

电能质量技术问答

董其国 编写 潘震东 沈镜明 主审



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

电能质量的概念

1. 什么是电能质量？

电能质量是指通过公用电网供给用户端的交流电能的品质。理想状态的公用电网应以恒定的频率、正弦波形和标准电压对用户供电。同时，在三相交流系统中，各相电压和电流的幅值应大小相等、相位对称且互差 120° 。但由于系统中的发电机、变压器和线路等设备非线性或不对称，负荷性质多变，加之调控手段不完善及运行操作、外来干扰和各种故障等原因，这种理想的状态并不存在，因此产生了电网运行、电力设备和供用电环节中的各种问题，也就产生了电能质量的概念。围绕电能质量的含义，从不同角度理解通常包括：

(1) 电压质量。是以实际电压与理想电压的偏差，反映供电企业向用户供应的电能是否合格的概念。这个定义能包括大多数电能质量问题，但不能包括频率造成的电能质量问题，也不包括用电设备对电网电能质量的影响和污染。

(2) 电流质量。反映了与电压质量有密切关系的电流的变化，是电力用户除对交流电源有恒定频率、正弦波形的要求外，还要求电流波形与供电电压同相位以保证高功率因素运行。这个定义有助于电网电能质量的改善和降低线损，但不能概括大多数因电压原因造成的电能质量问题。

(3) 供电质量。其技术含义是指电压质量和供电可靠性，非技术含义是指服务质量。包括供电企业对用户投诉的反映速度以及电价组成的合理性、透明度等。

(4) 用电质量。包括电流质量与反映供用电双方相互作用和影响中的用电方的权利、责任和义务，也包括电力用户是否按期、如数交纳电费等。

国内外对电能质量确切的定义至今尚没有形成统一的共识。但大多数专家认为，对现代电能质量的定义应理解为“导致用户电力设备不能正常工作的电压、电流或频率偏差，造成用电设备故障或错误动作的任何电力问题都是电能质量问题”，根据这一定义，电能质量除了保证额定电压和额定频率下的正弦波形外，还包括所有电压瞬变现象，如冲击脉冲、电压下跌、瞬时间断等。这个定义概括了电能质量问题的成因和后果，当然这里的“偏差”应作广义的理解，它还包括供电可靠性的问题。



2. 对电能质量的定义有哪些不同的认识和理解？

国际电力电子工程师协会 IEEE 对电能质量的定义是：“合格电能质量的概念指给敏感设备提供的电力和设置的接地系统是均适合于该设备正常工作的”，并已正式采用了“Power quality”（电能质量）这一术语。这提醒我们，在许多情况下，接地系统对电能质量的确存在很大的影响，而过去并没有引起足够的重视。但这个定义的缺点是不够直接和简明。

国际电工委员会 IEC 没有采用“Power quality”这一术语，而是提出使用“EMC”（电磁兼容）的概念，它对电磁兼容的定义是：“系统或设备在所处的电磁环境中能正常工作，同时不对其它系统和设备造成干扰”。指出和强调设备与设备之间、电源与设备之间的相互作用和影响，并确定了谐波电压的兼容性水平。EMC 采用“排放”反映电流质量问题，表示设备产生的电磁污染；采用“抗扰”反映电压质量问题，表示设备免除电磁污染的能力。IEC 以此为基础制定了一系列相关的电磁兼容性技术报告和文件。由于电磁兼容的技术术语与电能质量术语有很大的重叠性，包括了许多同义词，同时 EMC 提出的计算电气化铁路牵引站注入电网谐波电流允许值的原则和方法，在现场应用中与电网运行的实际情况并不完全吻合，因而也受到一些非议。

时至今日，对电能质量的范畴、定义、供用电双方的认识，以及电能质量下降的起因等诸多问题仍存在不同的认识和理解，对相关名词和术语未能达成统一，对生产中出现的电能质量问题也常各持己见、互相推诿，以致发生分歧与争论。这就要求我们继续深入探索未被认识的问题，进一步对电能质量加以细化和分类，制定和形成科学、合理，符合我国国情，符合电力发展客观规律，符合电力生产运营实际的、可操作的电能质量考核标准和综合性的评价与管理评价体系。

3. 目前针对电能质量问题研究的主要内容有哪些？

目前，研究和解决电能质量问题已成为电力发展的当务之急。主要研究课题包括：

(1) 研究谐波对电网电能质量污染的影响并采取相应的对策。由于钢铁等金属熔炼企业的发展，化工行业整流设备的增加，大功率晶闸管整流装置及电力电子器件的开发应用，使公用电网的谐波影响日趋严重，电源的波形产生了严重的畸变，影响了电网安全可靠运行。

(2) 研究谐波对电力计量装置的影响并采取相应的措施。由于波形畸变，使电力计量的准确度与精确度受到影响，致使计量误差，产生附加的功率损耗，造成不必要的经济损失。

(3) 研究电能质量污染对高新技术企业的影晌并采取相应的技术手段。由于计算机系统和基于微电子技术控制的自动化生产流水线以及新兴的 IT 产业、微电子芯片制造企业等，对电能质量的要求和敏感程度比一般电力设备要高得多，任何暂态和瞬态的电能质量问题都可能造成设备的损坏或运行异常，影响正常的生产，给电力用户造成经济损失。

(4) 加强电能质量控装置的研制。电能质量控制装置的基本功能就是要在任何条件，



甚至是极为恶劣的供电条件下改善电能质量，保证供电电压、电流的稳定、可靠，在谐波干扰产生的瞬间能立即将其抑制或消除。我国第一台高压大容量电能质量控制器（ASCG）已经正式投入运行并取得一定的成效。目前世界上只有美国、日本、中国和德国四个国家掌握了这项技术并能生产出相应的装置。从容量来说，我国在掌握了 20MVA 电能质量控制器的关键技术后，还将争取尽快研制 100MVA 甚至 120MVA 的更大容量装置，并形成一个新的信息电力支柱产业。可见，电能质量控制器有着巨大的工业和民用需求、潜在的商业市场和广阔的发展前景。

