

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.10.023

新型无桥 PFC 控制 BLDC 的研究

陈 晨, 张 舒, 熊 奇, 张兴杰
(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对进一步提高功率因素校正(PFC)系统的整体效率并解决电源谐波污染严重的问题,提出了一种新型的高性能的无桥 PFC 电路拓扑结构,通过采用电感电流断续的工作模式分析了无桥 PFC 拓扑电路的工作原理并运用模糊 PI 控制算法对其进行了仿真分析和研究,搭建了无桥 PFC 实验电路实现了变频压缩机驱动系统电源前级 AC/DC 功能,同时运用新型无桥 PFC 技术提出了一种高效率的应用于无刷直流电机(BLDC)驱动系统的方案,并利用 Matlab 的 simulink 模块搭建仿真平台对其进行了数字仿真与理论研究。研究表明,通过新型无桥 PFC 技术使 BLDC 驱动系统减少了相应的开关器件所带来的导通损耗,在一定的输出功率下提高了系统的整体效率,并且降低了系统输入电流的谐波干扰,具有一定的工程应用价值。

关键词: 无桥;功率因素校正;模糊 PI;无刷直流电机

中图分类号: TP23; TM711

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)10-1380-05

Analysis of new bridgeless PFC BLDC control

CHEN Chen, ZHANG Shu, XIONG Qi, ZHANG Xing-jie

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at further improving the overall efficiency of the system in power factor correction(PFC) and to solve the power problem of harmonic pollution, a new high performance bridgeless PFC topology was proposed, the work of PFC circuit was analysed by DICM model and fuzzy PI algorithm was used to the simulation analysis and research, the experiments of bridgeless PFC circuit to achieve a variable speed compressor drive system power pre-AC/DC function was setted up, a highly efficient driving scheme was proposed by using new bridgeless PFC applying to the brushless DC motor(BLDC) drive system and the simulation platform of simulink in Matlab was builded for digital simulation and theoretical research. The results indicate that by the new bridgeless PFC technology enables BLDC drive system reduces conduction losses arising from the corresponding switching device, in a certain output power improves the overall efficiency of the system and reduce the system input current harmonics interference with certain engineering application.

Key words: bridgeless; power factor correction; fuzzy PI; brushless DC motor(BLDC)

0 引 言

随着各种电力电子设备(例如变频冰箱)进入到电网中,电网中产生了大量的谐波污染,为了解决谐波污染的问题,目前主要的方法有两种:一种是利用有源或者无源滤波器来增设电网补偿装置,使电力电子装置所产生的谐波得到补偿;另一种是采用 PFC 的方法,使电力电子设备得到本质性改进,减少产生或者不

产生谐波^[1-2]。这两种方法相比较,第一种方法是在谐波产生以后再进行补偿;第二种方法是利用功率因数的校正,抑制谐波的产生,具有非常好的前景。因此,解决电网谐波污染问题的主要方法是采用 PFC 技术^[3]。

传统的 PFC 变换器首先通过 DBR 将交流电转化成直流电,再经过 PFC 校正电路,但是 DBR 的加入使得系统的损耗随着系统功率的增加而增加,并且占有了很大一部分^[4-5]。近年来,业界提出了一种没有采用

DBR 的 PFC(无桥 PFC)拓扑结构,这种拓扑结构减少了电路工作过程中电流流通过径上的半导体器件数量,降低了通态损耗,从而提高了系统工作效率^[6-7]。因此,将无桥 PFC 技术应用到直流无刷电机中具有非常大的创新性,减少相应的硬件带来的损耗,对实现国家节能减排有着可持续发展的战略作用。

本研究针对现有的各种无桥 PFC 电路拓扑结构进行改进,提出了一种具有更少的元器件数量和每半个开关周期导通过径上的元器件数量的无桥 PFC 拓扑结构,能进一步的降低开关损耗,提高系统效率。

