
应用指南

HVAC应用中的谐波



目录

4	谐波概述以及我们为什么需要注意谐波问题
4	引言
4	谐波基本原理
5	谐波畸变原因
5	谐波畸变带来的问题
6	谐波畸变带来的经济问题
6	重要设施内的谐波
7	功率因
8	减少谐波的不同方式
8	六脉波传动, 无电抗器
8	六脉波传动, 带3-5%电抗器
9	无源滤波器
10	有源滤波器
11	多脉波解决方案
12	有源前端
12	其它谐波抑制技术
14	总结

谐波概述以及我们为什么需要注意谐波问题

引言

HVACR (供暖、通风、空调与制冷) 系统为建筑物 (如办公楼、医院、数据中心和其它建筑) 提供空调并使里面的人感觉舒适。HVACR系统消耗大量的能量。在这些系统中正确使用变频传动 (VFD) 将大大降低其能耗。

VFD与很多其他类型的电子设备共同产生一种称为电力线谐波的现象。使用VFD的好处远大于谐波的负面影响。但了解谐波、谐波引起的可能问题以及减少谐波的可用解决方案也很重要。

虽然本文着重讨论作为谐波源的VFD, 但需要注意的是, VFD不是系统中谐波的唯一来源。然而, 由于HVACR内使用的VFD可能构成整个建筑功耗的重要部分, 因此VFD通常是谐波计算和抑制话题的焦点。VFD在HVACR内的应用范例包括泵 (冷冻水、冷凝水、热水)、风扇 (供风、回风、排气、冷却塔) 和压缩机。其他重要谐波源包括电子换向电机 (ECM) 驱动的风扇、照明系统、不间断电源 (UPS) 系统和单相电源。

由于电子设备以非线性方式消耗电流, 谐波出现在电压波形上。谐波通常以百分比表示, 称为总谐波畸变 (THD)。它是RMS (均方根) 谐波含量与基频RMS值之比。THD表示偏离基波正弦波形的百分比。如果电压或电流中没有任何谐波, THD为零。随着谐波量的增大, THD百分比也随之增大。

与繁琐的失真量相比, 有很多行业标准可用于确定可接受谐波畸变量。例如, 美国和亚洲的一些国家采用IEEE 519-2014。欧洲和亚洲也有谐波电磁兼容 (EMC) 标准。这些标准是从公共设施的角度编写的。这些标准旨在避免产生足以影响电网上的相邻用户的谐波畸变。

“谐波”一词是一个广义的术语, 用于许多不同的行业。遗憾的是, 某些电气问题被错误地归咎于谐波。不应将这些谐波与射频干扰 (RFI) 混淆, 射频干扰的频率要比谐波高得多。电力线谐波频率较低, 因此它们不会干扰无线局域网信号、手机、FM或AM无线电或对高频噪声特别敏感的任何设备。ABB提供了一篇关于由RFI引起的干扰的单独文件 (文件编号3AUA0000222151)。

谐波基本原理

电压谐波是电压波形失真。同样, 电流谐波是电流波形失真。这些失真的波形很难用一个简单的方程式来量化, 因此在讨论谐波时采用了一种数学方法 (称为傅里叶分析)。利用该方法确定构成失真波形的很多较小正弦波形的幅度和频率。这使工程师能够确定哪些谐波是最有问题的谐波, 并提出纠正措施以减少这些谐波。

如引言中所述, 谐波通常是指THD百分比。该百分比描述了纯正弦波形的失真程度。高度失真的波形有更高的THD百分比值。以下两个公式用于量化系统中的谐波量。THDV是电压波形的总谐波畸变。THDI是电流波形的总谐波畸变。在这两种情况下, 根据RMS谐波含量与基波RMS值之比进行计算。换句话说, 谐波含量越高, THD百分比越高。

$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 \dots V_n^2}}{V_1} * 100\%$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 \dots I_n^2}}{I_1} * 100\%$$

虽然这不在本白皮书的范围内，但涉及谐波的另一个重要话题是了解THDV和THDI水平对于建筑物而言是可接受的。每个系统都是独一无二的，并考虑建筑物负载大小与公用设施容量之比，即短路比。另外，了解在哪里测量谐波即公共耦合点（PCC）通常是一个被误解的概念。简而言之，PCC通常是建筑物电网连接到电力电网的点。总需求失真（TDD）在PCC测量，它替代THDI。TDD通常用于评估整个建筑物的谐波，而THDI则用于评估建筑物内单个设备的谐波。