4. 我国对电网的电能质量制定了哪些国家标准？

- (1) GB 12325—1990 《供电电压允许偏差》。
- (2) GB/T 14549—1993 《公用电网谐波》。
- (3) GB/T 15543—1995 《三相电压允许不平衡度》。
- (4) GB/T 15945—1995 《电力系统频率允许偏差》。
- (5) GB 12326—2000 《电压允许波动和闪变》。该标准是在 GB 12326—1990 《电压允许波动和闪变》的基础上，参考了国际电工委员会 IEC 电磁兼容 IEC6100-3-7 等文件和标准修订后重新颁布实施的。
- (6) GB/T 18481—2001。《电能质量 暂时过电压和瞬态过电压》。

5. 国际电工委员会 IEC 对电能质量是怎样分类的？

为了能系统地了解、熟悉和研究电能质量问题，并能在工作中对电能质量反映的问题或测量结果进行分析和判断，从而找出引起电能质量问题的根本原因和采取针对性的解决办法，将电能质量现象进行科学、合理的分类是非常重要的。国际电工委员会 IEC 从电磁兼容及相互干扰的角度考虑，对引起电磁干扰的基本现象进行了分类，见表 1-1。

表 1-1 IEC 对电能质量根据电磁干扰现象的分类方式

序号	电磁干扰现象	对应电能质量产生的影响因素
1	传导型低频现象	谐波、间谐波；载波干扰；电压波动；电压跌落和中断；电压不对称；工频偏差；感应低频电压；交流电网中的直流分量
2	辐射型低频现象	工频电磁场
3	传导型高频现象	感应连续波电压或电流；单方向瞬变；振荡性瞬变
4	辐射型高频现象	磁场；电场；电磁场；连续波；瞬变
5	静电放电现象	
6	核电磁脉冲	

6. 国际电力电子工程师协会 IEEE 对电能质量问题是怎样分类的？

国际电力电子工程师协会 IEEE 根据电压扰动的频谱特征、持续时间、幅值变化等将其进行了细分，并对供电系统典型的电磁干扰现象进行了特征分类，为准确地区分电压暂



态现象提供了依据, 见表 1-2。

表 1-2 IEEE 电力系统电磁现象的特性与分类

种 类			频谱成分	持续时间	电压幅值
电磁瞬态	冲 击		上升沿 5ns	< 50ns	—
			上升沿 1 μ s	50ns ~ 1ms	—
			上升沿 0.1ms	> 1ms	—
	振 荡	低 频	< 5kHz	0.3 ~ 50ms	0 ~ 4p.u.
		中 频	5 ~ 500kHz	20 μ s	0 ~ 8p.u.
		高 频	0.5 ~ 5MHz	5 μ s	0 ~ 4p.u.
短时电压变动	瞬 时	中 断	—	0.5 ~ 30 周波	< 0.1p.u.
		跌 落	—	0.5 ~ 30 周波	0.1p.u. ~ 0.9p.u.
		升 高	—	0.5 ~ 30 周波	1.1p.u. ~ 1.8p.u.
	暂 时	中 断	—	30 周波 ~ 3s	< 0.1p.u.
		跌 落	—	30 周波 ~ 3s	0.1p.u. ~ 0.9p.u.
		升 高	—	30 周波 ~ 3s	1.1p.u. ~ 1.4p.u.
	短 时	中 断	—	3s ~ 1min	< 0.1p.u.
		跌 落	—	3s ~ 1min	0.1p.u. ~ 0.9p.u.
		升 高	—	3s ~ 1min	1.1p.u. ~ 1.4p.u.
长期电压变动		持续中断	—	> 1ms	0.0p.u.
		欠电压	—	> 1ms	0.8p.u. ~ 0.9p.u.
		过电压	—	> 1ms	1.1p.u. ~ 1.2p.u.
电压不平衡			—	稳 态	0.5% ~ 2%
波 形 畸 变	直流偏移		—	稳 态	0% ~ 0.1%
	谐 波		0 ~ 100th	稳 态	0% ~ 20%
	间 谐波		0 ~ 6kHz	稳 态	0% ~ 2%
	陷 波		—	稳 态	—
	噪 声		宽 带	稳 态	0% ~ 1%
电 压 波 动			< 25Hz	间 歇	0.1% ~ 7%
工 频 变 化				< 10s	

7. 对电能质量稳态和非稳态特性的属性是怎样分类的?

根据电磁干扰现象的特征进行划分, 可将稳态现象和非稳态现象的属性作如下分类, 参见表 1-3。

表 1-3 电能质量及电磁干扰现象的特征与属性

特 征	属 性
稳 态 现 象	幅值, 频率, 频谱, 调制, 电源阻抗, 陷落深度, 陷落面积
非稳态现象	上升率, 幅值, 相位移, 持续时间, 频率, 频谱, 发生率, 能量强度, 电源阻抗



8. 什么是电力系统频率？

电力系统频率是指电力系统统一的一种运行参数，国家标准 GB/T 15945—1995《电力系统频率允许偏差》规定以 50Hz 正弦波作为我国电力系统的标准频率（工频），并规定电力系统正常的频率标准为 $50\text{Hz} \pm 0.2\text{Hz}$ 。当系统容量较小时，可放宽到 $50\text{Hz} \pm 0.5\text{Hz}$ 。但 GB/T 15945—1995《电力系统频率允许偏差》中并没有说明系统容量大小的界限，全国供用电规则中规定了供电局供电频率的允许偏差：电网容量在 3000MW 及以上者为 0.2Hz；电网容量在 3000MW 以下者为 0.5Hz。实际运行中，我国各跨省电力系统频率的允许偏差都保持在 $+0.1 \sim -0.1\text{Hz}$ 的范围内。因此，电压频率目前在电能质量中最有保障。

