

**【专家简介】**许遐，男，华北电力科学研究院教授级高级工程师，长期从事电能质量的管理和电能质量监测、分析评估及调控技术等方面的研究。在国内外刊物上发表学术论文八十多篇，出版有《公用电网谐波的评估和调控》等专著。

## 如何对接入供电系统的商业用电负荷进行谐波评估

——华北电力科学研究院电能质量专家许遐专访

**记者：**许高工，您好！非常感谢您百忙之中就电能质量的有关问题接受我们的采访。本期是有关电能质量评估方面的主题，我们了解您在商业用电负荷接入供电系统的谐波评估方面有独特的研究，能否请您先谈谈这方面的背景资料？

**许遐：**随着商业现代化和电气化，以及信息、控制等诸多新技术的广泛应用，对于商业建筑中用电负荷的报装，也同样必须进行谐波评估。因为在商业部门中，其用电负荷的大部分类型，都是属于非线性负荷。例如：

(1) 由开关电源供电的电子设备在商业负荷中所占的比例日益增加。这些电源装置中，其输入电流含有很高的谐波分量。

(2) 使用电子镇流器的新型高效荧光灯，比使用电磁镇流器的传统荧光灯含有更高的谐波电流分量。

(3) 为了提高电能利用效率，商业建筑中大量的三相交流负荷多数都采用可调速变频驱动器，这些驱动器会产生大量的谐波电流。

(4) 电力升降机驱动器等负荷会产生较大的时变谐波电流分量。

来自这些不同设备电源所产生的谐波电流会导致供电线路的中线导体过热，变压器过热以及干扰通信系统。不同设备电源所产生谐波的累加效果取决于有关设备的特性和该系统的整体设计。

不同负荷产生的同一次谐波的如何累加决定了系统整体谐波水平。事实上，通常存在着由于负荷类型不同，而使连接商业设备的系统中出现了非常显著的谐波互相抵消的现象。大多数的谐波问题出现在单相电子负载占比例较大的380V/220V系统中。

供电公共连接点的电压畸变水平取决于该连接点处的系统阻抗和设备产生谐波的特性。连接点处的系统阻抗通常由降压变压器和供电线路的阻抗来确定。由于补偿功率因数的电容器组一般都是公共使用，因此，对于商业设备接入的谐

波评估，需要认真分析电容器组的投切状态与各次谐波的关系，评估的唯一根据仍然是国家标准GB/T 14549-93。根据国家标准GB/T 14549-93 中给出的各个电压等级的基准短路容量，和全部用户注入公共连接点的各次谐波电流的允许值，按照商业用户的实际报装数据和供电方案，来核算单个用户实际的谐波电流注入允许值。当公共连接点的最小短路容量不同于基准短路容量时，可按实际的最小短路容量 $S_{K1}$ 与基准短路容量 $S_{K2}$ 的比值进行修正，得到全部用户实际的谐波电流注入允许值 $I_h=(S_{K1}/S_{K2})I_{hp}$ 。在公共连接点同时连接多个客户时，对于第*i*个客户的第*h*次谐波电流注入允许值 $I_{hi}$ ，还必须根据该客户与供电公司所签订的供电协议中，与经济上有关的用电协议容量 $S_i$ (MVA)，以及公共连接点的供电设备总容量 $S_t$ (MVA)和求和指数 $\alpha$ 来分配，即： $I_{hi}=I_h(S_i/S_t)^{1/\alpha}$ 。

**记者：作为资深的电能质量专家，商业设备中主要的负荷类型有哪些？**

**许遐：**在现代商业建筑中，谐波电流产生源通常是容量小，数量多。商业设备中大多数非线性负荷都属于下面三种类型中的一种。

### ☞ 电子电源模块

在现代化商业大楼里大多数生产性设备都属于这一种类。个人计算机，工作站和外围设备如打印机、复印机等都具有完成交直流转换的电源模块，为微电子元件供电。这些负载通常大多是单相的（也有一些较大的主机和微型计算机的供电是三相的），而且供电电压都是220伏。使用UPS设备系统为这种类型的负载提供备用电源。单相电子电源提供的额定功率范围可以从几百瓦到几千瓦。