1 新型无桥 PFC 拓扑结构原理分析

本研究采用的无桥 PFC 的拓扑结构如图 1 所示。

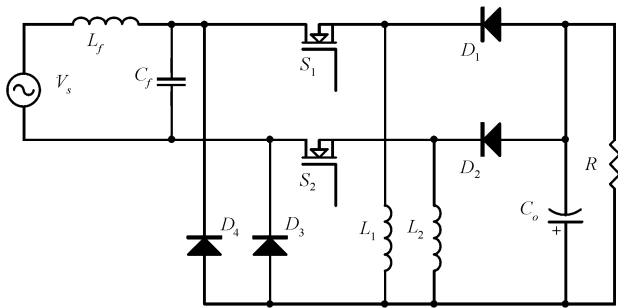


图 1 无桥 PFC 拓扑结构

在一个完整的开关周期内,这个 PFC 转换器分为两个部分的操作,工作在电源电压的正半周期和负半周期,由开关 S_1 和开关 S_2 来分别控制。在输入电压正半周期,电感 L_1 和二极管 D_1 把能量传递给电容 C_o ,类似地,在输入电压负半周期,电感 L_2 和二极管 D_2 把能量传递给电容 C_o ,在一个开关周期内,这个转换器中的电流以不连续导通的形式传递能量,最后电容 C_o 为负载提供恒定的电压。

在一个完整的开关周期内,PFC 转换器可以分为 3 个步骤运行,在输入电压的正半周期,首先,开关 S_1 打开,对电感 L_1 进行充电,电感 L_1 的电流增加, C_o 电容放电,接着, S_1 关闭,电感 L_1 所存储的能量转移到电容 C_o 上,直到电感 L_1 完全放电,电感 L_1 上的电流减小至零。最后,电感 L_1 进入非连续传导,即没有能量留在电感 L_1 中,在这个过程中,没有开关和二极管是导通的,电容 C_o 提供能量给负载。在一个完整的开关周期后,开关 S_1 再次打开,重复这个操作。

在输入电压的负半周期,首先,开关 S_2 打开,对电感 L_2 进行充电,电感 L_2 的电流增加, C_o 电容放电,接着, S_2 关闭,电感 L_2 所存储的能量转移到电容 C_o 上,直到电感 L_2 完全放电,电感 L_2 上的电流减小至零。

最后,电感 L_2 进入非连续传导,即没有能量留在电感 L_2 中,在这个过程中,没有开关和二极管是导通的,电容 C_o 提供能量给负载。在一个完整的开关周期后,开关 S_2 再次打开,重复这个操作。

2 仿真设计

为了使 PFC 转换器高效率的工作,需要设计合适的电路参数。对于给定的输入端电源是有效值为 220 V 的正弦交流电源,那么,其输入端的平均电压为^[8-9]:

$$\bar{V} = \frac{2\sqrt{2}V_i}{\pi} \quad (1)$$

转换器输出端的电压为 100 V ~ 250 V,这个 PFC 转换器的电压转换比是:

$$D = \frac{V_o}{V + V_o} \quad (2)$$

所以相应的最小和最大的电压转换比是 0.335 6 和 0.558 0。

在这个 PFC 转换器中的最关键的影响传导模式的电感 L_1 的电感值为:

$$L = \frac{R(1-D^2)}{2f} \quad (3)$$

式中: R —负载阻抗, D —电压转换比, f —开关频率。为了保证转换器能进入完全的 DICM 模式,电感 L_1 和 L_2 的值要小于电感最小临界值的 1/10。

对于这个 PFC 转换器,供电电压 V_i 和供电电流 I_i 以及输入功率如下:

$$P_i = \sqrt{2}V_i \sin \omega t \cdot \sqrt{2}I_i \sin \omega t \quad (4)$$

根据输出端电容中电流的二阶谐波量计算出输出端的电容值:

$$i_c(t) = -\frac{V_i I_i}{V_o} \cos 2\omega t \quad (5)$$

根据输出端电容电流得出输出端电压如下:

$$\Delta V_o = \frac{1}{C_o} \int i_c(t) dt = -\frac{I_o}{2\omega C_o} \sin 2\omega t \quad (6)$$

