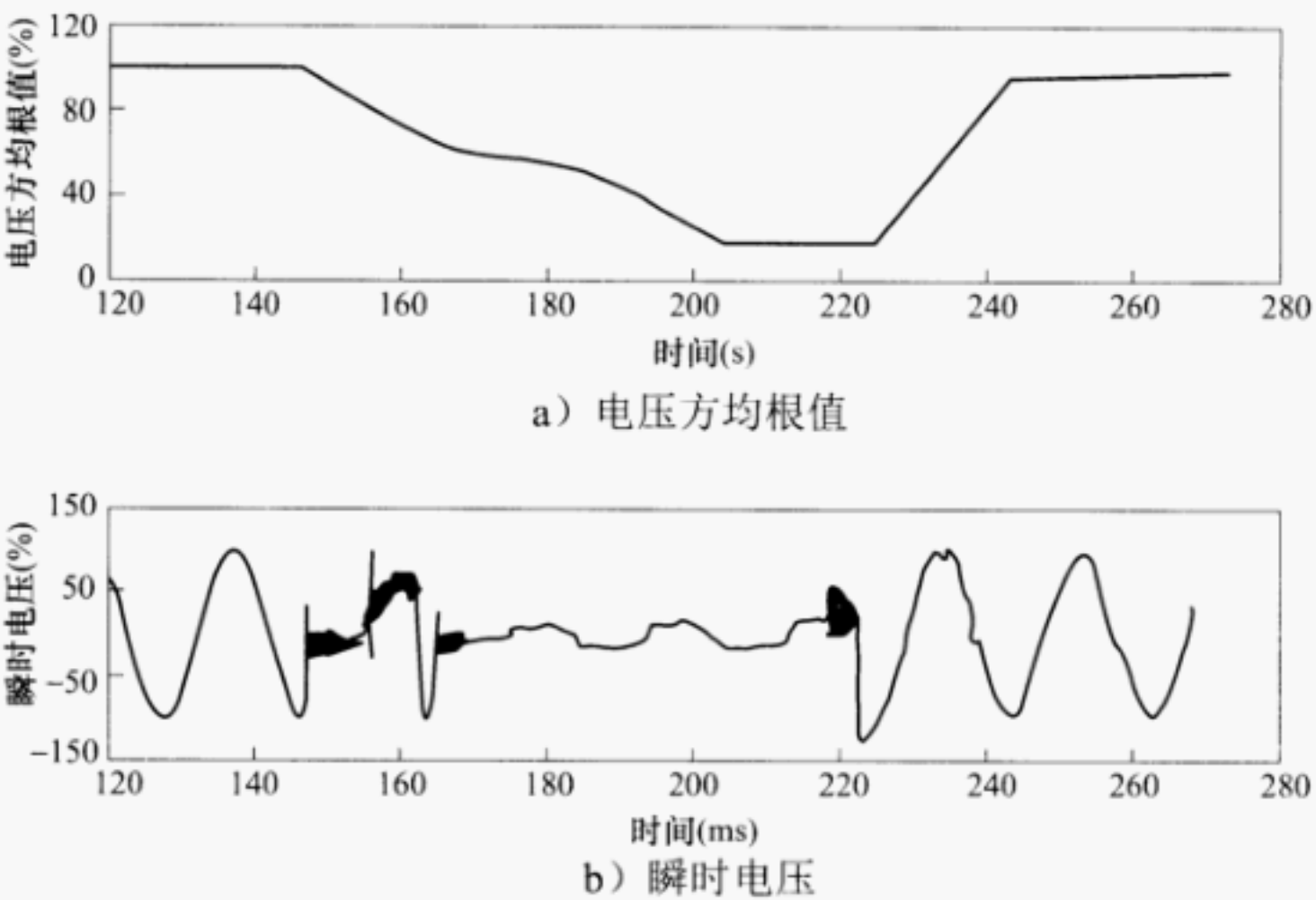


图 7 单相接地故障引起的瞬时电压暂降

大容量感应电动机启动会引起电压暂降。电动机启动时会产生 6 倍~10 倍的额定电流。这个大电流通过系统阻抗引起电压下降。图 8 显示了大型电动机启动时的电压过渡过程。

