

## 1. 什么是电能质量?

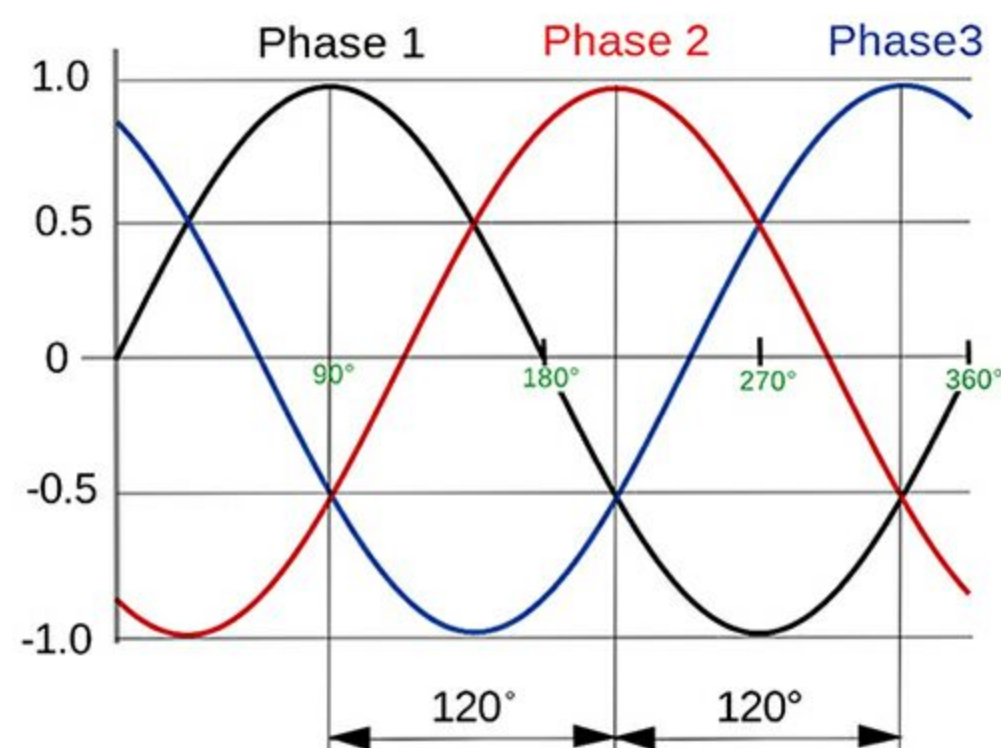
电能作为一种商品，当然也有质量问题，但是电能又不同于普通商品，它的生产和使用几乎在同一时间完成，无法做到事前或事后的检测，也不能用肉眼观测，这决定了必须采用特定的方法来检测、控制电能质量。

自从电能诞生的那一刻起就已经有电能质量问题，只是那时候的电力负载比较简单，对电能质量的要求比较简单，主要是对电压和频率幅值的要求。随着技术的发展，非线性电力电子器件的广泛应用以及大功率冲击性、波动性负荷投入，都会对电能质量产生影响，另一方面各种复杂的、精密的设备对电能质量也非常敏感，所以人们不仅仅对供电可靠性的要求越来越高，而且对电能质量的要求也越来越高。

不同国家和组织对电能质量有不同的定义和理解：

- 对供电公司来说，电能质量就是可靠性。
- 从负载的角度来说，电能质量指为所有设备（包括敏感设备）提供令人满意的性能所提供的电源。
- 从最终用户角度来说，电能质量指“任何表现为电压、电流或频率偏差的电源问题，导致客户设备出现故障或误动作”。
- IEEE 标准将电能质量定义为“以适合该设备运行的方式为敏感设备供电和接地”。
- IEC 标准将电能质量被定义为“一组参数，用于定义在正常操作条件下交付给用户的电源特性，包括电源的连续性和电压特性（幅度、频率、波形）”。
- 我们国家《GB/T 32507-2016电能质量术语》标准将电能质量定义为电力系统指定点处的电特性，关系到供用电设备正常工作(或运行)的电压、电流的各种指标偏离基准技术参数的程度。

在理想的三相电力系统中，电压处于标称幅值和频率，三相平衡并具有完美的正弦波形。对一个参数（幅值、频率、波形或对称性）的任何干扰都被归类为电能质量问题或电能质量扰动。存在多种电能质量扰动——电压暂降、谐波、瞬态等——所有这些扰动都会对电力系统和设备产生负面影响，例如停电、设备损坏、故障、过热、设备性能下降和设备寿命减少。



完美的三相电压波形



## 2. 电能质量事件分类及描述

### 2.1 电能质量事件分类

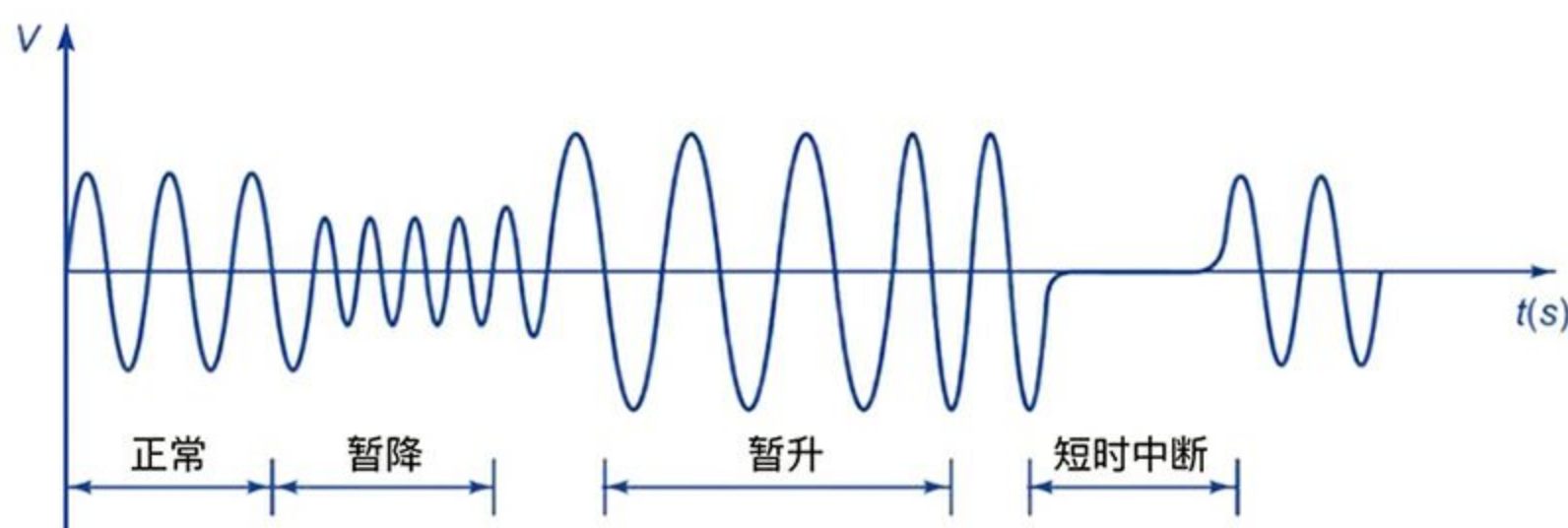
最简单的电能质量事件就是我们常说的“停电”，即输送到负载的电力突然消失，也称为“电力中断”。IEEE 1159 标准将电能质量分成7类：