对于输出端电容电压的最大值, $\sin 2\omega t$ 取 1, 因此:

$$C_o = \frac{I_o}{2\omega \Delta V_o} = \frac{P_o}{V_o \cdot 2\omega \Delta V_o} \quad (7)$$

为了不影响输入端电流,需要在输入端设计一个二阶低通 LC 滤波器来吸收高阶谐波,最大的滤波电容值为:

$$C_f = \frac{I_{\max}}{\omega_{\max} V_{\max}} \tan(\theta) \quad (8)$$

式中: $V_{\max}$ —输入端电压的峰值, $I_{\max}$ —输入端电流的峰值, $\omega_{\max}$ —线频率的峰值, θ —输入端电压和电流之间的位移角。

因此 LC 滤波器的滤波电感为:

$$L_f = \frac{1}{4\pi^2 f_c^2 C_f} = L + L_s \tag{9}$$

式中: f_c —滤波器的截止频率,取 PFC 转换器开关频率的 1/10, L_s 取基本阻抗的 4%~5% 为源阻抗:

$$L_s = 0.04 \frac{1}{\omega_{\max}} \frac{V_i^2}{P_o} \tag{10}$$

3 控制算法

为了进一步提高系统的快速性、稳定性,智能控制技术被应用到各种控制系统中。模糊控制技术是智能控制技术中非常常见的一种,但是,模糊控制技术对于消除系统稳态误差的性能较差,很难达到较高的控制精度。同时,PI 控制技术对参数确定的系统具有快速性好、精确度高的特点,而模糊控制具有不依赖于系统模型参数、鲁棒性强的特点,综合两者的特点,采用模糊 PI 的控制策略能使输出电压精准快速地达到稳定,具有很好的抗干扰性^[10]。

模糊 PI 控制有两种形式,为模糊控制与 PI 控制分段控制、模糊增益调节 PI 控制器。前者是在系统误差比较大时,通过模糊控制,迅速抑制误差,使误差较小到一定范围,然后通过 PI 控制,消除其余的系统误差。这种方式只是把模糊控制与 PI 控制粗糙的结合,其效果不是非常理想,当系统参数改变后,这种方式往往达不到很好的控制效果。后者利用模糊理论,根据相应的模糊规则和模糊推理来确定 PI 控制中的参数,即利用系统误差 $e(k)$ 以及误差的变化率 $de(k)/dt$ 来实时调整 PI 控制器的参数 K_p 、 K_i ,以得到更加准确的控制参数。

由于 PFC 转换器工作于 DICM 模式,所以通过采集输出电压来控制开关 S_1 和 S_2 的占空比。

假定输出目标电压为 V_o ,实际测得的电压为 V_i ,那么误差电压 V_e 为:

$$V_e = V_o - V_i \tag{11}$$

误差电压 V_e 通过 PI 控制器计算后产生控制输出电压 V_c 为:

$$V_c(k) = V_c(k-1) + K_p \{ V_e(k) - V_e(k-1) \} + K_i V_e(k) \tag{12}$$

通过比较高频锯齿波 V_{st} 和控制输出电压 V_c 来产生 PWM 的控制信号,控制信号关系如表 1 所示。

表 1 控制信号的关系

时间	控制电压比较	开关状态
输入电压	$V_{st} < V_c$	开关 S_1 打开
正半周期	$V_{st} \geq V_c$	开关 S_1 关闭
输入电压	$V_{st} < V_c$	开关 S_2 打开
负半周期	$V_{st} \geq V_c$	开关 S_2 关闭

