

有源滤波技术及其应用

胡 铭, 陈 珩

(东南大学电气工程系, 南京 210096)

摘要: 随着大功率开关器件的广泛应用, 电能质量问题日益严重。文中就谐波治理中的无源及有源滤波技术进行对比, 简要介绍了有源滤波器的分类、工作原理以及近年来国内外有源滤波技术研究的最新成果, 展望了有源滤波技术在我国的发展前景。

关键词: 有源滤波器; 无源滤波器; 电能质量; 谐波

中图分类号: TM 76

0 引言

近年来, 配电网中整流器、变频调速装置、电弧炉、电气化铁路以及各种电力电子设备不断增加。这些负荷的非线性、冲击性和不平衡的用电特性, 对供电质量造成严重污染。另一方面, 现代工业、商业及居民用户的用电设备对电能质量更加敏感, 对供电质量提出了更高的要求^[1]。仅依靠过去无源滤波技术治理谐波已不能满足要求, 研究和开发适应这一要求的新技术已成为近年来电力系统研究领域中的新热点。对此, 国外提出了“用户电力技术”(Custom Power)的新概念^[2], 即利用电力电子控制器来提高配电网供电可靠性及电能质量。由于谐波是影响电能质量的最主要因素, 因此有源滤波——利用电力电子控制器来抑制谐波也是 Custom Power 技术实施的主要手段之一, 利用有源滤波这一新技术对配电网进行综合电能质量补偿必将会带来显著的经济效益。

本文首先对无源滤波技术和有源滤波技术的优缺点进行比较, 接着对有源滤波技术的原理、应用及其发展趋势做了详细介绍。

1 无源和有源滤波技术

采用电力滤波装置就近吸收谐波源所产生的谐波电流, 是抑制谐波污染的有效措施。通常采用由电力电容器、电抗器和电阻器适当组合而成的无源滤波装置进行滤波。由于无源滤波具有投资少、效率高、结构简单、运行可靠及维护方便等优点, 因此无源滤波是目前广泛采用的抑制谐波及无功补偿的主要手段。由于无源滤波器是通过在系统中为谐波提供一并联低阻通路, 以起到滤波作用, 其滤波特性是由系统和滤波器的阻抗比所决定的, 因而存在以下缺点^[1,3]: ①滤波特性受系统参数的影响较大; ②只

能消除特定的几次谐波, 而对某些次谐波会产生放大作用; ③滤波要求和无功补偿、调压要求有时难以协调; ④谐波电流增大时, 滤波器负担随之加重, 可能造成滤波器过载; ⑤有效材料消耗多, 体积大。

由于无源滤波具有以上缺点, 随着电力电子技术的不断发展, 人们将滤波研究方向逐步转向有源滤波器。早在 70 年代初期, 日本学者就提出了有源滤波器(active power filter, 缩写为 APF)的概念^[4], 即利用可控的功率半导体器件向电网注入与原有谐波电流幅值相等、相位相反的电流, 使电源的总谐波电流为零, 达到实时补偿谐波电流的目的。1976 年美国西屋电气公司的 L. Gyugi 提出利用大功率晶体管组成的 PWM 逆变器构成的 APF 消除电网谐波^[5]。由于受到当时功率半导体器件水平的限制, APF 的研制一直处在试验研究阶段。进入 80 年代以后, 随着电力电子技术的飞速发展, 大功率可关断器件(GTR, GTO, IGBT 等)的不断进步, 以及对非正弦条件下无功功率补偿理论的深入研究, 特别是瞬时无功理论的提出^[6], 为 APF 的实用化提供了必要的条件, 使之在工业上得到了广泛的应用。

与无源滤波器相比, APF 具有高度可控性和快速响应性, 其具体特点如下:

- 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, 在性价比上较为合理;
- 滤波特性不受系统阻抗的影响, 可消除与系统阻抗发生谐振的危险;
- 具有自适应功能, 可自动跟踪补偿变化着的谐波。

尽管 APF 有着无源滤波器所不具备的巨大技术优势, 但目前要想在电力系统中完全取代无源滤波器还不太现实。这是因为与无源滤波器相比较, APF 的成本较高, 这一点是限制 APF 推广使用的关键。随着电力电子工业的发展, 器件的性价比将不断提高, APF 必然会得到广泛应用。

