

无源/有源滤波原理及其应用分析

刘圣奇

(深圳市建筑工务署, 广东 深圳 518006)

摘要: 阐述了谐波产生源及谐波对电力系统和用电设备的影响, 分析了无源/有源滤波的工作原理和特性, 提出滤波器应合理配置, 避免滥用有源滤波器造成投资浪费、无谓的能源消耗及维护管理成本的提高。考虑到公用建筑的具体情况, 分析仅限于380/220 V系统, 并假设电源系统本身的非线性参量可忽略。

关键词: 谐波; 无源滤波器; 有源滤波器

中图分类号: TN713

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2009)05-0069-05

An Analysis on the Principle and Application of Passive/Active Filters

Liu Shengqi

(Shenzhen Works Bureau, Shenzhen Guangdong 518006, China)

Abstract: Describes harmonic sources and influence of harmonics on the power system and electrical equipments, analyzes the working principle and characteristics of passive/active filters, and puts forward appropriate allocation and application of filters to avoid excess investment, meaningless energy loss and the high cost of maintenance due to abuse of active filters. In view of the specific circumstances of public buildings, analysis is limited to 380/220 V systems, and assumes that the non-linear parameters of power source can be ignored.

Keywords: harmonics; passive filter; active filter

1 谐波的主要来源

随着新技术的发展, 具有非线性负荷特征的用电设备越来越多。下面对公用建筑中的主要谐波源作简单介绍。

1.1 UPS

根据整流装置的结构, 大功率UPS主要有三相全控6脉冲整流桥或12脉冲整流装置。6脉冲整流主要产生 $6n \pm 1$ 次谐波电流, 12脉冲整流主要产生 $12n \pm 1$ 次谐波电流。

1.2 变频器

目前变频器的工作原理一般采用间接式, 即采用AC-DC-AC方式。与UPS类似, 其谐波分量也取决于其整流电路的结构^[1], 目前大量采用6脉冲桥式整流, 某变频风机的谐波分布如图1所示。

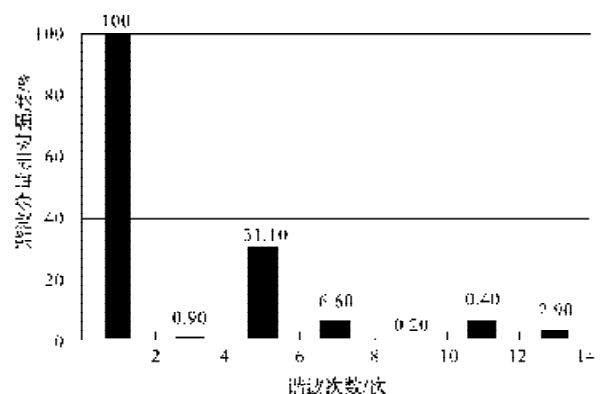


图1 典型变频器的谐波分布

Fig. 1 Harmonic spectrum of typical frequency converter

1.3 电子镇流器

目前我国大部分电子镇流器产品仅采用简单的整流桥加单电容滤波, 造成其功率因数极低(在0.5~0.6

收稿日期: 2009-07-02

作者简介: 刘圣奇(1967-)男, 安徽潜山人, 深圳市建筑工务署高级工程师, 硕士, 主要研究方向为建筑电气, 建筑智能化, 计算机网络, E-mail: liusq008@126.com

之间), 3次谐波可高达86%, 5次谐波高达61%。

1.4 开关电源

开关电源的输入端一般为单相全波二极管式整流桥, 在整流桥后是否采用APFC (active power factor correction), 其谐波分量差别较大, 典型开关电源谐波分布见表1。

表1 APFC对产生谐波分量的影响

Table 1 Influence of APFC on harmonic components generation

谐波成分	3次谐波	5次谐波	7次谐波	总谐波畸变率
谐波分量 无 APFC	91.69	84.04	74.17	174.6
相对强度 / % 有 APFC	54.70	17.14	4.17	59.4

2 谐波对电力系统的影响

据 GB/T14549-93《电能质量、公用电网谐波》要求, 380/220 V电网的电压总谐波畸变率不应超过5.0%, 其中奇次谐波不应超过4.0%, 偶次谐波不应超过2.0%。对于谐波电流, 该规范规定, 公共连接点的全部用户向该点注入的谐波电流分量(方均根值)不应超过规定的允许值(380/220 V, 基准短路容量10 MVA)^[2]。