谐波畸变原因

谐波是由非线性负载引起。非线性负载不会正弦地消耗公用设施的电流。非线性负载包括VFD、EC电机、LED照明、复印机、计算机、不间断电源、电视机以及包括电源在内的大多数电子设备。建筑物内的谐波的最主要起因通常是非线性三相功率。功率越大，电网中的谐波电流就越大。

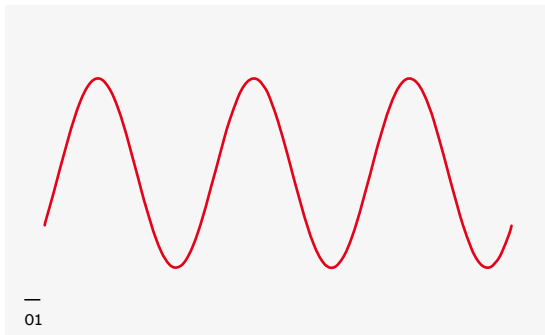
下一节将回顾VFD的电气特性。这是为了说明非线性负载的一个范例。最常见的VFD设计使用三相交流线路输入电源并通过二极管对电压进行整流。电压被转换成一组电容器上的平滑直流电压。然后，VFD将直流变回电机交流波形，以便控制电机的速度、扭矩和方向。非线性电流通过三相交流-直流整流产生。

谐波畸变带来的问题

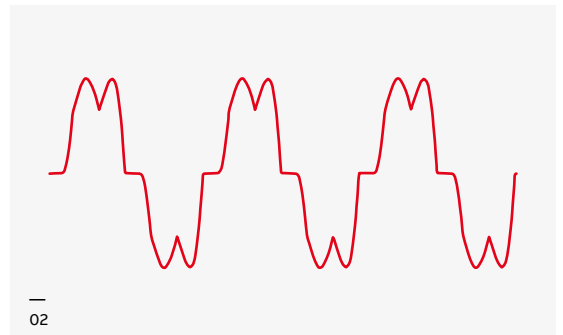
设施内的谐波高度失真会引起各种各样的问题。可能会遇到的一些问题包括：

- 出现过热时，经常会出现设备过早失效和寿命缩短的情况，例如：
 - 变压器、电缆、断路器和保险丝过热
 - 直接由线路供电的电机过热
- 由于额外的热量和谐波负载造成断路器和熔断器的故障跳闸
- 备用发电机运行不稳定
- 需要纯正弦波交流波形的敏感电子设备运行不稳定
- 闪烁光

—
01 纯正弦电流波形（无谐波）



—
02 电流波形（有谐波）



— 03 谐波对变压器的 潜在影响

上一页中提到的问题通常很难被识别为谐波相关问题。例如，我们知道电机几乎可以达到过热点。在正常运行条件下，将手放在满载电机上可能会在一两秒钟以后感到不适。那么，典型建筑物用户该怎样发现电机是否因谐波而升温十度？该用户很可能无法意识到六年以后（届时该电机已服役十二年）电机是否因谐波而破坏。这个例子只是涉及谐波的隐藏经济方面之一，这将在下一节中介绍。需要注意的是，这个案例是基于由线路供电的电机，因此易发生波形失真。VFD主要缓冲电力线谐波对电机的影响，因此由VFD供电的电机不会遇到这种导致过早破坏的电力线谐波现象。

谐波畸变引起的经济问题

谐波对建筑寿命的各个阶段都会产生经济影响。首先，通过扩大设备规模或配备谐波抑制设备处理谐波问题需要前期成本。其次，由于系统效率低下，日常成本增加。最后，由于设备过早损坏而产生成本。

解决谐波问题的一种方法是在建筑物内使用部分大型电气基础设施。可增大变压器和电线尺寸，以应对增加的谐波含量和热量。有高谐波负载的系统中的备用发电机也必须是大型发电机。发电机尺寸涉及多个方面。发电机必须能够处理增加的谐波电流。此外，发电机电压调节器必须能够处理电压失真而不会导致不稳定运行。

除使用大型设备以外，还有一种方式就是使用产生较少谐波的产品。以VFD为例，较之直流扼流圈或输入线路电抗器等价格适中的VFD，低成本VFD的电流消耗高出67%（甚至更多）。最佳解决方案是采用能够将谐波降低到5%以下的谐波抑制技术。采用谐波抑制解决方案是使用超大型电气基础设施的替代解决方案。