2 有源滤波器的分类

目前,有源滤波技术已在日本、美国等少数工业发达国家得到了广泛应用。根据应用场合不同,有源滤波器可分为有源直流滤波器和有源交流滤波器两大类。有源直流滤波器主要用来消除 HVDC 系统中换流器直流侧的电压、电流谐波;而有源交流滤波器则是应用于交流电力系统各个电压等级的有源滤波器,也就是通常所说的 APF。从不同的观点出发,APF 具有不同的分类标准^[7]。

a. 根据 APF 与系统的连接方式可将 APF 分为并联型 APF、串联型 APF、串-并联型 APF 以及混合型 APF。

图 1 所示为并联型 APF,由于其与系统相并联,可等效为一受控电流源。并联型 APF 可产生与负载谐波大小相等、方向相反的谐波电流,从而将电源侧电流补偿为正弦波。并联型 APF 主要适用于感性电流源型负载的谐波补偿,目前技术上已相当成熟,工业上已投入运行的 APF 多采用此方案^[8]。

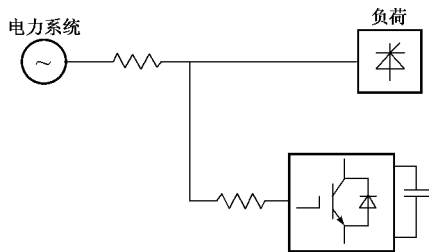


图 1 并联型 APF

Fig. 1 Parallel-type APF

图 2 所示为串联型 APF,通过 3 个单相变压器串联在电源与负载间,可等效为一受控电压源。其主要用于消除带电容二极管整流电路等电压型谐波源负载对系统的影响,以及系统侧电压谐波与电压波动对敏感负载的影响^[8,9]。与并联型 APF 相比,由于串联型 APF 中流过的是正常负载电流,因此损耗较大;此外,串联型 APF 的投切、故障后的退出及各种保护也较并联型 APF 复杂^[8]。目前单独使用的串联型 APF 的研究较少,国内外的研究多集中在其与 LC 无源滤波器所构成的串联混合型 APF 上^[10,11]。

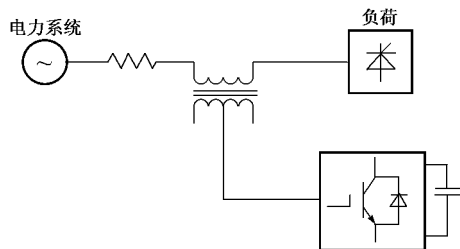


图 2 串联型 APF

Fig. 2 Series-type APF

图 3 所示为串-并联型 APF,这是一种新型 APF,其名称尚未统一,文献^[12,13]称之为统一电能质量调节器(UPQC),目前还处在试验阶段。这种 APF 兼有串、并联 APF 的功能,可解决配电系统发生的绝大多数电能质量问题,具有较高的性价比,是今后值得推广的一种装置。

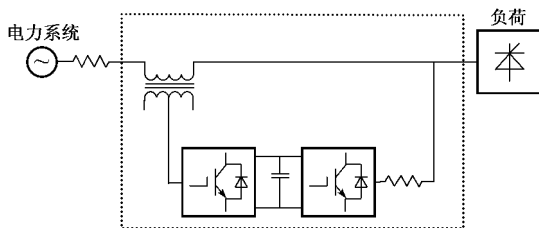


图 3 串-并联型 APF

Fig. 3 Series-parallel type APF

由于 APF 造价高,运行损耗大,容量受到限制,将无源滤波器与有源滤波器组合起来,构成混合型有源滤波器在目前无疑是一种较好的方案^[8]。但从长远角度看,随着电力电子元件成本不断下降,它将被性价比更高的串-并联有源滤波器所代替。

b. 按 APF 中逆变器直流侧储能元件的不同,APF 又可分为电压型 APF(储能元件为电容)和电流型 APF(储能元件为电感)。与电流型 APF 相比,电压型 APF 损耗较小、效率高,因此目前国内外绝大多数 APF 都采用电压型逆变器结构。随着超导储能技术的不断发展,今后可能会有更多电流型 APF 投入使用。

c. 此外还有一种如图 4 所示的有源滤波装置——有源线路调节器(active power line conditioner,缩写为 APLC),其结构与 APF 相似,因此过去很多文献上都把 APLC 等同于 APF。其实,从原理上看,与 APF 的单节点谐波抑制相比较,APLC 是向网络中某个(几个)优选节点注入消谐补偿电流,通过补偿电流在网络中一定范围内流动,实现该范围内所有节点谐波电压的综合抑制。由于 APLC 代表的是谐波治理的一种更高层次,不应将两者等同。