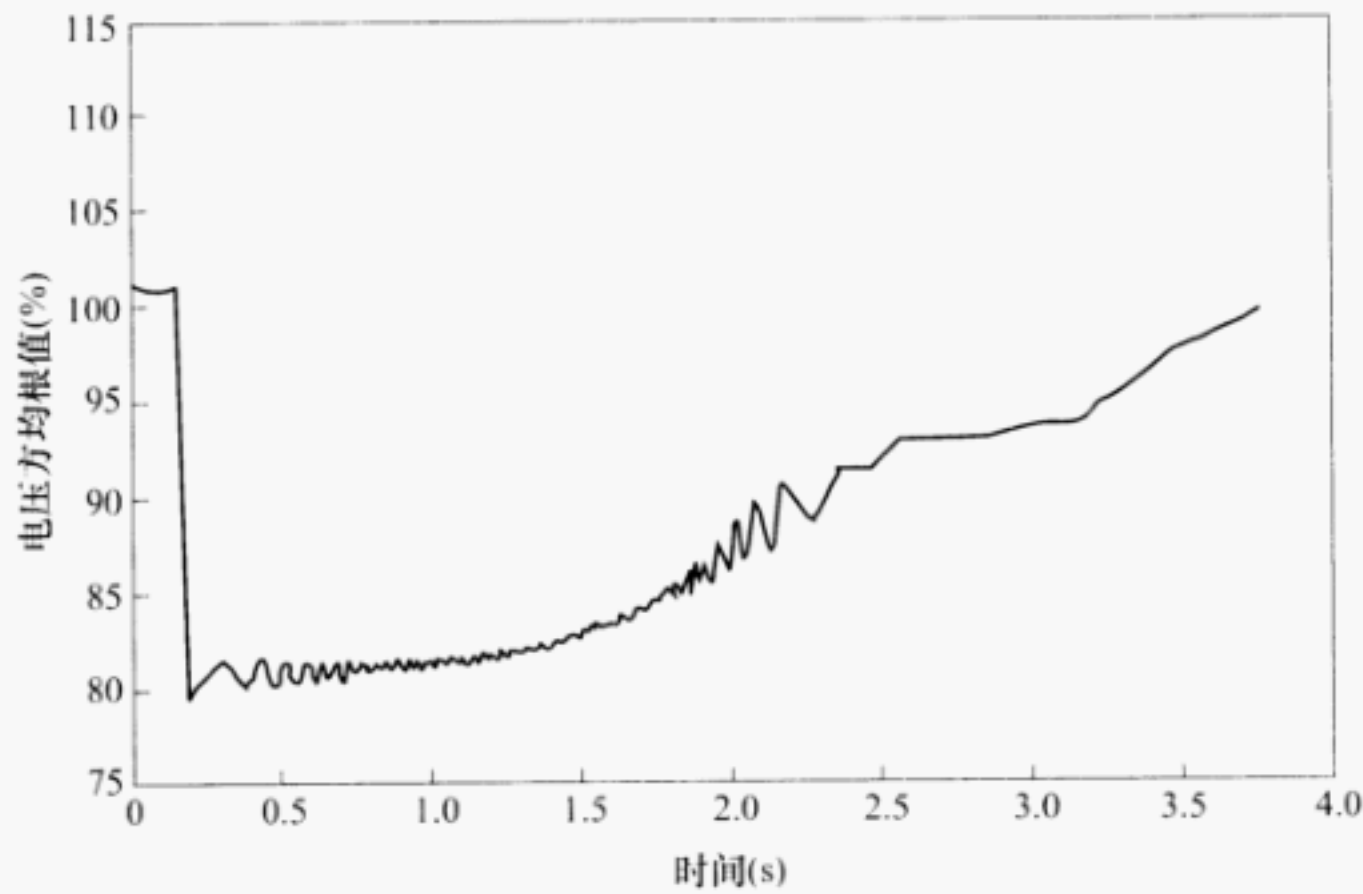


图 8 电动机启动引起的瞬时电压暂降

变压器空载接入电网时，由于变压器磁通饱和以及剩磁的作用，可能出现很大的冲击电流，造成电压暂降。变压器激磁涌流引起的瞬时电压暂降如图 9 所示。

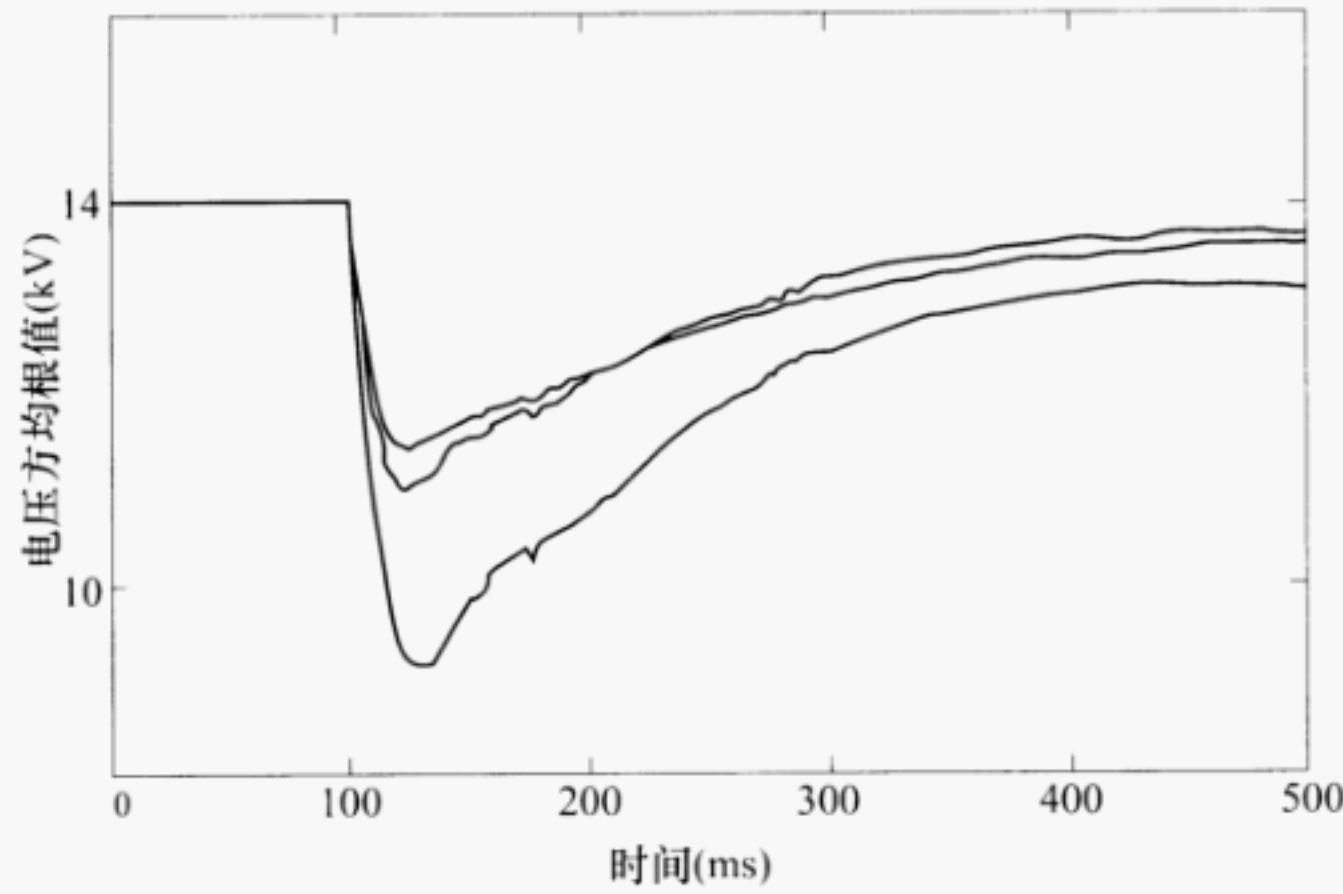


图 9 变压器激磁涌流引起的瞬时电压暂降

4.2.3.4 电压暂升

与电压暂降一样，电压暂升通常也与系统故障情况有关，但发生概率远远低于电压暂降。中性点不接地电力系统发生单相接地故障（SLG）时会导致非故障相电压升高。大容量负荷退出、甩负荷或大容量电容器组投入等事件也会造成暂升。图 10 显示了单相接地故障引起的非故障相的电压暂升。

电压暂升是由电压方均根值和持续时间来描述的。在故障情况下，电压暂升的严重程度是由故障点、系统阻抗大小决定的。在中性点不接地时，单相金属性接地故障的非故障相线对地电压将是 1.73p.u.。在变电站附近且中性点接地良好的电力系统中，非故障相电压不会升高，因为中性点提供了一个低阻抗零序故障电流路径。

4.2.4 长时间方均根值变化

4.2.4.1 概述

长时间的变化是指电压方均根值偏差超过 1min，如过电压或低电压。过电压和低电压是由系统运行方式和负荷变化造成的，其特征可描述为电压方均根值随时间的变化。

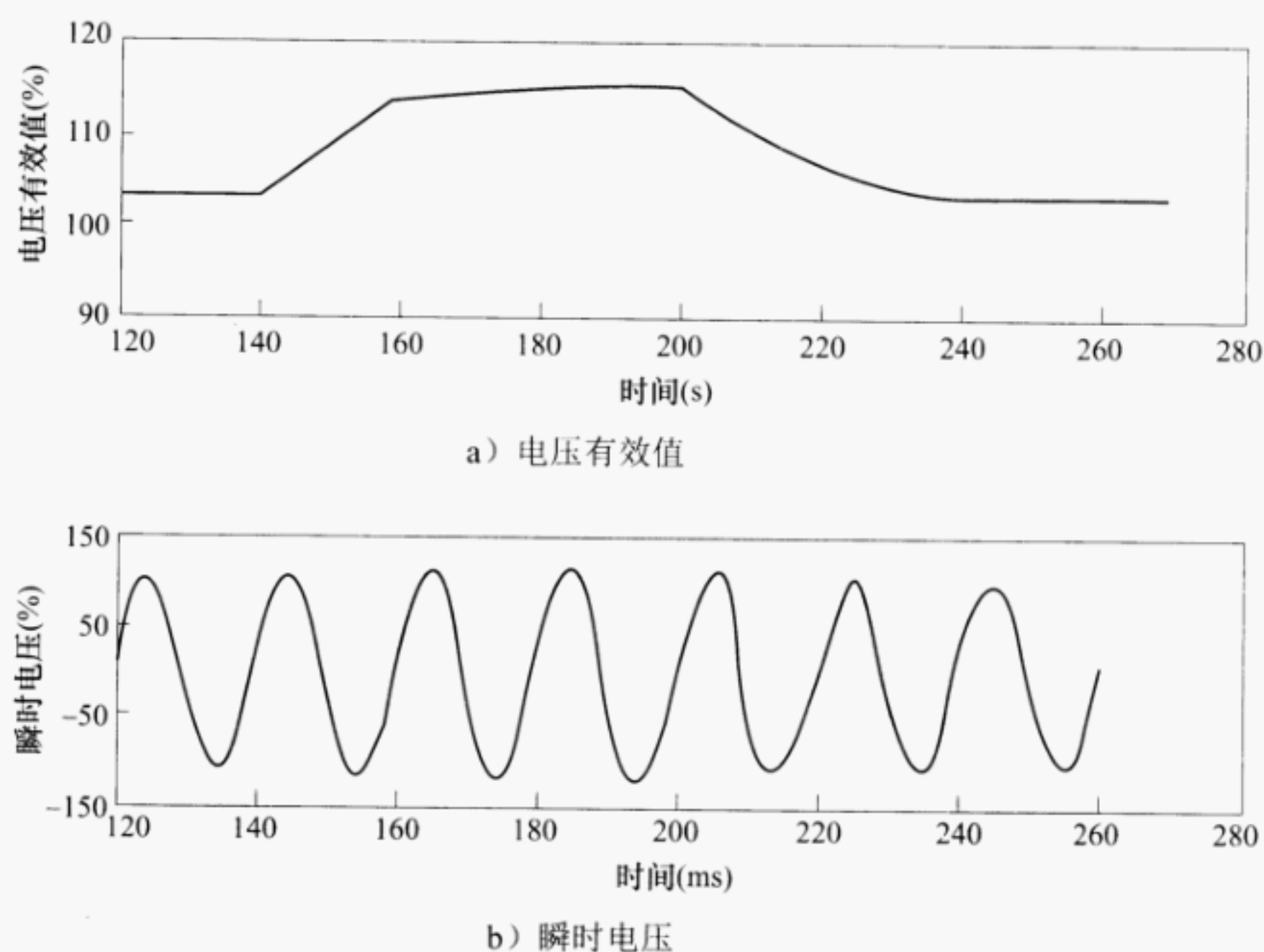


图 10 单相接地故障引起的瞬时电压升高

4.2.4.2 过电压

过电压是指工频下交流电压方均根值升高, 超过标称值 10%, 并且持续时间大于 1min 的长时间电压变动现象。过电压属于电力系统中的一种电磁扰动现象。一方面, 电力设备的绝缘长时间耐受着工作电压, 同时还必须能够承受一定幅度的过电压, 这样才能保证电力系统安全可靠地运行。另一方面, 系统运行中要确保设备在允许的电压偏差范围的上限之下运行, 以免对电力设备的绝缘造成损害。

过电压可能来源于切除一个大负荷或系统无功补偿的变化, 例如投入一组电容器。系统电压调节或控制能力差可能会导致过电压。不正确地调整变压器分接头也会导致系统过电压。

4.2.4.3 低电压

低电压是指工频下交流电压方均根值降低, 低于标称值 10%, 并且持续时间大于 1min 的长时间电压变动现象。

造成低电压的原因与过电压相反。投入一个大负载或者切除一组电容器组会引起低电压, 通过系统电压调节装置可以返回正常电压水平。输变电设备过载也能导致低电压。

4.2.4.4 持续中断

工频下交流电压方均根值下降接近于零 (小于 0.1p.u.) 且持续时间超过 1min 称为持续中断。持续中断超过 1min 常常是永久性的故障, 需要人工干预恢复。持续中断与断电的含义不同。持续中断是电力系统的一个特定现象, 而断电是指用电设备与电力系统完全断开的状态。

4.2.5 三相电压不平衡

三相电压不平衡是指三相系统的工频相电压在幅值上不同或其相位差不是 120° 。用户在使用过程中发生三相电压不平衡的主要原因如下:

- 各相负荷分布不均衡;
- 高次谐波电流使各相之间发生不平衡;
- 接线端子及电缆接触不良附加的不平衡;
- 外部环境导致不平衡的发生 (如施工等导致线路断开);
- 不换位长距离架空输配电线路。