系统控制直流无刷电机的原理图如图 2 所示。

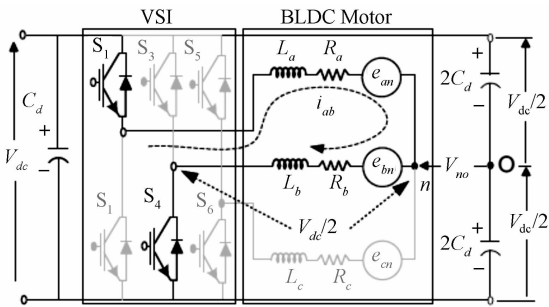


图 2 直流无刷电机控制原理图

通过对电机的相位信号来控制 VSI 使直流电流供电给三相直流无刷电机。开关管的状态与 BLDC 的位置信号的关系如表 2 所示,其中,电压逆变器的开关 $S_1 \sim S_6$ 用‘1’和‘0’来代替开关的‘开’和‘关’, H_a 、 H_b 、 H_c 表示每一相相对于端子‘O’的电压,用‘1’和‘0’来代替有相电压和相电压为零。

表 2 开关管的状态与 BLDC 的位置信号的关系

$\theta/(^{\circ})$	每一相的导通和关闭			开关管的导通和关闭					
	H_a	H_b	H_c	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
NA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0~60	0	0	1	1	0	0	0	0	1
60~120	0	1	0	0	1	1	0	0	0
120~180	0	1	1	0	0	1	0	0	1
180~240	1	0	0	0	0	0	1	1	0
240~300	1	0	1	1	0	0	1	0	0
300~360	1	1	0	0	1	0	0	1	0
NA	1	1	1	0	0	0	0	0	0

4 实验及结果分析

为了验证理论分析,本研究以 220 V、50 Hz 的交流电作为输入电压,输出 200 V 直流电压为目标,进行了电路仿真。电路参数如下:滤波电感 $L_f = 1.6$ mH,滤波电容 $C_f = 330$ nF,电感 $L_1 = 47$ μ H,电感 $L_2 = 47$ μ H,输出电容 $C_o = 2\ 200$ μ F,开关频率 = 20 kHz。Matlab Simulink 仿真电路图如图 3 所示,输出电压的波形图如图 4 所示,电感 L_1 和 L_2 的电流及输入电流的波形对比如图 5 所示,经仿真进行 FFT 分析后对结果,表明 PF 基本为 1,THD 为 3.47%。