目前,国外 APLC 的应用还处在研究和试验阶段,实时确定补偿电流、优选补偿节点、在线测量谐波等技术难点限制了 APLC 的应用^[14~16]。

3 APF 的控制策略

APF 的控制主要由谐波信号的检测和补偿分量的产生两大部分组成。由图 5 可见,APF 通过检测电路检测出电网中电流电压的畸变部分,然后采用某种控制方式控制功率电路产生相应的补偿电流分量,并注入到电网中,以达到消谐的目的。

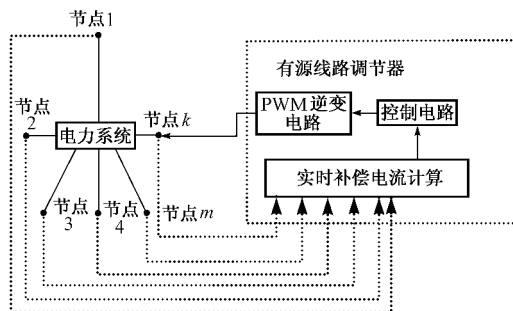


图4 APLC原理图

Fig. 4 The principle diagram of APLC

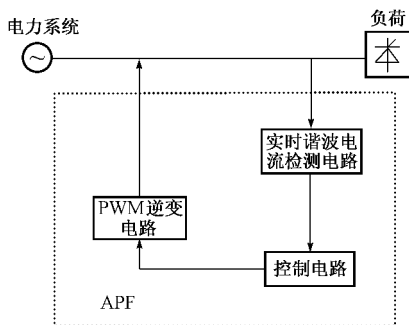


图5 APF原理图

Fig. 5 The principle diagram of APF

3.1 谐波信号的检测

谐波信号的检测主要有以下几种方法。

3.1.1 提取基波分量法

该法是最早被采用的谐波电流检测方法，其原理是在检测到的信号中提取出基波分量，它与原信号之差就是所需补偿的谐波，通常可采用带通滤波器实现。但所采用的高阶滤波器会产生附加相移，造成输出信号畸变，影响补偿效果。此外，这种方法还存在设计困难、误差大、对电网频率波动和电路元件参数较敏感等缺点，因而目前已较少采用。近年来，有文献介绍利用小波变换技术提取基波分量^[17]，其具体效果如何还需深入研究和探讨。

3.1.2 瞬时空间矢量法

基于瞬时无功功率理论的瞬时空间矢量法是目前APF中应用最广的一种检测方法，最早是由日本学者H. Akagi于1984年提出的，经过不断改进，现包括 $p-q$ 法^[6]、 i_p-i_q 法^[18]以及 $d-q$ 法^[19]。其中， $p-q$ 法适用于电网电压对称且无畸变情况下谐波电流的检测； i_p-i_q 法不仅在电网电压畸变时适用，在电网电压不对称时也同样有效；而基于同步旋转坐标变换的 $d-q$ 法可在电网电压不对称、畸变情况下精确地检测出谐波电流^[19,20]，其优点是当电网电压对称且无畸变时，各电流分量（基波正序无功分量、不对称分量及高次谐波分量）的检测电路比较简单^[19]。

3.1.3 基于FFT的数字化分析法^[21]

该方法是在建立在Fourier分析的基础上，因此要求被补偿的波形是周期变化的，否则会带来较大误差。通过FFT将检测到的一个周期的谐波信号进行分解，得各次谐波的幅值和相位系数，将拟抵销的谐波分量通过带通滤波器或傅里叶变换器得出所需的误差信号，再将该误差信号进行FFT反变换，即可得补偿信号。其优点是可以选择拟消除的谐波次数，缺点是具有较长的时间延迟，实时性较差。

3.1.4 自适应检测法^[22]