- 瞬态，包括冲击瞬态、振荡瞬态
- 短时扰动，包括短时中断、暂升、暂降
- 长时扰动，包括持续中断、过电压、低电压
- 电压不平衡
- 波形畸变，包括直流偏置、谐波、间谐波、缺口、噪音
- 电压波动
- 频率扰动

### 2.2 电能质量事件描述

#### 1. 电压暂降

电压暂降 (voltage sag/dip) 是电压方均根值突然降至0.1 p.u.~0.9 p.u.，并在短暂持续10ms~1min后恢复正常的现象，电压暂降是由雷击、电力系统故障、大电机启动、变压器投切引起的，电压暂降通常会导致灯光变暗或闪烁、计算机设备锁定、控制系统失效等。



电压暂降、暂升、短时中断

#### 2. 电压短时中断

电压短时中断 (short interruption) 是电压方均根值突然降至0.1 p.u.以下，并在短暂持续10ms~1min后恢复正常的现象。电压短时中断可以理解成电压暂降的一种特殊形式。根据其持续时间的不同分为瞬时中断、暂时中断、短时中断 (0.5周波—30周波—3秒—1分钟)，不同标准对电压短时中断的阈值和持续时间的规定可能会不同。

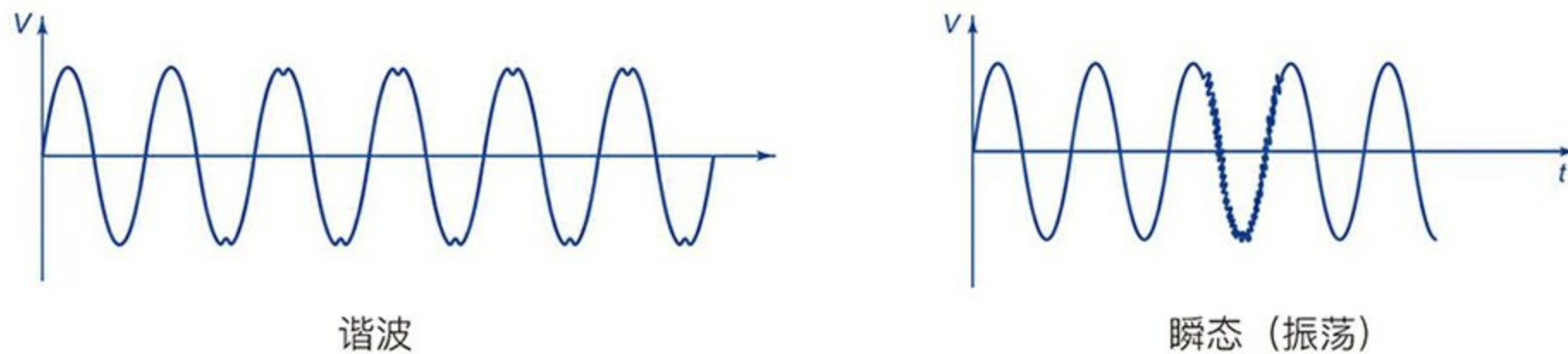
#### 3. 电压暂升

电压暂升 (voltage swell) 是电压方均根值上升到 1.1p.u.~1.8p.u. 之间，并在短暂持续10ms~1min后恢复正常的现象，大多数的电压暂升是由电机停止或单线接地故障引起的。通常不会引起什么问题，但已知会导致电子设备中的边缘组件发生故障。



#### 4.谐波

谐波是对周期性非正弦交流量进行傅里叶级数分解所得到的大于基波频率整数倍的各次分量，单次谐波也是正弦波的电压或电流，其频率是供电系统运行频率的整数倍。谐波通常是由电子设备引起的波形的有规律的失真，谐波会导致变压器、导线、电机过热，也会影响测量、计量精度。