4.2.6 波形畸变

4.2.6.1 概述

波形畸变是指某些电力、电气设备所具有的电压与电流的非线性特征使它们波形偏离正弦波的变化。有五种主要类型的波形畸变：

- a) 直流偏置；
- b) 谐波；
- c) 间谐波；
- d) 电压缺口；
- e) 噪声（悬置段）。

4.2.6.2 直流偏置

直流偏置指交流系统中存在直流电压或电流成分的现象。电磁干扰或半波整流作用会产生直流偏置。例如，延长白炽灯灯泡的寿命可通过二极管半波整流降低电压有效值，但产生了直流分量。交流系统中的直流偏置使变压器磁饱和度加大，造成变压器发热、损耗增加等不良影响。

地磁暴和高压直流输电中的单极大地回路运行方式的直流偏置会导致变压器直流偏磁，使变压器不能正常工作或损坏，威胁电网安全运行。

4.2.6.3 谐波

稳态谐波主要是由电力系统或负荷的非线性特性引起的。

电力系统中的电力电子设备是谐波的主要来源，除此之外，产生电弧的负荷，工作在铁磁非线性状态的电力、电气设备，也会产生谐波。这些设备和负荷，通常可以表征为谐波电流源，向电力系统注入谐波电流。谐波畸变程度可以由谐波频谱范围、每个谐波分量的幅值和相位角来描述。也可以使用单一的量值，即总谐波畸变率（THD）来衡量波形畸变的程度。

4.2.6.4 间谐波

电网的所有电压等级中都可能存在间谐波。间谐波往往由较大的电压波动或冲击性非线性负荷引起，所有非线性的波动负荷，如电弧炉、电焊机、各种变频装置、同步串级调速装置及感应电动机等产生间谐波，电力载波信号也是一种间谐波。

4.2.6.5 电压缺口

持续时间小于 0.5 周期的周期性的电压扰动称为电压缺口。与电压缺口有关的频率分量很高，采用谐波分析仪测量可能是很困难的。用高频滤波仪录波可以观察到这一现象。

换相电压缺口是晶闸管整流器强制换相所产生的特有现象（见图 11）。强制换相过程是在一相晶闸管仍然导通时触发另一相晶闸管，使得原来导通的晶闸管由于反向电压而关断。由于晶闸管关断需要时间，并且线路有电感，电流不能立即降到零，因此在换向过程中两相处于短路状态，就形成了换向电压缺口。

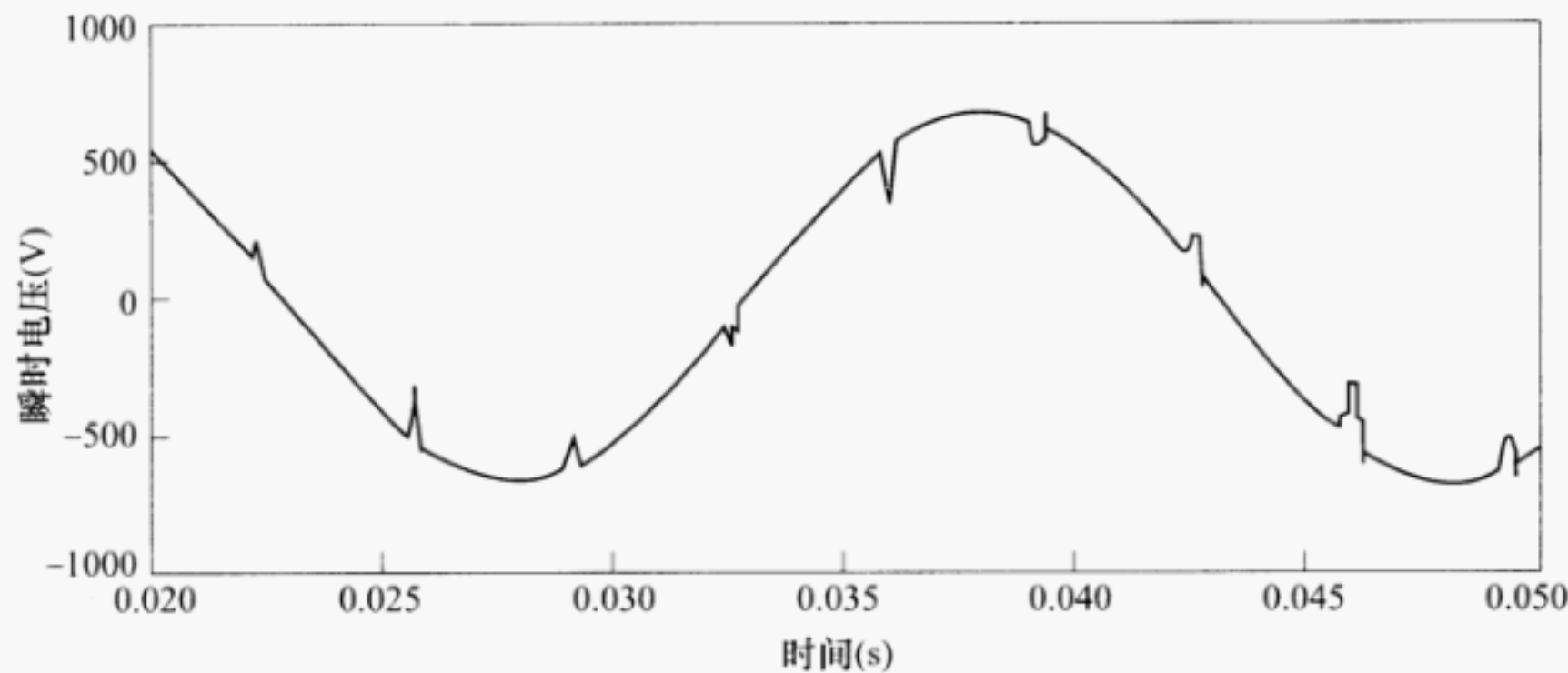


图 11 晶闸管整流器强制换向引起的电压缺口

4.2.6.6 噪声

电力系统中的噪声主要来自操作干扰、电气耦合干扰、地磁干扰、直流和厂（站）用电系统操作干

扰、大规模集成电路工作时引起的噪声干扰等，频率含量低于 200kHz。噪声是一种功率信号失真，不正确的接地往往加剧噪声问题。

噪声的频率范围和规模水平取决于产生噪声的根源和系统特点。典型的噪声幅度小于电压幅值的 1%。噪声干扰电子设备，如微型计算机和可编程控制器。噪声造成的问题往往可以通过滤波器、隔离变压器和线路调节器得到抑制。

4.2.7 电压波动

电压方均根值一系列快速变动或连续改变的现象，其变化周期大于工频周期（20ms）。电压波动时的电压方均根值一般在电压许可偏差的范围内。

任何负载的周期性变化，特别是无功分量，会引起电压波动。电压波动引起灯光强弱的变化称作“闪变”。闪变反映了电压波动引起的灯光闪烁对人视感产生的影响，是电压波动造成的一种不良后果。例如，频率在 8.8Hz，波动幅值达到工频电压幅值的 0.25% 的电压波动加在白炽灯上，就会使人感觉到视觉不适和疲劳。