谐波引起的系统效率低下产生的日常成本往往被隐藏和忽略。变压器或电机发热意味着它的能源利用效率低，因为能量被用来产生热量，而不是为建筑物中的其他负载供电。如今，建筑物HVAC系统高效运行，因此需要消耗更多的电力，因为它需要消除建筑物的废热。

故障设备的成本不会被掩盖。然而，确定这些故障和成本与谐波相关是一项挑战。

在设计阶段解决谐波问题可降低电气基础设施的其他部分的成本（即无需使用超大型设备）。谐波问题一旦解决，使用更高效率和更耐用的设备可以进一步节省长期成本。

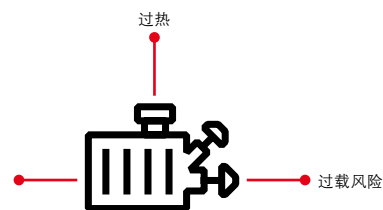
重要设施内的谐波

本文的前面部分说明了可能影响任何建筑物的问题。然而，某些行业必须非常关注电能质量——因而密切关注谐波——因为HVAC系统的间断性能至关重要。

医院、数据中心和机场是最常被称为关键设施的三大行业。医院和机场的设备如果出故障，则可能会使生命处于危险之中。数据中心设有敏感设备，可存储大量信息，必须持续正常运行。系统设计人员应意识到谐波对任何关键设施的影响。

—
03

对于超大型
设备的需求





本文的下一部分讨论功率因数，这是受谐波影响的一个电气分量。

功率因数

功率因数是电气行业中使用的电气术语。但它是一个可引起混淆的术语，因为实际上有三种不同类型的功率因数：真功率因数、位移功率因数和失真功率因数。本页的公式显示了这些不同类型的功率因数之间的关系。真功率因数考虑位移功率因数（也称为 $\cos\phi$ ）和失真功率因数（这是一个谐波电流量函数）。

工程师或建筑业主对功率因数的三个最重要的要求是：

- 一些公用事业公司向功率因数不佳的客户收取费用，并且/或者向功率因数良好的用户提供更低的电价。
- 在电机上配备VFD将改善真功率因数。
- 产生较少谐波的VFD比产生更多谐波的VFD更好地改善真实功率因数。

$$pf_{true} = \frac{P_{avg1}}{V_{1rms}I_{1rms}} * \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} = pf_{disp} * pf_{dist}$$

减少谐波的不同方式

减少谐波的方法有很多种，并没有“一刀切”的解决方案。

下表比较了各种谐波抑制技术的THDI并提出其他比较。

	六脉波VFD 无电抗器/扼流圈	六脉波VFD 直流母线电容低	六脉波VFD +5%电抗器/扼流圈	三相VFD 有源前端传动*
典型THDI	90-120%	35-40%	35-45 %	3-5 %
VFD系统价格**	\$	\$	\$\$	\$\$\$
占地面积	○	○	○○	○○○
优点	简单且低成本的解决方案，可用于有少量小型传动的装置。	简单和低成本的解决方案，可以减少一定的电流谐波 (THDI)。	HVAC应用中的标准解决方案	任何解决方案的最佳谐波抑制性能。
缺点	谐波含量高，不建议用于有大量传动的装置。	较高的电压失真 (THDV)，比带有5%电抗器/扼流圈的六脉波VFD更高。更易受因电能质量差引起的问题的影响。几乎没有低电压穿越能力。	配备大量或大型传动的系统可能需要额外的谐波抑制措施。	较之装有电抗器的标准六脉波传动，这种传动本身产生的热量略多一些。

