

# 基于单周期控制的通用三相 PFC 控制器的研究

张厚升<sup>1</sup> 胡振营<sup>2</sup> 刘雪婷<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院 淄博 255049

2. 深圳迈瑞生物医疗电子有限公司 深圳 518057)

**摘要** 分析了具有串联升压拓扑结构的三相 boost 整流器,提出了一种基于单周期控制技术的三相 PFC 控制器,它可以实现单位功率因数和低电流畸变。该控制器不需要乘法器,控制方法简单、可靠,而且在任意时刻只有两个开关管工作在高频状态,所以开关损耗降到了最低程度。最后给出了试验结果。

**关键词**: 单周期控制 功率因数校正(PFC) 整流器

**中图分类号**: TM13

## Study of a General Three-Phase PFC Controller Based on One Cycle Control

Zhang Housheng<sup>1</sup> Hu Zhenying<sup>2</sup> Liu Xueting<sup>1</sup>

(1. Shandong University of Technology Zibo 255049 China

2. Shenzhen Mindray Bio-Medical Electronics Co.Ltd Shenzhen 518057 China)

**Abstract** Three-phase boost rectifier with series-connected dual-boost topology is analyzed in this paper, and a general PFC controller based on one cycle control is proposed for three-phase boost rectifiers. Low current distortion and unity power factor can be achieved in the proposed controller. It does not require multipliers to scale the current reference according to the output power level. The proposed control approach is simple, reliable and general. Furthermore, switching losses are minimized since only two high frequency switches are controlled at any time. Experimental results are presented to verify the theoretical analysis.

**Keywords**: One cycle control, power factor correction(PFC), rectifier

## 1 引言

近几十年来,随着电力电子装置应用的日益广泛,电网系统中的谐波污染也日趋严重,电源质量日益成为人们关注的焦点,传统的二极管或晶闸管整流电路从电网中吸收谐波电流,使系统的功率因数降低,造成电网供电质量的下降和谐波损耗的增加,干扰了周围电气设备的正常运行。抑制电力电子装置产生谐波的方法主要有两种:一是被动方法,即采用无源滤波或有源滤波电路来旁路或滤除谐

波;另一种是主动式的方法,即设计新一代高性能整流器,它具有输入电流为正弦波、谐波含量低、功率因数高等特点,即具有功率因数校正功能<sup>[1]</sup>。近年来功率因数校正(PFC)电路得到了很大的发展,成为电力电子学研究的重要方向之一,目前单相功率因数校正技术在电路拓扑和控制策略方面已日趋成熟,而三相整流器的功率大,对电网的污染更为严重,因此三相功率因数校正技术成为近年来研究的热点。

单周期控制技术是 20 世纪 90 年代初由美国加州大学的 Keyue M Smedley 提出的,它是一种不需要乘法器的新颖控制方法,该技术同时具有调制和

控制的双重性, 该技术突出的特点是无论稳态、暂态, 都能保持受控量的平均值恰好等于或正比于控制参考信号, 这种控制方案具有动态响应快、开关频率恒定、鲁棒性强、易于实现等优点, 在文献[1]和文献[2]中都对单周期控制的原理作了详细的介绍。本文提出的基于单周期控制技术的三相 PFC 控制器能为具有串联升压拓扑结构的三相 boost 整流器实现单位功率因数校正和低电流畸变。

## 2 系统结构与工作原理

图 1 给出了三相三开关升压整流器的电路原理图, 一个周期内三相电压的波形如图 2 所示, 并用虚线将整个周期划分为 6 个区间。依据 6 阶段 PWM 控制技术的工作原理, 三相整流器可以通过在线性周期每 60° 区间内控制两个开关的通断来实现单位功率因数<sup>[3]</sup>。

