

高性能价格比功率因数校正系统的 动态非线性控制策略

林维明¹,黄是鹏²,张冠生¹,陈 为¹

(1. 福州大学电气工程系,福州 350002;2. 浙江大学电气工程系,杭州 310027)

摘要: 本文建立升压型开关变换器大信号平均电路模型,从动态输入输出电压关系,提出一种无需乘法器/除法器、无需电流环放大器、无需测量输入电压的新型非线性控制策略,具有高功率因数、高控制精度和快速的动态响应等优良性能,计算机仿真和实验验证了这一思想。

关键词: 平均电流控制; 动态电路关系; 功率因数校正

中图分类号: TN878 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 05-0638-03

A New Nonlinear Simple Control Method for Power Factor Correction

LIN Wei-ming¹,HUANG Shi-peng²,ZHANG Guan-sheng¹,CHEN Wei¹

(1. Department of Electrical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350002, China;

2. Department of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: A new large-signal average circuit model for Boost converter is set up and a new simple control of power factor correction is proposed to realize the objective of high power factor and fast response. Computer simulation and experiment show excellent property of the new method.

Key words: simple control; dynamical circuit relations; power factor correction

1 引言

八十年代初期兴起的有源功率因数校正技术是抑制谐波电流,提高功率因数最有效的方法.一般说来,5kW以下的中小功率场合,采用单相有源功率因数校正技术.交流输入电压经全波整流后,再经DC/DC开关变换器变换,通过相应的控制使输入电流平均值自动跟踪全波整流电压基准,同时保持输出电压稳定.

目前有许多控制方法应用在实现输入电流谐波抑制和单位功率因数,但普遍使用而且已实现集成电路芯片的控制电路比较复杂,一般需要乘法器/除法器、电流环放大器等,其成本价格与普通的PWM控制芯片相比昂贵许多;近年来国际上已在努力发展无需乘法器的高性价比的有源功率因数校正控制方法,使控制电路简单,成本降低^[1-3],但是其控制策略是基于稳态输入输出电压电路关系推出的.

本文从动态输入输出电压关系出发,建立一种新型高性价比的有源功率因数校正非线性控制策略.该方法无需乘法器/除法器、无需电流环放大器、无需测量输入电压,提高了控制精确度.以AC/DC BOOST开关变换器为例,计算机仿真和实验测试验证,说明新的有源功率因数校正非线性控制策略的优良控制特性.

2 BOOST变换器大信号平均电路模型

升压式(BOOST)开关变换器由于具有电感电流连续、控制特性好、电流波形失真小、输出功率大及共源极使驱动电路简单等优点,而广泛地应用在单相有源功率因数校正电路中.

由文[4]提出的等效受控源方法,可以给出图1所示BOOST变换器的大信号平均电路模型.

图1所示的大信号平均电路模型,当BOOST电路工作在连续导电模式(CCM),根据基尔霍夫电压定律平均形式的电路关系,可导出输入输出电压的动态关系:

$$V_g = \bar{v}_0 - V_0 + \bar{v}_L \quad (1)$$

式中: v_g 为平均输入电压,因其为缓变低频信号,假设在开关周期内保持不变; \bar{v}_L 为开关周期平均电感电压; V_0 为输出电压; α 为开关占空比.

3 高功率因数的新型非线性控制策略

以BOOST开关变换器作为有源校正环节的AC/DC整流

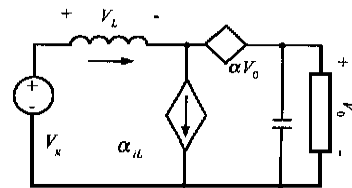


图1 BOOST变换器大信号平均电路模型

器的控制目标,是使输入电流低频分量与全波整流交流电压成正比,即

$$i_g = \bar{i}_L = v_g / R_e \quad (2)$$

同时使得输出直流稳定在一个给定参考电压, $V_0 = V_{ref}$. 式(2)中, R_e 是 PFC AC/DC 开关变换器的输入等效电阻. 从图 1 的 BOOST 电路关系可得:

$$\bar{i}_L = \bar{i}_S + \bar{i}_d \quad (3)$$

式中: \bar{i}_S 为开关管平均电流; \bar{i}_d 为输出二极管平均电流; v_g 为输入整流电压,是两倍基频(100 赫芝)低频大信号. 由图 1 BOOST 大信号平均电路模型的功率平衡关系分析可得:

$$v_g \bar{i}_L = \bar{v}_L \bar{i}_L + V_0 \bar{i}_d \quad (4)$$

联立式(2~4)得

$$\bar{i}_S = \bar{i}_L - \bar{i}_d = \bar{i}_L \left(1 - \frac{v_g - \bar{v}_L}{V_0}\right) = \frac{v_g}{R_e} \cdot \frac{V_0 - v_g + \bar{v}_L}{V_0} = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} i_S dt \quad (5)$$

$$\text{则 } R_S \bar{i}_S = \frac{R_S}{T_S} \int_0^{T_S} i_S dt = \frac{R_S v_g (V_0 - v_g + \bar{v}_L)}{R_e V_0} \quad (6)$$