### ☞ 荧光灯

荧光灯通过电弧发光明，由于电弧的特性使得荧光灯的工作电压和电流关系呈现非线性。荧光灯工作电流中所含谐波分量的大小，与所使用的镇流器种类有直接影响。使用电磁镇流器的荧光灯工作电流中，主要有三次谐波电流，大约为基波的20%，由于使用电子电源的设备一般具有很高的三次谐波分量，故对这个比率通常也不会引起特别的关注。使用电子镇流器的荧光灯工作电流中，谐波含量变化范围是8—32%，三次谐波电流可高达30%。在电子镇流器中产生谐波电流是由于使用单相二极管桥整流器，就象在电子电源中的情况一样。使用无源型功率因数补偿电路可降低输入电流的畸变率。

### ☞ 交流调速驱动装置（ASD）

交流电动机将逐渐被交流调速驱动装置所替代，这种替代主要应用在大功率鼓风机和空压机，一方面可提高它们的工作效率，同时有显著的节约电能效果。典型的三相交流调速驱动装置，是通过一个三相晶闸管桥整流回路连接到交流电力系统中。具有三相输入整流回路的在线 UPS 系统具有与它相似的特性。

### ② 商业用电负荷的功率因数

在商业用电设备中的谐波电流主要都是由同一类元部件产生的，那就是接入供电线路中的二极管桥整流器。输入交流电流的脉动特性是由整流回路直流侧的滤波电容器所决定。这些负荷的另一个重要特性就是它们都具有相移功率因数。由于整流回路中独立的二极管不能被控制，而是在整流桥交流和直流的两侧对电压进行开通和关断，因此基频交流电压和基频交流电流之间的相移基本上是保持一个常量，几乎接近于零。相应的基频功率因数和相移功率因数，是很接近的。真功率因数是实际的传送功率与电压有效值和电流有效值的乘积的比值，对于这些非线性负荷来说，真功率因数数值是比较小的。这是因为电流中含有大量的谐波分量所造成的。传统的用于测量这种负荷无功功率的仪器，如感应式仪表，测量出的是基频相移功率因数，而真功率因数是比该测量值低。例如，对于由计算机负荷组成的整个系统而言，其相移功率因数大约为 0.95，而真实功率因数只有 0.6—0.7。现代的电子测量仪器已能测量到真功率因数，在一些实际场合中是根据真功率因数进行电能计费。

因为二极管桥整流器的相移功率因数是一个常量，上面所介绍的三种类型的负荷，其输入电流波形看起来都类似同一种负荷的输入电流，因此，这将使得计算等效谐波电流源变得比较容易。根据所接入的各类负荷的额定容量和每相电流中的谐波电流频谱分量，通过计算可以得到被测电源接入点处总的谐波注入量。

**记者：**根据您的研究，典型商业建筑中供电线路的谐波电流有什么特点？

**许遐：**具有高谐波含量是大量商业负荷的特点，在所有设备中都会出现相当高的谐波电流。然而，不同类型负荷的谐波电流会发生相互抵消，使得在电源接入点处总的谐波电流注入量一般不会超过国家标准规定的谐波允许值。当较多的三相交流设备改变为可调速驱动装置，以及把升降机的驱动装置从交流电机启动

改变为相控直流驱动时，这时情况就有所变化。

图 1 示出了在商业办公楼内不同位置的谐波电流测量值。在楼里面有较大比例电子负荷，常规的电磁镇流器，以及接在三相交流系统中空调的可调速驱动装置。办公楼中各处负荷电流的波形显示，在这些电子负荷供电线路中存在很高的电流畸变，但是这些谐波电流到达它们的供电接入点时却能抵消和衰减。