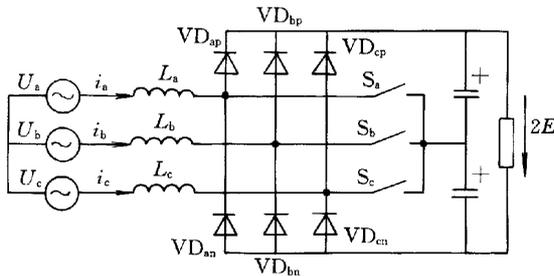


图 1 三相三开关三电平 boost 整流器  
Fig.1 3-phase 3-switch 3-level boost rectifier

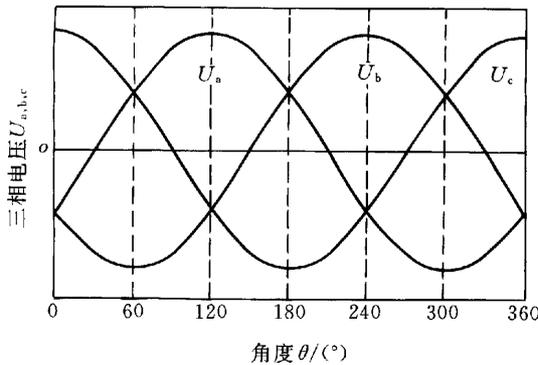


图 2 标准的三相电压波形  
Fig.2 3-phase voltage waveforms

在假定三相电源平衡、输入电压为正弦波、三相电路参数对称、元器件的正向阻抗以及其他寄生参数忽略不计的情况下, 在区间 $[0^\circ \sim 60^\circ]$ 内, 开关  $S_a$  一直处于导通状态, 通过控制开关  $S_b$ 、 $S_c$  使相电流  $i_b$ 、 $i_c$  分别跟踪各自相电压  $v_b$ 、 $v_c$ , 由于  $v_a + v_b + v_c = 0$ ,  $i_a + i_b + i_c = 0$ , 因此相电流  $i_a$  也将跟踪相电压  $v_a$ , 也即可以实现单位功率因数<sup>[4]</sup>。

对于图 1 所示的三相整流器可以将其解耦为如图 3 所示的串联升压拓扑结构, 图中  $T_p$ 、 $T_n$  为不同区间所对应的开关,  $V_p$ 、 $V_n$  为不同区间所对应的等效电压,  $L_p$ 、 $L_n$ 、 $L_t$  为不同区间所对应的电感。开关  $T_p$ 、 $T_n$  共有四种可变化的开关状态, 即:  $T_p$ 、 $T_n$  均开通。  $T_p$  开通,  $T_n$  断开。  $T_p$  断开,  $T_n$  导通。  $T_p$ 、 $T_n$  均断开。运用回路法和节点法我们可以对每种开关状态下电感  $L_p$ 、 $L_n$  和  $L_t$  上的电压值进行分析, 对于固定开关频率的三相 PFC 整流器来说, 如果在下降沿调制, 在每个开关周期内只有两种可能的开关次序, 即  $T_p$ 、 $T_n$  (满足条件  $d_p > d_n$ ,  $d_p$ 、 $d_n$  分别表示开关管  $T_p$ 、 $T_n$  的占空比) 或  $T_n$ 、 $T_p$  (满足条件  $d_p < d_n$ )。这里我们先考虑第一种情况, 假定开关频率远高于电网频率, 那么图 3 所示的拓扑电路可以被视为一个 dc-dc 变换器, 因而在一个开关周期内, 电感电压的平均值为零, 如果令式(1)成立<sup>[1]</sup>

$$\begin{bmatrix} V_p^* \\ V_n^* \\ V_t^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

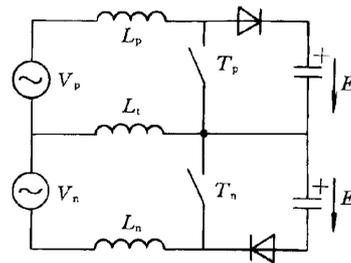


图 3 串联升压拓扑结构  
Fig.3 Series-connected boost topology

那么可以得到式(2)

$$\begin{cases} V_p^* d_n + \left( V_p^* - \frac{1}{3} E \right) (d_p - d_n) + (V_p^* - E)(1 - d_p) = 0 \\ V_n^* d_n + \left( V_n^* - \frac{2}{3} E \right) (d_p - d_n) + (V_n^* - E)(1 - d_p) = 0 \\ V_t^* d_n + \left( V_t^* - \frac{1}{3} E \right) (d_p - d_n) + V_t^* (1 - d_p) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

对于对称、平衡的三相系统而言,  $V_p^* - V_n^* + V_t^* = 0$ , 因此式(2)可简化为

$$\begin{bmatrix} 1 - d_p \\ 1 - d_n \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p^* \\ V_n^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

可以证明, 式(3)对于另外一个开关次序、  
( $d_p < d_n$ )也是成立的。式(3)给出了该拓扑结构在稳定状态时电路的输入电压、输出电压和占空比三者之间的固定关系, 只要电路工作在连续导通模式, 这个等式并不依赖于控制电路, 即与所采取的控制方案无关。