在输电和配电系统中，电弧炉、变频调速是导致电压波动的最常见原因。图 12 给出了由电弧炉引起的白炽灯闪变的电压波形。

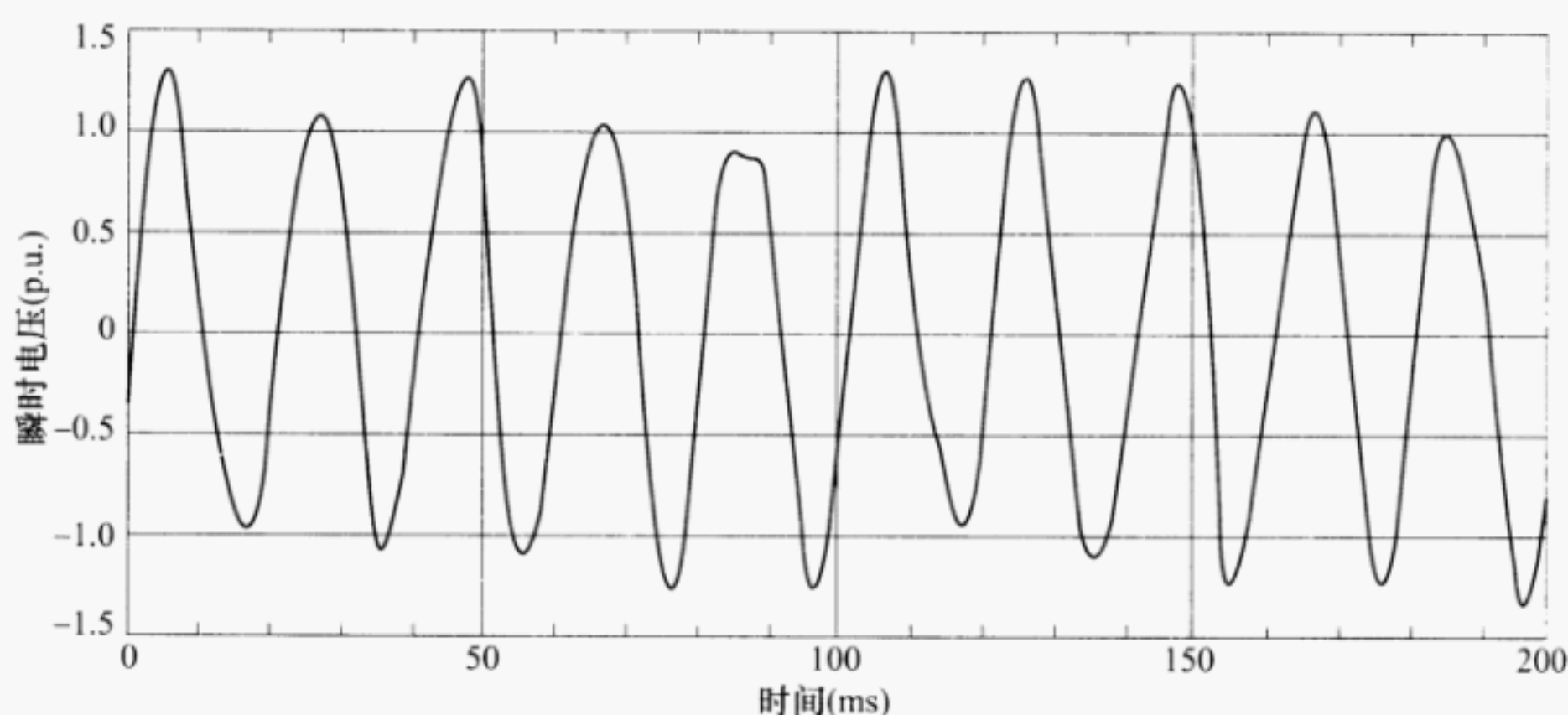


图 12 电弧炉运行引起的电压波动示例

除了电弧炉、变频调速装置等，接入电网的风电机组在持续运行和切换操作过程中都会产生电压波动和闪变。

4.2.8 频率偏差

频率偏差是系统频率的实际值和标称值之差。系统有功功率变化是产生频率偏差的根本原因。

稳态电力系统频率直接关系到系统的发电机转速。在任何时刻，频率取决于（总）负载和即时（总）发电出力之间的平衡。随着这种平衡的动态变化，频率会发生微小的变化。这些轻微频率变化可以通过发电机的调速装置进行自动调节，发电系统一般不会有太大影响。

电力系统的频率变化偏离正常许可范围，通常是由输电系统故障时切除大容量负荷或者切除大容量发电机组引起。孤岛系统由于本身供电容量限制只能允许承受相对轻微的频率变化。（频率偏差标准规定：小容量系统的允许频率偏差可以比大容量系统大）

5 电能质量问题相关参考资料

电能质量现象与基本电磁扰动现象见附录 A；

电能质量问题对设备的影响见附录 B；

基本电力/电气设备电能质量现象及其产生原因解释见附录 C；

部分行业电能质量现象及其产生原因解释见附录 D；

几种典型的电能质量控制设备及控制技术见附录 E；

电能质量与能源节约以及资源综合利用见附录 F。

附 录 A
(资料性附录)

电能质量现象与基本电磁扰动现象

在 IEC61000-2-5 《电磁兼容 (EMC) 第 2-5 部分：环境—电磁环境的分类》（等同采用为 GB/Z 18039.1—2000 《电磁兼容 环境 电磁环境的分类》）中，国际电工委员会将电磁现象分为六类。在特定的频率范围内没有定义高频和低频这样的术语，而主要是为了表明列出的这些类别现象的主频分量的相对差异。表 A.1 列出了 IEC 关于基本电磁扰动现象分类，从中看出电能质量现象在分类中位置。

表 A.1 IEC 关于基本电磁扰动现象分类

分 类	范 例
低频传导现象	谐波，间谐波
	信号电压
	电压波动
	电压暂降与中断
	电压不平衡
	频率偏差
	感应低频电压
	交流电网中的直流分量
低频辐射现象	磁场
	电场
高频传导现象	感应连续 (CW) 波电压或电流
	单方向瞬态
	振荡性瞬态
高频辐射现象	磁场
	电场
	电磁场
	连续波
	瞬态
静电放电现象 (ESD)	—
核电磁脉冲 (NEMP)	—

附录 B
(资料性附录)
电能质量问题对设备的影响

B.1 瞬态

雷电或开关操作引起的瞬态过电压可能会引起各类设备故障或绝缘介质损坏。瞬态过电压的高幅值和快速上升时间会引起像旋转电机、变压器、电容器、电缆、电流互感器、电压互感器和开关等电气设备的绝缘击穿。同样，当瞬态通过电路引导进入半导体器件如集成电路时，也很容易造成器件损坏。瞬态脉冲还可以经过能量转换从变压器高压侧传递到变压器低压侧，使连接到变压器低压侧的设备可能发生瞬态损伤。降低瞬态幅值可延缓设备的老化和最终的绝缘破坏，同时增加了设备的平均无故障时间。单次瞬态可能导致电子设备供电故障。由于直流母线过电压保护电路的存在，瞬态也会造成自动调速装置(ASDs)跳闸。

B.2 短时间方均根值变化

B.2.1 概述

短时间有效值变化(即短时中断、暂降和暂升)最普遍的影响是导致设备停机。在许多重要生产过程中，瞬态现象甚至会造成用电设备的停机，需要较长时间重新启动恢复。短时间有效值变化的时间长短对用电设备造成的停机故障损失几乎是相同的。

B.2.2 短时中断

瞬间的短时中断都可能会影响电子和照明设备，并导致误操作或关机。电子设备包括电源、电子控制器、计算机和旋转电机的电子控制。短时中断会导致设备停止运转并可能会导致异步电动机失步。在某些情况下，特别是在电压突然恢复时，短时中断可能会损坏电子设备。

B.2.3 电压暂降

现有的精密制造设备、计算机、变频器、各种微电子装置和自动调速装置等用电负载对电压暂降均非常敏感，持续 16ms 的幅值为额定值 85%~90%电压暂降即可能导致设备停机。电压暂降与短时中断的差别在于短时中断时负载一般与供电系统基本断开(幅值低于额定值的 10%)，而电压暂降发生时负载仍与电源连接。对某些工业用户而言，两者均会造成设备停机，产生的结果是相同的，但是电压暂降发生的几率远高于短时中断会发生的几率。调查显示：在所有配电系统事故中，电压暂降引起的事故占了 70%~80%；而在输电系统事故中，电压暂降引起的事故所占的比例超过了 96%。目前在欧美各国对电压暂降的关注程度比其他有关电能质量问题的关注程度要大得多，其中一个重要的因素是在电能质量的诸多原因中，由电压暂降引起的用户投诉占整个电能质量问题的 80%以上，而由谐波、闪变、开关操作过电压等引起的电能质量问题投诉不到 20%。在中国，随着社会经济的发展，电压暂降和短时中断的问题也逐渐引起了供电公司、用户及制造厂商的关注。特别是在一些高科技园区、大型医院、军工单位和重要的政府部门。

B.2.4 电压暂升

设备承受的电压幅值和频率的增加超过其额定值时会损坏元件。电子设备包括 ASDs、电脑及电子控制器在此情况下可能会立即失灵。许多现代电子设备在设计时考虑了一定限度的过电压值。实际的电子产品往往是与电源相连的，在出现故障时设备可与电源断开。频繁电压骤升可能会导致用电设备的绝缘损坏。变压器、电缆、母线、开关、电流互感器、电压互感器和旋转电机在经历过电压后使用寿命可能会降低。电压的突然增加可能会引起继电保护误动作。电容器上的电压暂升可能会导致电容器组输出容量增加。短时电压升高会引起照明设备光照增强。当浪涌超过最大额定工作电压时，紧凑型浪涌保护设备(如压敏电阻、雪崩二极管)会损坏。

B.3 长时间方均根值变化

B.3.1 概述

电源电压有效值长时间的变化，即持续时间超过 1min，可能会导致负载设备出问题。公用供电线路不太可能发生长时间过电压、低电压的问题，因为电力部门有充分调节手段将电压控制在允许的电压偏差范围。然而，由于馈线超载、变压器分接头设置不正确、监管或控制不到位、电容器保险丝熔断和在轻负载条件下投入电容器组，仍然会引起过压或低压问题。

B.3.2 持续中断

持续中断可能是由包括断路器跳闸、熔断器熔丝熔断、电路元件损坏等多种原因引起的。除了由不间断电源（UPS）或其他形式储能装置供电的负载不会受到影响外，持续中断将导致设备关机。

B.3.3 低电压

超过 1min 的低电压也可能导致用电设备故障。在低电压时电机控制器会动作使电动机退出运行。电机控制器的典型动作值是额定电压的 70%~80%。长时间的低电压会使电动机的电流增加并增加损耗，最终可能烧毁电动机。低电压情况下，电磁转矩降低会引起感应电动机的转速变化；因为无功出力与电压的平方成正比，故电容器输出功率将减少。一般来说，低电压条件下，对变压器、电缆、母线、开关柜、电流互感器、电压互感器、计量装置和传感器不会直接造成设备问题。低电压条件下，照明设备照度会减少；计算机和电子控制器等电子设备可能会停运。

B.3.4 过电压

过电压可能引起设备故障。过电压情况下电子设备可能立即停运，但是，变压器、电缆、母线、开关柜、电流互感器、电压互感器和旋转电机一般不会立即显示故障。持续或反复的过电压，会使变压器、电缆、母线、开关柜、电流互感器、电压互感器和旋转电机等因绝缘老化而缩短使用寿命。过电压条件下，继电保护装置会动作，但不会造成其他影响。频繁的过电压会引起电容器内绝缘损坏而鼓胀。因无功出力与电压的平方成正比，电容器在过电压条件下无功输出会增大。在过电压状态下一些照明设备照度可能会增加。