2.1 谐波对电缆的影响

由于电缆分布电容和分布电感的存在, 谐波分量传输过程中幅值会大大提高, 且谐波次数越高, 谐波电压、电流放大倍数越大。电缆长期承受高频过电压、过电流, 易造成绝缘老化、击穿, 并增加损耗。

2.2 谐波对发电机和电动机的影响

对于旋转电机, 由于存在集肤效应、磁滞、涡流等, 因此随着频率的提高会使其铁芯和绕组中附加损耗增加。同时, 由于谐波会产生显著的脉冲转矩, 因此可能出现电机转轴扭曲振动, 并产生噪音, 对气轮发电机来说, 还会使汽轮机叶片产生疲劳损坏。

2.3 谐波对变压器的影响

由于高频电流的集肤效应, 高频谐波电流将在绕组表面产生较大涡流, 使发热增加(铜损); 同时, 随着频率的增加, 铁芯中磁滞损耗和涡流损耗也将增大(铁损), 因涡流损耗与频率的平方成正比, 故谐波电流造成的损耗将尤为严重。

2.4 谐波对电容器的影响

电容器通常并联在供电回路中, 由于电容器的容抗与频率成反比, 高次谐波将在电容器中产生较大的谐波电流, 此谐波电流叠加在基波电流上, 将使温度升高, 引起电容器过负荷甚至爆炸。

2.5 谐波对继电保护的影响

电力系统中有一些保护是按负序分量进行整定的, 该类保护整定值低, 灵敏度高, 谐波中5次、11次等负序谐波分量可能会引起该类继电保护误动, 威

胁电力系统的安全运行^[3]。

2.6 谐波对电能计量装置的影响

对于感应式电度表, 谐波会造成计量误差, 不过随着谐波次数的增高, 影响会越来越小。但对于大部分电子式电度表来说, 它们会将谐波产生的电功率与基波功率进行简单的代数相加, 由于系统中的谐波是从非线性用户流向线性用户, 造成线性用户除了受谐波危害之外, 还要额外支付谐波功率的费用; 而非线性用户产生谐波污染了电网, 却还能由于对外输送谐波功率而抵消掉一部分电功率费用。

2.7 谐波对现代医院中医疗设备的影响

现代医院中很多医疗设备都是通过检测人体生物电信号来判别人体健康状况, 由于信号非常微弱, 高频的谐波容易在其检测结果(如波形、图形或图像)上叠加一些畸变信号, 可能造成误诊, 严重时若因干扰源感应出高电压, 引起微电击, 则会造成生命危险。

3 谐波的主要抑制方法

1) 对于新建公用建筑, 要严格执行国家标准、规范, 购买和使用符合标准的用电设备。一些新修订的国家标准, 对谐波分量要求已相当严格。

2) 对3次或其整数倍的谐波, 在其不影响本地其它用电设备或产生其它危害的前提下, 可以不做补偿, 规范推荐采用的D_{yn}11接线组别变压器能防止该类谐波送到上级电力系统。

3) 对大容量电容器组, 回路内应增设限流装置或串联电抗器, 在吸收部分谐波的同时, 能有效保护电容器免受损害。

4) 设置滤波装置, 就地或集中对谐波进行滤波, 这也是以下重点讲述的内容。

4 无源滤波器

从理论上说, 最有效的也是最简单的滤波方式是在线路中串联低通滤波器, 只允许基波电流通过, 但由于线路中负载电流一般较大, 这就要求滤波器中电抗元件的容量也较大, 同时损耗加大, 并在电抗器两端产生较大压降, 因此这种方式不经济。在实际工程应用中, 一般都采用并联无源滤波器的方式。

3次及其整数倍谐波分量只要其对本级用户不产生影响, 一般可不采取措施, 因此, 对于无源滤波器来说, 只要考虑5、7、11、13次等谐波分量即可。

对于5、7次谐波分量较高的回路, 可采取并联5次或同时并联5、7次滤波器的方法, 如图2。当 L_5 与 C_5 在5次谐波时产生谐振使其回路阻抗等于0(这里假设电感的电阻及其回路电阻等于0), 则其电容及电感的取值为 $\frac{1}{j\omega_5 C_5} + j\omega_5 L_5 = 0$, 由此得 $f_5 = \frac{1}{\omega_5^2 C_5}$ 。这样负载