* 估值基于ABB低谐波传动

** 系统价格包含VFD和安装成本

—
04 六脉波传动，无
谐波抑制功能

六脉波传动，无电抗器

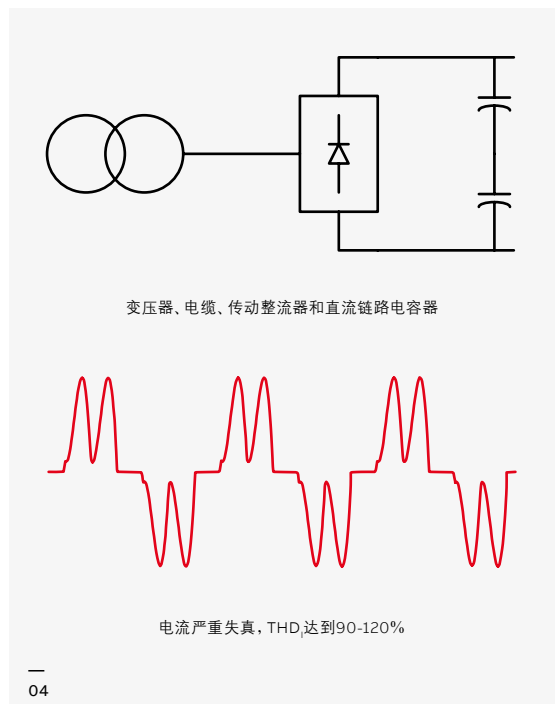
这里将说明无谐波抑制措施的标准六脉波传动。使用这种类型的传动是因为它的成本更低，影响小。由于未使用谐波抑制技术，这种VFD可用作参考点。实际的电流失真真因设计而异，但典型值在90%到120%之间。

值得注意的是，市场上的这款传动采用了小尺寸直流母线电容器。这种设计使

THDI值看起来更好，但它对电力系统中的THDV有显著的负面影响。由于线路瞬变、下垂和浪涌，此类传动非常容易出现过压和欠压跳闸。

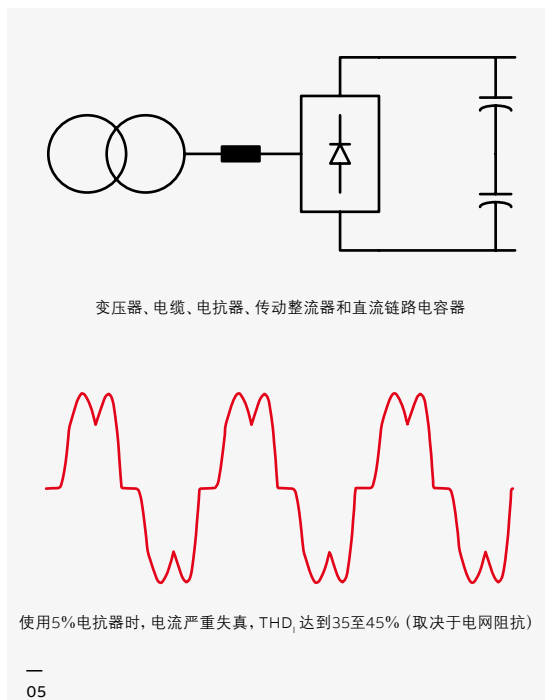
六脉波传动，带3-5%电抗器

使用带有增设直流扼流圈或输入线路交流电抗器的标准六脉波传动增大阻抗，从而使谐波电流水平降低到35-45%。



	六脉波VFD +无源滤波器	采用矩阵技术的传动	多脉冲VFD	六脉波VFD +有源滤波器
典型THD _i	5-10%	5-13 %	12-pulse: 10-12% 18-pulse: 5-6 %	4-7%
VFD系统价格**	\$\$\$	\$\$\$\$	\$\$\$\$	\$\$\$\$\$
占地面积	□□□□	□□□	□□□□□	□□□□
优点	假设有物理空间可用, 如果确定谐波是问题起因, 则可以在安装传动之后增加无源谐波滤波器。	包括再生制动。	传统谐波抑制方法。	一个有源滤波器可以清除多个传动/负载的谐波。
缺点	轻负载条件下的超前功率因数, 除非滤波器的电容器退出电路。系统中滤波电容器与其他电容器之间的谐振风险。	低谐波模式 (5%THD _i) 不允许在整个频率范围内实施全速控制, 因为它只能调制不超过93%的电压。由于缺乏直流总线, 没有电源电路欠压穿越。	占用空间很大。大量的故障点。最佳谐波性能要求十分均衡的交流馈电并且几乎没有背景失真。现场翻新难度大。	通常是最昂贵的解决方案。滤波器成为谐波抑制的单点故障。滤波器故障可能会导致系统内出现严重/直接谐波相关问题。