B.4 三相电压不平衡

一般来说，供电电压维持在三相相对平衡状态，因为即使是低幅度的不平衡也可能导致发电、输电和配电系统设备的电源波动和热效应。三相负载不平衡引起的电压不平衡更容易出现在负荷侧，特别是在大型的单相负载中（如电气化铁道）。电压不平衡主要危害是电机和变压器很容易出现过热，旋转设备（发电机、电动机）振动。供电电压不平衡一般维持在 1% 以下，大于 2% 的情况也并不少见。应尽可能通过调整单相负载或切除故障，减少大于 2% 的电压不平衡。三相电容器的一相熔断可产生大于 2% 的不平衡。三相电路的一相缺相或断电情况可能会产生大于 5% 的不平衡电压。

B.5 波形畸变

非线性负荷注入供电系统的谐波电流引起电力系统的谐波电压。谐波电流和谐波电压会导致旋转设备、变压器和载流导线过热，熔断器烧毁；电力系统的谐波谐振会进一步恶化电力系统的运行并引起计量不准确。电力用户在谐波电压的作用下也会产生同样的问题。有时，谐波失真会引起电力电子设备误操作，造成运行过程中出现故障。GB/T 14549—1993 规定了公用电网谐波电压限值及用户注入公共连接点的谐波电流允许值。电力用户和电力部门应努力将谐波控制在标准许可范围内，以尽量减少谐波对公用电网和电力用户的影响。

B.6 电压波动

电压波动造成白炽灯和放电光源的输出光强弱变化使人视觉疲劳并难以忍受。低于 0.5% 的电压突

然下降会导致白炽灯和气体放电照明设备的光输出明显减少，根据设备的感光性，电压波动对照明设备和其他非照明设备的影响有很大的差异。

B.7 频率偏差

一般情况下，电力系统稳定运行与频率控制密切相关。电力系统中频率的微小变化会造成转矩的巨大变化，从而对发电机及其轴系造成严重损害。此外，由于电力系统的高度互联性和操作同步性，轻微的频率偏差也可能会引起逐级互联系统解列。用户自有的发电设备在孤岛模式下运行时系统频率变化更加频繁：这些发电机与公用电网相比通常很“弱”，如果突然发生一个甩负荷，发电机即可能超速，引起孤立系统的频率增加。

附录 C
(资料性附录)

基本电力/电气设备电能质量现象及其产生原因解释

C.1 产生电能质量扰动的基本电力/电气设备及其产生原因解释

产生电能质量扰动的基本电力/电气设备及其产生原因解释见表 C.1。这是指正常的电力/电气设备运行，故不包括设备故障引起的电压暂降。

表 C.1 基本电力/电气设备电能质量现象及其产生原因解释

序号	设备名称	主要电能质量问题	原因解释
1	整流设备与高压直流输电换流站	谐波	整流装置是将交流电转换成直流电的装置，逆变是整流的逆过程，高压直流输电大量采用晶闸管，根据换流理论，在换流的过程中，6 脉冲整流产生 $(6k \pm 1)$ (k 为正整数) 次特征谐波，即 5、7、11、13 等次谐波。12 脉冲整流产生 $(12k \pm 1)$ 次特征谐波，即 11、13、23、25 等次谐波。以此类推
2	变频调速装置	谐波、间谐波	变频器是利用电力电子器件的通断作用将工频电源变换为另一频率的电能控制装置。交交变频与交直交变频集成了高压大功率晶体管技术和电子控制技术，它通过对供电频率的转换来实现电动机转速的自动调节，变频过程使电流波形发生畸变，引起谐波、间谐波污染
		电压波动与闪变	变频过程不同频率之间的调制过程可能产生电压波动与闪变
3	轧机	谐波	轧机采用晶闸管整流装置与使用直流电机调速，产生谐波，污染电网
		电压波动与闪变	轧机是大功率的波动负荷，电机的频繁启动与制动具有冲击性负荷的非线性特性，引起电压波动
4	电力机车	谐波	交传动电力机车把交流电整流成直流电，改变电动机的端电压实现对机车的调速，但是这种机车由于一般采用晶闸管相控整流电路，会带来大量 $(2k \pm 1)$ (k 为正整数) 次特征 (k 为正整数)；交直传动电力机车从接触网上引入的仍然是单相交流电，但其整流环节一般采用 4 象限 PWM 整流器，也会产生少量谐波，主要是 20 次以上的高次谐波
		三相电压不平衡	电力机车作为不对称负载，对电网三相电压产生影响
		电压波动	普通铁路上的机车负荷属于波动性负荷
5	城市轨道交通	谐波	城市轨道交通普遍是直流供电，为轨道交通提供直流电的电源是采用大功率晶闸管的换流站，换流装置产生谐波
		电压波动与闪变	轨道交通启动与制动频率比较大，它具有冲击负荷或波动负荷的特性，引起电压波动与闪变
6	起重机	谐波	起重机负荷变化大、速度变化快、短时重负载，属于冲击性负载，且普遍应用晶闸管的交、直流驱动等装置，这些因素是产生大量谐波的根源
		电压暂降与短时中断	在小型电网中，重型起重机的启动会带来电网负荷突然出现大的变化，易引起电压暂降与短时中断

表 C.1 (续)

序号	设备名称	主要电能质量问题	原因解释
7	矿井提升机	谐波	矿井提升机主要由电动机、减速器、卷筒（或摩擦轮）、制动系统、深度指示系统、测速限速系统和操纵系统等组成，采用交流或直流电机驱动，因为采用直流电机调速或变频调速装置，含有换流与变频原件，是谐波的主要来源
		间谐波	当采用变频调速装置时，会产生间谐波
		电压波动与闪变	重复启动、变速易产生电压波动与闪变
8	自动化生产线	谐波	自动化生产线采用大量电机与电力电子设备，电机的调速依靠直流调速或变频调速来完成，整流装置与变频设备带来大量的谐波
9	电解电镀设备	谐波	这类用电设备为了提供平稳的直流电源，采用了换流设备，晶闸管整流设备激发了谐波的产生量
10	电弧炉	谐波、间谐波	在熔化初期以及熔化的不稳定阶段，弧长强烈变化，电流波形无规律，会造成电压极不规则地波动，产生高次谐波电流，谐波含量大
		三相电压不平衡	电炉工作过程各相间的电弧长度是单独变化的，引起三相电压不平衡
		电压波动与闪变	电弧炉最重要的影响除了低次谐波外，还有电压波动和闪变。大型电弧炉会引起对电网的剧烈扰动，有的大型炉的有功负荷波动，能够激起邻近的大型汽轮发电机的扭矩振荡和电力系统间联络线上的低频振荡，此类冲击性负荷会引起电网电压波动。频率在 6Hz~12Hz 范围内的电压波动，即使只有 1%，其引起的白炽灯照明的闪烁，已足以使部分人群感到不舒服，难以忍受
11	中频炉	谐波	中频炉是一种将工频 50Hz 交流电转变为中频（300Hz 以上至 1000Hz）的电源装置，把三相工频交流电整流后变成直流电，再把直流电变为可调节的中频电流，供给由电容和感应线圈里流过的中频交变电流，在感应圈中产生高密度的磁力线，并切割感应圈里盛放的金属材料，在金属材料中产生很大的涡流。以上可以看出，中频炉是非线性负载，谐波问题很严重
12	电焊机	谐波、间谐波	电弧加热设备只有在电极间的电压在 70V 以上才会起弧产生弧光电流，并且灭弧电压略低于起弧电压，造成电弧电流与电弧电压的非线性而引起谐波
		电压波动与闪变	电焊机的工作特性是冲击性质的，会使电压快速波动。这种冲击性负荷是主要的电压波动与闪变源
		三相电压不平衡	电焊机负荷过于集中接入单相或两相交流电源引起
13	家用电器	谐波	家用电器现在大多采用开关电源。开关电源的频率比较高，一般在 40kHz 左右，不仅在整流时产生谐波，而且在开关管开闭时，发射 40kHz 左右的谐波至电源
14	变压器	谐波	变压器铁芯的磁化饱和特性会产生谐波，变压器产生的谐波次数还受其一、二次侧接线方式（△或 Y）的影响，大小则与磁路的结构形式、运行电压（铁芯的饱和程度）有关。变压器在正常运行电压时，产生的谐波水平不高。变压器铁芯的额定电压的设计值对变压器产生的谐波电流影响较大。一般而言，变压器铁芯的额定值应该按照系统允许的最高电压确定
		电压暂降	变压器投切时，由于铁芯的饱和特性，会产生数倍于额定电流的激磁电流，涌流的大小与电压初相角铁芯的饱和程度有关。变压器容量大小对恢复时间有较大影响
15	大型感应电动机	电压暂降	大型感应电动机直接启动时，启动电流很大，易产生电压暂降
16	电动汽车充电站	谐波	电动汽车电池充电一般采用两种基本方法：接触式充电和感应耦合式充电，设备中采用整流等电力电子装置，晶闸管等整流设备产生谐波