侧产生的5次谐波电流将通过LC并联回路短接,由于前面算式中所忽略的电抗器及回路的电阻相当小,产生的分压也极低,这样只可能有极小的5次谐波电流通过变压器反馈到电力系统,同时该分压所引起的5次谐波电压也不会再对其它负荷产生影响。

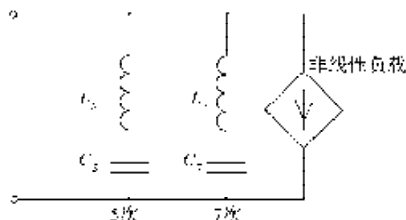


图2 5次、7次无源滤波器简图

Fig. 2 Schematic of 5th/7th passive harmonic filter

在该滤波电路中,若去掉电感 L_5 ,则该电路就变成了普通的无功功率补偿电路,那么串入电抗器后,这些电容器对无功功率的补偿还有多大作用,如前所述,滤波电路的阻抗为 $\frac{1}{j\omega C_5} + j\omega L_5 = 0$,而不带电抗器时阻抗为 $\frac{1}{j\omega C_5}$ (设其为 Z_{c5}),两者的比值反应出滤波回路中电抗器对回路阻抗的影响程度,即:

$$\frac{\frac{1}{j\omega C_5} + j\omega L_5}{\frac{1}{j\omega C_5}} = \frac{\frac{1}{j\omega C_5} + j\omega \frac{1}{\omega_5^2 C_5}}{\frac{1}{j\omega C_5}} = 1 + \frac{(j\omega)^2}{\omega_5^2} = 1 - \frac{\omega^2}{\omega_5^2} = 1 - \frac{f^2}{f_5^2} = 1 - \frac{n^2}{5^2}$$

式中: n 为谐波次数。

由上式可得该滤波回路作为整体对外所表现的容性(或感性)特征,同理也可求得7次谐波滤波器的特性,如表2。

表2 滤波回路对外表现的容性(负值为感性)特征

Table 2 Capacitive characteristics (negative value as inductive) of filter circuit as a whole

谐波次数/次	5次谐波滤波回路阻抗/ Ω	7次谐波滤波回路阻抗/ Ω
1	$0.96Z_{c5}$	$0.98Z_{c7}$
3	$0.64Z_{c5}$	$0.82Z_{c7}$
5	0	$0.49Z_{c7}$
7	$-0.96Z_{c5}$	0
9	$-2.24Z_{c5}$	$-0.65Z_{c7}$
11	$-3.84Z_{c5}$	$-1.47Z_{c7}$
13	$-5.76Z_{c5}$	$-2.45Z_{c7}$
15	$-8.00Z_{c5}$	$-3.59Z_{c7}$
17	$-10.56Z_{c5}$	$-4.90Z_{c7}$

从表2可看出,在基波情况下,5、7次谐波滤波器对外所表现的特性阻抗分别为 $0.96Z_{c5}$ 和 $0.98Z_{c7}$,因此该滤波电路不仅完成了滤波任务,还充当了无功补

偿的角色,由此要求设计者在设计该类滤波器时要结合无功补偿一起考虑,以免出现过补偿和欠补偿。

对于3次谐波,该滤波器也显现出较高的容性特征,分别为 $0.64Z_{c5}$ 和 $0.82Z_{c7}$,因此在系统中3次谐波含量较高时,电容器的选择应考虑能承载叠加在基波无功电流和该滤波器所担负的该次谐波电流之上的3次谐波电流。当然,对于独立的7次谐波滤波器(没有与5次谐波滤波器同时使用时),还应考虑5次谐波电流的影响。

对比滤波器次数更高的谐波,该滤波器已显现容性特征的负值,即感性特征,且其感抗随谐波次数的升高而很快上升,即该电路对高次谐波的影响不大。

整体说来,当线路中谐波成分不太复杂,如5次、7次或11次谐波分量较高,而其它次数的谐波分量都不是很高且属于稳态谐波时,采用无源滤波器还是很合适的。它具有系统结构简单、响应无延时、不需要工作电源、故障率及维护成本低、投资省等特点。