9. 什么是供电电压允许偏差？

供电电压允许偏差是指电力系统各处的电压偏离其额定值的百分比。目前，GB 12325—1990《供电电压允许偏差》中规定：电压允许偏差是在正常运行条件下应保持电网各点电压在额定的水平上。其中：35kV 及以上供电和对电压质量有特殊要求的用户为额定电压的 $+5\% \sim -5\%$ ；10kV 及以下高压供电和低压电力用户为额定电压的 $+7\% \sim -7\%$ ；低压照明用户为额定电压的 $+5\% \sim -10\%$ 。

由于电网各点的电压调节不同于频率的调节，可由电网统一进行，又由于电网各点电压主要反映了该点无功功率的供需关系，因此电压调节一般采取了无功就地平衡的方式进行无功功率补偿，并及时调整无功功率补偿量，以从源头上解决问题。也有采取调整同步发电机励磁电流的方式，以产生超前或滞后的无功功率，从而达到改善网络负荷的功率因数和调整电压偏差的目的。还有利用有载调压变压器，采取对电压偏差及时调整的方式。因为从总体上考虑，无功负荷只宜补偿到功率因数 0.90~0.95，但仍然有一部分变化无功负荷要电网供给，从而产生电压偏差，这就需要分区采取一些有效的技术手段，而有载调压变压器就是有效而经济的措施之一。

10. 什么是三相电压不平衡度？

三相电压不平衡度是指三相系统中三相电压的不平衡程度，用电压或电流负序分量与正序分量的均方根百分比表示。三相电压不平衡（即存在负序分量）会引起继电保护误动、电机附加振动力矩和发热。额定转矩的电动机，如长期在负序电压含量 4% 的状态下运行，由于发热，电动机绝缘的寿命将会降低一半，若某相电压高于额定电压，其运行寿命的下降将更加严重。

我国目前执行的 GB/T 15543—1995《三相电压允许不平衡度》规定了电力系统公共连接点正常电压不平衡度允许值为 2%，同时规定了短时的不平衡度不得超过 4%，其短时允许值的概念是指任何时刻均不能超过的限制值，以保证继电保护和自动装置正确动作。对接入公共连接点的每个用户引起该点正常电压不平衡度允许值一般为 1.3%。



11. 什么是电压波动和闪变?

电压波动和闪变是指电压幅值在一定范围内有规则变动时,电压最大值与最小值之差相对额定电压的百分比,或电压幅值不超过 0.9 p.u. ~ 1.1 p.u. (标么值)的一系列随机变化。这种电压变化被称为闪变,以表达电压波动对照明灯的视觉影响。因此,闪变是说明对不同频率电压波动引起灯闪的敏感程度及引起闪变刺激性程度的电压波动值,是人眼对灯闪的一种主观感觉。

对用户负荷引起的闪变限值,是根据用户负荷的大小、协议用电容量占供电容量的比例及系统电压等级规定的。电力系统公共供电点由冲击负荷产生的电压波动允许值的百分数,分三级作不同的规范和限制。

(1) 10kV 及以下为 2.5。

(2) 35 ~ 110kV 为 2.0。

(3) 220kV 及以上为 1.6。

GB 12326—2000《电压允许波动和闪变》特别规定了各级电压下的闪变限制值,它适用于由波动负荷引起的公共连接点电压的快速变动及由此可能造成人对灯闪明显感觉的场合。

12. 什么是电压谐波?

电压谐波是指电力系统各公共连接点的电压谐波含有率允许值。国际电工委员会文件 IEC61000-3-6《中、高压电力系统畸变负荷发射限值的评估》提出了决定畸变负荷接入电网时所作评估的一些基本原则和评估程序。其目的是将供电网的谐波电压限制到对所有用电设备不致造成有害影响的水平(兼容水平),保证对接入电网的用户都有合适的供电质量,并提出了电网谐波的兼容水平、规划水平和发射水平三个方面的标准。我国目前执行的电压谐波标准是 GB/T 14549—1993《公用电网谐波》,标准中对电网 0.38, 6, 10, 35, 66, 110kV 电压等级公共连接点的电压谐波含有率允许值做了明确的规定。

13. 什么是间谐波?

间谐波是指不是工频频率整数倍的谐波。间谐波往往由较大的电压波动或冲击性非线性负荷所引起,所有非线性的波动负荷如电弧炉、电焊机,各种变频调速装置,同步串级调速装置及感应电动机等均为间谐波源,电力载波信号也认为是一种间谐波。

间谐波源的特点是放大电压闪变和对音频干扰,影响电视机画面及增大收音机的噪声,造成感应电动机振动及异常。对于采用电容、电感和电阻构成的无源滤波器电路,间谐波可能会被放大,严重时会使滤波器因谐波过载而不能投运,甚至造成损坏。间谐波的影响和危害等同整数次谐波电压的影响和危害已成共识,IEC 61000-3-6 对间谐波的发射水平作出了明确的说明,如间谐波电压水平应低于邻近谐波水平,并规定为 $(0.5\% \sim 1\%) U_N$ 。我国目前还没有制定相应的国家标准给出限制规定。



