

双随机调制技术在有源功率因数 预调节器中的应用研究

王 斌,周 丹,黄 凯

(三峡大学 电气信息学院,湖北 宜昌 443002)

摘要: 高频脉宽调制(PWM)整流技术能够减少单相 AC-DC 整流装置输入端的谐波电流、提高功率因数,但引起了集中在开关频率及其倍频谐波频谱的离散能量分布特性。随机调制技术能够改善电力电子系统电磁兼容性。针对有源功率因数预调节器高频 PWM 的开关特性,引入双随机调制技术,完成了该系统的性能仿真研究及其 Welch 谱估计分析。结果表明,双随机调制技术在保证功率因数预调节器具有较高功率因数的情况下,还减小了该高频整流器对供电系统的干扰,改善了其电磁兼容特性。

关键词: 功率因数调节器; 双随机调制; 电磁兼容性/电磁干扰

中图分类号: TN 761;TM 714.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)07-0090-03

0 引言

开关功率变换器因其运行效率高,方便满足不同电流电压水平的需要和灵活匹配多种设备的特点而得到广泛应用。使用二极管整流器的 AC-DC 变流装置,产生谐波并且输入的功率因数和谐波总畸变率都不能满足 IEC 1000-3 和 IEEE 519 国际标准限制的谐波量和谐波总畸变率。有效的解决方法就是在不控整流器和负载之间增加一个功率变换电路,通常是 Boost 变换器,即有源功率因数校正 APFC(Active Power Factor Correction)。它将整流器的输入电流校正成与电网电压同相位的正弦波,消除了传统整流电路中由于输入电流波形畸变所产生的高次谐波分量和无功电流,将电网功率因数提高到近似为 1^[1]。由于 APFC 使得电网端保持了高功率因数,从而减小了输入电流,降低了配电输入线损,消除了用电装置谐波分量对电网的污染,因此,凡是本身工作会产生非线性,引起电网电压、电流畸变的电力电子装置,如果增加功率因数校正部分对电网带来的效益明显。

随机调制技术因能很好地抑制电磁干扰(EMI),已越来越多地受到应用电力电子领域的关注。特别是双随机调制技术能够有效减少开关脉冲运行产生在功率电子系统中的传导电磁干扰,使之呈现为频域连续的功率谱特征^[2]。本文针对有源功率因数预调节器高频 PWM 的开关特性,分析比较了双随机变量引入到该系统后,对功率因数预调节器性能的影响和进一步改善整流器输入电流频谱特性的特点。对双随机调制方法,由于开关函数的复杂化,需对整个系统控制的稳定性进行进一步分析。本文实现了基于平均电流控制的系统仿真设计,同时,利用

Welch 谱估计方法给出了有源功率因数校正器输入电流的功率谱估计。结果表明,双随机调制技术用于功率因数预调节器控制,不仅保证了系统高功率因数的性能要求,而且明显改善了系统的电磁兼容性。

1 常规 PWM 调制的功率因数调节器特性

有源功率因数校正技术的原理,主要是控制整流后的电流,使之在对滤波电容充电之前,能与整流后的电压波形相同,从而避免电流脉冲的形成,达到改善功率因数的目的。基于 Boost 变换器的单相功率因数预调节器是一种最基本的单向高频 PWM 整流,其原理示意如图 1 所示。

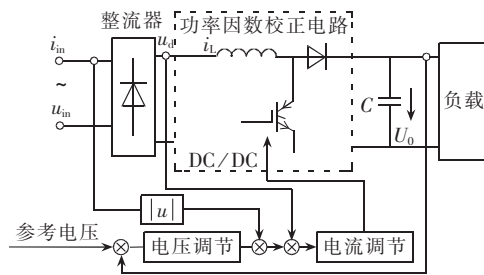


图 1 有源功率因数校正电路原理结构

Fig.1 The structure of APFC circuit

有源功率因数预调节器主电路由单相桥式不控整流器和高频 DC-DC Boost 变换器组成^[3]。由于 IGBT 的工作频率越来越高,完全可以取代功率 MOSFET,因此 APFC 的成本增加不大,而可靠性大大提高。同时由于 APFC 增加了一级功率调节环节,它既要使输入电流波形呈正弦波,又要能够稳定输出电压,要同时具有两个互为矛盾的特性,势必会造成动态响应恶化。但如果合理设计输出滤波电容 C,就可适当得到补偿。增大 C 的容量,使之同时满足电压纹波和交流突然断电时维持时间的要求。

图 2 给出了有源功率因数预调节器输入电压 u_{in} , u_d 和电流 i_{in} , i_L 波形。

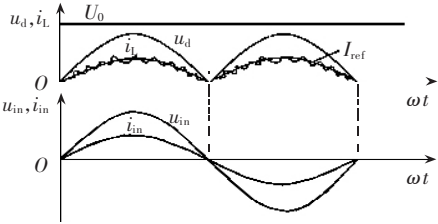


图 2 输入电流、电压波形

Fig.2 Waveforms of input current and input voltage

输入电流被高频 PWM 调制成接近正弦的波形,从而获得高的功率因数。工作在连续导电模式 (CCM) 的 Boost 变换器应用电流型跟踪控制实现了功率因数校正的功能。分析整流器输入电流的频谱,呈现出典型的离散谱特性^[2],如图 3 所示。