该方法基于自适应干扰抵消原理，将电压作为参考输入，负载电流作为原始输入，从负载电流中消去与电压波形相同的有功分量，得到需要补偿的谐波与无功分量。该自适应检测系统的特点是在电压波形畸变情况下也具有较好的自适应能力，缺点是动态响应速度较慢。在此基础上，文献^[23]提出一种基于神经元的自适应谐波电流检测法。

从以上检测方法看，基于瞬时无功功率理论的瞬时空问矢量法简单易行，性能良好，并已趋于完善和成熟，今后仍将占主导地位。基于神经元的自适应谐波电流检测法和小波变换检测法等新型谐波检测方法能否应用于工程实际，还有待进一步验证。

3.2 补偿电流的产生

补偿电流的产生通常采用基于PWM的电压源逆变器(VSI)，从采用的电流控制方法看，主要分为以下3种。

3.2.1 三角载波线性控制

三角载波线性控制(triangle wave-linear control)是最简单的一种控制方法。通过将检测环节得到电流实际值与参考值之间的偏差与高频三角载波相比较，所得到的矩形脉冲作为逆变器各开关元件的控制信号，从而在逆变器输出端获得所需的波形。该方法的优点是动态响应好，开关频率固定，实现电路简单，缺点是输出波形中含有与三角载波相同频率的高频畸变分量，开关损耗较大，在大功率应用中受到限制。

3.2.2 滞环比较控制

滞环比较控制(hysteresis control)^[24]是将补偿电流参考值与逆变器实际电流输出值之差输入到具有滞环特性的比较器，通过比较器的输出来控制开关的开合，从而达到逆变器输出值实时跟踪补偿电流参考值。与三角载波线性控制相比，滞环比较控制具有开关损耗小、动态响应快等特点。缺点是系统的开关频率、响应速度及电流的跟踪精度会受滞环带宽影响。带宽固定时，开关频率会随补偿电流变化而变化，从而引起较大的脉动电流和开关噪声^[25]。

3.2.3 无差拍控制

无差拍控制(deadbeat control)^[26]是一种在电

流滞环比较控制技术基础上发展起来的全数字化控制技术。该方法利用前一时刻的补偿电流参考值和实际值,计算出下一时刻的电流参考值及各种开关状态下逆变器电流输出值,选择某种开关模式作为下一时刻的开关状态,从而达到电流误差等于零的目标。该方法的优点是能够快速响应电流的突然变化。缺点是计算量大,而且对系统参数依赖性较大。近年来不断有新的改进方法出现^[27,28]。

3种方法中,基于模拟控制技术的三角载波线性控制法和滞环比较控制法是目前 APF 中普遍采用的方法,可通过多重化技术、自适应滞环带等改进措施来克服其固有的缺陷,提高其使用效率。相对而言,基于全数字化控制技术的无差拍控制法在 APF 中的应用还较少,但随着微机控制技术的不断发展以及数字信号处理器(DSP)运算速度的不断提高,其将在 APF 中得到进一步的应用。

以上的 APF 控制方法都是基于跟踪非线性负荷谐波进行控制的思想,其测量系统和控制系统都较复杂。近年来,我国学者提出了基于优化特定消谐 PWM 技术的广义有源滤波器^[29,30],通过改变逆变器输出波形的频谱分布,使其接近于正弦波,从而达到消谐的目的。从原理上看,广义有源滤波器是一种新型非跟踪型有源滤波器,其控制系统比较简单,是一种构思较新颖的有源滤波器。

4 APF 的应用及其发展趋势

有源滤波器作为改善供电质量的一项关键技术,在日本、美国、德国等工业发达国家已得到了高度重视和日益广泛的应用。目前,世界上 APF 的主要生产厂家有日本三菱电机公司、美国西屋电气公司、德国西门子公司等。据文献^[8]介绍,自 1981 年以来,仅在日本,已有 500 多台 APF 投入运行,容量范围由 50 kVA 到 60 MVA。从近年来的研究和应用中可以看出 APF 具有如下的发展趋势:

a. 通过采用 PWM 调制和可提高开关器件等效开关频率的多重化技术,实现对高次谐波的有效补偿。当 APF 的容量小于 2 MVA 时,通常采用 IGBT 及 PWM 技术进行谐波补偿。当容量大于 5 MVA 时,通常采用 GTO 及多重化技术进行谐波补偿。