14. 什么是暂时过电压和瞬态过电压？

(1) 暂时过电压是指在给定安装点上持续时间较长的不衰减和弱衰减的（以工频或其一定的倍数、分数）振荡的过电压。

(2) 瞬态过电压是指持续时间数毫秒或更短，通常带有强阻尼的振荡或非振荡的一种过电压。它可以叠加于暂时过电压上。

暂时过电压和瞬态过电压是由于电力系统运行操作，或遭受雷击，或发生故障等因素引起的，是供电特性之一。新颁布的国家标准 GB/T 18481—2001《电能质量 暂时过电压和瞬态过电压》，规定了作用于电气设备的暂时过电压和瞬态过电压要求、电气设备的绝缘水平及过电压保护方法，并对过电压的相关术语、定义做了比较详尽的论述。

15. 什么是电压暂降和电压上升？

(1) 电压暂降是指由于系统故障或干扰造成用户持续时间 0.5 周波至 1min 内下降到额定电压或电流的 10% ~ 90%。即幅值为 0.1p.u. ~ 0.9p.u.（标么值）时系统频率仍为标称值，然后又恢复到正常水平。国际上普遍认为，电压幅值低于 0.1p.u.（标么值）或大于 0.5 个周波的供电中断对敏感用户和严格用户而言都属于断电故障。电压暂降可能造成某些用户的生产停顿或次品率增加，而供电恢复时间取决于自动重合闸或自动功能转换装置的动作时间，因此传统的机械式断路器已不能满足对敏感和严格用电负荷的需求，目前主要采取的方案是利用高速固态切换开关 SSTS、动态电压恢复器 DVR 或利用不间断电源 UPS 作后备电源并配合固态电子开关等措施。

(2) 电压上升是指电压的有效值升至额定值的 110% 以上，典型值为额定值的 110% ~ 180% 称为电压上升，即暂时性超过标称值 10% 以上，系统频率仍为标称值，持续时间为 0.5 周波 ~ 1min，幅值为 1.1p.u. ~ 1.8p.u.（标么值）。

16. 什么是断电和电压中断？

(1) 断电是指由于系统发生故障，造成用户在一定时间内一相或多相失去电压，低于 0.1p.u. 称为断电。断电按持续时间分为三类：其一，0.5 ~ 3s 称为瞬态断电；其二，3 ~ 60s 称为暂时断电；其三，大于 60s 称为持续断电。

(2) 电压中断是指断电的持续时间大于 3min。

断电和电压中断往往是由于电力系统故障引起的，如供电线路遭受雷击、对地闪络，或是系统线路发生外力破坏致使保护动作等。由于短时失电后又重合闸，致使电压突然跌到零或接近零。电压中断将致使一些用户生产停顿，造成重大的经济损失或产生严重的后果。

17. 什么是电压瞬变？

电压瞬变又称为瞬时脉冲，是指在一定时间间隔内，两个连续稳态之间的一种在极短时间内发生的现象或数量变化。



这种瞬时脉冲可以是任一极性的单方向脉冲，也可以是第一个峰值为任意极性的衰减振荡波，即发生在任一极性阻尼振荡波的第一个尖峰。

18. 什么是过电压和欠电压？

(1) 过电压是指电压幅值超过了标称电压，且持续时间大于 1min。过电压的幅值为 1.1p.u. ~ 1.2p.u. (标么值)。

(2) 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 0.8p.u. ~ 0.9p.u. (标么值)。

19. 什么是交流电网中的直流分量？

交流电网中的直流分量是指在交流电网中由于非全相整流负荷等原因引起的直流成分影响。直流分量会使电力变压器发生偏磁，从而引发一系列的影响和干扰，例如，当 500kV 直流输电线路单极接地时，会引起变电站主变压器的运行噪声和机械振动急剧增加。

20. 什么是载波电压信号？

载波电压信号是指在电力输电线路中传递的高频电压信号，也有人认为载波电压信号是一种间谐波。由于电压闪变是由电网电压幅度波动而引起的，它的数学模型也用调幅信号表示。因此，电压闪变与载波电压信号的频率和幅值有一定的相关性，载波电压信号的频率和幅值必须满足相关技术标准的规定。

21. 什么是电压切痕？

电压切痕（也称为电压缺口）是指一种持续时间小于 0.5 周波的周期性电压扰动。电压切痕主要是由于电力电子装置在有关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。电压切痕的频率会非常高。用常规的谐波分析仪器很难测量出电压切痕，这就是过去从未有过的此项电压扰动的内容，直到最近才被国际电力电子工程师协会 IEEE 列入的主要原因。

22. 什么是稳态电压扰动？

稳态电压扰动是指以电源电压波形畸变为特征而引起电能质量污染的各种稳态电能质量问题。稳态电压扰动主要包括：

(1) 谐波。其特征指标是出现谐波频谱电压和谐波频谱电流的波形。

(2) 陷波。其特征指标是陷波的持续时间及幅值大小。

(3) 电压闪变。其特征指标是波动幅值、调制频率等。

(4) 三相电压不对称。其特征指标是不平衡因子，产生的主要原因是三相负载不平衡。



23. 什么是暂态（瞬态）电压扰动？

暂态（瞬态）电压扰动是指电源电压的正弦波形受到暂态（瞬态）的电压扰动而发生畸变，引起电能质量的污染的各种问题。暂态电能质量问题是以前谱和暂态持续时间为特征的，一般分为脉冲暂态和振荡暂态两种类型。暂态（瞬态）电压扰动的主要特征包括：

(1) 暂态谐振。其特征指标是波形、峰值和持续时间，产生的原因是由于线路、负载和电容器组的投切，造成的后果是破坏运行设备的绝缘、损坏电子设备等。

(2) 暂态脉冲。其特征指标是电压上升时间、峰值和持续时间，产生的原因是线路遭受雷击或感性电路分合等，造成的后果是破坏运行设备的绝缘。

(3) 瞬时电压上升或暂降。其特征指标是幅值、持续时间、瞬时值/时间，产生的原因通常是由于大容量电动机启动、负荷瞬变、电力系统切换操作或远端发生故障等引起的，这是电力用户投诉最多的一种电压扰动，这是因为瞬时电压上升或暂降可能造成用电设备发生运行故障、敏感负载不能正常运行等后果。