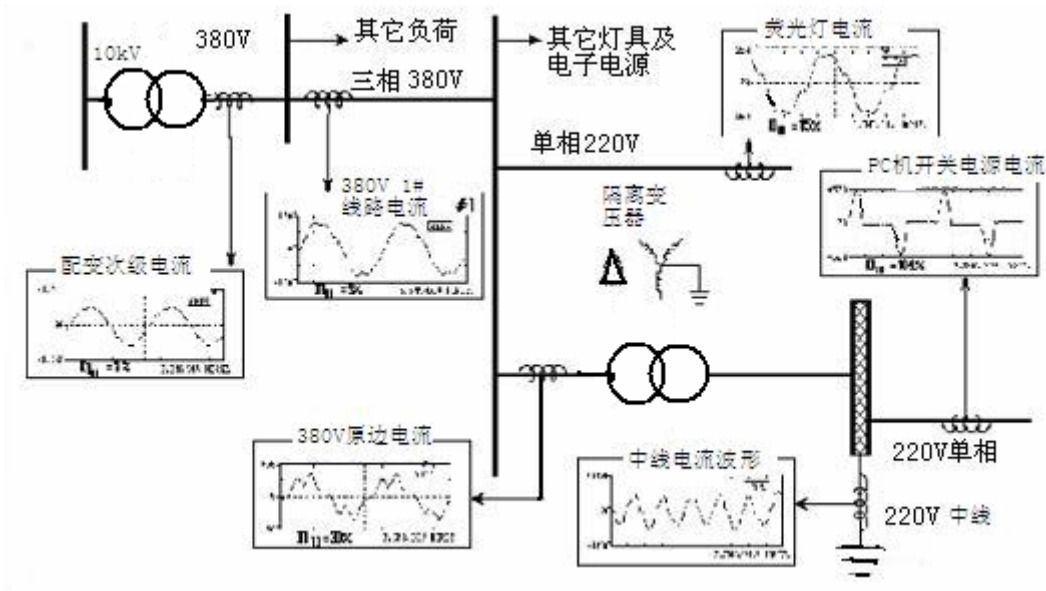


图 1 商业建筑中谐波相互抵消的例子

不同类型负荷的相互影响可以通过一个简单的网络来分析，如图 2 中所示。网络中使用各种元件模型，每个设备的谐波水平可以通过断开楼中用电负荷的各主要元件来进行测评，或者是测量每一单独元件的谐波分量。重要的元件包括电子负荷、照明负荷、高压直流负荷（包括可调速驱动装置），和其它用电设备。根据主要负荷的谐波特性来分析的一些例子汇集在表 1 中。

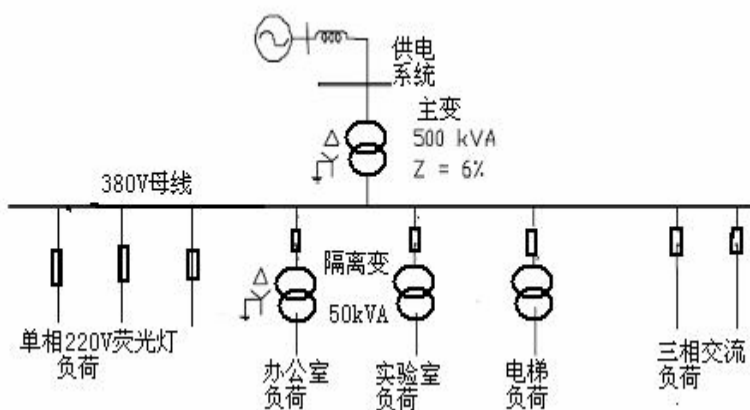


图 2 一个商业建筑谐波评估的简化图

表 1 商业建筑中不同类型负荷谐波电流特性的分析

场合	负荷组成情况	非线性负荷所占总负荷百分比			供电接入点谐波畸变率	
		电子型	灯光照明	ASD装置	电压	电流
1	基本情况	20%	30%	5%	3.5%	14.5%
2	高比率荧光灯	20%	60%	5%	3.9%	17.1%
3	高比率电子电源	40%	30%	5%	5.7%	21.8%
4	高比率ASD负荷	20%	30%	10%	5.1%	20.3%

记者：您觉得根据不同谐波源产生的谐波，它们的危害有什么不同以及治理的方案有哪些？

许遐：商业建筑的谐波问题一般都出现在用电设备中。下面就向读者介绍一些典型的商业设备的谐波问题。

### ☉ 中线过载

当单相电子负荷用三相四线制供电时，要注意流过中线导体中电流的幅值。三相线性负荷的中线电流是一个三相负荷平衡度的简单函数。在基本平衡的电路中，中线电流的幅值是相当小的。实际中就形成中线导体截面一般要小于相线导体。

由于电子负荷是通过开关方式来供电的，负荷电流中的谐波分量可形成更大的中线电流。这些负荷产生的 3 的奇数倍次（3，9，15 次等）谐波，在平衡线路中以零序电流形式表现出来。在中线中电流正序和负序分量可相互抵消，零序分量则是相加。在单相电源和电子镇流器中 3 次谐波通常是最大的单次谐波。