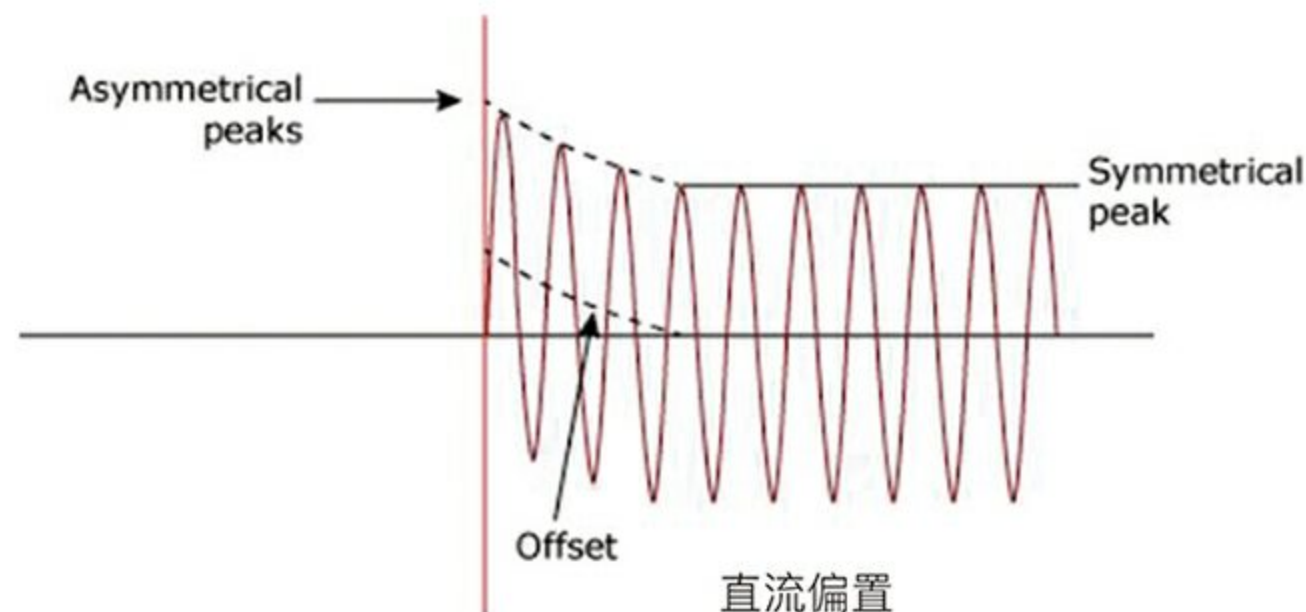
#### 5.瞬态事件

瞬态事件 (transient) 是由于系统中状态突然变化引起的短暂的能量爆发。瞬态也称为浪涌 (surges) 或尖峰 (spikes)，是由闪电、用电器、断路器、电容器的投切引起。瞬态可以按波形分成两类，一是冲击瞬态 (impulsive transient)，通常称为“尖峰”，因为高频尖峰从波形中突出。另一种是振荡瞬态 (oscillatory transient)，比如是电容器投切瞬态，因为振铃波形会继续运行并使正常波形失真，它的频率较低，但能量较高。

瞬态可能会扰乱计算机、破坏数据，甚至会损坏电源和设备组件。

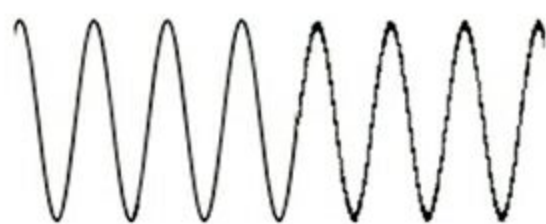
#### 6.直流偏置

直流偏置 (DC offset) 是交流电力系统中存在直流电流或者直流电压的现象，这通常是由于交直流整流器出现故障引起的，直流电可以穿过交流电源系统并向已经在其额定工况下运行的设备添加不需要的电流。变压器的过热和饱和也会引起循环直流电流，当变压器饱和时，它不仅会变热，而且无法满功率运行，随后的波形失真会进一步导致电子负载设备的不稳定。



#### 7.噪声

噪声 (noise) 是特定环境下产生相对无用的、甚至是有害影响的存在于电路中的电信号，也就是叠加在电力系统电压或电流波形上的不需要的电压或电流。电力电子设备、控制电路、弧焊机、开关电源、无线电发射机等都会产生噪声。接地不良的系统更容易受到噪音的影响，噪声会导致设备技术问题，例如数据错误、设备故障、设备提前失效、硬盘故障和视频显示失真。



噪声波形图

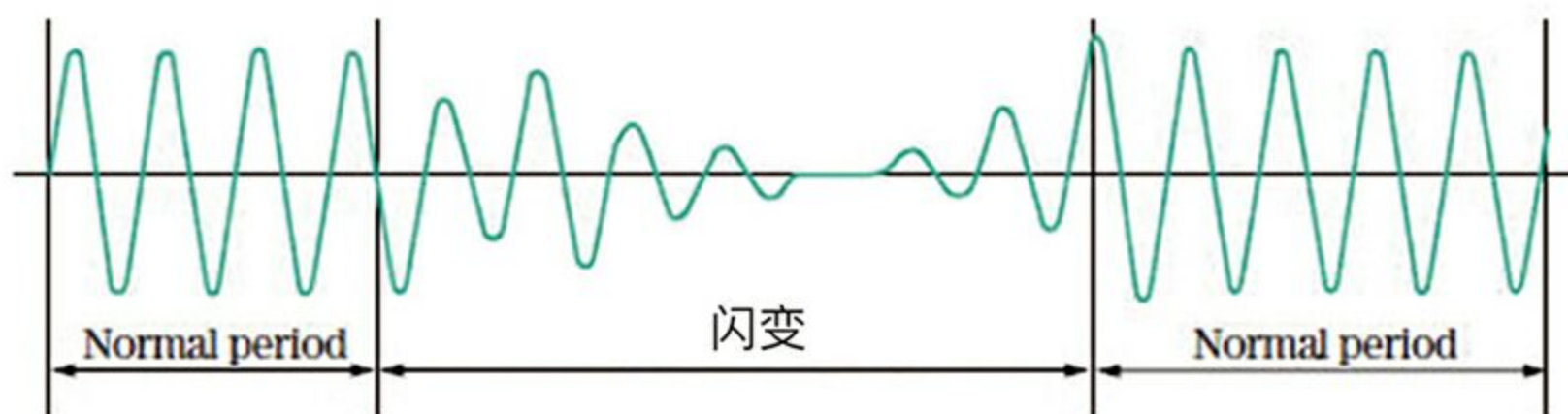
射频干扰引起的噪声是来自如电视、无线电发射器、手机之类的发射高频电能的设备的电气干扰，干扰也可能由电弧或开关电源引起，例如电子镇流器和变频器。这种噪声往往会对控制电路造成干扰。



## 8. 闪变

闪变(flicker)是人对于视觉不稳定的感受,这种视觉不稳定是由于供电电压波动引起光源的照度或频率随时间变化而导致的,其根源是由于设备或设施的负载电流变化而在电网的源阻抗上产生的电压降,从而产生闪变。这些波动会产生闪烁。闪变会对人的视觉造成影响,还可能影响敏感电子设备,例如电视接收器、恒功率工业设备。