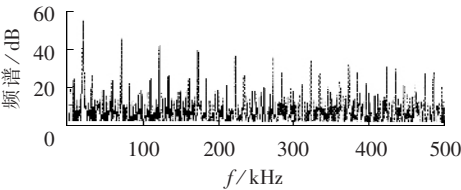


图 3 典型的输入电流离散谐波谱

Fig.3 A typical discrete harmonics spectrum of input current

显然,常规 PWM 技术取决于开关信号脉冲宽度变化,各次高频谐波幅值随脉冲宽度函数变化,总有一些能量集中在谐波频率上,从频域功率谱密度观点看,这些幅值可能不满足电磁兼容标准要求。

2 高功率因数调节器采用双随机调制原理

随机调制技术的基本原理是将按某种概率规律分布的随机变量加入到开关信号,利用随机的谐波能量驱散集中的开关高频谐波功率^[4]。

随机脉冲开关函数表示为

$$F_m(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^N f_k(t-t_k) \tag{1}$$

$$f_k(t-t_k) = \begin{cases} 1 & \varepsilon_k T_k \leq t-t_k \leq (\varepsilon_k + \alpha_k) T_k \\ 0 & t-t_k < \varepsilon_k T_k \text{ 或 } t-t_k > (\varepsilon_k + \alpha_k) T_k \end{cases} \tag{2}$$

组成开关函数的 3 个基本参数包括脉冲频率或周期 T_k , 脉冲上升沿位置延迟系数 ε_k 和脉冲宽度系数 α_k , 对于 Boost 直流变换器,随机性的变量是 T_k 和 ε_k 。其中 k 表示对应于这个脉冲序列的第 k 个周期。显然,脉冲上升沿位置延迟系数 ε_k 和脉冲宽度系数 α_k 应该满足条件^[5]:

$$\alpha_k + \varepsilon_k \leq 1 \tag{3}$$

分析随机开关函数的特点和系统控制的要求,双随机调制脉冲开关信号都是由一个随机化的三角波与参考信号比较的结果^[4],图 4 所示为通过数字信号处理器实现的双随机脉冲信号的频谱,与常规的 PWM 调制相比离散部分已经得到很好的抑制。

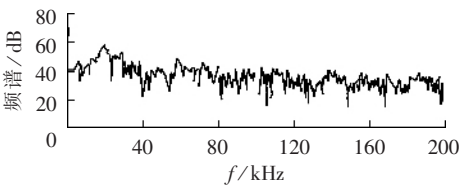


图 4 双随机调制信号的频谱

Fig.4 Dual randomized modulation signal spectrum

图 5 所示为具有电感电流和输出电压反馈双环控制的功率因数校正仿真模块。

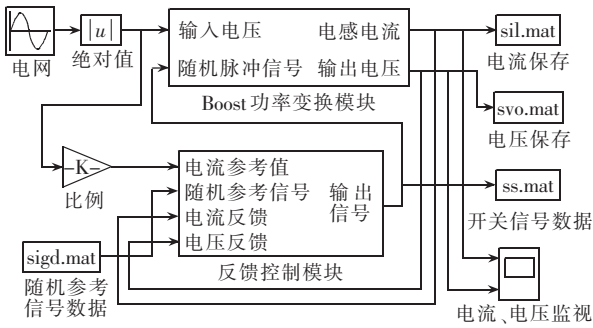


图 5 功率因数预调节器仿真模块

Fig.5 The simulation module of power factor preregulator

功率电路单元由状态方程式(4)确定。

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{u}_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{F_m(t)-1}{L} \\ -\frac{F_m(t)-1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ u_{in} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} U_0 \tag{4}$$

采用均匀概率密度分布规律产生的 2 个独立随机数被加到 PWM 调制信号中,这样具有 2 个随机参数(ε_k 和 T_k)的双随机脉宽调制信号就用于驱动功率开关。考虑双随机因子调制时,三角波信号可能出现斜率偏大、波形变化过陡,采用平均电流控制技术。

3 高功率因数调节器性能分析

根据前述的随机调制控制原理以及由 Matlab 的 Simulink 构成的仿真模块,功率因数预调节器输入电流如图 6 所示,(a)(b)分别给出了常规 PWM 调制以及双随机调制的仿真结果,并对局部进行了放大。

随机参数 ε_k 和 T_k 的随机程度均取为 0.5。显然双随机调制仍能保持功率因数预调节器具有较高的功率因数,而且系统稳定性也能满足要求,虽然输出电压的脉动有所增加,但仍在容许范围之内。然而,当使用 Welch 平均周期法分析电流信号的功率谱密度 PSD 时^[6],就会发现双随机调制与常规 PWM 具有完全不同的特性,其电磁兼容性却得到明显改善。常规 PWM 调制明显存在离散谐波,如图 7(a)所示,其功率谱密度是集中在开关频率及其倍数频率的地方;而应用双随机因子调制技术后,离散谐波的峰值被明显消除,如图 7(b)所示,使得频谱更加连续,离散的谐波能量转化为连续的噪音,主谐波的峰值也大大降低(图中 λ 为输入电流 Welch 谱估计; f/f_s 表示频率相对值, f_s 是平均开关频率)。

