

文章编号:1671-251X(2009)01-0036-04

# 电力电子装置谐波污染及其抑制对策的研究<sup>\*</sup>

郑 征, 张东霞

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003)

**摘要:**文章分析了作为电网主要污染源的电力电子装置中谐波产生的原因及其危害,介绍了几种常规抑制谐波和提高功率因数的方法和技术以及各自的特点。最后指出,PWM 整流及其控制技术能实现网侧电流和功率因数可控及“绿色电能变换”,是电力电子装置谐波抑制的研究方向,具有广阔的应用前景。

**关键词:**电力电子装置;谐波抑制;功率因数;PWM 整流

**中图分类号:**TD679;TM714

**文献标识码:**A

收稿日期:2008-08-27

<sup>\*</sup>基金项目:河南省教育厅自然科学基金项目(200810460011)

**作者简介:**郑 征(1965-),女,河南新野人,教授,现主要从事电力电子与电力传动、控制理论与控制工程方面的教学与研究工作。

E-mail:124180834@qq.com

## 0 引言

随着电力电子技术和计算机技术的快速发展,电力电子装置越来越广泛地应用于冶金、化工、煤炭和运输等诸多领域。但由于电力电子装置是一种非线性时变拓扑负荷,它们在交流侧会造成电流波形

太环网为基础的矿井信息高速公路,应根据矿井投资和新建或改造矿井的具体情况,确定建设 PHS/WIFI 还是 CDMA/WIFI 组合模式的系统,采用 PHS/WIFI 或 CDMA/WIFI 双模手机,在设备集中布置区域和重要场所装设 WIFI 基站;新建矿井可采用单一系统组网方式。井下无线覆盖根据巷道的具体情况可采用定向天线和泄漏电缆混合组网方式,截面大、平直的巷道采用定向天线,截面小、弯道、地形复杂的巷道采用泄漏电缆覆盖。

### 3.2 煤矿无线通信系统的发展方向

下一代煤矿无线通信系统中,语音通信只是煤矿信息处理的一小部分,井下视频监控、自动控制、各种无线传感器、地质构造监测、巷道数据采集、即时信息发布、井下视频会议、辅助运输管理等都会搭载到无线通信系统平台上。下一代无线通信 WIFI 标准与 802.11n 标准的融合,将使无线传输速率达到 128 Mbps 以上,802.11n 采用了 OFDM(正交频分复用调制技术)与 MIMO(多入多出)技术,形成 MIMO-OFDM 系统;智能天线和软件无线电等技术的应用,能够很好地提升 WIFI 性能;天线及传输技术的改进将使无线局域网的传输距离大大增加,可达到几公里;煤矿现有 CDMA2000-1X 无线通信系统也可能升级到 3G,煤炭企业的良好经济效益将会加快前沿信息技术的引进速度。

## 4 结语

本文通过对我国煤矿正在使用的几种无线通信系统的分析比较得出:载波通信系统和泄漏通信系统是较早使用的无线通信系统,因其通信性能差而无法适应煤矿综合信息化的要求;PHS 无线通信系统目前在煤矿中普及率较高,技术较成熟;CDMA 和 WIFI 煤矿无线通信系统起步较晚,普及率不高,但发展迅速,且因其良好的性能成为煤矿无线通信系统的主要发展方向。笔者认为,煤矿无线通信系统的设计应根据矿井的实际情况,兼顾信号覆盖和数据带宽的要求,选择合适的无线通信系统进行优化组合,从而构建高性能、易扩展、成本合理的煤矿无线通信系统,提高我国煤矿的信息化水平。

### 参考文献:

- [1] BERLON Y H L. 现代无线通信系统电波传播[M]. 顾金星,译. 北京:电子工业出版社,2001.
- [2] TRAPPAPOR T S. 无线通信原理与应用[M]. 周文安,译. 北京:电子工业出版社,2006.
- [3] 徐福新. 小灵通(PAS)个人通信接入系统[M]. 北京:电子工业出版社,2001.
- [4] 孙继平. 截面尺寸对矩形巷道中电磁波传播的影响[J]. 北京:中国矿业大学学报,2005(5):96~99.