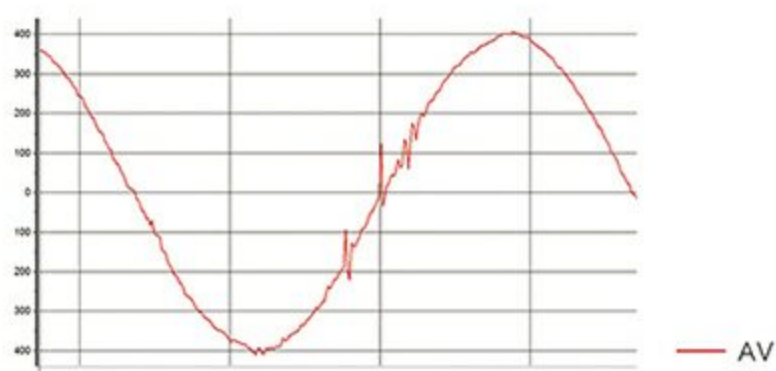
例如,钢铁厂使用大功率电机、电弧炉、频繁启停电动机,或者在长馈电线路上定期启停大电机,这些都可能会产生闪变。



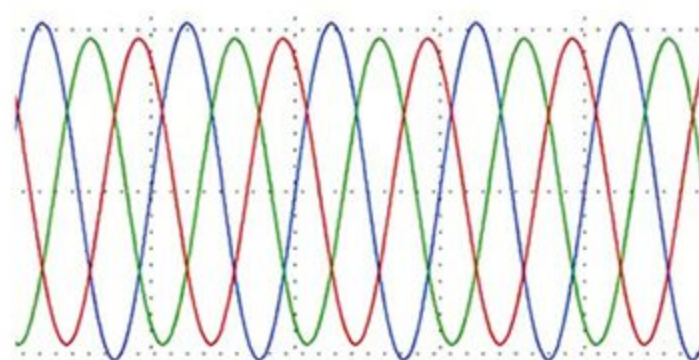
闪变波形图

## 9. 缺口

缺口(notching)是电力电子装置在进行正常电流换相时导致的周期性电压波形局部凹陷状槽口,缺口主要由产生连续直流电流的三相整流器或转换器引起,当电流从一相换向另一相时,就会出现缺口。此外,缺口是一种介于谐波和瞬态之间的特殊情况,这是因为缺口是稳态扰动,它可以通过受影响电压的谐波频谱来区分,另一方面,缺口频率分量有些高,可能无法用常用的谐波分析仪来测量。



缺口波形图



电压不平衡

## 10. 电压不平衡

电压不平衡(voltage unbalance)是指三相系统的相电压有效值不相等,相电压很少能做到完全相等,但当不平衡度超过一定值时,就会给三相电机带来问题,变频器更容易受到电压不平衡的影响。

## 3. 电能质量扰动的经济损失

由于电能质量问题发生的频率会影响财务收益,电能质量是最终用户日益关注的一个领域:当今所有非计划停机时间中有 30% 至 40% 与电能质量问题有关。例如,在工业部门,电能质量差产生的损失成本可达到年营业额的 4%,通常相当于应付能源账单的总额。电能质量会造成以下不良的影响:

- 增加能源损耗
- 计划外停机
- 设备过早老化
- 电力公司的罚款
- 生产率下降
- 增加维护服务成本
- 可靠性降低
- 人员利用率低
- 需要加大设备选型, 增加设备采购和安装成本
- 敏感设备损坏, 如工控机、控制系统



2008年，莱昂纳多电能质量联盟（LPQI）发布电能质量经济性调查报告，主要目的是估算欧洲 25 国中的重要行业因电能质量问题而产生的损失成本。调查在8个欧洲国家进行，为期2年，总共进行了62次完整访谈，该报告中列出了每年度电压暂降和中断造成损失成本，12个月内电能质量事件报告数量的调查结果见下表。这项研究结果表明，由于电能质量扰动干扰，浪费了大量的资源，电压暂降和短时中断是发生概率最高、损失最大的电能质量事件。

工业类型 Type of Industries	事件次数 Number of evens				年 Annual%
	电压暂降 Voltage sags	短时中断 Short Interruption	长时中断 Long interruptions	浪涌和瞬态 Surges & transients	谐波 Harmonics
工业 Industry	15.7	6.9	2.2	13	9.0%
服务业 Services	7.7	5.4	2.1	6.7	7.5%
平均 Average	13.2	6.4	2.2	11.3	8.5%

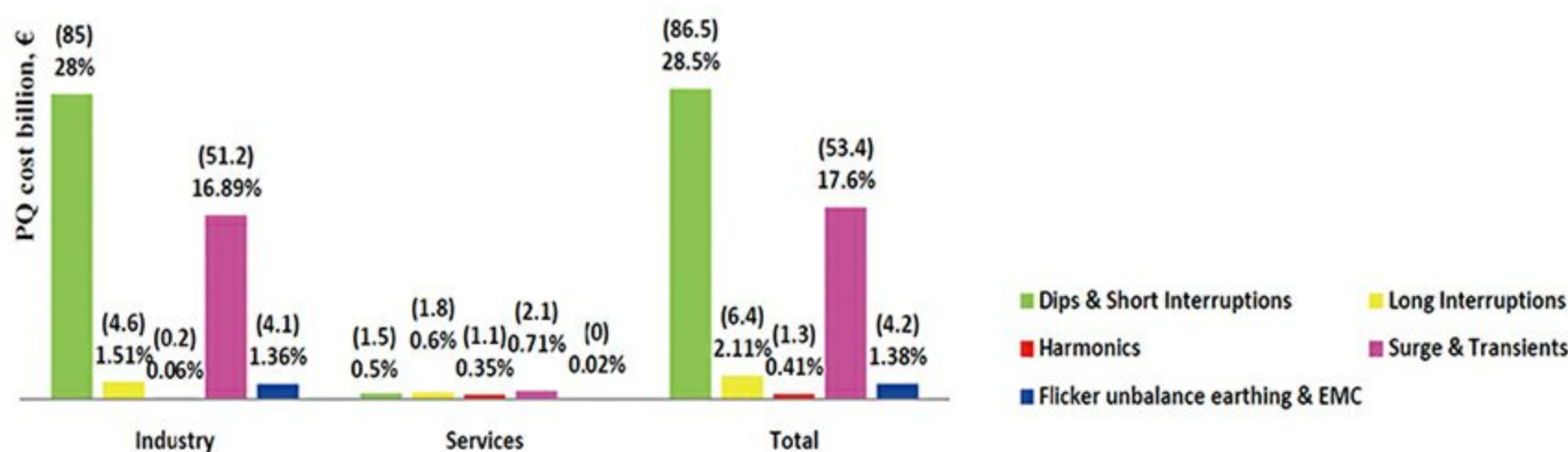
各行业电能质量事件数量统计

根据调查，欧盟 25 国每年因电能质量差而造成的经济损失总计达 1500 亿欧元，在本次调查显示：

- 电压暂降、短暂中断、浪涌和瞬变占 1500 亿欧元财务成本损耗的 80-90%，
- 与设备损坏和运营浪费所占的比例相当，
- 最敏感工业部门（约占欧盟 25 国总营业额的 20%），电能质量成本约占其营业额的 4%。