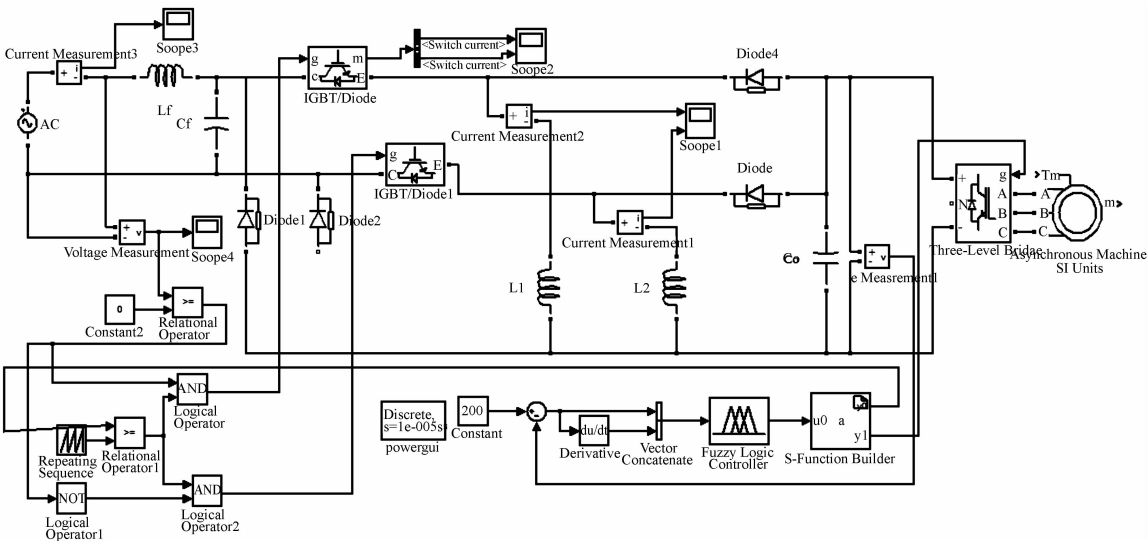


图 3 仿真原理图

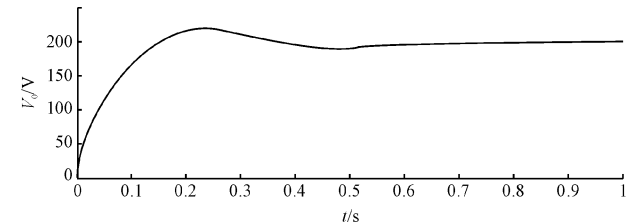


图 4 输出电压波形

由图 4 可知,输出电压达到 200 V 后继续上升,由于模糊 PI 的控制,使输出电压下降至 200 V 以下后,又缓慢回到 200 V 附近并趋于稳定,实现了系统控制的作用。

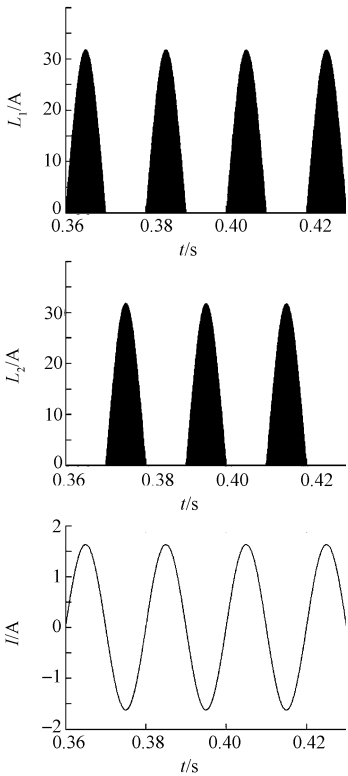


图 5 电感 L_1 和电感 L_2 的电流及输入电流

又图 5 可知,当输入电压处于正半周期时,由于开关 S_1 的开关,电感 L_1 不断地被充电和放电,电感 L_1 的电流波形呈正弦波的半波,同理,电感 L_2 的电流波形也呈正弦波的半波,输入电流的波形呈完整的正弦波。3 种电路结构的效率如图 6 所示。

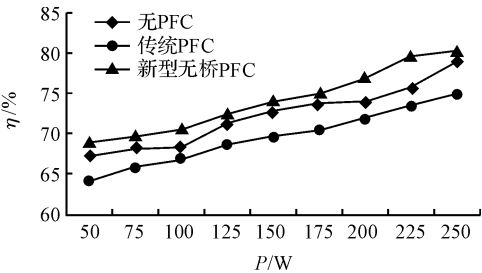


图 6 3 种电路结构的效率

通过对图 6 的分析,随着输出功率的增大,系统的效率也逐渐增大,采用新型的无桥 PFC 技术在输出功率小于 250 W 的应用范围内,具有较高的效率。

5 结束语

本研究深入分析了无桥 PFC 的工作原理,为了进一步减少导通损耗,提高变频压缩机的系统效率,提出了一种新型无桥 PFC 技术。该技术采用 DICM 的工作模式和单周期的控制策略解决了整流桥带来损耗的问题,通过模糊 PI 的控制算法使输出电压更加快速的达到稳定。通过对 VSI 的控制使直流无刷电机转速恒定,并且具有较高的系统效率和较低的功耗。同时运用 Matlab Simulink 进行了仿真建模与分析,实验结果验证了理论分析,为改善变频压缩机的实践和应用奠定了理论基础。本研究提出的无桥 PFC 技术不仅能应用于变频空调、变频冰箱中,还能应用于智能电网、通信电源、电动汽车等领域,对社会经济的可持续发展

具有重要意义。

参考文献 (References) :

[1] 温向宇,赵丽平,李健华,等. 新型单周期控制的无桥 Boost PFC 变换器[J]. 电源学报,2014(1):91-95.