当然无源滤波器的缺点也是非常明显的:1)因为一般都是滤除次数较低的谐波,要求元件的参数较大,较笨重;2)电源的阻抗特性会直接影响到滤波器补偿特性,为了达到较好补偿效果,通常需要对所补偿的系统进行分析计算并实际测量,专门进行设计才能达到;3)系统频率偏移会严重影响滤波特性,若想在较宽的系统频率范围内都能达到满意的效果,则采用较复杂的设计,系统将会异常复杂和庞大;4)在系统设计中要充分考虑到谐振问题,避免造成系统损坏。当无源滤波器的使用受到上述问题制约时,下面介绍的有源滤波器将会更具优势。

5 有源滤波器

有源滤波器基本原理是利用电力电子技术,在线路中产生指定分量的电流,用以抵消非线性负载产生的谐波电流,这样谐波电流就不会注入电源系统而对其它用户造成影响,其电路结构见图3。根据接口电路的形式,有源滤波器可分为并联型或串联型^[4],以下就常用的并联型有源滤波器作简单介绍。

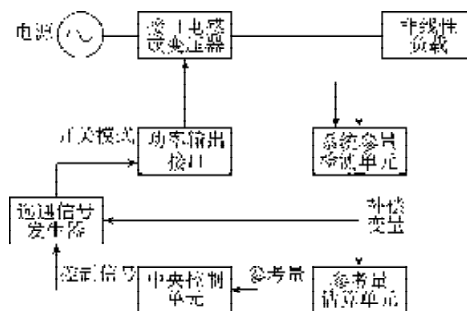


图3 有源滤波器基本逻辑框图

Fig. 3 Basic logic diagram of active filter

5.1 滤波原理

并联型有源滤波器作为电流源，补偿非线性负载产生的谐波电流，它向系统注入与畸变电流等值的电流，抵消畸变电流对系统的影响，从而净化系统达到滤波的目的。并联型有源滤波电路原理框图如图4。

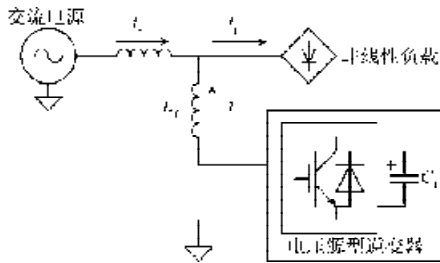


图4 并联型有源滤波器（基于电压源型逆变器）

Fig. 4 Shunt active filter(based on voltage source inverter)

运用傅里叶变换，可以将非线性负载电流分解成基波分量 $i_{L,f}$ 与谐波分量 $i_{L,h}$ 之和，即 $i_L = i_{L,f} + i_{L,h}$ ，于是由并联有源滤波器向线路注入的补偿电流应为 $i_f = i_{L,h}$ ，这样，由电源向系统提供的电流 $i_s = i_L - i_f = i_{L,f}$ ，即纯净的基波分量（理论值），而不会由于谐波电流进入电源系统而引起电源电压畸变，并联型有源滤波器作用效果可见图5的波形分析。

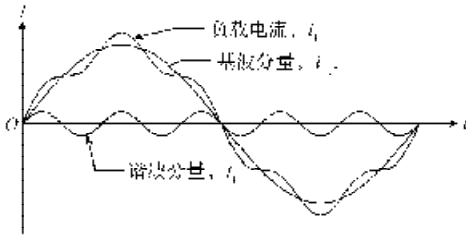


图5 并联型有源滤波器波形分析

Fig. 5 Waveform analysis of Shunt active filter

并联型有源滤波器的优点是，只有补偿电流通过滤波器，而基波电流不需通过，从而减轻了系统元件的负担，同时，并联型有源滤波器还可以提供无功补偿电流。另外，可以将多个并联型有源滤波器并联起来，从而提高整体滤波能力。

5.2 参考量的估算

有源滤波器在监视系统各种参数时，要计算出参考量信号的值，以便滤波器根据系统实际参量与参考量之间的差异，输出适当的补偿量，由此可见，参考量估值的准确性会直接影响滤波器的补偿效果。