C.2 新能源和可再生能源产业电能质量现象及其产生原因解释

C.2.1 概述

目前已进入工业应用的新能源发电型式主要为风力发电和光伏发电。

C.2.2 风力发电

风力发电机组大多采用软并网方式，但是在启动时仍会产生较大的冲击电流。当风速超过切出风速时，风机会从额定出力状态自动退出运行。如果整个风电场所有风机几乎同时动作，这种冲击对配电网的影响十分明显。不但如此，风速的变化和风机的塔影效应都会导致风机出力的波动，而其波动正好处在能够产生电压闪变的频率范围之内（低于 25Hz），因此，风机在正常运行时也会给电网带来电能质量问题，主要是三个方面。

——谐波。风电给系统带来谐波的途径主要有两种：一种是风力发电机本身配备的电力电子装置，可能带来谐波问题。对于直接和电网相连的恒速风力发电机，软启动阶段要通过电力电子装置与电网相连，会产生一定的谐波。

由于变速风力发电机通过整流和逆变装置接入系统，如果电力电子装置的切换频率恰好在产生谐波的范围内，则会产生很严重的谐波和间谐波问题。另一种是风力发电机的并联补偿电容器可能和线路电抗发生谐振，产生大量谐波。

——电压稳定性（电压偏差）。大型风电场及其周围地区，常常会有电压波动大的现象，主要有以下三种。风力发电机组启动时，会产生较大的冲击电流。单台风力发电机组并网对电网电压的冲击相对较小，但并网过程至少持续一段时间后（约几十秒）才消失。多台风力发电机组同时直接并网会造成电网电压暂降，因此多台风力发电机组的并网需分组进行，且要有一定的间隔时间。当风速超过切出风速或发生故障时，风力发电机会从额定出力状态自动退出并网状态，风力发电机组的脱网会导致电网电压的突降。

——频率稳定性。大型电网具有足够的备用容量和调节能力，风电接入，一般不必考虑频率稳定性问题，但是对于孤立运行的小型电网，风电带来的频率偏移和稳定性问题是不容忽视的。

C.2.3 太阳能发电

谐波问题是光伏发电的最主要问题，光伏发电使用交、直流逆变器，由于逆变器是通过半导体功率开关的开通和关断作用，把直流电转变成交流电，在此环节会产生谐波问题。

新能源发电独有的不确定性，造成输出功率的随机波动，导致电网频率偏差、电压波动与闪变。另外采用电力电子装置接入的新能源发电系统还需要关注注入电网的谐波和直流分量的影响。

附录 D (资料性附录)

部分行业电能质量现象及其产生原因解释

D.1 煤炭行业电能质量现象及其产生原因解释

D.1.1 煤炭行业的主要负荷

煤炭行业的主要用电环节是煤矿生产。主要电能质量扰动负荷为主副提升机系统采用的晶闸管直流调速或交-直-交变频调速装置，主运输胶带机采用的晶闸管变频驱动装置等。波动性负载是提升机。

D.1.2 煤炭行业的主要电能质量现象

D.1.2.1 概述

煤炭行业的电能质量现象主要包括：电压偏差大、电压波动大、谐波含量高、功率因数较低。

D.1.2.2 电压偏差

供电系统正常运行方式下，煤矿井下终端用户的电压偏差通常达 $-15\% \sim 10\%$ ，高于 GB/T 12325—2008 规定允许电压偏差值。标准规定 20kV 及以下三相供电电压偏差为标称电压的 $\pm 7\%$ 。

电压偏差是影响煤矿供电质量的主要因素，这是由煤矿开采特点所决定的。当线路传输功率特别是无功功率时，电流将在线路阻抗上产生电压损耗。煤矿的负荷集中在开采工作面上，随着煤矿开拓范围的不断扩大，生产负荷的供电距离也在不断延伸，从而加大了线路电压损耗。

D.1.2.3 电压波动与闪变

煤矿大功率冲击性负荷在运行中导致公共连接点电压波动，严重时超过 GB/T 12326—2008 允许值。

煤矿行业采用大容量机电设备如提升机，这些设备启动频繁，导致公共连接点电压在短时间里急剧变动，且明显偏离额定电压值。

D.1.2.4 谐波

煤矿行业的非线性负载产生大量的特征谐波，主要是 3 次、5 次、7 次、9 次、11 次和 13 次谐波较大，其中 11 次和 13 次通常超标。

由于煤矿行业采用电力电子装置作为直流、交流调速的传动装置，具有调速范围广、控制简单、节能效果明显、结构简单、维护方便等优势而在煤矿得到广泛应用，并逐步替代其他调速方式，但由此带来的谐波问题在煤矿安全生产中也逐渐显现，谐波已成为影响煤矿电能质量的重要因素之一。为直流提升机供电的晶闸管变流装置以及各种变频器、逆变电源是煤矿电网中最主要的谐波源。

D.2 港口行业电能质量现象及其产生原因解释

D.2.1 港口的主要负荷

港口的大型电动气动设备，如桥机、门机等负荷变化大、速度变化快、短时重负载，属于大型冲击性负载；而这些大型电动起重设备的电气传动装置多采用晶闸管整流直流调速和交流变频调速设备，属于非线性用电设备。

D.2.2 谐波

港口大量非线性负载产生谐波，主要以 3 次、5 次、7 次、9 次、11 次和 13 次谐波为主，电压总畸变率通常超标。在港口电力系统中，主要的谐波源存在于：

- a) 变压器。港口供电系统中的变压器，设计时考虑经济性，其工作磁密选择在磁化曲线的近饱和段上，使得磁化电流呈尖顶波形，因而含有奇次谐波。
- b) 整流器和逆变器。港口大型装卸机械的电气传动装置多采用晶闸管整流直流调速和交流变频调速装备，属于非线性用电设备，是典型的谐波源。主要产生 5 次、7 次、11 次、13 次、17 次

谐波。

- c) 气体放电类电光源。港口企业照明基本采用气体放电类电光源，如荧光灯、高压汞灯和金属卤化物灯等。此类光源具有非线性特征，3次谐波含量占其基波含量的20%以上。由于其特性为对称奇函数，故只含有奇次谐波。

D.2.3 电压波动与闪变

港口供电系统电压波动通常在1.8%~5.6%之间，高于GB/T 12326—2008允许值。

港口作业负荷均为大型电机，频繁启停时因电流过大，对电源会造成巨大的冲击，从而导致电网电压闪变和瞬间波动，对电网上的其他设备造成不良影响。

以某港区为例，该港口的作业负荷包括：串电阻调速的400V门机、反并联晶闸管调速的400V门机、半变频调速的400V门机、全变频调速的400V门机、全变频调速的400V桥机、全变频调速的6kV门机、反并联晶闸管调速的6kV桥机、发电机—电动机组的6kV桥机、全变频调速的6kV桥机。根据对九台门（桥）机测试的数据统计分析，各类门（桥）机单独运行时都有不同程度的电压波动超标；若多台门（桥）机同时作业，产生的电压波动将会更大大增加。

D.3 电气化铁道行业电能质量现象及其产生原因解释

D.3.1 电气化铁道主要负荷

电气化铁道采用单相供电制，主要负荷有两类：交传动电力机车、交直交传动电力机车，均属非线性用电设备。电气化铁道引起的主要电能质量现象包括：谐波、电压波动与闪变、三相电压不平衡。

D.3.2 谐波

传统交传动电力机车采用晶闸管相控整流，对电网带来大量奇次谐波，高速铁路采用交直交传动车组，其谐波的频谱及幅值与传统交直电力机车不同，在低频带的3次、5次、7次、9次谐波含量较少，在高频带的23次~37次和41次~55次区间谐波明显存在，但其总谐波电流畸变率通常小于5%。

交传动电力机车主电路为2脉波相控整流电路，主要产生 $(2k \pm 1)$ 次特征谐波，即3次、5次、7次等谐波电流。交直交传动电力机车和动车组采用PWM变流技术，其在网侧产生的谐波、间谐波分布主要由PWM调制方法决定。交直交机车采用全桥电路，双极性倍频调制，谐波主要分布在载波频率的偶数倍附近。

D.3.3 电压波动

供电臂电压波动大，通常在29kV~19kV之间波动。

交、直流电力机车产生的功率在牵引变压器和牵引供电臂上产生电压降，通常某一段供电臂上机车要比较频繁地进行启动、加速、惰性和制动等工况转换，造成牵引负荷波动剧烈，从而导致电压波动大。

D.3.4 三相电压不平衡

电气化铁道采用单相供电制，而公用电力系统是三相的。单相负荷与三相电源之间电气结构的差异，决定了三相负荷的不对称性。

D.4 城市轨道交通行业电能质量现象及其产生原因解释

D.4.1 概述

城市轨道交通引起的主要电能质量现象是谐波和电压偏差。

D.4.2 城市轨道交通主要负荷

城市轨道交通主要用电负荷一般采用三相并联的12脉动不可控整流装置。

D.4.3 谐波

整流装置是典型非线性负荷，产生5次、7次、11次、13次和23次谐波。

城市轨道交通供电系统的整流设备一般都是采用三相并联的12脉动不可控整流电路，12脉波整流电路主要产生 $(12k \pm 1)$ 次特征谐波。但是由于整流机组参数的不完全对称性，因而也会产生少量6脉

波的 $(6k \pm 1)$ 次特征谐波。另外配套的低压系统如照明系统、荧光灯（电子整流器）主要产生3次谐波。EPS电源屏、通风空调、电梯、扶梯等设备主要产生5次和7次谐波。