电能质量扰动的单位成本（每个事件）：

- 每次电压暂降事件的成本在 2,000 到 4,000 欧元之间。
- 每次短时中断与暂降损失比，工业是 3.5 倍，服务业是 9 倍。
- 长时间中断的平均成本为 90,000 欧元，每个行业差不多
- 由于缺乏对浪涌和瞬态这些现象的成本研究，无法评估每个浪涌和瞬变事件的成本。对于本次调查，其费用介于 120,000 欧元和 180,000 欧元之间。



电能质量事件成本

平均而言，从总调查样本中抽取的 6 类电能质量干扰的绝对影响份额如下：

- 电压暂降 23.6%
- 短时中断 18.8%
- 长时中断 12.5%
- 谐波 5.4%
- 瞬态和浪涌 29.0%
- 其他 10.7%

这项研究的总结表明，由于电能质量的干扰，这些行业浪费了大量不必要的资源。



在我国，亚洲电能质量联盟中国工作组组织成立的项目组，从 2010 年 4 月开始在上海市开展了电能质量经济性调查的试点工作，项目组针对上海市重点发展的 18 个行业，分两个阶段分别对 147 家企业开展了问卷调查和 29 家企业开展了面对面深入访谈。通过确定性方法，得到电能质量对该 29 家企业造成的经济损失总和约为 1.04 亿元。

行业	总值		电压暂降	非计划停电	计划内停电	谐波	有序用电
	样本数	数值					
半导体	7	29,156,458	19,803,442	5,916,736	2,688,880	250,000	497,400
服务业	4	3,037,319	2,257,840	646,479	N/A	133,000	N/A
钢铁制造	6	64,395,263	3,075,143	27,193,030	24,453,601	9,655,940	1,262,288
化工	5	1,800,420	11,866	226,002	1,177,292	332,000	53,260
汽车制造	3	5,570,069	1,636,516	252,784	2,282,536	40,000	850,883
食品制造	2	302,420	302,420	N/A	N/A	N/A	N/A
制药	2	88,322	88,322	N/A	N/A	N/A	N/A
总值	29	104,350,271	27,175,548	34,235,031	30,602,309	10,410,940	2,663,830

调查样本的电能质量年经济成本总值（元）

由此可见电能质量会对经济造成巨大的损失，我们要重视电能质量，由供电公司、用户和设备制造商共同努力，提高电能质量、增强设备的免疫能力，减少电能质量造成的损失。

## 4. 典型的电能质量症状

今天，最终用户的电气装置面临着大量的各种电能质量问题，这些干扰的80% 是由用户拥有的设备产生的。例如，在工业设施中，此类干扰可能由非线性负载（如弧焊机或变频器、电容器切换或大型电机启动）引起。在商业建筑中，计算机、打印机和服务器等电子设备也可能产生额外的电能质量扰动。

另外 20% 的电能质量干扰来自供电公司，因为即使是最先进的输配电系统也无法保证 100% 的能源可用性。现代输配电系统的可用性在 99.9% 到 99.99% 之间，具体取决于网络的冗余水平、地理位置和电压等级。即使有 99.99% 的能源可用性，也相当于每年 52 分钟的中断时间。

与此同时，终端用户的电气设备对电能质量的敏感度比过去要高得多。现代网络包括大量且不断增加的电子设备和整流设备，这些设备会产生电能质量问题，同时对电能质量也更加敏感，因此，它们会更频繁地失效。

今天的用户更意识到糟糕的电能质量在停机、设备损坏和过热方面可能产生的影响。他们期待更高的供电质量，更关注现场产生的电能质量问题，并尽力采取相应的电能质量治理方案。

出现以下情况都可能与电能质量有关：

- 灯闪烁
- 变压器问题，例如噪声、过热或过早故障
- 配电柜、零线、其他配电设备过热
- 变频器、PLC、工业 PC 等中的印刷电路板故障
- 断路器跳闸和变频器意外关闭
- 电机过早故障和设备意外关闭
- 接触器意外断开
- 网络通信不良
- 计算机设备意外停机或重启
- 功率因数低
- 电费过高
- 线路或设备噪音
- 系统容量变低



对于某些用户来说，配电系统或连接到电力系统中的设备产生的问题可能不会被判断为电能质量问题。当没有找到原因时，可能会被误认为是断路器损坏或是其它一次性的偶发原因。

## 5. 治理电能质量问题的益处

治理电能质量可以帮助提高能源效率，同时延长设备的使用寿命、减少维护和运营成本，具体体现在以下几方面：

- |                |              |
|----------------|--------------|
| 1) 提高生产效率      | 5) 提高产能      |
| 2) 减少碳排放       | 6) 减少设备维修和更换 |
| 3) 提高设备和电力可靠性  | 7) 提高能源效率    |
| 4) 减少意外停机和生产损失 | 8) 降低运营成本    |

## 6. 电能质量治理流程

以下给出了电能质量治理的一般步骤，以及在每个步骤中应该考虑的主要因素：

- |   |   |
|---|---|
| <p><b>1 信息收集</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 工厂供配电、接入电网的数据，图纸、保护整定值</li> <li>• 历年的电能质量数据</li> <li>• 生产过程的故障报警事件记录</li> <li>• 设备的免疫力</li> </ul> | <p><b>2 测量分析</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 电能质量仪接入测量</li> <li>• 电能质量数据分析、接地状况审核</li> <li>• 设备的电压暂降耐受度测试</li> </ul> |
| <p><b>3 评估与方案</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 了解生产工艺流量，发现隐藏的薄弱环节</li> <li>• 列出解决方案及经济性评估</li> <li>• 确定合适的方案和预算</li> </ul>                      | <p><b>4 安装治理</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 明确治理流程</li> <li>• 采购设备清单及技术规格书</li> <li>• 设备安装调试</li> </ul>             |
| <p><b>5 验证与服务</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 治理效果验证与报告</li> <li>• 治理不达标项整改</li> <li>• 文档资料</li> </ul>   |   |