24. 什么是动态电能质量问题？

国际电力电子工程师协会 IEEE 将电磁系统中典型的暂态现象进行了特征分类，主要列出了暂态和瞬态扰动现象，根据扰动的频谱特征、持续时间、幅值变化等，将其分为瞬时、短时和长期的电压变动三大类，在此基础上又进一步细分出 18 个子类。其中，短时电压变动，尤其是电压中断和跌落已成为国际上所关注的问题。这些问题对于具有较强惯性距的传统电机设备也许没有明显的影响，但对敏感和严格的用电负荷，如集成电路芯片制造和微电子控制的生产流水线等，将可能造成极大的危害，并已成为现代电能质量的重要问题，使电能质量的内涵也发生了较大的变化。

(1) 传统的电能质量问题，如谐波、三相不对称等继续存在，而且严重性正在增加。

(2) 目前，随着供电可靠性的不断提高，人们已逐步将注意力转向新的动态电能质量问题。如持续时间为毫秒级的动态电压升高、脉冲、电压跌落和瞬时供电中断等。

常见的几种动态电能质量问题的波形示意图和波形见图 1-1。电能质量问题的性质、产生原因及解决方法见表 1-4。

表 1-4 电能质量问题的性质、产生原因及解决方法

类型	扰动性质	特征指标	产生原因	后果	解决方法
谐波	稳态	谐波频谱电压、电流波形	非线性负载、固态开关负载	设备过热，继电保护误动，设备绝缘破坏	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、电机启动	伺服电机运行不正常	静止无功补偿



续表

类型	扰动性质	特征指标	产生原因	后果	解决方法
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，瞬时电压下降	暂态	幅值、持续时间、瞬时值/时间	远端发生故障、电机启动	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	稳态/暂态	幅值、频谱	不正常接地、固态开关负载	微处理器控制设备不能正常运行	正确接地、滤波器

动态电能质量问题是近年来随社会信息化的日益发展而逐渐暴露出来的新问题。对这些动态电能质量问题的研究还处在起步阶段，如何界定动态电能质量问题，用什么样的特征进行描述，怎样制定合理的指标进行评估等，都还缺少成熟的经验和方法。这些都需要

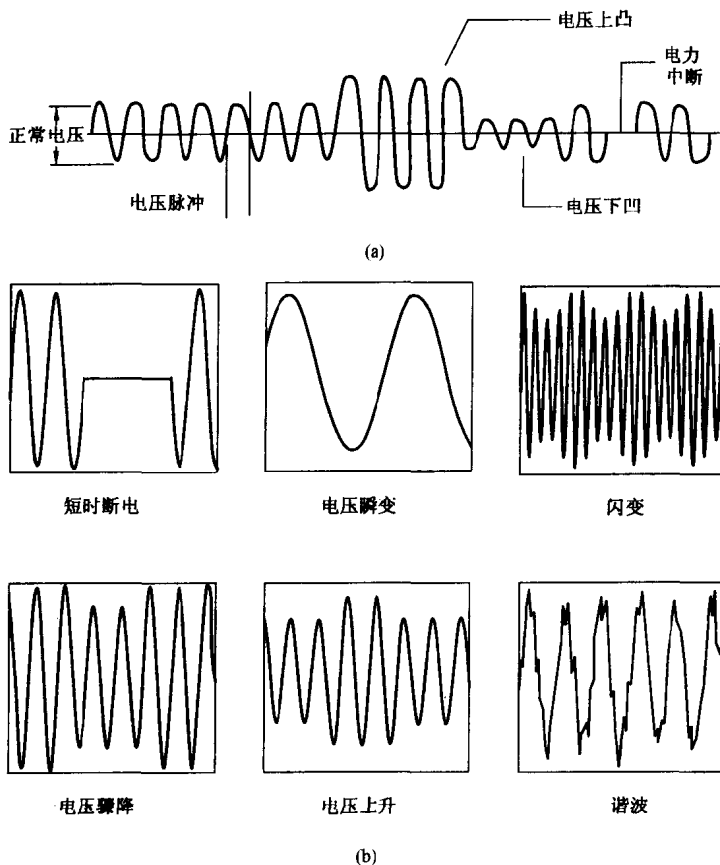


图 1-1 几种常见动态电能质量问题的波形示意图和波形

(a) 几种常见动态电能质量问题的波形示意图；

(b) 常见的几种电能质量问题波形



进一步深入地研究、探索和实践。

25. 用电负荷的分类与电能质量的敏感度有哪些对应关系？

根据用电设备负荷的特性及不同的用电负荷对电能质量的要求与敏感度，一般将用电负荷分为三大类。

1. 普通负荷 (Common Load)

普通负荷对电能质量的要求不太高，只有在发生持续断电或电压波动幅度过大，持续时间较长时才会受到影响。同时，本身对电网的电能质量基本不形成影响和危害。如照明设备、加热器、通风机、一般家用电器等。

2. 敏感负荷 (Sensitive Load)

敏感负荷对电能质量有一定的要求，电能质量不好可能对此类负荷会造成一定的影响和危害。同时，本身对电网的电能质量也可能造成一定的影响和污染。因此，需要采取一定的措施和对策。如电动机控制器、UPS 电源、变频调速装置等。

3. 严格负荷 (Critical Load)

严格负荷对电能质量的要求非常高，电能质量出现问题对严格负荷会造成严重的后果，可能损坏设备，影响生产。同时，对电网的电能质量也会造成一定的影响和危害。因此，对严格负荷必须确保电能质量符合应用要求。如集成电路芯片制造流水线、微电子产品的智能化流水线、银行及证券交易中心的计算机系统等，均属于严格用电负荷。