根据前面所提供的电流波形，可以估算该电流对中线导体额定容量的影响。对于这类电流波形，3 次谐波大约是基波的 70%。假设三相负荷是平衡的，而且都具有共同的谐波特性，那么它们的相线电流有效值  $I_p$  和中线电流有效值  $I_n$  分别可以表示为下式：

$$\text{相线电流 } I_p = (I_1^2 + I_3^2)^{1/2} = (1.0^2 + 0.7^2)^{1/2} = 1.22$$

$$\text{中线电流 } I_n = (I_3 + I_3 + I_3) = (0.7 + 0.7 + 0.7) = 2.1$$

$$I_n / I_p = 2.1 / 1.22 = 1.72$$

可见，此例中线电流有效值是相线电流有效值的 172%。对于电子负荷中的中线电流，一般不会小于这个值。事实上，中线电流差不多是相线电流的两倍。对这类负荷导线选择的另一个方法就是对每一条相线提供一条中线。

用于计算中线电流  $I_n$  与相线电流  $I_p$  的有效值 (rms) 关系式如下所列：

$$I_{nrms} = 3 \sqrt{\frac{0.5 p_{nl}^2}{1 + 0.5 p_{nl}^2}} I_{prms}$$

此式基于如下条件：电路负荷处于平衡，非线性负荷功率在整个负荷功率中所占百分比用  $P_{nl}$  表示，负荷电流中含有占到基波的 70% 的 3 次谐波。其关系见图 3 所示。

解决中线导体过负荷的办法有如下几种：

- (1) 增大中线导体尺寸，减小相线导体尺寸。
- (2) 使用双中线导体。
- (3) 在每相中都安装中线导体。
- (4) 在受影响的中线导体负荷侧安装隔离变压器。
- (5) 在受影响的中线导体负荷侧并联安装三次谐波滤波器。
- (6) 为阻塞三次谐波在中线中装设串联滤波器。

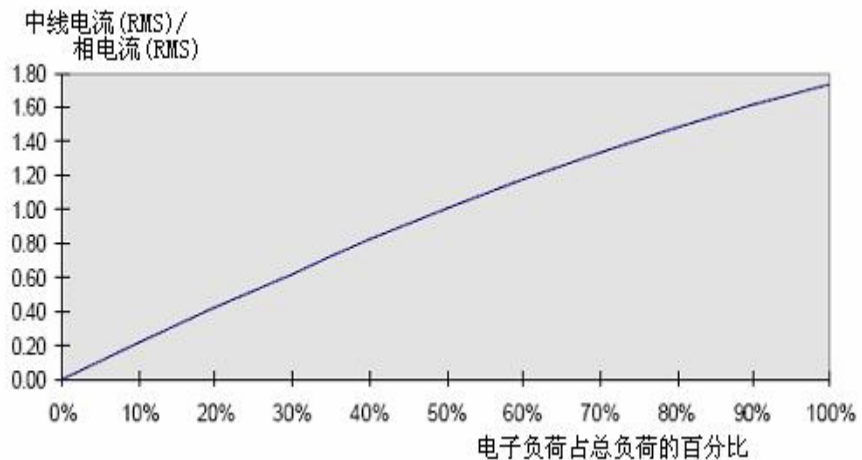


图 3 中线电流与电路负荷容量的关系图

不过，在 10kV 系统中，来自负荷侧的零序分量在通过降压变压器的三角形

绕组时将被陷除，中线电流并不常见。因此，仅在对荧光灯等电子负荷供电的 220V 单相线路中，才有中线电流。在这种情况下，3 次谐波分量较少。一个普通的电子镇流器的 3 次谐波电流一般不会超过基波分量的 30%。按最差的情况，中线电流  $I_n$  与相线电流  $I_p$  的比可计算如下：

$$\text{相线电流 } I_p = (I_1^2 + I_3^2)^{1/2} = (1.0^2 + 0.3^2)^{1/2} = 1.04$$

$$\text{中线电流 } I_n = (I_3 + I_3 + I_3) = (0.3 + 0.3 + 0.3) = 0.9$$

$$I_n / I_p = 0.9 / 1.04 = 0.87$$

这就是说在含有荧光灯负荷的供电线路中，中线电流的幅值总是低于相线电流的幅值。在这些线路中，使中线导体尺寸与相线导体的尺寸一样即可。

### ☉ 变压器发热

非线性负荷产生的谐波电流，最重要影响之一就是使变压器产生附加发热。为了确定普通电力变压器对非线性负荷的供电能力，在美国国家标准 ANSI/IEEE Std C57.110 中作了一些规定，可供对变压器的需求容量与供电电流的畸变系数之间作出选择。在该标准中，给出供电电流的畸变系数  $K$  的计算表达式为： $K = \frac{\sum (I_h^2 \cdot h^2)}{\sum I_h^2}$ ；式中， $I_h$  为  $h$  次谐波电流，取基波有效值为 1 的标么值。