D.4.4 电压偏差

城市轨道供电采用电缆，夜晚无负荷时电缆对地电容充电无功大导致电压升高，使有负荷与无负荷时电压偏差加大。

D.5 冶金行业电能质量现象及其产生原因解释

D.5.1 冶金行业用电负荷特征

冶金企业负荷具有容量大、冲击大、启制动频繁、工作连续性等特点。轧机、电焊设备、炼钢电弧炉等冶金设备的运行会引起功率波动、三相不平衡、谐波含量超标；大型风机、轧机主传动等较多应用大功率变流、变频装置，容量有的达上万千瓦，这些设备在调速过程产生的谐波干扰将直接影响配电系统的电能质量，尤其是在这些传动设备的加、减速阶段，谐波干扰特别严重，而交-交变频调速系统产生的谐波不仅含有一般变流装置中的特征谐波，而且含有间谐波和非特征谐波等成分，频率分布广、含量较高，不仅会造成电网电压畸变，还可能造成电网在某些频率下的谐振。

D.5.2 谐波

冶金行业产生的谐波随非线性负荷特征变化。

电弧炉产生的谐波主要集中在2次~13次，这是因为电弧产生过程的波形畸变正负半周不对称（产生偶次谐波），三相不对称（产生3的整数次谐波）。

轧机使用整流后的直流调速产生的谐波和整流装置特征有关。6脉冲整流产生 $(6k \pm 1)$ 次特征谐波，12脉冲整流产生 $(12k \pm 1)$ 次特征谐波。使用交-交变频调速产生谐波和PWM方式有关。

大型鼓风机主要是由交-交变频调速产生的谐波。

D.5.3 电压波动与闪变

电弧炉用电负荷剧烈波动产生电压波动与闪变。

轧机生产过程负荷剧烈波动产生电压波动与闪变。

交-交变频鼓风机调速过程的PWM产生电压波动与闪变。

采用电磁搅拌的电弧炉，电磁搅拌器采用可调频率的低频电源，其频率在0.3Hz~0.5Hz内调节，会产生电压波动与闪变。

电焊设备工作过程产生电压波动与闪变。

D.5.4 三相电压不平衡

主要由不对称负荷，如电弧炉引起。

D.6 煤化行业电能质量现象及其产生原因解释

煤化工没有使用大型非线性负荷，其电能质量扰动表现为采用变频调速装置产生的谐波、间谐波和闪变问题，以及由电压暂降干扰造成生产线跳闸断电问题。

煤制油、煤制甲醇生产中使用了变频调速装置，会产生谐波和闪变。由于变频调速装置在整个用电装置中所占比例不是太高。所以谐波和闪变污染并不严重。而电压暂降超过20%会造成变频装置停机，从而造成整个生产线停电的重大事件。

D.7 石化行业电能质量现象及其产生原因解释

D.7.1 概述

石化行业由于工艺的特殊性对供电可靠性要求很高，包括供电的连续性、稳定性等，供电状况稍有不慎就可能引发化工装置很严重的安全事故和很大的环境破坏事故。结合其供电、用电及负荷特性，其电能质量问题主要体现在如下方面。

D.7.2 频率稳定问题

石化企业大多有热电联产的自备热电厂，因某种原因导致石化企业小电网同外电源解列而成为孤网运行，内部发电机所发容量不足以满足石化企业内部用电负荷需要，如果不采取任何控制措施，有功无法实现平衡，将会导致石化企业内部最终运行频率非常低，严重时可能导致全系统瓦解。

D.7.3 电压波动及电压跌落

“晃电”被认为是石化企业中最常见的电能质量问题之一，主要是指电网因雷击、对地短路、发电厂故障及其他原因造成电网短时间故障，电网电压短时大幅度波动，甚至短时断电数秒钟的现象。“晃电”往往会造成石化装置停车，进而导致生产过程紊乱，装置非计划停工，给生产造成大的损失，其内部引起的电压质量问题主要包括电压波动和电压骤降两个方面。

石化企业中冲击负荷造成的电压波动是比较普遍的现象，这是由于存在很多快速变化的冲击性负荷，如大型电动机和电动机群组等。另外，电动机群启动时，会需要额外的大量无功，可能造成供电电网的电压跌落，甚至电压短时中断，严重的可能造成电压稳定事故。

D.7.4 谐波问题

石化行业中电力负荷构成的变化，以及广泛使用电脱盐、电除尘、电解槽、电加热器、开关电源、UPS、变频器等给电网造成了大量的谐波。其谐波特性以整流负荷的谐波特性为主，即主要由整流设备的结构所决定，以奇次谐波为主。

D.7.5 其他电能质量问题

其他电能质量问题如电压偏差、三相不平衡等，其产生原因与常规的电网基本类似，相比前面三项，已不是石化企业电能质量问题中的主要矛盾。

D.8 核电企业电能质量现象及其产生原因解释

核电企业其电能质量特性与常规火电企业基本相似，其厂内负荷中，存在部分变频设备，将产生一定含量的谐波，但含量基本在相关国家标准范围之内。核电站发电机组对并网点的电能质量要求与火电机组保持一致，其自身发电电能质量特性较好。

附录 E (资料性附录)

几种典型的电能质量控制设备及控制技术

下面列出几种常见的电能质量控制方法。不同方法的综合使用可能有更好的效果。

E.1 无源电力滤波器 (PPF)

无源电力滤波器简称滤波器。由电容器和电抗器串联组成，并调谐某个特定的谐波频率，形成低阻抗电路。滤波器可以采用星形或三角形联结，但星形联结便于分相调谐。

无源电力滤波器组安装在带有非线性负荷的节点上，既能抑制谐波电流注入电力系统、降低节点的谐波电压，又能提供该节点的无功补偿。无源电力滤波器组参数的设计既要满足注入系统的谐波电流限制、节点的谐波电压及电压总谐波畸变率限制和无功补偿的要求，又要保证多个安全运行条件，如电容器的过电压、过电流及发热约束，滤波器组内并联谐振约束及滤波器组与外部系统的并联谐振约束，同时又能使投资最小。

E.2 有源电力滤波器 (APF)

近年来由于大功率大电流的半导体器件及可关断晶闸管 (GTO)、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 的快速发展，促使有源电力滤波器实用化。有源电力滤波器是一种用于动态抑制谐波、无功的新型电力电子装置。与无源电力滤波器相比，有源电力滤波器具有高度可控性和快速响应性，其具体特点如下：

- a) 不仅能补偿各次谐波，还可抑制闪变、补偿无功、有一机多能的特点，在性价比上较为合理。
- b) 滤波特性不受系统阻抗的影响，可消除与系统阻抗发生谐振的危险。其他如统一电能质量控制器 (UPQC) 是有源补偿技术的进一步发展。
- c) 不足之处是本身功耗较大。

E.3 静止无功补偿器 (SVC)

利用静止无功补偿器 (SVC) 或称静止无功补偿系统 (SVS) 来改善系统电压质量和提高电力系统在小干扰和大干扰下的稳定性，已获得较为广泛的应用。SVC 的基本功能是从电力网吸收或向电网输送可连续调节的无功功率，以维持装设点的电压恒定，并有利于电网的无功功率平衡。

静止无功补偿装置的典型代表是固定电容器+晶闸管控制电抗器 (FC+TCR)。由于单独的 TCR 只能吸收无功功率，而不能发出无功功率，因此往往与电容器配合使用。TCR 本身会产生谐波，所以用滤波器组代替电容器。滤波器组在基波频率下起无功补偿的作用，在谐波时除滤除 TCR 产生的谐波外，也要滤除非线性负荷产生的部分谐波。

E.4 静止无功发生器—静止同步补偿器 (SVG—STATCOM)

SVG 是指由自换相的电力电子器件组成的变流器来进行动态无功补偿的装置。现在一些文献称为静止同步补偿器 (STATCOM)，主要采用脉宽调制 (PWM) 方式实现动态无功补偿。

SVG—STATCOM 采用全控型器件 (GTO 或 IGBT)，其交流侧电压的相位 (以电网电压的相位为基准) 是任意控制的，虽然交流侧电压的幅值受直流侧电压幅值限制，但在一定的范围内也是可控的，故可通过控制交流侧电压幅值和相位来改变交流侧电流的幅值和相位，即通过实现交流侧电流相位超前或者滞后电网电压相位 90° ，从而实现发出无功功率或吸收无功功率的功能。

E.5 动态电压恢复器（DVR）

基于电力电子技术的动态电压恢复器（DVR）在消除电压跌落、提高大型综合性敏感工业负荷的供电质量和供电可靠性方面有着显著的效果。当电压下跌时，动态电压恢复器能立即发出一个补偿电压并准确地施加到跌落的电压波形上，使其迅速恢复正常。电压下跌持续的时间可根据敏感负荷的需要预先配置，以取得最为经济的效果。

DVR 持续工作的时间由直流侧储能装置决定。大容量电容、高能量电池和超导储能装置已投入工程应用。另外采用适当的控制策略，如探讨最小能量控制方式也是延长 DVR 有效工作时间的手段之一。由于 DVR 只在电压暂降出现时提供负荷满足正常电压所需的功率消耗，所以效率较高。

E.6 不间断电源（UPS）

在减小电压暂降与短时中断影响的装置中，UPS 是最受欢迎的。出现电压暂降时直流侧电压降低，使得由 UPS 的储能装置 DG 通过 PWM2 向敏感负荷供电。在电压暂降期间由电网交流电源 U_s 平稳移动到储能装置 DG 供电而解决电压稳定问题，效率达到 92%~97%。缺点是费用高，大容量受限制。采用蓄电池储能需要定期维护和调换。