—
05 六脉波传动,
带3-5%电抗器



ABB建议将此解决方案作为HVAC系统内使用的所有传动的起点。如果谐波计算结果表明需要进一步降低THD_i, 则升级到更好的谐波抑制技术。

无源滤波器

无源滤波器解决方案是在传动的电源(线路)侧增设附加滤波器。现代设计由一个电感器-电容器-电感器设计组成, 可以针对特定的谐波频率进行调谐。无源谐波滤波器的性能因制造商而异, 某些设计在部分负载条件下或者当建筑物电源中已存在电压失真时的谐波抑制能力较差。无源谐波滤波器的典型性能产生5%到10%的电流失真。

我们知道，无源滤波器在部分负载条件下能够产生超前功率因数。多数制造商提供可选接触器，这样一来，在部分负载条件，不需要滤波器电容器组。

对于可由发电机电源供电的任何滤波器，强烈建议使用这种接触器，因为当负载消耗超前功率因数电流时，发电机可能会变得不稳定。无源谐波滤波器内的电容器也与电网中的其他电容器相互作用，例如：功率因数校正组内的电容器或传动内的电容器。这些电容器之间的相互作用可能会产生有害的电气问题。

无源滤波器可作为独立滤波器单独提供，装在其外壳内，这意味着需要紧靠传动布线。另外，传动制造商也可在与传动相同的机箱中提供无源滤波器。单独供应和安装过滤器要求在项目设计和施工阶段进行额外的协调。

协调实例包括：

- 必须为每个过滤器的安装位置分配空间。
- 预算应包括滤波器安装和布线所需要的额外的劳动力。

- 将无源滤波器安装到传动时务必小心。可能把无源滤波器与dV/dt滤波器混淆，然后将滤波器安装在传动的错误一侧。
- 如果传动带有旁路，则必须完成额外的滤波器接线。在旁路模式下，滤波器不应设在电气路径中，因此滤波器必须连接到传动而不是旁路。这增大了安装人员可能无法理解的额外复杂性。
- 如果滤波电容器在部分负载条件下关闭，则需要提供传动与接触器线圈之间的电源和附加接线并向安装人员详细说明连接。

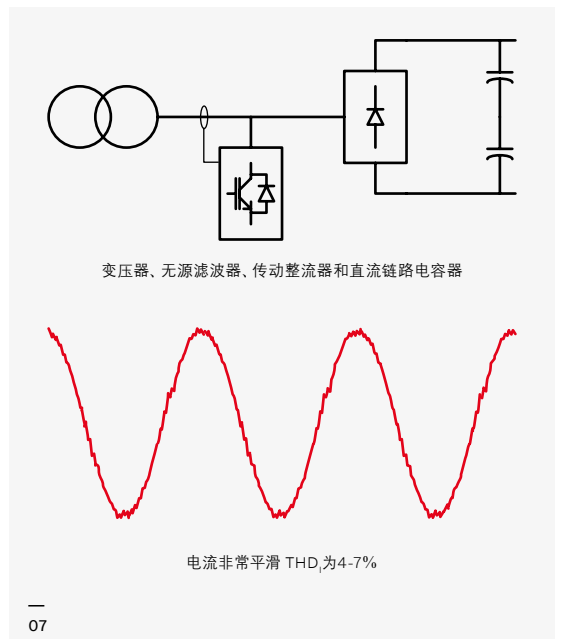
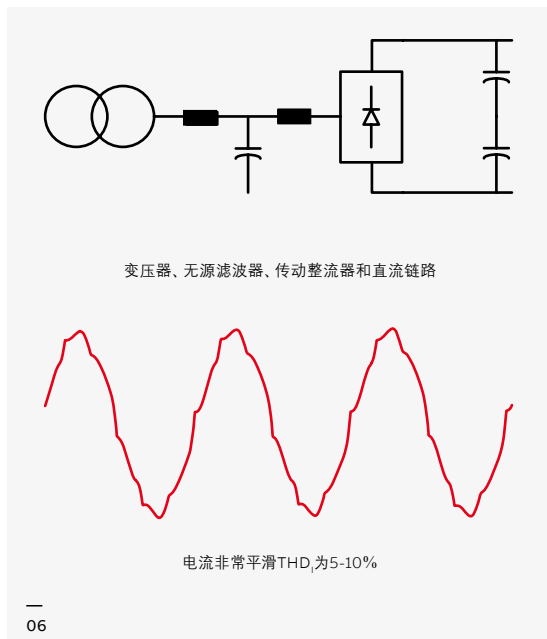
有源滤波器