式中: R_S 为等效的电流测量电阻; \bar{v}_L 为动态开关占空比. 当每一个开关周期动态 \bar{v}_L 满足式(6),则平均输入电流就跟踪全波整流输入电压. 基于式(6)实现的控制策略具有无需采集电感电流和消除电流校正环误差放大器等优点,但仍然需要测量输入和输出电压,并使用乘法器/除法器电路. 下面从 BOOST 变换器大信号平均电路模型来进一步简化控制策略.

如图 1 所示,导出的升压型 AC/DC 开关变换器一开关周期的平均电路模型,其动态输入电压和输出电压的关系如式(1)所示.

将式(1)代入式(6),得:

$$\begin{aligned} R_S \bar{i}_S &= \frac{R_S}{T_S} \int_0^{T_S} i_S dt = \frac{R_S}{R_e} \cdot \frac{(V_0(1 - \bar{v}_L) + \bar{v}_L) V_0}{V_0} \\ &= \frac{V_0}{R_e} R_S (1 - \bar{v}_L) + \frac{\bar{v}_L}{R_e} R \end{aligned} \quad (7)$$

为了实现 \bar{i}_S 满足式(7)的控制策略,本文对式(7)做如下处理:

$$\text{令 } v_{m1} = \frac{R_S}{R_e} V_0, v_{m2} = \frac{R_S}{R_e} \bar{v}_L$$

则每一个周期开关电流积分采集量 $R_S \bar{i}_S$, 达到使高速比较器翻转的参考电压 v_C 由下式决定:

$$v_C(t) = v_{m1} \left(1 - \frac{t_{ON}}{T_S}\right) \frac{t_{ON}}{T_S} + v_{m2} \frac{t_{ON}}{T_S} v_C(t_{ON} + T_S) = v_C(t_{ON}) \quad (8)$$

式(8)的控制参考信号,可采用如图 2 所示电路获取.

当每一个开关周期内,开关电流积分采集量 $R_S \bar{i}_S$ 满足于式(8)的控制信号,则平均输入电流就跟踪全波整流输入电压.

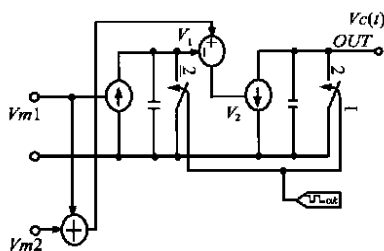


图 2 新型功率因数校正控制策略的控制参考信号电路

式(8)可改写为:

$$v_C(t) = (v_{m1} + v_{m2} - v_{m1} \frac{t_{ON}}{T_S}) \frac{t_{ON}}{T_S} \quad (9)$$

v_m 是用于调节输入等效电阻的控制输入,设计积分控制参考:

$$v_C(t) = (v_m - v_{m1} \frac{t_{ON}}{T_S}) \frac{t_{ON}}{T_S} \quad (10)$$

则输入等效电阻由下式给出:

$$R_e = R_S \frac{V_0 + \bar{v}_L}{v_m} \quad (11)$$

实现式(11)的控制即为新型 PFC AC/DC PWM 型 BOOST 开关变换器的非线性控制策略.

式(11)中,低频控制输入 v_m 可以采用补偿网络的电压闭环反馈来实现.

4 BOOST 变换器电感电压低频分量的数学模型

由式(7)可知,电感电压的低频分量是一个重要的控制变量. 本文通过下面理论分析,可建立 BOOST 开关变换器电路的电感电压低频分量数学表达式,为实现新型功率因数校正的动态非线性控制提供所需的控制参量.