E.7 固态切换开关（SSTS）

固态开关一般由隔离开关、旁路开关和估态开关组成。正常情况下固态切换开关接通主电源，关断通备用电源。当主电源侧发生故障时，则固态切换开关关断主电源，接通备用电源，在主电源和备用电源之间实现快速的、无暂态的切换，用以抑制电压暂降影响。

E.8 定制电力技术

定制电力技术（Customized Power Technology），是针对信息电力时代产生的复杂的电能质量需求问题，应用现代电力电子技术控制和改善电能质量，为用户提供特定需求的电力供应。广义上说，E.1~E.7 条都具有定制的特征；但用更专业的术语来说，定制电力是指能提供多级别的电能质量服务（Multiple Power Quality Services）。它具有对谐波、闪变、电压偏差、电压暂降、三相电压不平衡等多种电能质量问题的综合选择控制功能，从而形成优质电力园区。

E.9 几种常用手段能实现的电能质量控制汇总

表 E.1 汇总了几种能实现电能质量控制的常用手段。

表 E.1 几种能实现电能质量控制的常用手段汇总表

治理控制手段	谐波抑制	无功补偿	电压调整	频率调整	三相不平衡治理	闪变抑制	瞬态电压事件的控制
无源滤波	√	√	√				
有源滤波	√	√	√		√	√	
电容补偿		√	√				
有载调压			√				
SVC	√	√	√		√	√	
STATCOM		√	√		√	√	√
DVR							√
UPS							√

表 E.1 (续)

治理控制手段	谐波抑制	无功补偿	电压调整	频率调整	三相不平衡治理	闪变抑制	瞬态电压事件的控制
SSTS							√
定制电力技术	√	√	√		√	√	√
避雷器							√
一次、二次调频				√			
按频率电压减载			√	√			

附录 F (资料性附录)

电能质量与能源节约以及资源综合利用

目前,中国火力发电及供热用煤占全国煤炭总产量的 51%,产生灰渣占全国的 70%,火电用水量占工业用水总量的 40%,灰尘排放占工业排放 33%,二氧化硫排放占工业排放的 5%,因此。电力工业在中国资源节约及综合利用工作中占有重要地位。

随着现代工业的发展,各种非线性设备容量的增长率超过了电网发电设备容量的增长率,大量的电力电子用电负荷、电弧炉、电力机车等干扰源设备接入电网,这些设备在运行中对电网电能质量造成严重的污染,导致供电设备本身的安全性降低,严重降低电能的使用效率,在电网和电气设备上造成附加损耗,带来能源浪费。因此,提高电网电能质量是电网节能的一个重要途径。

F.1 电能质量恶化与能效损失

F.1.1 概述

电能质量恶化是由“电力污染”引起的,所谓“电力污染”是指因为频率偏差、电压偏差、电压波动、谐波、三相电压不平衡等电能质量指标变差,造成电能质量下降的现象。

引起电力污染的原因很多,冲击性负荷如大功率设备的启停会在电网中产生电压变动;非线性负载和电力系统的非线性特性将引起谐波污染,大功率整流或变频装置的使用不仅会对电网造成严重污染,同时也会使得功率因数降低。

F.1.2 电能质量恶化造成能效损失

电能质量恶化会造成电器设备效率下降,损耗增多,浪费大量能源,而且会对电器设备造成不同程度的损害,影响其安全、稳定运行,具体表现在以下几个方面:

- a) 电压偏移:电压降低引起发电厂给排水系统和给煤系统的效率降低,影响锅炉、汽轮机和发电机的出力;电压降低引起照明设备的效率降低;电压升高损害电气设备的绝缘,使变压器、发电机等电工设备工作在饱和状态,激磁电流增加,设备过热并产生有害的谐波电流等。
- b) 系统频率变化:所有的设备几乎在额定频率下的效率最高,偏离额定频率将导致效率降低。频率偏离额定值将使发电厂汽轮机叶片的振动变大,严重时叶片断裂;频率降低使得发电厂给煤、排水系统效率降低,从而使系统频率状态进一步恶化;系统频率降低引起异步电动机和变压器激磁电流增加,所消耗的无功功率增加,恶化了电力系统的电压水平;频率的变化还可能引起系统中滤波器的失谐和电容器组发出的无功功率变化。
- c) 三相不平衡:三相不平衡会导致同步电动机产生振动;负序电流流入同步电动机或异步电动机,会使电动机因产生附加损耗而过热,产生附加转矩而降低使用效率等。
- d) 谐波畸变:谐波电流在旋转电机绕组中流通,使电机产生附加功率损耗而过热,产生脉动转矩和噪声;由于集肤效应和邻近效应的存在,使输电线路、变压器等因产生附加损耗而过热,而造成能量损失等。
- e) 电压暂降:电压暂降出现时的不正常低电压供电方式使用电过程发生混乱而使能量失效,如一个计算中心失去电源 2s 可能破坏几十小时的数据处理结果,几分之一秒的不正常供电就可能在自动化设备控制的连续精加工生产线造成大规模的混乱,其损失是难以估计的。

F.2 电能质量控制的节能效益

F.2.1 概述

电能质量的节能效益可分为直接经济效益和间接的社会效益:

- a) 直接经济效益：供电线路线损下降，用户减少功率因数罚款，提高生产率，采用电能质量控制措施后，企业内部设备故障率下降。设备运行可靠性提高，减少生产性服务成本的支付。
- b) 间接社会效益：非线性负荷周边用户及供电变电站的电气设备故障率下降，用户投诉下降。

F.2.2 电能质量直接关系到国民经济的总体效益

电能质量降低将带来巨大的经济损失。我国尚缺少这方面资料，但据美国电力科学院 2000 年粗略估计，认为与电能质量相关的问题在美国每年造成的损失高达 260 亿美元。

法国学者（埃列和卡恩）关于频率和电压对额定值偏差引起的经济损失估算方法，认为在任意时间段 T 内因参数 n （这里指频率或电压值）的额定值差 Δn 所引起的国民经济损失 Y_T 为：

$$Y_T = K \int_0^T (\Delta n)^2 dt = KT \Delta N^2 \quad (\text{F.1})$$

式中：

ΔN ——参数对额定值偏差的方均根值；

K ——国民经济损失系数。

过去人们关注电能质量多从用电设备安全的角度，实际上因为电能质量下降还将引起发电、输电和用电设备损耗增加，效率下降，造成巨大的能源浪费。因此在当前的形势下，通过提高电能质量既可以减少能源浪费，又保证了电力系统各设备的安全运行。无论从资源和环境等的可持续发展还是节能减排的角度看，提高电能质量都是一条改善能源紧张的好途径。

F.2.3 谐波治理对节能的实际意义

谐波治理后并不会给产生谐波的设备带来直接的节能效果，但由于谐波电流的减少也存在间接的节能效果，主要有以下两个方面：首先是变压器，谐波电流可导致铜损和杂散损耗增加。另一方面是配电线路，谐波电流会引起电缆的温升更高，该额外温升是由电缆的集肤效应所引起的，而这种现象还取决于频率及导体的尺寸。

F.2.4 无功补偿措施带来的节能效益

通过合理配置无功功率补偿设备来提高系统的功率因数，从而达到降低损耗、节约电能的目的。设电网输送的有功 P 为定值，加装无功补偿设备后功率因数由 $\cos\varphi_1$ 提高到 $\cos\varphi_2$ ，计算得到的有功损耗下降：

$$\delta_{\Delta P_L} = \left[1 - \left(\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} \right)^2 \right] \times 100\% \quad (\text{F.2})$$

式中：

$\delta_{\Delta P_L}$ ——补偿后的有功损耗；

ΔP_L ——补偿前的有功损耗。

F.2.5 控制电压暂降带来的节能效益

由于电压暂降造成敏感负荷的用电故障，如自动化生产线误动带来产品报废。所以控制电压暂降出现的频次或降低电压暂降的强度，不但可以避免因故障重复生产的电能消耗，而且还减轻因产品报废带来的资源浪费。

F.3 节能技术对电能质量的影响

节能技术对电能质量的影响主要体现在两方面，一是某些节能设备的使用有可能影响电网电能质量，如电力电子设备产生谐波；二是某些节能技术使用不当也会导致电能质量变差，如并联电容补偿装置参数配置不合理引起的电网谐振，放大了谐波。

参 考 文 献

- [1] IEEE Std 1159TM—2009, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality
 - [2] IEEE 100TM, The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms, Seventh Edition
 - [3] GB/Z 18039.1—2000 电磁兼容 环境 电磁环境的分类
 - [4] GB/T 16927.1—1997 高电压试验技术 第一部分：一般试验要求
 - [5] GB/T 18481—2001 电能质量 暂时过电压和瞬态过电压
 - [6] 林海雪. 电压电流频率和电能质量国家标准应用手册. 北京：中国电力出版社，2001.
 - [7] 刘天琪，等. 电力系统分析理论（第2版）. 北京：科学出版社，2011.
-

中 华 人 民 共 和 国
能 源 行 业 标 准
电 能 质 量 现 象 分 类
NB/T 41004—2014

*

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京九天众诚印刷有限公司印刷

*

2015年2月第一版 2015年2月北京第一次印刷

880毫米×1230毫米 16开本 2印张 57千字

印数 0001—3000册

*

统一书号 155123·2178 定价 17.00元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究