### 3 三相 PFC 控制器

为了实现三相 PFC 整流器的单位功率因数, 控制的目标就是在一个开关周期内使每相的电感电流  $i_a$ 、 $i_b$  和  $i_c$  分别跟踪相电压  $v_a$ 、 $v_b$  和  $v_c$ , 用公式可表示为

$$v_a = R_e \cdot i_a, \quad v_b = R_e \cdot i_b, \quad v_c = R_e \cdot i_c$$

式中  $R_e$ ——反映负载电流的等效电阻

对于一个对称、平衡的三相系统而言, 通过控制两相电流分别跟踪各自相电压, 由于  $v_a + v_b + v_c = 0$ ,  $i_a + i_b + i_c = 0$ , 所以另外一相的相电流也将跟踪其相电压, 从而实现单位功率因数, 即只要控制升压拓扑电路中的电感电流  $i_{Lp}$  和  $i_{Ln}$  分别跟踪电压  $V_p^*$  和  $V_n^*$ , 就可以实现控制的目的。由于系统是一个三相对称系统, 所以三相 PFC 控制的目标可以重写为

$$\begin{cases} V_p^* = R_e \cdot i_{Lp} \\ V_n^* = R_e \cdot i_{Ln} \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)中可得

$$\begin{bmatrix} 1-d_p \\ 1-d_n \end{bmatrix} = \frac{R_e}{ER_s} \cdot R_s \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lp} \\ i_{Ln} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中  $R_s$ ——等效的电流检测电阻

如果令  $V_m = \frac{ER_s}{R_e}$ , 这里  $V_m$  代表反馈电压环误差补偿器的输出, 那么式(5)可以表示为

$$V_m \begin{bmatrix} 1-d_p \\ 1-d_n \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lp} \\ i_{Ln} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)就是实现三相单位功率因数校正的关键函数, 它表明了控制开关  $T_p$ 、 $T_n$  的占空比, 如果使其线性组合满足此关系式, 那么就可以实现三相 PFC。对于式(6)我们可以通过图 4 所示的单周控制模块来实现, 图中区间选择电路决定了电路工作的时段; 多路开关用来选择输入电感电流; 核心部分包括时钟、触发器、加法器、比较器和带复位开关的实时积分器, 通过这些器件的线性组合来实现三相 PFC 功能; 输出逻辑单元将等效开关控制信号  $Q_p$ 、 $Q_n$  转换为开关  $S_a$ 、 $S_b$  和  $S_c$  的控制信号, 由于该装置使用了输入区间选择电路和逻辑电路, 因此单周期控制可以实现每隔  $60^\circ$  轮流改变系统参数的要求。

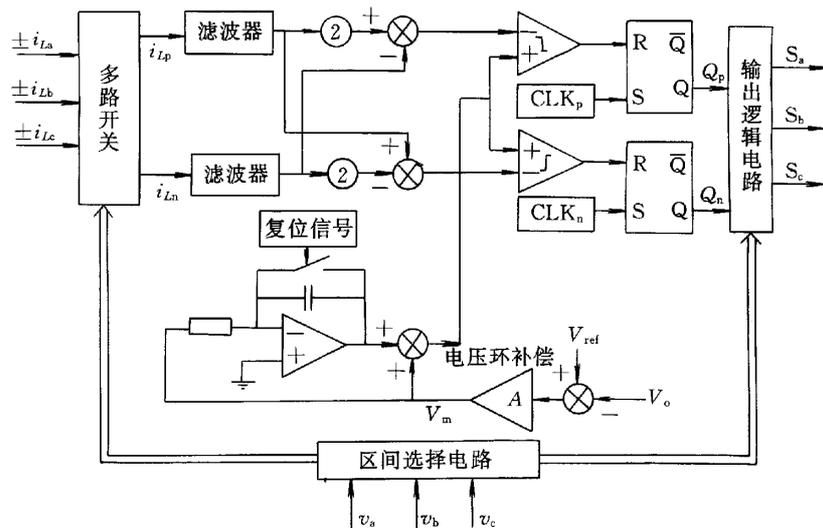


图 4 三相 PFC 控制器的单周控制模块

Fig.4 The one cycle control block of proposed PFC controller

### 4 试验研究

为了验证该理论分析的正确性, 根据图 1 所示的三相整流器搭建了一个 500W 的三相 PFC 试验电

路, 试验条件如下: 输入电压为 90V, 输出电压为 400V, 开关频率为 55kHz, 交流输入侧电感为 0.8mH, 用示波器测得的等效开关的驱动脉冲  $Q_p$ 、 $Q_n$  如图 5 所示, A 相的电压、电流波形如图 6 所示,