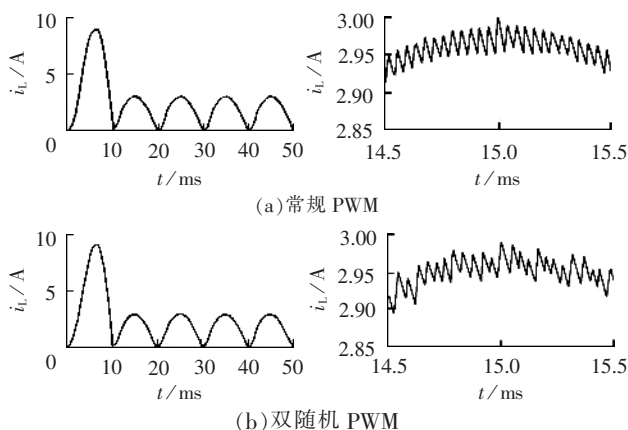


图6 功率因数预调节器输入电流波形

Fig.6 The input current of power factor preregulator

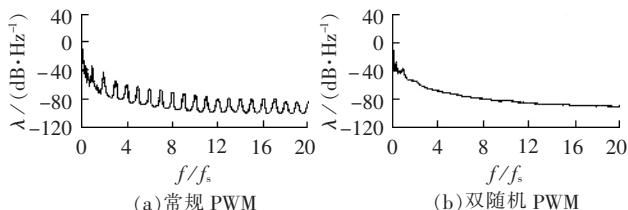


图7 功率因数预调节器输出电流功率密度谱

Fig.7 Welch spectrum estimation for output voltage of power factor preregulator

4 结语

本文结合双随机调制技术的特点,构建了基于Boost功率因数预调节器的Simulink仿真模型。平均电流反馈控制仍然能够满足双随机调制的要求,但由于双随机开关脉冲信号取自于三角波,其斜率的剧烈变化是控制中值得注意的问题。双随机调制的功率因数预调节器不仅具有很高的功率因数,而且具有更好的削减谐波峰值和遣散离散功率谱的效果,减少了开关电路运行对电力系统产生的谐波干扰,发挥了随机调制技术进一步抑制传导EMI的特性,使得系统整体的电磁兼容性明显改善。虽然双随机调制技术实现的难度比任何一种单随机调制要大,但

是并不增加调节器成本,具有很好的推广应用价值。

参考文献

- [1] KASSAKIAN J G, SCHLECHT M F, VERGHESE G C. Principles of power electronics [M]. Massachusetts: Addison-Wesley, 1991.
- [2] WANG Bin, KHAMLICHI D K E, FONTAINE J. Suppression EMI by using aperiodic control in power converters [A]. *Proc. PCIM'2003* [C]. Nürnberg, Germany: ZM Communications GMBH, 2003. 601-605.
- [3] HOLTZ J. Pulse width modulation for electronic power conversion [J]. *Proc. of the IEEE*, 1994, 82(8): 1194-1214.
- [4] 王斌. 抑制传导EMI策略——随机调制技术研究 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2003, 25(3): 226-228.
- WANG Bin. Suppression conducted EMI schemes—Investigation on the randomized PWM techniques [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2003, 25(3): 226-228.
- [5] 王斌, 李兴源, KHAMLICHI D K E. 双随机调制技术及其功率谱密度特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 97-101.
- WANG Bin, LI Xing-yuan, KHAMLICHI D K E. Analysis of power spectrum of a dual randomized modulation (DRM) [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(4): 97-101.
- [6] CADZOW J A. Foundations of digital signal processing and data analysis [M]. New York, USA: Wiley, 1987.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

王斌(1963-),男,山西沁水人,副教授,博士,主要研究方向为电力电子、电力传动、电能质量(E-mail: binwang@ctgu.edu.cn);

周丹(1978-),女,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术及其应用;

黄凯(1980-),男,湖北宜昌人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术及其应用。

Application of dual randomized PWM technique in active power factor preregulator

WANG Bin, ZHOU Dan, HUANG Kai

(China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: High-frequency PWM (Pulse Width Modulation) technique reduces the input harmonic current of single-phase AC-DC rectifier and enhances the power factor, but simultaneously raises the discrete energy distribution of harmonic spectrum at switching frequency and its multiple frequencies. Randomized modulation technique can improve the electromagnetic compatibility of power electronic system. The dual randomized modulation technique is introduced to a high power factor preregulator. The system performance is analysed and the power spectrum estimation of the input current is simulated. Results show that, the dual randomized modulation technique lowers the interference of high-frequency rectifier on power supply system and improves its electromagnetic compatibility, as well as ensures the high power factor of power factor preregulator.

Key words: power factor preregulator; dual randomized modulation; EMC/EMI