对于并联型有源滤波器，常需监测的量包括负载电流、电源侧电流、补偿电流和滤波器内部供给逆变器的直流电流。参考量估值单元在取得这些数据后，可采用时域或频域方法对这些参量进行分析而产生参考量的估值。

傅里叶变换是目前高档次有源滤波器普遍采用的方式，它利用高速数字信号处理器（digital signal processor，即DSP）的强大运算能力结合有源滤波器

其它部件统一设计，容易实现整个系统的全数字化，系统稳定可靠，升级及调整一般通过修改软件设计即能实现。但这种方式的缺点是系统参量采样和傅里叶运算引起的时延较大，使得它不适合快速变化的动态负载。目前很多产品对该算法进行了一些修改，只计算基波电流参量，从而提高了运算速度，减少了由运算引起的时延。

时域的各种运算方法一般采用模拟运算电路实现，其反应速度相对较快，但系统结构复杂，调整困难，且抗干扰能力差，参数易漂移而引起较大补偿误差。为此，也有一些厂家采用DSP方法来进行运算。在时域的各种运算方法中，同步检测法和同步参考坐标法只适用于三相平衡系统，其它几种方法既适用于三相系统，也适用于单相系统。

5.3 有源滤波器的控制技术

并联型有源滤波器的输出类似于变频器的输出，它采用脉宽调制技术输出系统所需的、特定的幅值随时间变化的补偿电流，因此，控制脉冲宽度调制（pulse width modulation，即PWM）输出的选通信号的生成成为系统的关键，目前常用线性控制法、数字无差拍控制法和滞环控制法。数字无差拍控制一般是基于DSP运算实现的，而线性控制和滞环控制一般采用模拟运算放大电路实现。

5.3.1 线性控制技术

线性控制技术采用图6所示的负反馈电路。通过补偿误差放大器将补偿电流或电压（ i_f 或 u_f ）与参考值（ $i_{f,参考}$ 或 $u_{f,参考}$ ）进行比较，输出的差值信号作为控制信号再与某确定频率的锯齿波进行比较，通过脉宽调制电路PWM产生滤波电路所需要的选通信号。锯齿波的频率决定了开关频率，如图7所示。

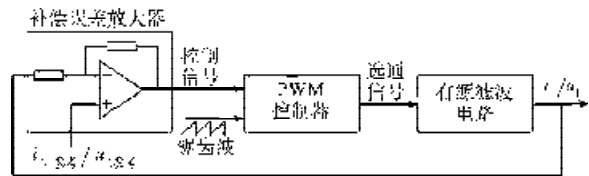


图6 线性控制电路框图

Fig. 6 Linear control circuit block diagram

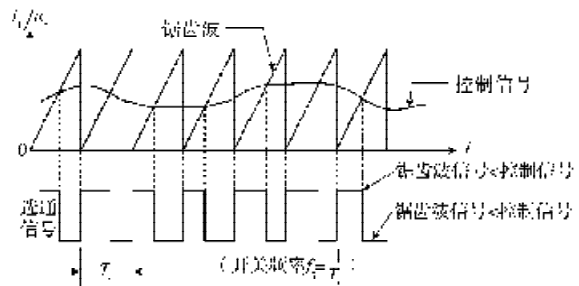


图7 选通信号产生示意图

Fig. 7 Gating signal generation diagram

采用模拟 PWM 电路, 反应快且电路简单, 但由于模拟电路的固有缺陷, 如补偿误差放大器的带宽限制或参数漂移等, 从而影响了谐波补偿的性能。

5.3.2 滞环控制技术

滞环控制技术类似于线性控制技术, 也是根据系统参量与参考量之间的差别产生适当的选通信号^[5]。不同的是, 在滞环控制方式中, 人为设定一个误差范围 H , 在此区间内跟踪参考信号 i_f 参考或 u_f 参考, 电路原理框图参见图 8。在实际控制中, 设定参考信号 $\pm H/2$ 作为上限与下限, 当输出信号 i_f 或 u_f 的大小在此区间内时, 选通信号不会发生改变, 而当输出信号 i_f 或 u_f 碰到误差边界时, 选通信号发生改变, 见图 9。

