变频装置的谐波及其抑制

访中冶南方工程技术有限公司上海分公司教授级高工张翼

胡 颖/本刊记者

张 翼 教授级高工
中冶南方工程技术有限公司上海分公司

谐波抑制和治理是当前乃至今后相当长的时期内，改善电能质量的一种行之有效的手段。

现代工业生产及人们的日常生活与变频装置的关系越来越紧密。比如工厂生产线上的变频传动装置、小区恒压供水的变频水泵，甚至家里空调机也用变频调节温度。变频装置的大量使用给人们的工作、生活带来了极大的便利，以变频装置为代表的电力电子装置是公用电网中最主要的谐波源之一，其对电力系统中电能质量有着重要的影响。为了对变频装置的谐波及抑制有更多的了解，本刊记者特约采访了中冶南方工程技术有限公司教授级高工张翼。

性能优良 广泛应用

电气应用：变频技术及其相关产品是电力电子行业近几年的一个重要课题，也是近年来世界范围内行业竞相关注的热点。请张工简要介绍变频装置的用途？

张翼：人们的日常生活及工业生产都离不开电气传动，大量的机械设备通过电动机拖动将电能转化为机械能。对于控制准确度要求不高以及没有调速要求的场合，采用转速不变的定速拖动；而对于控制准确度高或有节能要求的场合，则需要用调速传动。

调速按电动机类型分直流调速和交流调速。直流调速系统具有良好的调速性能，但直流电动机体积大，加之具有换向电刷和整流子，因此电动机安装环境受到限制，而且需要经常对其进行检查、维护。20 世纪80 年代以前，在调速传动领域中直流调速一直占据主导地位。

随着电力电子器件及计算机技术的发展，交流变频调速技术获得了迅速发展和广泛应用。变频调速具有极大的优越性，整个调速系统体积小、重量轻、控制准确度高、保护功能完善和通用性强，用变频装置驱动电动机来拖动风机、水泵等机械时，节能效果十分可观，可产生30%～40%的节能效果。

目前，国内外有许多优秀的变频装置，国外品牌有ABB、西门子、施耐德、丹佛斯、三菱、日立和富士

中国知网 https://www.cnki.net

等，国内有英威腾、汇川、森兰、四方、利德华福、安邦信和台达等。

随着变频装置日益广泛的普及及应用，其占电网总负荷的比例越来越大，而随之带来的电能质量问题也不可小觑。电网中大量使用变频装置等非线性负荷，对电网的电能质量造成破坏，最常见的是变频装置产生谐波电流，使电网的电压、电流波形发生畸变。

谐波危害和抑制措施

电气应用：随着变频器的广泛使用，其所带来的谐波问题也越来越受到关注，那么请张工先简要介绍一下谐波方面的知识。

张翼：在三相交流系统中，电流、电压波形是理想的正弦波形，其幅值、周期（频率）恒定。正弦电压施加在线性无源元件电阻、电感和电容上，其电流和电压分别为比例、积分和微分关系，仍为同频率的正弦波。但当正弦电压施加在非线性电路上时，电流就变为非正弦波，非正弦电流在电网阻抗上产生压降，会使电压波形也畸变为非正弦波。

通过对非正弦波进行傅里叶级数变换，可以得到频率为1/*T*的基波，以及频率为基波频率整数倍的谐波。谐波就是周期波形的畸变分量，谐波次数为谐波频率和基波频率的整数比。

电气应用：变频装置产生的谐波对公用电网来说是一种污染，它产生的干扰不可忽视。那么谐波具体有哪些危害呢？

张翼：谐波危害主要表现在以下几个方面。

1）谐波使设备产生附加损耗，降低供配电设备及用电设备的效率。由于谐波电流的频率为基波频率的整数倍，当高频电流流过导体时，因趋肤效应的作用，使导体对谐波电流的有效电阻增加，从而增加了设备的功率损耗、电能损耗，使导体严重发热。大量的3次谐波流过中性线时会使线路过热甚至发生火灾。