有源谐波滤波器像消声耳机一样工作。有源滤波器进行测量，检测电流失真，并提供一个计数器波形来抵消失真。有源谐波抑制是有效的，通常可达到4%到7%的谐波电流失真水平。

正确应用有源谐波滤波器解决方案面临几个挑战。它们占地面积大，并且需要外部电流传感器。

— 06 六脉波传动，带无源滤波器

— 07 六脉波传动，带有源滤波器



这些滤波器足以从系统中清除指定量的谐波电流（安培）。由于有源滤波器的大尺寸和高成本，它们通常作为一个整体安装（对于建筑物或一组传动）。当然，这在特定情况下能够解决问题，但它对于建筑物内部或受谐波影响的其他地方的设备并没有帮助。这种解决方案也存在一些风险，因为一旦这一个滤波器失效，上游的谐波电平将大大增加。

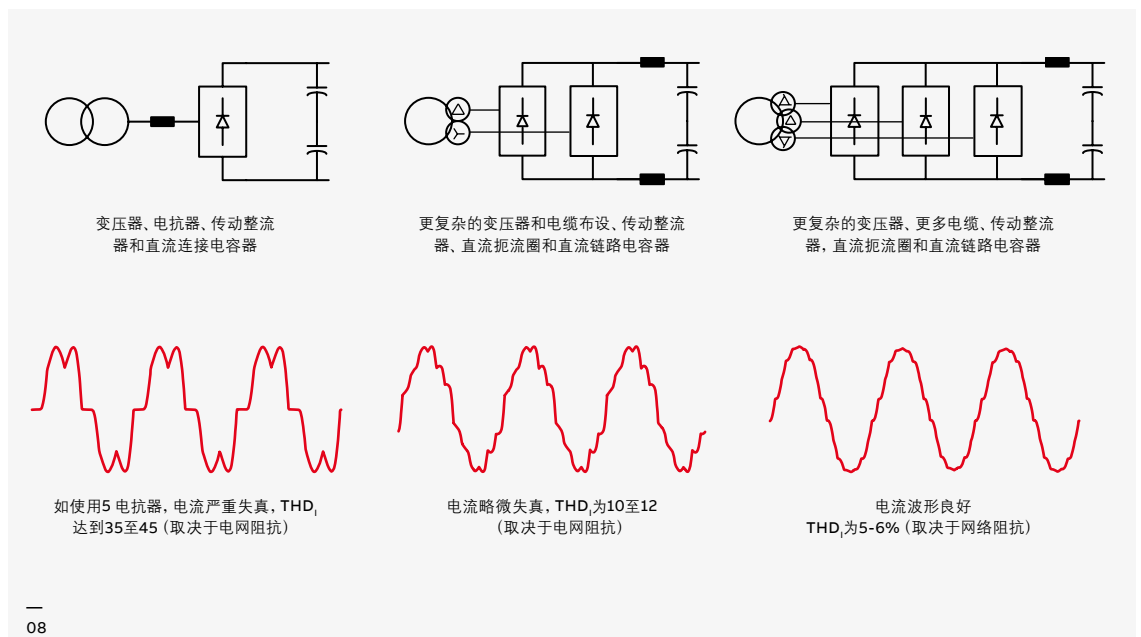
多脉冲解决方案

多脉冲解决方案是减少谐波的另一种方法。标准传动是六脉波传动，而低电压多脉冲组件通常采用12脉或18脉设计。也有24脉和更多脉波的设计，但这通常出现在中压传动上。组件内的整流二极管的总数与“脉”数量相同。由于所需要的所有硬件，多脉冲件在所有独立谐波抑制解决方案中占据最大的空间。例如，18脉冲组件包括一个6脉冲传动、12个附加二极管、平衡电抗器、（18个）熔断器、专用预充电电路、将这些组件连接在一起的大量电源线、大型变压器。

由于变压器和构成该组件的所有硬件，相对“小”的23安培18脉组件与冷冻机的尺寸大致相同。一个18脉组件从三相输入电压开始，并利用移相变压器产生总共九个相位。VFD从九个而不是三个相位吸收功率，从而导致从这九个单独相位中的每一个相位吸收的电流流量较小。18脉组件的电流失真在5%与6%之间。12脉冲组件的电流失真在10%到12%之间。