26. 什么是定制电力？

定制电力也被称为定质电力，它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和控制技术来实现电能质量的控制和改善，为电力用户提供电能质量特定需求的电力供应技术。

实现定制电力的前提是电力电子技术发展的水平，尤其是晶闸管器件的先进性、稳定性和可靠性，以及经济实用性水平。现代社会的发展对提高供电可靠性、改善电能质量提出了越来越高的要求。在现代企业中，由于变频调速驱动器、基于微电子技术控制的自动化生产线、半导体芯片制造、精密仪器仪表、可编程控制器、计算机信息系统等日益广泛的应用，对电能质量的控制提出了越来越严格的要求。这些设备对电源的波动和各种干扰十分敏感，任何供电质量问题的影响和恶化都有可能引起产品质量的下降、仪器设备的损坏，甚至造成企业重大的经济损失。因此，根据现代社会发展的实际需求和一些企业的客观需要，便产生了以电力电子技术和现代控制技术为基础的定制电力技术 (Custom Power Technology)。

27. 实现定制电力的基础和条件是什么？

1. 实现定制电力的基础

定制电力是现代电力电子技术及相关的检测和控制技术在配电领域的应用，其运行的可靠性、不断降低的成本和均衡其应用带来的效益是实现定制电力的基础。为提高配电系



统无功调节的质量，目前已开发并投入应用的系统设备主要有：

(1) 用于配电系统的静止无功发生器 (D-STATCOM)。它由储能电路、GTO 或 IGBT 变换电路和变压器组成。它的功能是快速调节电压，发生和吸收电网的无功功率，同时可以抑制电压闪变。这是定制电力的关键设备之一。

(2) 静止无功发生器和固态开关配合系统。可在电网发生故障的暂态过程中保持电压恒定。

(3) 动态电压恢复器 (Dynamic Voltage Restorer, 简称 DVR)。它由直流储能电路、变换器和串联在供电线路中的变压器构成。变换器根据检测到的线路电压波形情况产生补偿电压，使合成的电压动态保持恒定。无论是短时的电压低落或过电压，通过 DVR 均可以使负载上的电压保持动态恒定。

2. 实现定制电力的条件

实现定制电力的条件必须要由供用电双方共同努力。因为它不仅仅是供电企业单方面的责任，这是基于现代电能质量的许多问题大部分并不是电力系统电源本身产生的。

其一，现代非线性用电设备负荷的大量增加和复杂化不可避免地对公用电网造成污染，降低了电力系统的电能质量，影响和干扰了其他电力用户的设备运行和正常生产。

其二，不可抗拒的因素（如雷击等）导致供电中断。这种“责、权、利”的问题若都由供电企业承担，既没有法律依据，也会给供电企业带来极大的负担。

因此，对电能质量有特定需求的电力用户，要么由供用电双方共同承担提高电能质量的设施建设费用，要么实行优质优价的电价机制，才能从根本上解决实际问题。当前，一些重要的电力用户为保证优质的不间断供电，往往自己采取措施，如安装不间断电源 (UPS) 等，但这并不是经济合理的解决办法。根本的出路在于供电企业、用电企业和电力设备制造商能共同协调，齐心协力解决电能质量问题。

(1) 供电企业应根据用户的需要，保证可靠和优质的电能供应，在系统关键的配节点采取有效的技术手段和必要措施来提高供电质量，同时加强电能质量的监督和管理，确保优质供电。

(2) 用电企业能根据自身的实际需求，加强电能质量的监测和控制，对公用电网电能质量造成污染的电力用户，依据谁污染谁治理的原则，积极采取治理措施。

(3) 电力设备制造商要提高设备质量，提高技术水平，分析设备产生电能质量污染的原因、研究污染机理和提出解决对策。

三方要共同建立强烈的电能质量意识、各自的责任意识，才能有效地提高电能质量水平。

28. 什么是可控串联补偿输电技术？

可控串联补偿的正式名称是晶闸管可控串联补偿 (TCSC)。用电容器串联在输电线路路上，可抵消部分线路电感 (L)，达到降低线路电压降、减小输电线路功率角、提高线路输电容量、增进电网稳定性的目的，这种技术效果显著，已被广泛采用。问题是串联补偿在不可控的情况下，不能随时按现场的实际需求进行补偿参量的调整，另外，当系统和串



联电容的自然振荡频率电流与汽轮机和发电机转子轴系统产生谐振时，就会引起发电机轴扭振。这时，最好的解决办法也是采用补偿可控的措施。因此，在串联电容上并联一组晶闸管控的电阻电感是可控串补的基本形式，晶闸管（V）的导通角受控制器的控制，使串联电容（C）的等值容抗根据晶闸管导通角的动态变化进行连续调节，按需求自动快速反应电网的变化，实现最佳的补偿效果，其基本原理见图 1-2。

(1) 提高系统暂态稳定方面。系统发生短路，可控串补可在故障切除后瞬时加大补偿度，使输送功率增加。系统渐趋平衡后，由于并不需要长时间过大的输送功率，可控串补在预计稳定时迅速减小补偿度，使等值容抗下降，回到正常运行的补偿水平。

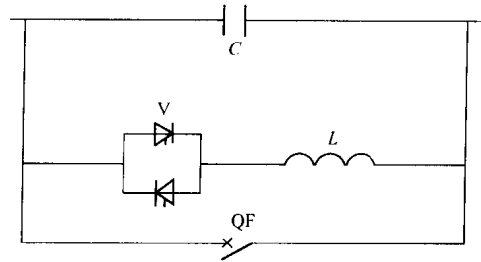


图 1-2 可控串联补偿原理图

(2) 提高系统电压稳定方面。系统在故障电流或冲击负荷电流的作用下，将使系统阻抗引起的电网受电端电压在短时间急速下降，当电压低过一个极限后，可能出现电压失稳或电压崩溃。另大容量电动机启动时，功率因数往往下降到 0.3 以下，无功功率较大时，造成电压崩溃的可能性更大，而可控串补可提高系统承担过大电流的能力，提高电压稳定的裕度。