作为实际应用的例子，给出一个具有 8% 阻抗电压的变压器，其使用容量的减少与电子负荷所占总负荷百分比的关系如图 4 中所示。用于商业设备的降压变压器，全部用电负荷为电子负荷时的实际使用容量应减至其额定容量的 85%。在一些商业设备中，由于设计得当，谐波能够相互抵消，对变压器减载的要求也可放宽。对变压器所需的减载主要取决于变压器的设计及其涡流损耗。

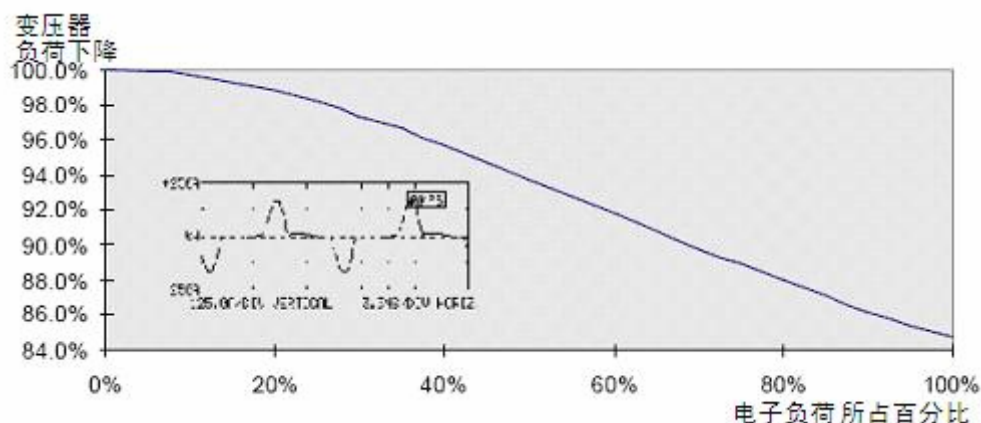


图 4 使用容量的减少与电子负荷所占总负荷百分比

对变压器发热问题可采取下列解决方案：

- (1) 确定负荷电流的畸变系数，或电子负荷所占总负荷的百分比，选择合适的变压器。
- (2) 变压器负荷侧加装有源或无源滤波器。这些滤波器将会减少注入变压器中的谐波电流而减少变压器发热。
- (3) 为了限制通过变压器的零序谐波成分（如 3 次谐波分量），必须安装隔离变压器或中线阻塞滤波器。只有减少通过变压器的 3 次谐波分量，变压器发热才能得到明显抑制。

### ④ 对交流调速驱动装置（ASD）的评估

为了节能，在商业用电设备中，如水泵、空压机和风机等，广泛应用可调速驱动装置（ASD）。随着这些用电设备在商业负荷中比例的增加，可调速驱动装置将成为商业建筑中主要的谐波源。可调速驱动装置的结构总是包括隔离电感器（一般作为输入交流侧的电抗器）、隔离变压器和 ASD 直流侧的电抗器。这些电感器通过平滑输入电流波形减少了谐波的产生。分析表明，这种 6 脉动整流类型的 ASD，最大只能占用户用电负荷的 20%，才能保证产生的谐波电流不超过国家标准规定的允许值。

如果 ASD 装置所占用户用电负荷的百分比超出 20%，可以通过以下各种方法来减少谐波的产生。

- (1) 采用无源谐波滤波器。根据滤波器的容量，一个调谐滤波器可使 6 脉动 ASD 装置的负荷比率允许增加至 60%。如果要使 ASD 装置能够处理电压骤升和输入电流波形畸变的话，可在每个 ASD 装置上，都各自安装宽带谐波滤波器。
- (2) 采用有源谐波滤波器。
- (3) 对于 12 脉动 ASD 装置，没有安装谐波滤波器时，可使用到用户全部用电负荷的 50%。
- (4) 在先进的 ASD 装置中，其输入整流器带有谐波控制环节。这些 ASD 装置在输入整流器中运用 PWM（脉宽调制技术），使输入波形改善。运用这种方法，其输入电流的畸变可控制在基波的 5% 以下。
- (5) 对于带有 24 脉动整流器的 ASD 装置，在占用户全部用电负荷的 70% 时，一般