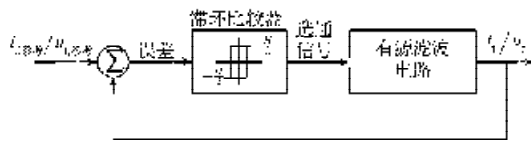


图 8 滞环控制电路框图

Fig. 8 Hysteresis control circuit block diagram

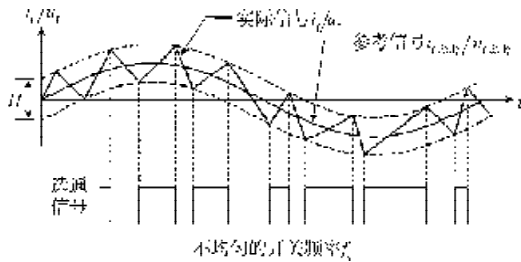


图 9 选通信号产生示意图

Fig. 9 Gating signal generation diagram

目前比较流行的方式是采用固定 H 的方法进行电路设计。为减少切换信号引起的纹波, H 值可以设定得较小, 但这样做会引起较高的切换频率, 加大半导体管的切换损耗而影响其寿命。

滞环控制技术的优点是它的出色的动态性能及纹波大小的可控性, 并且实现起来比较简单。主要缺点是开关频率是不确定的, 这样在设计混合滤波器系统时, 造成无源的高通滤波器将很难设计, 且这种不规则切换方式会影响有源滤波器效率和可靠性, 另外还有可能引起配电系统的振荡。

由以上分析可知, 对于不同性质的系统、不同性质的谐波, 有源滤波器的选择是非常重要的。由于有源滤波器工作原理的差异, 对同一配电系统, 如果有源滤波器选择不当, 可能反而会引起系统状况的恶化或不稳定。因此设计人员在设计有源滤波器时, 应对具体系统进行分析, 对有源滤波器选择提出具体要

求, 以保证有源滤波器的使用能真正达到设计要求。

6 结语

本文对谐波产生、危害及治理等作了阐述, 分析了无源滤波器和有源滤波器的基本工作原理。工程技术人员应在充分理解谐波特性及治理方法的基础上, 进行无源和有源滤波器的设计, 使设计既能降低造价, 又能达到较好的治理效果; 既能节约维护成本, 又能保证系统的高可靠性。

参考文献:

- [1] 钱诗宝, 杨志. 基于 IGCT 器件的两电平高压变频器研究与应用[J]. 华电技术, 2008, 30(1): 33-35.
Qian Shibao, Yang Zhi. Research on The Two-Level High-Voltage Frequency Converter Base on IGCT Devices and Application[J]. Huadian Technology, 2008, 30(1): 33-35.
- [2] 林海雪. 从 IEC 电磁兼容标准看电网谐波国家标准[J]. 电网技术, 1999, 23(5): 64-67.
Lin Haixue. On Difference between National Standard and IEC 61000 Standards of EMC in Harmonic[J]. Power System Technology, 1999, 23(5): 64-67.
- [3] 余培岩, 马卫平, 界金星, 等. 变压器 5 次谐波的产生及其对负序电压继电器的影响[J]. 电力设备, 2004, 5(8): 27-30.
Yu Peiyan, Ma Weiping, Jie Jinxing, et al. The Fifth Harmonic in Power Transformer and Its Influence on Negative Sequence Voltage Relay[J]. Electrical Equipment, 2004, 5(8): 27-30.
- [4] 罗德凌, 周方圆, 唐朝晖. 有源电力滤波器的研究现状与发展动向[J]. 国外电子测量技术, 2006, 25(2): 1-5.
Luo Deling, Zhou Fangyuan, Tang Zhaohui. Active Power Filters and Their New Development Tendency[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2006, 25(2): 1-5.
- [5] Salam Zainal, Cheng Tan Perng, Jusoh Awang. Harmonics Mitigation Using Active Power Filter: A Technological Review[J]. Faculty of Electrical Engineering, 2006, 8(2): 17-26.
- [6] 吴健. 大功率 UPS 输入谐波电流抑制四种方案比较[J]. 教育信息化, 2005(12): 79-81.
Wu Jian. Comparison of Four Harmonic Current Suppressions for High Power UPS[J]. China Education Info., 2005(12): 79-81.

(责任编辑: 李玉珍)