畸变,并给电网注入大量的谐波及无功,使电网的电能质量下降,引起严重的“电网污染”,同时导致深控时功率因数低、直流电压波动等现象。这些问题制约了电力电子装置的发展及应用。笔者从减少甚至消除电力电子装置谐波污染的角度出发,分析了电力电子装置谐波产生的原因及其危害,并分析比较了目前电力电子装置谐波抑制和提高功率因数的方法和技术,旨在实现电力电子变换装置的“绿色电能变换”,达到节能、环保的目的。

## 1 电力电子装置中的谐波产生及其危害

电网中的谐波主要是由各种功率变换器以及其它非线性负载产生的,其中主要的谐波源是各种电力电子装置,如整流装置、交流调压装置、不停电电源等。除整流装置外,开关电源和逆变装置等的应用也日趋普遍,而它们的输入直流电源也来自整流装置。传统的整流装置几乎均采用带电容滤波的二极管不控整流或晶闸管相控整流方式,这种整流装置产生的谐波所占的比例为 89%,因此,电力电子装置对电网造成的谐波污染日益突出。

电网中日益严重的谐波污染对用电设备的主要危害:谐波电流使输电电缆损耗增大,输电能力降低;使电动机损耗增大,发热增加,过载能力、寿命和效率降低,甚至造成设备损坏;容易使电网与用作补偿电网无功功率的并联电容器发生谐振,造成过电压或过电流,使电容器绝缘老化甚至烧坏;使某些电气测量仪表受谐波影响而造成误差,导致继电保护和自动装置误动作,对邻近的通信系统产生干扰;非整数和超低频谐波会使一些视听设备受到影响,使计算机自动控制设备受到干扰而造成程序运行不正常等。

## 2 谐波的抑制

解决电力电子装置谐波污染问题的基本思路有 2 条:一是装设谐波补偿装置补偿谐波;二是对电力电子装置本身进行改造,使其不但不产生谐波,而且能实现功率因数任意控制,甚至为 1。

### 2.1 LC 调谐波滤波器

装设补偿装置的传统方法是采用无源 LC 调谐波滤波器。该方法既可补偿谐波,又可补偿无功功率,而且结构简单,无需进行控制。图 1 为整流电路典型的无源 LC 滤波电路图。但该方法的不足是增加的无源元件一般体积都很大,成本也较高,并且功率因数通常仅能校正至 0.95 左右,而谐波含量仅能

降低至 30% 左右,难以实现谐波的标准限制。同时其补偿特性受电网阻抗和运行状态影响,易和系统发生并联谐振,导致谐波放大,使 LC 滤波器过载甚至烧毁。此外,该方法只能补偿固定频率的谐波,补偿效果也不理想。

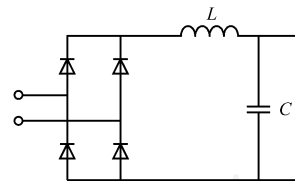
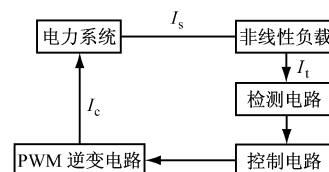


图 1 典型的无源 LC 滤波电路图

### 2.2 有源电力滤波器 APF

谐波抑制的另一重要趋势是采用有源电力滤波器 (Active Power Filter)。有源电力滤波器串联或并联于主电路中,基本原理是实时地从补偿对象中检测出谐波电流,由补偿装置产生 1 个与该谐波电流大小相等而极性相反的补偿电流,使负载总谐波电流为零,达到实时补偿谐波电流的目的,从而使电网只含基波分量。图 2 为并联有源滤波器的原理框图。图 2 中,非线性负载为谐波源,检测电路检测到电路中的谐波电流后,控制电路发出电流指令信号给 PWM 逆变电路, PWM 逆变电路将产生相应的补偿电流分量  $I_c$ ,并注入电网,补偿电流与实际的谐波电流大小相等但极性相反,从而可以消除谐波。采用有源电力滤波装置后,电力电子装置总谐波含量可以降低至 5% 以下,而功率因数能高达 0.995,可彻底解决整流电路的谐波污染和功率因数低的问题。然而有源电力滤波技术也存在一些缺点,如电路控制复杂、开关器件损耗较大。



$I_s$  - 系统电流;  $I_t$  - 检测电流;  $I_c$  - 补偿电流分量

图 2 并联有源滤波器的原理框图

### 2.3 功率因数校正电路

为了实现低谐波和高功率因数,在开关电源电路中,发展了在二极管整流电路后加上 1 个全控型器件的方式。该电路采用 PWM (脉宽调制) 控制,使输入电流波形、相位跟随输入电压波形的变化而变化,输入电流可实现正弦化并保持与输入电压同相位,大大降低了各次输入电流谐波的含量。

图 3 为单相功率因数校正 PFC (Power Factor Correction) 电路简图,实际上是由二极管整流电路

加升压斩波电路构成。由于采用升压型电路,因此,只要输入电压不高于输出电压,电感  $L$  的电流就完全受开关  $S$  的通断控制。 $S$  导通时,电感  $L$  的电流增大; $S$  断开时,电感  $L$  的电流减小。因此,只需控制  $S$  的占空比按正弦绝对值规律变化,且与输入电压同相,就可以控制电感  $L$  的电流波形为正弦绝对值,从而使输入电流波形为正弦波,且与输入电压同相,输入功率因数为 1。