上文列出的多脉组件电流失真值假定施加于传动的电压完全平衡。2%的传动电压不平衡就可使其电流失真增大50%。并且，由于所有这些额外硬件，这些组件是市场上最节能的组件之一。多脉组件是可追溯到20多年前的谐波抑制原始解决方案之一。但由于尺寸以及对完美平衡功率的要求，这种谐波抑制技术用得越来越少。

08 多脉冲解决方案：
六脉波整流器、12脉
冲整流器、18脉冲整
流器（滤波器）



有源前端

在有源前端 (AFE) 传动中，整流器由绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 器件而不是二极管构成。AFE传动还包含一个内置LCL (电感器-电容器-电感器) 滤波器。基于IGBT的整流器的控制方式允许传动获得接近纯正弦波的电流。LCL滤波器有助于消除IGBT开关产生的任何高频噪声。LCL滤波器通常优于更低效的LC滤波器。通过将IGBT整流器与LCL滤波器的组合，ABB AFE传动的电流失真率在3%和5%之间，它也可以称为ULH (超低谐波) 传动。

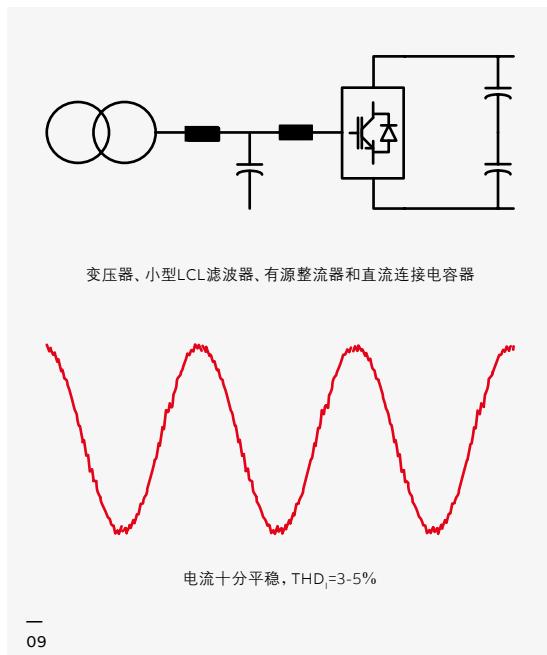
AFE是能够确保低于5%的电流失真的任何解决方案中最简单的方案。功率因数是统一的，这意味着它使用尽可能少的无功电流。此外，AFE传动在部分负载条件下具有出色的谐波抑制性能。安装AFE传动器非常简单，因为它们通常是带线路输入终端和电机输出终端的单件设备。由于IGBT前端的主动控制，AFE传动比任何其他谐波抑制解决方案更能抵抗电压不平衡。

其它抑制技术

还有其他一些方法可以抑制谐波，例如带小型直流母线电容器的传动和采用矩阵技术的传动，但ABB不建议使用它们。前文提出六脉波传动，未提及带小型直流母线的电抗器、参考传动。下文简要介绍矩阵传动。

矩阵传动由带九个双向IGBT以及无直流总线电容器的传动组成，这意味着输入交流电压直接被转换成输出交流电压。这个概念似乎很美好，但矩阵传动存在重大的技术限制。矩阵传动无法提供全输出电压以及最佳的谐波抑制。当矩阵传动能够提供最佳的谐波抑制 (几乎与AFE传动一样好) 时，输出电压限制为87或93%。限制电机电压会使电机在全速和满载时消耗更多电流，导致电机过热。输出电压可设为高于87%，但也需要增大电流失真。矩阵解决方案可以很好地消除谐波或者完全控制输出电压，但不能同时进行。典型的电流失真水平为5%-13%，这取决于它提供有限还是全输出电压。

—
09 有源前端传动 (带LCL滤波器)



总结

注意电网内的谐波水平非常重要，因为这可给您带来长期回报。 THD_V 是电压的总谐波畸变， THD_I 是电流的总谐波畸变。 THD_V 对最终用户的电能质量影响最大。但 THD_I 是比较不同谐波抑制解决方案的最简单方法。电流谐波(THD_I)产生电压谐波(THD_V)，因此，在本文中，我们只比较基于电流谐波(THD_I)的不同抑制技术。谐波畸变会在建筑物内造成各种问题，但最常见的问题是额外的热量。由于设备发热，运行效率降低，容易出现过早破坏。