2）谐波会影响各种电气设备的正常工作。如谐波引起过电压、过电流，使变压器严重过热；使电动机发热，产生机械振动、噪声；使电容器、电缆过热，绝缘性能老化和寿命缩短。

3）谐波会引起公用电网局部谐波放大，甚至并联谐振和串联谐振易引起设备损坏和安全事故。当发电机的自然振荡频率在脉动磁场频率附近时，发电机发生超同步谐振。

4）谐波（尤其是零序谐波分量）对临近的通信线路产生干扰，轻者产生噪声，降低通信质量；重者导致信息丢失，使通信系统无法正常工作。

5）谐波导致继电保护系统（如线路的高频保护、行波保护等）和自动装置（如自动准同期装置）的误动作与拒动作。

6）谐波影响互感器的测量准确度，引起电力测量的误差，导致测量仪表计量不准确。

7）谐波对计算机产生干扰，影响显示屏的画面质量。

8）谐波导致功率开关器件故障而造成损坏等。

电气应用：国内外关于谐波方面的标准有哪些？

张翼：国内外关于谐波方面主要有如下几种标准。

（1）国家电能质量方面标准

GB/T 14549—1993《电能质量—公用电网谐波》。

该标准主要涉及到谐波电流限值、谐波电压限值、谐波电压计算及谐波传递。

（2）国家电磁兼容标准

GB/Z 17625.4—2000 idt IEC61000－3－6:1996《电磁兼容 限值 中高压电力系统中畸变负荷发射限值的评估》

GB/Z17625.5—2000 idt IEC61000－3－7:1996《电磁兼容 限值 中高压电力系统中波动负荷发射限值的评估》

GB/Z17626.7—2008 idt IEC61000－4－7《电磁兼容试验和测量技术——供电系统及所连设备谐波、谐间波的测量和测量仪器导则》

（3）IEEE和IEC有关标准

Electromagnetic compatibility (EMC)—part 2—8 enviroment voltage dips and short interruptions on public power supply systems with statistical measurement results. IEC61000-2-8 First Edition 2002-11.

《IEEE519 IEEE Recommended Practies and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. Standard, IEEE 519. IEEE, New York》

电气应用：既然变频装置会对电能质量造成危害，那么有没有抑制谐波或治理的措施？

张翼：对变频装置高次谐波进行综合治理，通常从两个方面入手：一方面针对变频装置谐波源本身；另一方面采取措施进行抑制，使之控制在规定范围内。

主要采取以下几种措施。

1）改变变频装置系统结构，提高整流器的相数。变频装置整流负载经过整流器接到电源上。交流侧的电流实

中国知网 https://www.cnki.net

际上是整流变压器二次侧（即阀侧）的线电流。

6脉冲整流器：变频装置通常采用二极管或晶体管三相桥式（6脉冲）整流电路。对其电流波形进行傅里叶级数变换可知，电流中仅含有$n=6k\pm1$次谐波，各次谐波有效值与谐波次数成反比，且与基波有效值的比值为谐波次数的倒数。

12脉冲整流器：将两个6脉冲整流器并联起来向公共直流母线供电，整流器通过一个三绕组变压器接入电网。变压器二次侧两个绕组有30°的相角差。对于电网侧，两个整流桥产生的5,7,17,19…次谐波相互抵消，注入电网的只有$n=12k\pm1$次谐波，且其有效值与谐波次数成反比，而与基波有效值的比值为谐波次数的倒数。

24脉冲整流器：同样由两个12脉冲整流器并联，带有两个三绕组变压器，变压器有15°的相位偏移，从而构成24脉冲整流器。该结构的好处是几乎可以消除所有的低频谐波，其网侧电流仅含$24k\pm1$次谐波。

各脉冲整流器的结构及电流波形如图1所示。

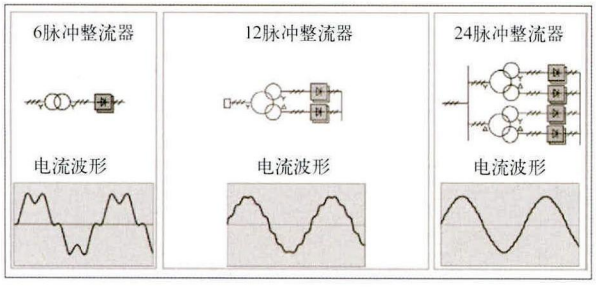


图1 各脉冲整流器的结构及电流波形

各脉冲整流器谐波次数分布如图2所示。

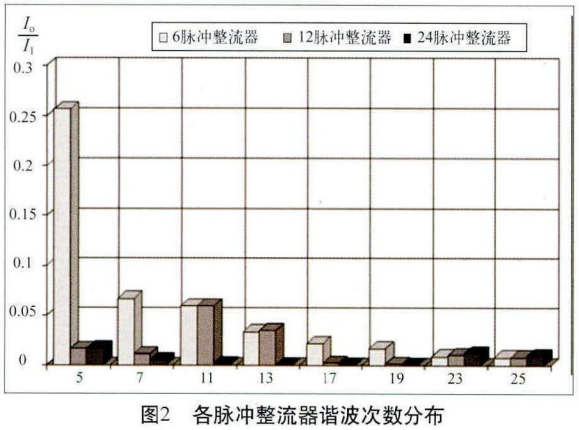


图2 各脉冲整流器谐波次数分布

通过以上分析可知，变频装置的脉冲数越高，则网侧谐波电流越小，电流畸变越小，电流波形更接近正弦波，但同时成本也越高。

采用IGBT整流器桥可以实现整流和再生功能，还可以不受功率流向的影响，低频的谐波非常少，电流波形接近正弦波，但高频谐波则有些高。如某厂IGBT交－直－交变频装置，68次高次谐波电流为其特征谐波电流，由于电缆分布电容与系统阻抗并联谐振，使68次谐波电流放大3倍左右，68次谐波含有率HRU_{68}高达8.1%，电压畸变率THD_U高达13.5%，严重超过电磁兼容限值（8%），致使该厂自动控制装置烧坏、变压器发热，每年谐波损耗高达48万kW·h，严重影响系统安全经济运行。