(3) 抑制系统低频振荡方面。系统发生低频振荡时，传输功率和功率角将以某一频率摇摆，并逐步恢复到稳定状态。若系统阻尼过小，则振荡可在故障后持续很长时间。而可控串补能在功率角增大时增加补偿电压、加大输送功率，功率角减小时降低补偿电压、减小输送功率，起到有效增加系统阻尼的作用；能改变线路电抗，实现抑制低频振荡和次同步谐振的功能。同时可控串补还能改变网络中的功率潮流，使电网运行更为经济合理。

(3) 抑制系统低频振荡方面。系统发生低频振荡时，传输功率和功率角将以某一频率摇摆，并逐步恢复到稳定状态。若系统阻尼过小，则振荡可在故障后持续很长时间。而可控串补能在功率角增大时增加补偿电压、加大输送功率，功率角减小时降低补偿电压、减小输送功率，起到有效增加系统阻尼的作用；能改变线路电抗，实现抑制低频振荡和次同步谐振的功能。同时可控串补还能改变网络中的功率潮流，使电网运行更为经济合理。

29. 什么是柔性交流输电技术？

柔性交流输电技术（FACTS）又称为基于电力电子技术的灵活交流输电系统，是由美国著名的电力专家 N.G.Hingorani 于 1986 年首次提出的。根据 IEEE 及国际大电网会议（CIGRE）于 1995 年共同认定的定义是：“一类以电力电子技术为基础并具有其他静止控制器的交流输电设备，它们能增强可控能力并增大输电容量”。因此，柔性交流输电技术就是基于电力电子变换器技术并直接作用于输电系统的一些快速控制设备的集合群。

柔性交流输电技术通过控制电力系统的基本参数来灵活控制系统潮流，使电力传输容量更接近线路的热稳定极限。从这一意义上讲，柔性交流输电技术是目前提高供电可靠性和提高输电系统传输容量的最有效的措施。

30. 柔性交流输电系统的设备有哪些种类？

柔性交流输电系统设备一般是根据变换器的换相形式及与电网的联接方式进行分类的，FACTS 系统的各类设备可参见表 1-5。



表 1-5

FACTS 系统设备的种类

变换器换相形式	与电网并联	与电网串联
自然换相	静止无功补偿器 (SVC)	晶闸管控制相位转换变换器 (TCPST)
	晶闸管控制制动电阻器 (TCBR)	晶闸管控制串联补偿电容器 (TCSC)
	负荷分流转换器 (LTC)	晶闸管控制串联投切电容器 (TSSC)
	晶闸管控制电压限制器 (TCVL)	晶闸管控制串联电抗器 (TCSR)
强迫换相	静止同步补偿器 (STATCOM)	静止同步串联补偿器 (SSSC)
	超导磁能存贮系统 (SMES)	
	蓄电池能源存贮系统 (BESS)	
统一潮流控制器 (UPFC)		
可转换静止补偿器 (CSC)		

在表 1-5 所列 FACTS 设备中:

(1) 串联补偿装置, 如 TSSC、TCSC 等能使输电线路的阻抗变小, 相当于缩短了输电线路的长度, 因而是提高电力系统输送容量和提高暂态稳定性的重要手段。

(2) 并联补偿装置, 如 STATCOM 等, 通过与电力系统进行无功功率的交换, 能维持电力线路电压的基本恒定, 因而是抑制系统电压波动、闪变和提高系统稳定性, 特别是电压稳定性的有力工具。

(3) 统一潮流控制器 UPFC, 它综合了串、并联补偿的功能和特点, 能对线路电压、阻抗、相位进行有效的控制, 因而是实现电力网络控制潮流、阻尼振荡, 提高系统稳定性等多种功能的得力措施。

静止同步补偿器 (STATCOM)、静止同步串联补偿器 (SSSC) 及统一潮流控制器 (UPFC) 是 FACTS 系统中最基本、最关键的设备, 目前已在现场得到了成功的应用, 并在逐步完善和发展。尤其是静止同步补偿器 (STATCOM), 它的发展将有可能取代早期出现且正在我国推广应用的静止无功补偿器 (SVC)。

31. 柔性交流输电系统的设备分别有哪些功能?

柔性交流输电系统 (FACTS) 的设备作用于电网的主要功能参见表 1-6。

表 1-6

FACTS 系统设备作用于电网的具体功能

设备名称	有功控制	无功控制	电压控制	电流控制	无功补偿	谐波抑制	暂态稳定	电压稳定	抑制故障电流
静止无功补偿器 (SVC)			✓		✓	✓	✓	✓	
静止同步补偿器 (STATCOM)			✓		✓	✓	✓	✓	
晶闸管控制制动电阻器 (TCBR)						✓	✓		
静止同步串联补偿器 (SSSC)				✓		✓	✓	✓	✓
晶闸管控制串联电容器 (TCSC)				✓		✓	✓	✓	✓
晶闸管控制串联电抗器 (TCSR)				✓		✓	✓	✓	✓
晶闸管控制电压限制器 (TCVL)		✓	✓			✓	✓	✓	
控制相位转换变换器 (TCPST)	✓					✓	✓	✓	
统一潮流控制器 (UPFC)	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓



32. 我国研制的 FACTS 装置的特点有哪些？

我国由清华大学和原河南省电力局共同研制出的 20 Mvar STATCOM 工业应用装置，标志着我国是继美国、日本、德国之后，第四个掌握制造大容量 FACTS 装置核心技术的国家。该装置具有补偿动态电压、抑制系统不平衡和振荡、提高系统稳定极限等功能，也是迄今为止我国唯一具有自主知识产权的 FACTS 工业装置。