b. 当前大功率滤波装置从经济上考虑,可以采用 APF 与 LC 无源滤波器并联使用的混合型有源滤波系统,以减小 APF 的容量,达到降低成本、提高效率的目的。其中 LC 滤波器用来消除高次谐波,APF 用来补偿低次谐波分量。

c. 从长远角度看,随着大量换流器用于变频调速系统,其价格必然下降;同时,随着半导体器件制造水平的迅速发展,尤其是 IGBT 的广泛应用,混合

型有源滤波系统低成本的优势将逐渐消失,而串-并联 APF 由于其功能强大、性价比高,将是一种很有发展前途的有源滤波装置。

d. 可通过单节点单装置的装设,达到多节点谐波电压综合治理的 APLC 的出现,表明电力系统谐波治理正朝着动态、智能、经济效益好的方向发展。

与国外广泛应用 APF 相比,我国的有源滤波技术还处在研究试验阶段,工业应用上只有少数几台样机投入运行^[29,31],这与我国目前谐波污染日益严重的状况很不适应。随着我国电能质量治理工作的深入开展,利用 APF 进行谐波治理将会具有巨大的市场应用潜力,有源滤波技术必将得到广泛的应用。

参考文献

- 1 吴克昌(Wu J C). 供电系统谐波(Power Supply System Harmonics). 北京:中国电力出版社(Beijing: Chinese Electric Power Publishing Company),1998
- 2 Hingorani N G. Introducing Custom Power. IEEE Spectrum, 1995, 32(6):41~48
- 3 Arrillaga J, Bradley D A, Bodger P S. Power System Harmonics. New York: John Wiley and Sons Ltd, 1985
- 4 Sasaki H, Machida T. A New Method to Eliminate AC Harmonic Current by Magnetic Flux Compensation-Consideration on Basic Design. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1971, 90(5):2009~2016
- 5 Gyugyi L, Strycula E C. Active AC Power Filters. Proceedings of IEEE-IAS, 1976:529~535
- 6 Akagi H, Nabae A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components. IEEE Trans on Industry Applications, 1984, 20(3):625~630
- 7 钱照明,叶忠明,董伯藩(Qian Z M, Ye Z M, Dong B F). 谐波抑制技术(Harmonics Suppression Techniques). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(10):48~54
- 8 Akagi H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 32(6):1312~1322
- 9 Peng F Z, Lai J. Application Considerations and Compensation Characteristics of Shunt Active and Series Active Filter in Power System. In: Proceedings of ICHQP VII. Las Vegas: 1996. 12~20
- 10 Peng F Z, Akagi H, Nabae A. A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems—A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters. IEEE Trans on Industry Applications, 1990, 26(6):983~990
- 11 刘进军,王兆安(Liu J J, Wang Z A). 串联混合型单相电力有源滤波器稳态特性的研究(Steady State Characteristics of a Hybrid Type Series Active Power Filter Used in Single-Phase Circuit). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1997, 17(4):248~253
- 12 Aredes M, Heumann K, Watanabe E H. An Universal Active Power Line Conditioner. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(2):545~551
- 13 Fujita H, Akagi H. The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series- and Shunt-