对该波形进行傅里叶分析可知单相的 THD 仅为 3%，功率因数可以控制在 0.999 左右，因而可以认为本系统的相电流能够及时地跟踪相电压，即该系统能够实现单位功率因数。从图 6 中还可以看出，输入电流存在某种程度的畸变，主要原因是由于在每  $60^\circ$  内，线电流从一相切换到另一相时存在切换过程中的瞬态响应。理论上，单周期控制变换器能抑制输入电压干扰，然而，实际应用中的开关管、晶体管和二极管等都不是理想器件，而且积分器动态响应速度慢，因此单周期控制的精确性还存在一定的偏差。

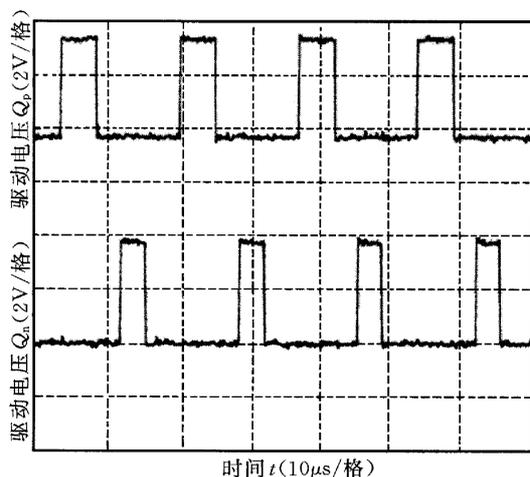


图 5 等效开关的工作波形

Fig. 5 Operation waveforms of switches

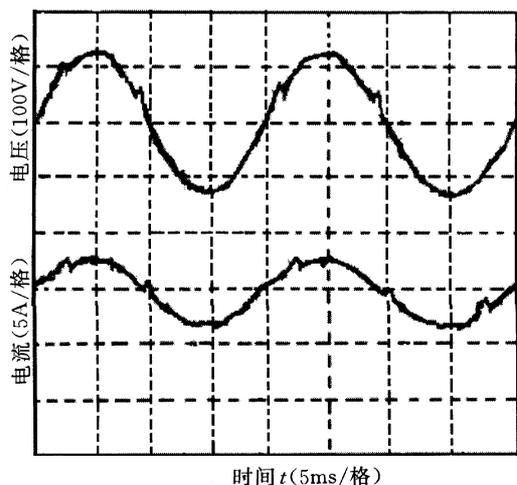


图 6 A 相电压和电流波形

Fig. 6 Phase A voltage and current waveforms

## 5 结论

本文基于单周期控制技术提出了一种通用三相 PFC 控制器，对于可解耦为串联升压拓扑结构的三相 boost 整流器都可以实现单位功率因数和低电流畸变。该控制器工作可靠，而且具有开关频率恒定、不需要乘法器、控制方案简单等优点，同时在一个开关周期的每  $60^\circ$  区间内，只有两个开关工作在高频状态，开关损耗明显减少。所提出的控制器使整个控制电路的复杂程度降低，具有非常广阔的应用前景。

## 参考文献

- 1 胡振营. 新型单周控制三相高功率因数整流器的研究: [硕士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2003
- 2 Keyue M Smedley, Slobodan Cuk. One-cycle control of switching converters. PESC' 91, 1991: 888 ~ 896
- 3 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计. 北京: 电子工业出版社, 1998
- 4 Qiao C, Smedley K M. A general three-phase PFC controller: Part I for rectifiers with a parallel-connected dual boost topology. Industry Application Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE, 1999(4): 2504 ~ 2511
- 5 Chongming Qiao, Keyue M Smedley. Three-phase unity-power-factor star-connected switch rectifier with unified constant-frequency integration control. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(4): 952 ~ 957

## 作者简介

张厚升 男, 1976 年生, 硕士, 助教, 研究方向为电力电子与电力传动。

胡振营 男, 1977 年生, 硕士, 现从事医疗电源的研究开发工作。