在 CCM 工作模式,由基尔霍夫定律可写出 BOOST 电路动态瞬时值电压:

$$v_L = v_g - (1 - S(t)) V_0 \quad (12)$$

这里,开关函数 $S(t)$ 定义为: $S(t) = \begin{cases} 1, & \text{开关导通为 } 1 \\ 0, & \text{开关关断为 } 0. \end{cases}$

由付里叶级数分析, $S(t)$ 可以由下式表示:

$$S(t) = \frac{1}{2} + \sum_{n=2}^{\infty} K_n \cos(n \omega t + \phi_n) \quad (13)$$

式中: $\omega = 2\pi f_s$, f_s 是开关频率;

$$K_n = \frac{2}{n} |\sin n \frac{\pi}{2}|, \quad \phi_n = n \frac{\pi}{2}, \quad n = 1, 2, \dots$$

对设计合理的变换器,其输出滤波器的转折频率远低于于开关频率,因此大于开关频率的高频分量可以被忽略,则电感电压可以表达为:

$$v_L = v_g - (1 - \bar{v}_L) V_0 + K_1 V_0 \cos(\omega t + \phi_1) \quad (14)$$

假定 $A = K_1 V_0$, 则式(14)可改写为:

$$v_L = v_g - (1 - \bar{v}_L) V_0 + A \cos(\omega t + \phi_1) \quad (15)$$

从式(15)可以看出,电动态电压由低频分量 $(v_g - (1 - \bar{v}_L) V_0)$ 和开关频率的高频分量组成,可以根据文[5]提出的电容电荷周期复位法获取.

5 计算机仿真及实验结果分析

为了验证式(7)实现的新型非线性控制策略的理论预期性能,本文给出升压型变换器的电路参数:

$$P_0 = 200W; C = 330\mu F; L = 2mH; f_s = 50kHz;$$

输入电压有效值范围为 90 到 260 伏;输出电压为 400 伏.

首先应用 PSPICE 仿真软件对建立的主电路及控制方案进行仿真. 图 3 与图 4 分别给出输入电压为 $V_{gms} = 90V$ 和 $V_{gms} = 220V$ 时的输入电压、输入电流和开关占空比的波形图.

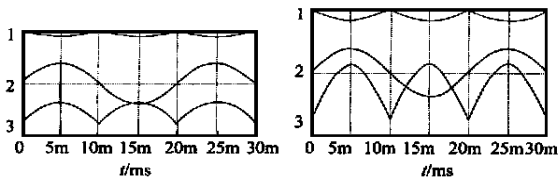


图3 $V_{gms} = 90V$ 时输入电压
电流与占空比的仿真
波形(图中1为占
空比,50%/格;2为
输入电压,100V/格;
3为输入电流,3A/格)

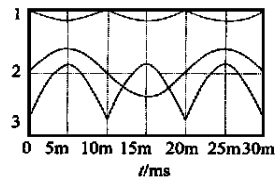


图4 $V_{gms} = 220V$ 时输入电压
电流与占空比的仿真波
形(图中1为占空比,
50%/格;2为输入电压,
200V/格;3为输入电流,
1A/格)

通过对设计的升压型 PFC 电路的计算机仿真,在满载条件下,当输入电压有效值从 90 到 260 伏变化,其功率因数可以取得 0.998. 建立与仿真电路一致的实验样机,应用 TDS360 示波器和 HI0K13193 电力质量分析仪对样机进行测量,图 5 为输入电压有效值为 220 伏,满载条件下的输入电压和输入电流波形.

试验测量功率因数不低于 0.995. 试验结果与计算机仿真基本一致,达到了理论预期的控制性能.

6 结论

由计算机仿真实验结果可以看出,新型非线性控制策略

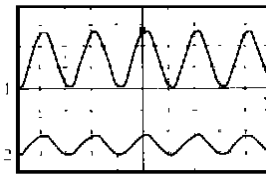


图5 $V_{gms} = 220V$ 时输入
电压与电流的实验
波形(图中1:输入
电压,100V/格;2:输
入电流,3A/格)

只需测量开关电流,无需电流环放大器、无需测量输入电压、电压反馈环、无需乘法器/除法器,电路简单可靠,具有高功率因数、高控制精度和快速动态响应等高性能价格比的优良控制性能.

参考文献:

- [1] Zheren Lai et al. One-cycle control of switching converters [J]. in IEEE PESC, 1991 Rec: 888 - 896.
- [2] Dragan Maksimovic et al. Nonlinear-carrier control for high-power-factor boost rectifiers [J]. IEEE Trans. On PE, 1996 July, (4) : 11.
- [3] Zheren Lai et al. A family of power-factor-correction controllers [A]. APEC '97 [C]: 66 - 73.
- [4] 张兴柱, 黄是鹏. 等效受控源平均法与开关式变换器的模型 [J]. 电杂志, 1986, 3.
- [5] 林维明. PWM 开关变换器非线性控制策略 [D]. 福州大学博士学位论文, 1999.

作者简介:



林维明 副教授, 1984 年, 1987 年和 1999 年分别在西安交通大学和福州大学获工学学士、硕士和博士学位. 感兴趣的研究方向为开关变换器非线性控制方法和电磁电器智能控制. E-mail: weiming@fzu.edu.cn

黄是鹏 浙江大学电气工程系教授, 从事高频开关变换器技术的研究.