- Filters. IEEE Trans on Power Electronics, 1998, 13(2):315~322
- 14 Chang W K, Grady W M, Samotyj M J. Controlling Harmonic Voltage and Voltage Distortion in a Power System with Multiple Active Power Line Conditioners. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(3):1670~1676
 - 15 Chang W K, Grady W M. Minimizing Harmonic Voltage Distortion with Multiple Current-Constrained Active Power Line Conditioners. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(2):837~843
 - 16 Yi H Y, Kwun C Y. Determination of Locations and Sizes for Active Power Line Conditioners to Reduce Harmonics in Power Systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3):1610~1617
 - 17 杨 晔,任 震,唐卓尧(Yang Y, Ren Z, Tang Z Y). 基于小波变换检测谐波的新方法(A New Method for Harmonics Detection Based on Wavelet Transformation). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(10):39~42
 - 18 杨 君,王兆安,邱关源(Yang J, Wang Z A, Qiu G Y). 不对称三相电路谐波及基波电流实时检测方法的研究(A Study on Real-Time Detecting Method for Harmonic and Fundamental Negative Sequence Currents in Unbalanced Three-Phase Circuits). 西安交通大学学报(Journal of Xi'an Jiaotong University), 1996, 30(3):94~100
 - 19 李庚银,陈志业,丁巧林,等(Li G Y, Chen Z Y, Ding Q L, et al). $dq0$ 坐标系下广义瞬时无功功率定义及其补偿(Definition of Generalized Instantaneous Reactive Power in $dq0$ Coordinates and Its Compensation). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1996, 16(3):176~179
 - 20 叶忠明,董伯藩,钱照明(Ye Z M, Dong B F, Qian Z M). 谐波电流的提取方法比较(Comparison of Two Approaches for Harmonic Current Extraction). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(12):21~24
 - 21 侯振程,陆治国,邹 言,等(Hou Z C, Lu Z G, Zhou Y, et al). 一种新的谐波和无功电流实时检测方法(A New Online and Real-Time Method for Determining Harmonic and Reactive Current). 重庆大学学报(Journal of Chongqing University), 1991, 14(6):28~31
 - 22 罗世国,侯振程(Luo S G, Hou Z C). 一种谐波及无功电流的自适应检测方法(An Adaptive Detecting Method for Harmonic and Reactive Currents). 电工技术学报(Transactions of China Electrotechnical Society), 1993, 8(3):42~46
 - 23 王 群,吴 宁,谢品芳(Wang Q, Wu N, Xie P F). 一种基于神经元的自适应谐波电流检测法(A Neuron-Based Adaptive Approach to Detection of the Harmonic Currents). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(10):13~16
 - 24 Malesani L, Tenti P. A Novel Hysteresis Control Method for Current Controlled VSI PWM Inverters with Constant Modulation Frequency. IEEE Trans on Industry Applications, 1990, 26(1):82~92
 - 25 Malesani L, Mattavelli P, Tomasin P. High-Performance Hysteresis Modulation Technique for Active Filters. Proceedings of IEEE APEC'96, 1996: 939~946
 - 26 Kawamura A, Haneyoshi T, Hoft R. Deadbeat Controlled PWM Inverter with Parameter Estimation Using only Voltage Sensor. Proceedings of the IEEE-PESC, 1986:576~583
 - 27 Holmes D G, Martin D A. Implementation of Direct Digital Predictive Current Controller for Single and Three Phase Voltage Source Inverters. In: Conference Record IEEE-IAS Annual Meeting. 1996. 906~913
 - 28 Buso S, Malesani L, Mattavelli P, et al. Design and Fully Digital Control of Parallel Active Filters for Thyristor Rectifiers. In: Conference Record IEEE-IAS Annual Meeting. 1997. 1360~1367
 - 29 纪延超,戴克健,唐忠贵,等(Ji Y C, Dai K J, Tang Z G, et al). 100 kvar 广义电力有源滤波器(GAF)的仿真与试验(Simulation and Experiment of Generalized Active Power Filter). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1997, 17(5):315~321
 - 30 黄 瀚,纪延超,张 辉,等(Huang H, Ji Y C, Zhang H, et al). 优化特定消谐 PWM 技术(The Optimal Technique for Selected Harmonics Elimination). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1997, 17(5):345~347
 - 31 沈龙大,朱兆年,许 霞(Sheng L D, Zhu Z N, Xu X). 电网高次谐波有源抑制装置的工业应用(Industrial Application of Active Elimination Unit for Power Harmonics). 电气传动(Electric Drive), 1993, 23(5):39~47

胡 铭,男,博士研究生,主要从事电力电子技术在配电系统的应用、电能质量分析等领域的研究。

陈 珩,男,教授,博士生导师,主要从事电力电子技术 in 电力系统应用、电力系统数字仿真、电力系统电压稳定等领域的研究。

ACTIVE POWER FILTER TECHNOLOGY AND ITS APPLICATION

Hu Ming, Chen Heng (Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: With the wide application of high power electronic switches in power system, the problem of quality of power supply becomes more serious. This paper makes a comparison between the passive filters and active power filters, introduces the classifications, operation principles and new trends of the active power filters, and the prospects of the application of active power filters in China.

Keywords: active power filter; passive filter; power quality; harmonics