关于控制谐波，没有“一刀切”的解决方案。但是，对于一些典型的谐波问题，可参考一些经验法则。

- 在传动占建筑物变压器容量的30%以下的项目中，使用阻抗为5%的所有六脉波传动都是可以接受的。
- 在有更大传动负载的项目中，阻抗为5%的六脉波传动（在较小的传动上）与AFE传动（在较大的传动上）组合将是最佳的系统解决方案。

对于任何有相当大的非线性负载的任何项目，建议使用计算机模拟的谐波分析。必要时，谐波分析将识别谐波水平并显示升级到附加谐波抑制（例如AFE）的影响。ABB可帮助您对建筑物或项目进行谐波分析。

联系我们

北京 ABB 电气传动系统有限公司

中国，北京，100015

北京市朝阳区酒仙桥北路甲 10 号 401 楼

电话：+86 10 58217788

24 小时 × 365 天技术热线：+86 400 810 8885

网址：www.abb.com/drives



ABB传动官方微信



ABB传动电子资料库

全国各地区销售代表处联系方式

上海办事处

中国 上海市 200001

上海市黄浦区蒙自路763号丰盛创建大厦16层

电话：+86 21 2328 8888

传真：+86 21 2328 8678

沈阳办事处

中国 辽宁省沈阳市 110001

和平区南京北街206号假日城市广场2座16层

电话：+86 24 3132 6688

传真：+86 24 3132 6699

乌鲁木齐办事处

中国 新疆乌鲁木齐市 830002

中山路339号中泉广场国家开发银行大厦6B

电话：+86 991 283 4455

传真：+86 991 281 8240

重庆办事处

中国 重庆市 400021

北部新区星光大道62号海王星科技大厦A区6层

电话：+86 023 6788 5732

传真：+86 023 6280 5369

深圳办事处

中国 广东省深圳市 518031

深圳市福田区华富路1018号中航中心1504A

电话：+86 755 8831 3038

传真：+86 755 8831 3033

杭州办事处

中国 浙江省杭州市 310000

杭州市钱江路1366号华润大厦A座8层

电话：+86 571 8763 3967

传真：+86 571 8790 1151

长沙办事处

中国 湖南省长沙市 410005

黄兴中路88号平和堂商务楼12B01

电话：+86 731 8268 3005

传真：+86 731 8444 5519

广州办事处

中国 广州市 519623

珠江新城珠江江西路15号珠江城大厦29楼01-06A单元

电话：+86 20 3785 0688

传真：+86 20 3785 0608

成都办事处

中国 四川省成都市 610041

人民南路四段三号来福士广场T1-8层

电话：+86 28 8526 8800

传真：+86 28 8526 8900

厦门办事处

中国 福建省厦门市 361009

湖里火炬高新区信息光电园围里路559号

电话：+86 592 630 3058

传真：+86 592 630 3531

昆明办事处

中国 云南省昆明市 650032

昆明市崇仁街1号东方首座2404室

电话：+86 871 6315 8188

传真：+86 871 6315 8186

郑州办事处

中国 河南省郑州市 450007

中原中路220号裕达国际贸易中心A座1006室

电话：+86 371 6771 3588

传真：+86 371 6771 3873

贵阳办事处

中国 贵州省贵阳市 550022

观山湖区金阳南路6号世纪金源购物中心5号楼10层

电话：+86 851 8221 5890

传真：+86 851 8221 5900

西安办事处

中国 陕西省西安市 710075

西安市经济技术开发区文景路中段158号3层

电话：+86 29 8575 8288

传真：+86 29 8575 8299

武汉办事处

中国 湖北省武汉市 430060

武昌区临江大道96号武汉万达中心21层

电话：+86 27 8839 5888

传真：+86 27 8839 5999

福州办事处

中国 福建省福州市 350028

仓山万达广场A1座706-709室

电话：+86 591 8785 8224

传真：+86 591 8781 4889

哈尔滨办事处

中国 黑龙江省哈尔滨市 150090

哈尔滨市南岗区长江路99-9号辰能大厦14层

电话：+86 451 5556 2291

传真：+86 451 5556 2295

兰州办事处

中国 甘肃省兰州市 730030

兰州市城关区张掖路87号中广大厦23楼

电话：+86 931 818 6466

传真：+86 931 818 6755

济南办事处

中国 山东省济南市 250011

泉城路17号华能大厦6楼8601室

电话：+86 531 8609 2726

传真：+86 531 8609 2724