## 7. 电能质量测量和监控设备

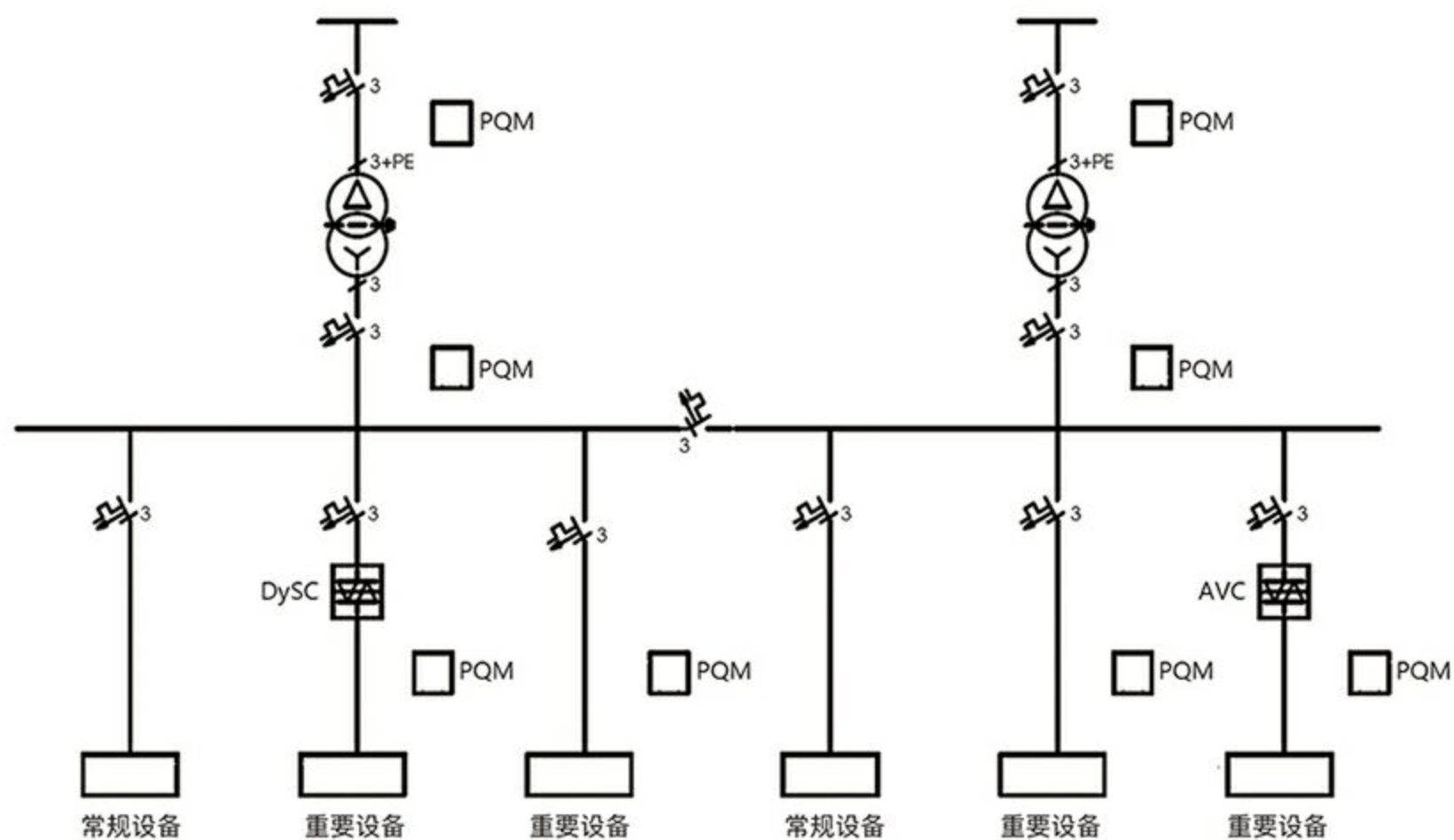
有多种类型的仪器可用于电能质量测量 (PQM)，每种仪器都有其独特的用途。电能质量分析仪是最常用的工具，用于高速收集数据、读取实时数据并可以下载到计算机进行分析，而电力多功能表或“数据记录仪”主要用于简单的电压和电流测量。

通常，电能质量事件是不可预测的且持续时间很短，可能需要安装数天、数周或数月的时间来捕获数据。系统中的每一相都有一个电压探头和电流传感器，用于在指定时间段内监控每个通道的幅值和极性。



电能质量分析仪

电能质量分析仪连接的地方称为测量点，测量点可以是在电力系统内的任何点，不一定在输入处，这取决于电力系统设计、关键负载、补偿设备和具体的监测目标。



□ 建议的分析仪PQM安装位置

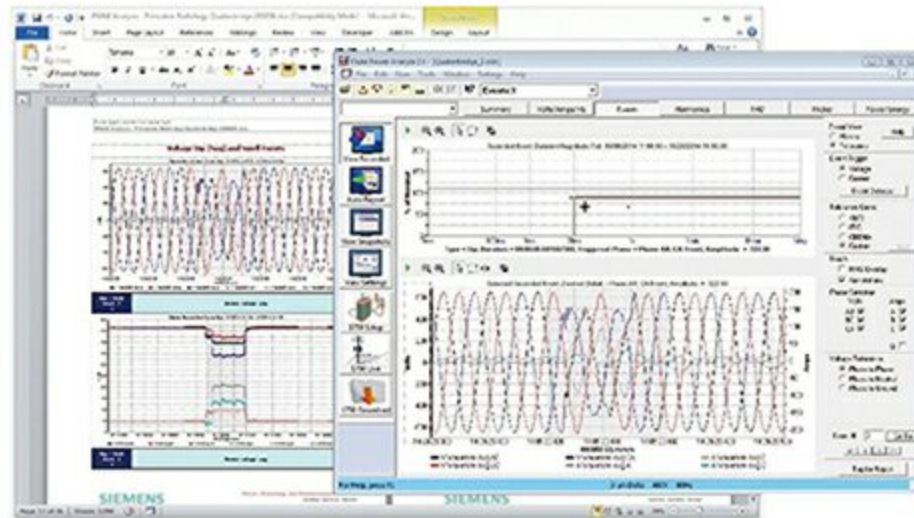
要安装的仪表类型取决于要捕获的数据。例如，一个简单的电流负载评估或公用事业账单审计所需的仪表远没有试图查明误跳闸原因或其他电源中断的原因那么复杂。