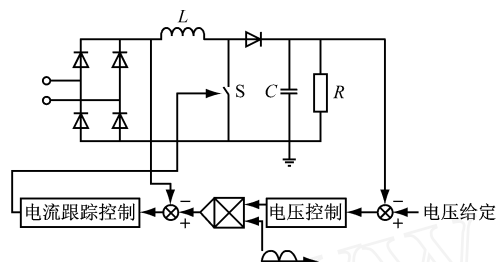


图 3 单相功率因数校正 PFC 电路简图

单相功率因数校正电路容易实现,可靠性也较高,应用非常广泛,基本上已经成为功率在 0.5 ~ 3 kW 范围内的单相输入开关电源的标准电路形式。然而三相有源功率因数校正电路结构和控制较为复杂,成本也很高,三相功率因数校正技术的研究还在积极进行中。

除了采用谐波补偿装置对电力电子装置产生的谐波进行补偿以外,还可以对其进行改造,开发新型的电力电子装置,使其本身不产生谐波,且功率因数可达到 1。由于不需另外增加谐波补偿装置,相对上述谐波抑制措施,该方法称为主动抑制谐波方法。

#### 2.4 多重化技术

大容量变流器提高功率因数和减少谐波的主要方法是采用多重化技术,即将多个方波叠加以消除次数较低的谐波,从而得到接近正弦的阶梯波。多重化技术将整流电路进行移相多重连结,多重连结分为并联多重连结和串联多重连结。重数越多,波形越接近正弦波,但电路结构越复杂。

对于交流电流来说,采用并联多重连结和串联多重连结的效果是相同的,都可以减少交流输入电流的谐波。现以三相桥的移相 30° 串联 2 重连结电路为例说明减少谐波的原理。图 4 给出了将 2 个三相全控桥式整流电路串联连结而成的 12 脉波整流电路原理图。整流变压器二次绕组分别采用星型和三角型接法构成相位相差 30°、大小相等的 2 组电压,接到相互串联的 2 组整流桥上,绕组匝数比为 1 : 1 :  $\sqrt{3}$ 。由图 4 可知,其基波幅值  $I_{m1}$ 、 $n$  次谐波

幅值  $I_{m1}$  和功率因数 分别为

$$I_{m1} = \frac{4\sqrt{3}}{n} I_d \quad (1)$$

$$I_{mn} = \frac{1}{n} \frac{4\sqrt{3}}{n} I_d, n = 12k \pm 1, k = 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

$$= 0.988 \cos \quad (3)$$

而三相全控桥整流电路的电流谐波  $I_n$  和功率因数 分别为

$$I_n = \frac{\sqrt{6}}{n} I_d, n = 6k \pm 1, k = 1, 2, \dots \quad (4)$$

$$= 0.955 \cos \quad (5)$$

对比式(2)、式(4)可看出,三相全控桥采用移相 30° 串联 2 重连结后,交流输入电流的 5 次、7 次、17 次、19 次等谐波被消除;对比式(3)、式(5)可看出,采用多重化技术,功率因数也相对提高。

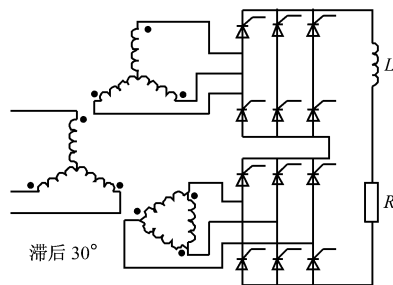


图 4 移相 30° 串联 2 重连结电路图

#### 2.5 PWM 整流技术

近年来开始的 PWM 整流器的研究以实现低谐波、单位功率因数  $\cos \phi = 1$  (为功率因数角)、能量双向流动及恒定直流电压控制等为目的,实现了“绿色电能变换”。由于 PWM 整流器具有上述优点,现已开始应用于单位功率因数整流、有源滤波及无功补偿、交流传动等工业领域中,成为目前国内外电力电子技术领域研究的热点。

PWM 整流器与传统的相控及二极管整流器的关键性不同点在于用全控型功率开关管取代了半控型功率开关管或二极管。图 5 为采用 IGBT (绝缘栅双极型功率管) 作为开关器件的电压型单相桥式 PWM 整流电路图。通过对 IGBT ( $V_1 \sim V_4$ ) 的 PWM 控制,可以控制变流器输入端电压  $u_{AB}$ ,从而