2）通过在交流电源侧或直流侧串联电抗器可以显著降低谐波。

3）采用在网侧设置滤波器来进行谐波治理，减少注入电网的谐波。

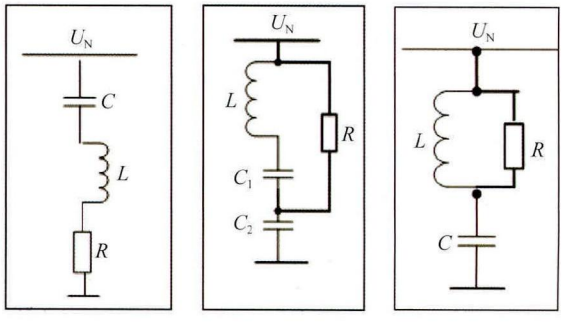
滤波器的使用和特点

电气应用：通过滤波器可以抑制谐波，那么请张工介绍一下滤波器方面的知识。

张翼：滤波器分无源滤波器和有源滤波器。

（1）无源滤波器

无源滤波器通常由电容器和电抗器串联而成，即采用串联调谐的方式，调谐某个特定谐波频率。滤波器对某次谐波来说呈低阻抗。理论上，滤波器在其调谐频率处阻抗为零，谐波电流即从其常规的途径转移到滤波器回路，因此可以吸收掉要滤除的某次谐波。其结构形式如图3所示。



(a) 单调谐滤波器 (b) C形高通滤波器 (c) 二阶高通滤波器

图3 无源滤波器的结构

无源滤波技术的主要优点是结构简单、维护方便、可以耐受高电压、投资少和效率高，而且容量可以很大并可在滤除谐波的同时补偿无功功率。在我国，无源滤波有较成熟的技术、设计和制造经验，因此无源滤波方案是目前采用得最为广泛的谐波抑制和补偿无功的主要手段。

中国知网 https://www.cnki.net

无源滤波装置的滤波原理是给谐波提供一个低阻抗通路，因此其滤波特性是由系统和滤波器的阻抗比所决定的，这样就存在如下不足之处：①无法滤除非特征谐波；②滤波特性受系统参数与运行工况影响比较大，设计起来较困难，谐振频率依赖于元件参数，因此只能对主要谐波进行滤波，频率的偏差、*LC*参数的漂移（如电容器温度特性）将导致滤波特性改变，使滤波性能不稳定；③系统运行方式的变化导致电网的参数与*LC*可能产生并联谐振，使该次谐波分量放大，使电网供电质量下降；④只能补偿固定的无功电流；⑤体积大；⑥滤波的要求与无功补偿、调压要求难以协调，无法同时满足。

（2） 有源电力滤波器

有源滤波器的原理与无源滤波器的原理完全不同，它是通过一个可控的电力电子电路，产生与需补偿的谐波幅值相等、波形一致以及相位相反的电流，使电源的总谐波电流为零，从而抵消非线性负荷产生的谐波电流，达到实时补偿谐波电流的目的，防止谐波注入系统。

随着电力电子技术的飞速发展，并且许多敏感负荷对滤波效果的要求越来越高，有源电力滤波器的研究得到飞速发展。自1976年L.Gyugi提出了用大功率晶体管PWM变换器构成电力有源滤波器（Active Power Filters，APF），并正式提出APF的概念，有源电力滤波器技术的研究日益加强，现在该技术已从实验室走向工业应用，国内外均有有源电力滤波装置的实际产品，限于电力电子主电路的电压、电流容量与电压等级，有源滤波器的应用目前主要集中在低压配电网范围内。

它与无源滤波器相比，有以下特点：

1）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，可实现动态无功补偿和电压电流的平衡控制，在性价比上较为合理。

2）滤波特性不受系统阻抗等的影响，不存在谐振问题，可消除与系统阻抗发生谐振的危险。

3）具有自适应功能，可自动跟踪补偿变化着的谐波，可控性强，响应速度快。

在实践中，通常采用有源滤波器与无源滤波器混合的结构，因为这样成本低，对有源滤波器电压等级要求也较低。

谐波抑制和治理是当前乃至今后相当长的时期内，改善电能质量的一种行之有效的手段。将变频装置产生的谐波控制在最小范围内，可以抑制电网污染、提高供电质量。随着科学技术进步，变频装置的谐波问题将会得到很好的解决，变频装置将真正成为“绿色电源”。 **EA**

典藏技术 革新应用

专业专注

时刻关注并推动中国电气技术的发展

《电气应用》是一本拥有光荣发展历程的全国优秀科技期刊。

自 1982 年创刊至今，已走过了 33 年艰苦创业、改革发展的光辉历程。其所荣获的“全国优秀期刊、中国期刊方阵‘双奖期刊’和国家期刊奖‘百种重点期刊’、中文核心期刊”等诸多荣誉见证了编辑们的专业与勤奋，也博得了广大读者和业内专家的支持与厚爱，在众多电工类专业技术期刊中颇具影响力。

国内统一刊号：CN11-5249/TM 国际标准刊号：ISSN1672-9560 国内邮发代号：82-341 国外发行代号：M1409

电气应用

中国知网 https://www.cnki.net