## 8. 电能质量分析与报告

电能质量分析软件可用于实时查看测试波形、谐波、功率、电能和其它参数，能导出测试数据并以文件的形式保存到电脑中，以便在需要的时候重新导入到分析软件中查看；也可以将仪器中所保存的趋势图记录、告警记录、暂态记录、截图等上传到电脑并显示，并能以数据文件的形式保存到电脑中长期保留。

分析软件有友好的界面，能以图表的形式显示所有的扰动，可以通过软件查看报警、波形、存储，另外一些有用的特点，如查看谐波频谱、放大或叠加波形，以其它标准格式导出电能质量数据，如excel, QPDIF, COMTRADE等。

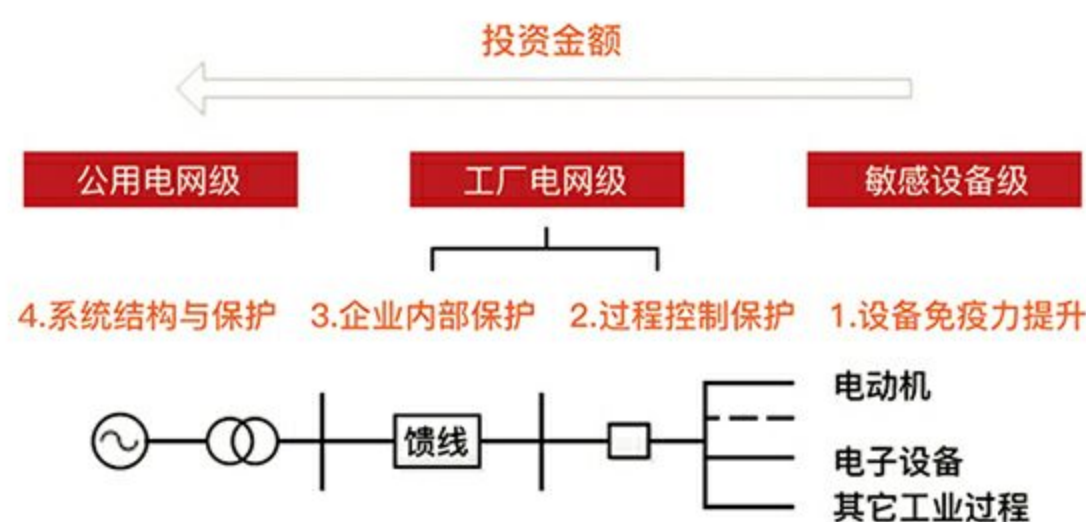


数据分析通常由专业电气工程师执行，他将生成一份报告，提供各种电源条件的摘要、分析期间发生的事件列表以及应考虑的任何治理措施或建议。

## 9. 电能质量治理

基于对结果和结论的解释，可以考虑不同的解决方案。它们可能包括安装电能质量治理设备、修改参数设置、设计和设置架构，甚至选择对电能质量干扰不太敏感的设备。

电力公司、最终用户和设备制造商可以做很多事情来提高电能质量、减少电能质量事件发生次数，并降低设备对电能质量的敏感性。技术上，可在公用电网级、工厂电网级、敏感设备级分级或协同采取措施治理，一般来说越靠近敏感设备，其治理的成本就越低。



电能质量分级治理方案和成本

每个电能质量问题都需要特定的治理设备。下面列出解决主要电能质量问题和功率因数问题的常见治理方案。



## 9.1 电压暂降和短时中断

电压暂降被广泛认为是影响商业和工业客户的电能质量问题的最常见和最重要的方面之一，几乎无法通过观察照明闪烁注意到它们，但许多工业过程会关闭。电压暂降可能会使生产系统停机、降低电气设备的效率和使用寿命。所以，对于设备故障可能导致巨大经济损失的行业来说，电压暂降是个严重的问题。

电压暂降是系统正常运行中不可避免的短时扰动现象，突然的大电流是导致电压暂降的根本原因，系统内突然吸出大电流的原因很多，可能在系统侧，也可能在用户侧。引起电压暂降的主要因素如下：

- 短路故障，雷击、操作过电压、绝缘老化、设备缺陷、人为误操作、动物接触等都可能引起短路，短路是导致电压暂降的主要原因；
- 变压器激磁；
- 大型感应电机启动。

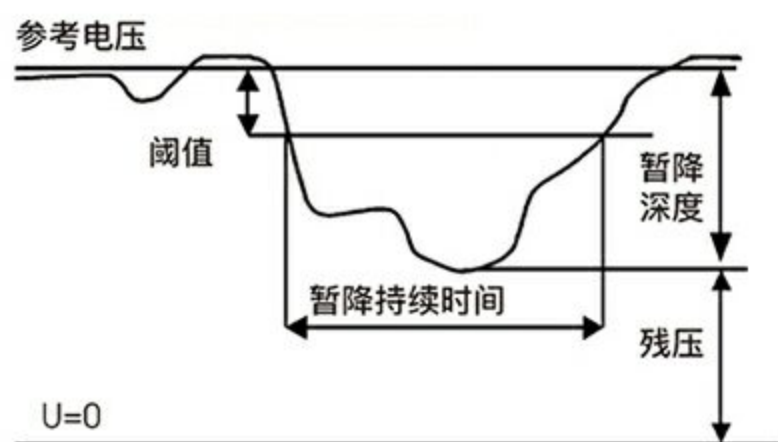
现代工厂特别是数字化工厂里采用了大量敏感电子设备，例如可编程逻辑控制器 (PLC)、变频器 (VFD) 和网络通信设备，这些设备极大地提高了生产力。然而，具有讽刺意味的是，由于这些电子设备对电压暂降、暂升和瞬态的敏感性，许多这类的电子设备也会造成产能损失。

这些电子设备被集成到现代工业和商业电力系统，如果受到电压、电流或频率偏差的影响，它们可能会发生故障或误动作。最常见的故障是能量不足，比如电压不足导致关键继电器或接触器不能保持吸合，或者电源故障导致电子传感器给出不正确的读数，这会导致设备做出不准确反应。