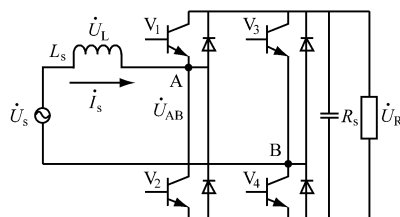


图 5 电压型单相桥式 PWM 整流电路图

控制变流器交流侧电流  $i_s$ , 使其正弦化, 同时可以控制输入电流和输入电压同相位, 实现大功率整流的目的。

图 6 为 PWM 整流状态运行方式相量图,  $\dot{U}_s$ 、 $\dot{U}_L$ 、 $\dot{U}_R$ 、 $\dot{I}_s$  分别为交流电源电压  $u_s$ 、电感  $L_s$  上的电压  $u_L$ 、电阻  $R_s$  上的电压  $u_R$  以及交流电流  $i_s$  的相量,  $\dot{U}_{AB}$  为  $u_{AB}$  的相量。通过控制端电压  $u_{AB}$  的幅值与相位, 可以使  $\dot{I}_s$  比  $\dot{U}_s$  超前或滞后任一角度  $\delta$ 。当  $\dot{I}_s$  与  $\dot{U}_s$  同相位时,  $\delta = 0^\circ$ , 电路工作在整流状态, 这时电路实现了交流侧向直流侧输送能量, 且功率因数  $\cos \delta = 1$ ; 当  $\dot{I}_s$  与  $\dot{U}_s$  反相位时,  $\delta = 180^\circ$ , 电路工作在逆变状态, 这时电路实现了直流侧向交流侧输送能量, 且功率因数  $\cos \delta = -1$ 。因此, 通过控制端电压就可以控制电流的方向和功率的流向。由此电路可以实现能量的双向传递, 也可以很方便地实现四象限运行。

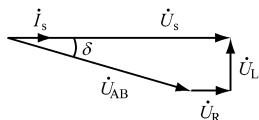


图 6 PWM 整流状态运行方式相量图

为了达到上述的单位功率因数整流, 即要求输入电流为正弦波且和电压同相位, 必须采用相应的控制方法对电路进行控制, 这些控制方法分为直接电流控制和间接电流控制 2 种。直接电流控制较之间接电流控制在动、静态性能上得到了提高, 且系统鲁棒性好, 因而获得了较多的应用。直接电流控制又分为峰值电流控制、滞环电流控制、平均电流控制、预测电流控制、单周电流控制、无差拍电流控制、模糊控制等。这些控制方法可以很方便地控制整流电路的功率因数, 也使 PWM 整流技术有着非常广阔的应用前景和使用价值。

图 7、图 8 分别为二极管不控整流电路和 IGBT PWM 整流电路的输入电压、输入电流波形。

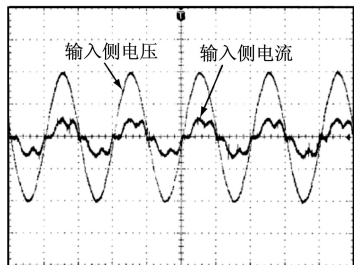


图 7 二极管不控整流电路输入电压、电流波形

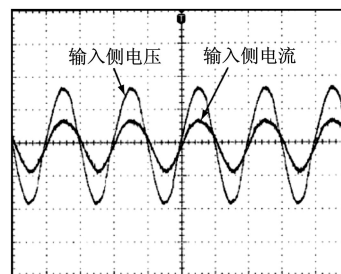


图 8 IGBT PWM 整流电路输入电压、电流波形

从图 7、图 8 可看出, 二极管不控整流电路和 IGBT PWM 整流电路虽然都能够使输入电流与输入电压同相位, 但是采用 PWM 控制技术可以使输入电流高度正弦化, 控制效果好。

### 3 结语

针对电力电子装置的谐波污染和功率因数问题, 本文介绍了 5 种电力电子装置的谐波抑制及功率因数控制策略。通过对各种方法的性能比较可看出, 有源滤波器和功率因数校正电路因其可有效降低谐波含量和提高功率因数, 成为目前谐波抑制的最主要手段, 而 PWM 整流器可以实现网侧电流可控以及单位功率运行, 甚至可以实现“绿色电能变换”, 因而得到越来越广泛的应用, 成为电力电子装置谐波抑制的发展方向。

### 参考文献:

- [1] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [2] 张崇巍, 张 兴. PWM 整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] 郑 征, 陶海军. 整流电路的谐波分析及其功率因数校正 [J]. 工矿自动化, 2005 (5): 9 ~ 11.
- [4] ZHENG Zheng, TAO Hairjun. Research of Three-phase PWM Rectifier Based on PI Control with Auto-tuning Scaling Factors [C] // Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006, Dalian: 3 844 ~ 3 847.
- [5] ZHENG Zheng, TAO Hairjun. Fast Space Vector Algorithm of Pulse Width Modulation Rectifier [C] // 2007 IEEE International Conference on Control and Automation, 2007, Guangzhou.
- [6] 杨 旭, 裴云庆, 王兆安. 开关电源技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [7] 王兆安. 电力电子技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [8] 郑 征, 田俊祥. PWM 整流电路直接电流控制技术 [J]. 自动化技术与应用, 2007 (2): 76 ~ 78.