仍可以满足国家标准规定的允许值。

### ④ 灯具设备更新的影响

在许多商厦里,高效电子镇流荧光灯正在取代老式电磁镇流荧光灯。典型的电子镇流荧光灯应满足国家标准规定的要求,即把其工作电流总畸变率(THDi)限制在 32% 以下。许多品牌荧光灯的 THDi 仅允许有 10%~20% 的变化范围。从一种类型的灯具向新一种类型灯具转换所产生的影响将取决于系统中设备产生谐波的特性和商厦建筑中产生谐波的负荷(如计算机和可调速驱动装置)的连接方式。商厦里灯光设备的更新对系统谐波畸变水平影响分析的结果表明,整个电子镇流系统的升级对谐波畸变水平的影响是可以忽视不计的。

### ④ UPS 系统的谐波评估

不间断电源(UPS)可方便地用于保护关键性的负荷。随着计算机网络、商厦控制系统和设备制造过程控制等技术的普及应用,UPS 系统的市场迅速扩大。对于如个人计算机等小负荷,通常采用立式 UPS 保护。当探测到电源有问题时,该系统就用静态开关切断主供电源,然后用备用电源(由蓄电池和逆变器组成)供电给负荷。在正常状态下,主供电源直接供电给负荷,对于谐波评估并不需要考虑 UPS 系统的影响。

对于电信主机、计算机群、机械制造控制等大型负荷,可采用在线 UPS 系统对其进行保护。这些 UPS 系统通常具有对输出电压波形的谐波控制环节,谐波控制环节一般包括 PWM 型逆变器、谐波滤波器、利用相移变压器抵消谐波及其它技术。UPS 系统可分为两大类,即电机型 UPS 系统或静止型 UPS 系统。对于 UPS 系统输入端的谐波电流,必须考虑它们对系统谐波水平的影响以及对其它负荷的影响。例如,其谐波畸变水平对备用发电机的影响应给予特别重视。通常,在正常工作状态下,电机型 UPS 系统并不是主要的谐波源,然而,静止型 UPS 系统在工作状态下,其内部的整流器和逆变器可构成系统的谐波源。需注意的是,当 UPS 系统处在旁路位置时,非线性负荷直接与主供电源相连,必须考虑的是负荷本身的谐波而不是来自 UPS 系统的谐波,静止型 UPS 系统原理框图如图 5 中所示。

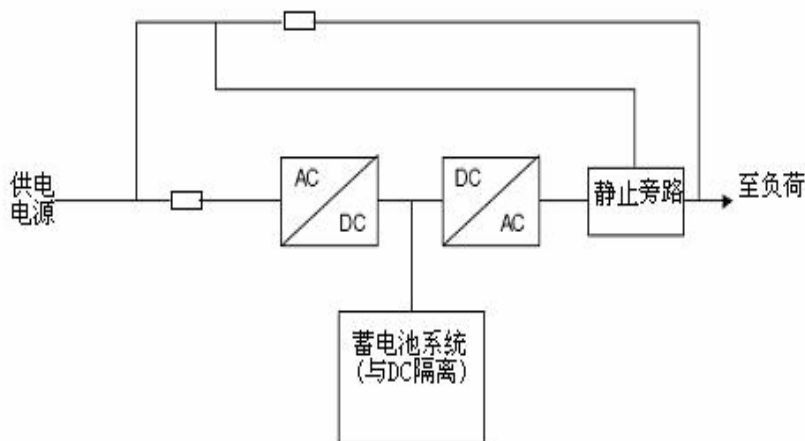


图 5 静止型在线 UPS 系统的基本框图

UPS 系统中整流器的谐波特性基本与用于可调速驱动装置的整流器相似。整流器输入电流波形中包含的特征谐波频率为：

$$f_h = (pm \pm 1) f_1$$

各次谐波有效值为  $I_h = \frac{1}{h} I_1$

式中， $h$  为特征谐波次数  $h = pm \pm 1$ ； $f_h$  和  $I_h$  为第  $h$  次谐波电流的频率和有效值， $f_1$  和  $I_1$  为基波电流频率和有效值， $p$  为整流器脉动数， $p=6$  或  $12$ 、或  $24$ 。 $m$  为正整数。