但是今天，随着敏感设备和流程变得更加复杂以及停机成本增加，工厂需要安装专用设备以避免出现不良情况。敏感电子设备的理想电源电压是恒定幅值的不间断正弦波形，任何破坏这种情况的事件都称为电能质量扰动。短至半个周波的电能质量扰动也可能会影响敏感电子设备的运行。

为了保护电压暂降和短时中断，根据电压暂降深度、持续时间、暂降频次和设备免疫力的不同，用户可以选择不同的电压暂降补偿设备：

- 有源串联补偿器，如DySC DRV AVC
- 铁磁谐振变压器 (CVT)
- 不间断电源UPS
- 飞轮储能系统
- 超导电磁能量存储设备(SMES)
- 静态切换开关和快速切换开关



电压暂降参数

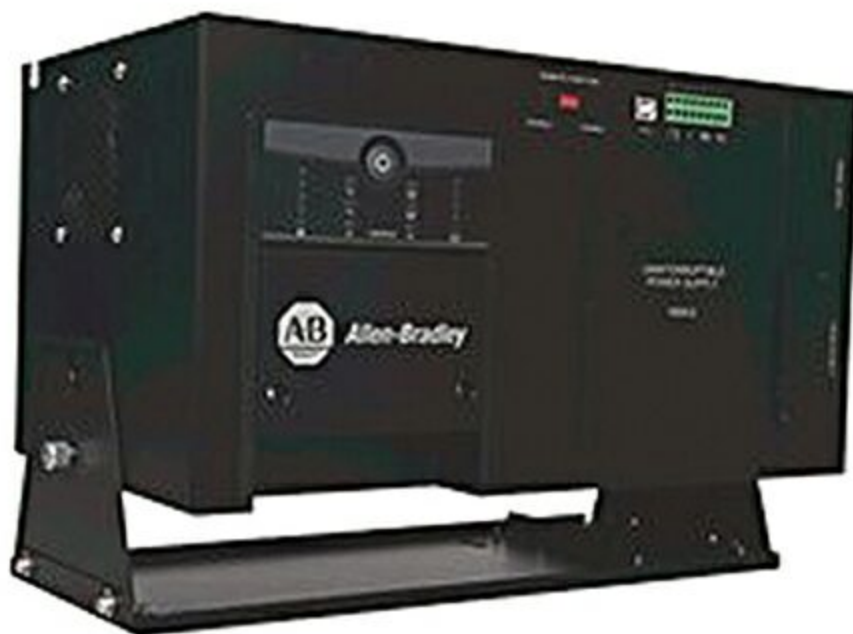


DySC电压暂降补偿器



## 9.2 电压中断

为了保护设备免受中断，最终用户可能会使用不间断电源设备 (UPS) 和其他能量存储系统。备用发电机或其它储能设备是管理持续中断所必需的。使用静态切换开关快速切换电源也是一种可选方案。



UPS

## 9.3 瞬态

应使用浪涌抑制器或浪涌保护装置 (例如 SPD 或瞬态电压浪涌抑制装置 – TVSS) 保护电子设备免受瞬态冲击。浪涌抑制器可以安装在进线柜、配电盘、单个负载处，以保护敏感的电子设备。

缓冲电路可用于感性负载，以抑制负载断电时自然发生的瞬变。典型的缓冲电路使用电阻电容 (RC) 电路、金属氧化物变阻器 (MOV) 或二极管。



浪涌抑制器



接触器右侧的缓冲模块



## 9.4 谐波

由于其很好的灵活性和高滤波性能，推荐用有源滤波器来抑制谐波，替代解决方案包括无源滤波器、移相变压器或设备级的谐波抑制器，例如集成到变频器里的谐波滤波装置。

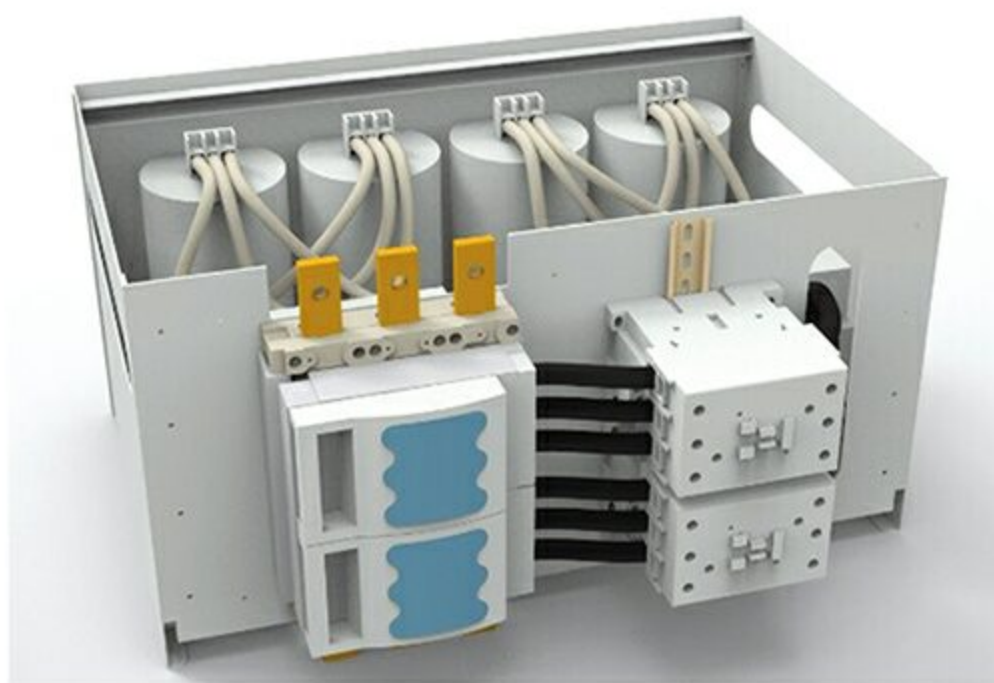


有源滤波器

## 9.5 功率因数补偿

为了提高功率因数、提高电能使用效率，可以通过使用电容器来实现。电容器可以放置在每个感性负载上，也可以是分组补偿一组设备或者是安装在总进线侧实现集中补偿。

SVG 也是一种可选的方案。



无功补偿单元



电力电容器