[2] KONG P, WANG S, LEE F C. Common Mode EMI Noise Suppression in Bridgeless Boost PFC Converter[C]. APEC, 07,2007:929-935.

[3] 贲洪奇,张继红,刘桂华,等. 开关电源中的有源功率因数校正技术[M]. 北京:机械工业出版社,2010.

[4] 王明霞,都洪基. 基于 IR1150S 芯片的 Boost PFC 变换器分析与设计[J]. 电源世界,2014(11):21-23,38.

[5] 林维明,洪 翠,黄 超,等. 无桥 PFC 电路改进单周期控制的仿真与实验分析[J]. 电工电能新技术,2013(2):

20-23.

[6] 白茂军. 软开关无桥 Boost PFC 技术的研究[D]. 成都:西南交通大学电气工程学院,2010.

[7] 王慧贞,张军达. 一种新型无桥 PFC 电路[J]. 电工技术学报,2010,25(5):109-115.

[8] MOHAN N, UNDELAND T M, ROBBINS W P. Power Electronics: Converters, Applications and Design, John Wiley and Sons Inc[M]. USA: Woley Press,2003.

[9] EMADI A, KHALIGH A, NIE Z, et al. Integrated Power Electronic Converters and Digital Control[M]. Honda: CRC Press,2009.

[10] 刘金琨. 先进 PID 控制 Matlab 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2011.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

陈 晨,张 舒,熊 奇,等. 新型无桥 PFC 控制 BLDC 的研究[J]. 机电工程,2015,32(10):1380-1384.

CHEN Chen, ZHANG Shu, XIONG Qi, et al. Analysis of new bridgeless PFC BLDC control [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(10):1380-1384.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn

(上接第 1374 页)

增加了一个高频零点,一般在穿越频率以上,这个高频零点改善了电压环的相位裕度,同时提高了输入阻抗在穿越频率处的幅值;对于输入阻抗对于等效二阶滤波环节的谐振点起衰减作用,抑制了输入阻抗的下跌;对于输出阻抗主要使其增加了一个高频的零点,增加了其高频处的幅值。

综上所述,适当的寄生参数对改善系统级联稳定性有一定的积极作用,实际电路的特性由于这些寄生参数的影响会略好于前面分析的理想情况。

参考文献 (References) :

[1] 蒋贤哲,王 莉. 直流分布式电源系统的建模研究[J]. 电源学报,2005,3(2):111-115.

[2] 程 心. 非理想 DC-DC 开关变换器的建模分析与仿真[D]. 合肥:合肥工业大学电子科学与应用物理学院,2009.

[3] 史修德. 考虑电路寄生参数的 BOOST 变换器开关特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院,2012.

[4] 肖文勋,戴 钰,张 波,等. 考虑寄生参数的移相全桥变换器恒压恒流自切换控制[J]. 电源学报,2012,10(6):

45-50.

[5] FENG X, YE Z, XING K, et al. Impedance Specification and Impedance Improvement for DC Distributed Power System[C]//Power Electronics Specialists Conference. Portugal: [s. n.],1999:889-894.

[6] 张军明. 中功率 DC/DC 变流器模块标准化若干关键问题研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2005.

[7] MIDDLEBROOK R D, CUK S. A General Unified Approach to Modeling Switching Converter Power Stages [C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference Record. Portugal: [s. n.],1976:18-34.

[8] 谢文涛,张 东,吕征宇. 光伏发电系统中前端 DC/DC 变换器的设计[J]. 机电工程,2007,24(9):133-136.

[9] 欧阳长莲. DC-DC 开关变换器的建模分析与研究[D]. 南京:南京航空航天大学自动化学院,2004.

[10] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京:机械工业出版社:2005.

[11] 徐同武,刘 军,何湘宁. 高压变压器寄生电容对电晕处理机工作频率影响的量化分析[J]. 机电工程,2010,27(10):116-118.

[编辑:张 豪]