图 1-3、图 1-4 分别是 20 Mvar STATCOM 装置实物图及响应曲线。

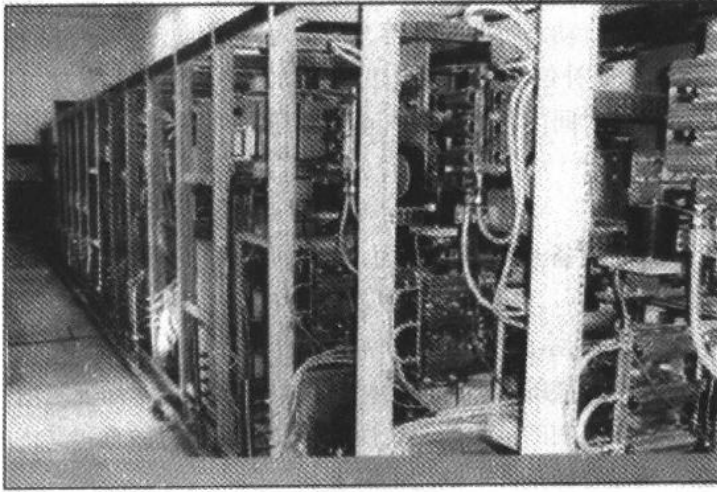


图 1-3 20 Mvar STATCOM 装置

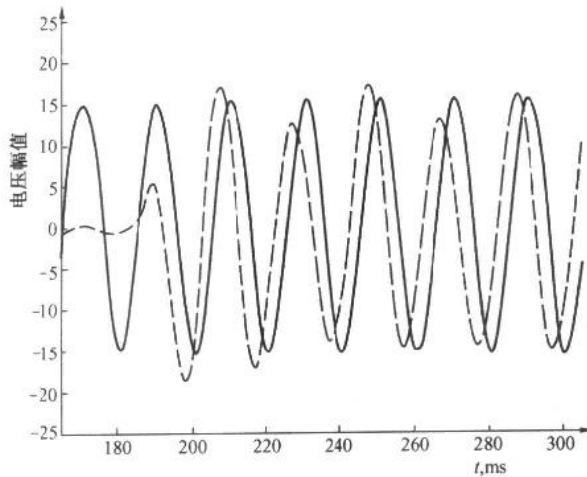


图 1-4 20 Mvar STATCOM 装置响应曲线

33. 什么是柔性配电技术？

将柔性交流输电技术中的现代电力电子技术及相关的检测和控制设备延伸应用于配电



领域称为柔性配电技术 (DFACTS), 又称为 Custom Power 技术。

柔性配电技术是改善电能质量的有力工具。其技术的核心器件 IGBT 比 GTO 具有更快的开关频率, 目前的关断容量已达到兆伏安级。因此, DFACTS 装置具有更快的响应特性。

1. DFACTS 工作原理

DFACTS 系统的工作原理, 是通过检测电能质量的相关参数, 控制时间在毫秒级动作的快速电子开关, 经柔性配电设备进行相应的参数补偿, 这些设备既能对配网的稳态特性起到补偿的效果, 又能提供快速的无功支撑、稳定电压波形、消除配网中的谐波、抑制电压波动和闪变等, 还能进行动态特性的补偿、平滑短时的供电电压中断和跌落等。其中: 有源电力滤波器 (APF) 是补偿谐波的有效工具; 动态电压恢复器 (DVR) 是通过自身的储能单元, 能够在毫秒级时间内向系统注入正常电压与故障电压之差。因此, DFACTS 对抑制电压暂降非常有效。

2. DFACTS 系统组成

DFACTS 系统组成的设备包括配电静止同步补偿器 (DSTATCOM)、固态切换开关 (SSTS) / 固态断路器 (SSCB)、动态电压恢复器 (DVR)、有源电力滤波器 (APF)、蓄电池储能系统 (BESS) / 超导储能系统 (SMES) 等。

对现代电能质量技术延展的动态特性指标, 在柔性配电技术出现之前, 仅靠传统的调整手段是不可能进行有效控制的。因此, 柔性配电技术能够为敏感和严格的电力用户提供优质、可靠的电能, 满足特殊条件下的用电需求。

34. 柔性配电技术的关键问题是什么?

柔性配电技术的关键是现代电力电子技术的发展水平, 特别是晶闸管器件的先进性、可靠性和经济适用性。其关键主要体现在以下两点:

(1) 全可控器件的技术和成熟应用。如门极可关断晶闸管 (GTO) 阻断电压达 1 ~ 5kV、通流能力达 1kA。绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 阻断电压可达 2kV、通流能力达 6kA。这两种器件在技术上都已经比较成熟, 目前已在轻型直流输电、变频器等设备中得到广泛的应用。

(2) 新涌现的器件技术水平进一步提高。如集成门极换向晶闸管 (IGCT), 阻断电压可达 1.5kV, 通流可达 1.7kA, 可关断频率达数千赫兹。

电子器件技术的发展, 一方面使器件本身的可靠性水平不断提高, 另一方面使得器件的控制策略更加灵活、控制速度更加快捷, 为柔性配电技术装置的健全和完善创造了良好的条件, 为实现真正意义上的柔性输配电系统奠定了坚实的基础。

35. 国外柔性配电技术的研究和应用有哪些进展?

国外一些先进国家对柔性配电技术的研究和应用进行了大规模的投入。其中, 美国电力科学研究院 EPRI、瑞典 ABB 公司、德国 Siemens 公司已有了配电静止同步补偿器和动态电压恢复器的商业化产品, 并有数十例在配电系统和特殊的用户端投入了运行。