对于三相 6 脉动全控整流器，所产生的谐波电流理论上遵循下面的表达式：

$$i_a = (2\sqrt{3}/\pi) * I_d (\sin \omega t - 1/5 \sin 5\omega t - 1/7 \sin 7\omega t + 1/11 \sin 11\omega t + 1/13 \sin 13\omega t - 1/17 \sin 17\omega t - 1/19 \sin 19\omega t + \dots)$$

式中  $i_a$  为交流侧的输入交流电流。对基波有效值  $I_1 = (\sqrt{6}/\pi) I_d = 0.78 I_d$  对于谐波  $I_h = (k_h/h) \cdot I_1$ ， $h$  为谐波次数； $k_h$  为谐波有效值减小系数，其经验数据如下面表 2 所列：

表 2 减小系数  $k_h$  值

谐波次数	5	7	11	13	17	19	23	25
$k_h$	1.0	1.0	0.75	0.7	0.5	0.4	0.25	0.2

一般地说，6 脉动整流器有 5、7、11、13、17、19 等次特征谐波，12 脉动整流

器有 11、13、23、25 等次特征谐波。

可采用下面所列的任一种措施来减少 UPS 系统使用过程中产生的谐波畸变，这些技术都能达到很好的效果：

- (1) 采用高脉动数的整流器（12 脉动整流器通常用于较大的 UPS 系统中）。
- (2) 在UPS的输入端安装无源调谐滤波器；
- (3) 在整流器设计中引入有源谐波控制环节；
- (4) 在UPS的输入端安装有源谐波滤波器。

## 🔁 关于备用发电机

许多场合需采用燃油发动机驱动的发电机作为重要用户的备用电源。备用发电机常常被连接到 UPS 系统。当供电站的故障时间超过 UPS 系统的蓄电池备用时间时，备用发电机便启动为 UPS 注入电能，防止重要设备断电。通常备用发电机还向其它不要求 UPS 保护的设备供电，如空调和照明设备等。

由UPS系统和其它非线性负荷（如ASD和电子镇流荧光灯等）产生的谐波电流，即使在供电站正常运行时不产生任何问题，但对备用发电机的运行可能会产生严重的影响。评估所关心的问题是包括可能会降低发电机的出力，备用发电机运行时的电压畸变可能会影响其它负荷，以及凹陷电压波形会影响控制电路和定时电路等。

备用发电机的容量必须与备用电源供电的负荷大小相匹配。采取备用发电机向UPS负荷供电时，可根据UPS的额定容量、功率损耗和蓄电池充电容量（一般为UPS额定容量的25%）来计算发电机所需的额定功率。在选择发电机容量时还必须考虑该发电机发电时产生的谐波。与负序电流一样，谐波电流将产生附加的热量。有的制造商推荐，对于电流波形畸变率为12%的负荷，发电机的最小容量应为实际负荷大小的1.1倍。谐波电流越大，发电机出力就降低得越多，不同类型的发电机其降低出力的程度有所不同。另外，UPS的调控装置对频率波动也很敏感，这也需加大备用发电机的额定容量。

对由备用发电机供电的所有负荷的谐波控制要求，取决于备用发电机投运时的电压畸变率。典型的限值是规定电压总畸变率不得超过5%。这一限值有助于保护发电机和其它负荷免受超限谐波电流的影响。没有任何特殊谐波控制措施时的电压畸变率值可以由负荷运行电流谐波频谱和发电机的超瞬态电抗来计算得

到。首先，计算单个电压谐波分量：

$$V_h = I_h * h * X_d''$$

式中：Vh： 单个电压谐波分量(V)； Ih： 单个电流谐波分量(A)；

h： 谐波次数；Xd''： 发电机超瞬态电抗（基波频率下的欧姆值）。

然后计算电压总谐波畸变率：

$$THD_{V_n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \times 100\%$$

上式中： Vn ： 系统电压有效值 (V)

如果预期的电压畸变率值超过了所允许的限值（5%），那么在备用发电机运行期间，必须采用一些类型的谐波控制措施。典型的方法包括无源谐波滤波器、有源谐波滤波器或相移变压器谐波抵消技术等。