

永磁驱动重构型车载充电机三相 DC/DC 变流器的研究*

袁晓强, 於 锋, 吴 晓, 吴晓新, 项财生
(南通大学 电气工程学院, 江苏 南通 226019)

摘 要: 提出了一种新型永磁驱动重构型车载充电机三相 DC/DC 变流器集成系统。该集成系统将永磁驱动的电机绕组和 DC/AC 逆变器重构成车载充电机实现电动汽车驱动-充电的集成, 具有空间利用率高、充电快速和可靠性高等特点。分析了集成系统的结构和工作原理, 推导了充电系统的三相 DC/DC 变换器数学模型。在此基础上, 利用 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建了驱动-充电集成系统仿真模型, 对同步脉宽调制 (PWM) 控制和交错 PWM 控制策略进行仿真研究, 分析对比了交流侧电压电流、直流侧电机绕组电感电流和直流侧电压波形。仿真结果表明, 与交错 PWM 控制策略相比, 同步 PWM 控制策略下该新型结构充电系统具有更好的运行性能。

关键词: 集成系统; 重构; 同步 PWM 控制; 交错 PWM 控制; 三相 DC/DC 变流器

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)09-0019-06

Research on Three-Phase DC/DC Converter of the Permanent-Magnet-Drive Reconstructed Onboard Charger*

YUAN Xiaoqiang, YU Feng, WU Xiao, WU Xiaoxin, XIANG Caisheng
(School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: A new three-phase DC/DC converter integrated system was presented to realize a permanent-magnet-drive reconstructed onboard charger, which integrated permanent magnet machine windings and DC/AC converters into an onboard charger to achieve drive-charging integration in electric vehicle, and aimed at high space utilization, fast charging and high reliability. The structure and working principle of the integrated system were analyzed, and the mathematical model of the three-phase DC/DC converter of the charging system was deduced. Based on this, the simulation model of the drive-charging integrated system was built by MATLAB/Simulink simulation software. The performances of two pulse width modulation (PWM) control strategies were evaluated based on the comparison of the AC-side voltage, AC-side current, DC-side machine winding inductor current and DC-side voltage waveform. The simulation results showed that compared with the interleaved PWM control strategy, the new reconstructed onboard charger system had better running performance under the synchronous PWM control strategy.

Key words: integrated system; reconstruction; synchronous PWM control; interleaved PWM control; three-phase DC/DC converter

0 引 言

传统汽车保有量一直处于不断增长的趋势,

不可再生能源消耗随之加剧。传统汽车尾气对环境的影响日益严重。电动汽车具有节能、环保和高效等优点, 有望解决环境污染及能源短缺问题,

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51807098)

作者简介: 袁晓强(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气自动化及电机控制技术。

於 锋(1985—), 男, 博士, 研究方向为永磁电机变频调速系统及电力电子技术在电动汽车中的应用。

吴 晓(1961—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为自动化技术应用及先进制造技术中的控制技术应用。

因此各个国家争相研究和开发电动汽车^[1]。作为电动汽车的关键技术之一,动力电池组的充电时间与续航里程是制约其发展的主要因素。

传统电动汽车采用非车载充电机进行充电,该方法虽然能够实现快速充电,但是充电桩的建设面临着建设地点紧缺、建设费用高昂、区域建设密度低等困难。相比于传统充电方式,车载充电机携带方便,充电简单灵活,越来越受到汽车厂商和用户的青睐。传统的车载充电机充电和驱动是两个独立的工作系统,其空间利用率低、充电时间长、可靠性低,不符合电动汽车的模块化和小型化发展趋势^[2],影响电动汽车的普及。因此,研究和开发大功率、结构紧凑的车载充电机将对未来电动汽车的发展有着重要意义。

文献[3]提出了一种绕线式感应电机的驱动与充电集成的系统。该驱动-充电集成系统的显著特点是将电机作为变压器起到隔离作用,安全性较好,但是由于存在气隙,需要很大的励磁电流,降低了充电效率。文献[4-5]提出一种完全集成的车载充电机,特点是减少了器件数量,减轻了电动汽车的自重,但在充电运行时,永磁电机一直旋转,损耗较大。文献[6-8]提出一种新的集成化方式,该方式三相电机设计呈开绕组状态,三相电网连接在其引出的中间抽头上,2个并联的半绕组连接在1个H桥变换器上。该方式下电机绕组之间存在耦合,控制策略比较复杂。

本文针对车载充电系统在充电质量、体积重量和成本等方面的问题^[9-13],提出一种永磁驱动重构型车载充电机三相DC/DC变流器系统结构。该结构将驱动系统的逆变器和电机绕组等重构成车载充电机,通过优化拓扑结构和控制策略实现电机驱动、高功率因数充电等功能总集成。利用驱动系统的逆变器,使其在充电时工作在整流模式;利用永磁电机的三相绕组作为充电时DC/DC拓扑结构的滤波电感。该方法节约电动汽车空间、减少自重,进一步降低整车成本。

本文以永磁电驱重构型车载充电机三相DC/DC变流器集成系统作为控制对象,分析了集成系统的结构和工作原理,推导了充电系统的三相DC/DC变流器数学模型,然后建立该集成系统的仿真模型,对同步脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)和交错PWM控制策略进行对

比研究和分析。

1 系统拓扑结构及工作原理

1.1 驱动-充电集成系统拓扑结构

本文设计了一套新型永磁驱动重构型车载充电机系统,将电动汽车用原有驱动系统的三相逆变器、三相永磁电机绕组重构为充电系统的整流器及滤波电感。该驱动-充电集成系统的拓扑结构如图1所示,其中, $e_x(x=a,b,c)$ 为三相电源电压; i_x 为三相电源电流; E 为动力电池电压; C 为直流母线电容,该并联电容有利于对纹波的吸收和提高直流侧电压稳定性;三相AC/DC整流器采用电感滤波器并网; L_g 为并网电感; L_p 为三相永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)绕组相电感;K1和K2为模式切换开关。

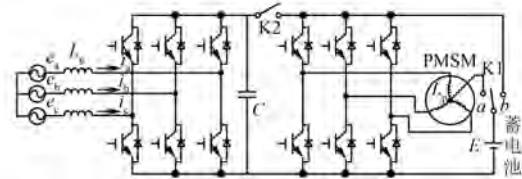


图1 驱动-充电集成系统拓扑结构

该集成系统拓扑可自由切换驱动/充电工作模式。当工作于驱动状态时,动力电池经逆变器作用于PMSM;工作在充电状态时,三相交流电经AC/DC整流器、驱动逆变器和电机绕组后对动力电池进行充电。由此看出,该拓扑在两种工作模式下公用1套驱动逆变器、控制电路及电机绕组,仅需增加1套额外AC/DC整流电路便可实现驱动/充电功能总集成,可有效提高电动汽车的电能利用率。同时,该系统采用三相接口充电拓扑结构,输出电压范围大,可满足大功率充电要求。

1.2 系统工作原理

1.2.1 充电模式

图2所示为电动汽车工作在充电模式时的电路图。在图1基础上,将开关K2闭合,开关K1投切至a位置。此时,三相交流电经AC/DC整流器(即三相全控整流电路)和滤波电路(由输入滤波电感和输出滤波电容组成),并通过一定的控制策略控制功率器件的开关情况,可实现直流母线电压的稳定输出,而后流经重构型三相DC/DC变流器,将整流得到的高压直流电转换成稳定的

低压直流电压给蓄电池供电,从而实现电动汽车的充电功能。此时,通过封锁驱动逆变器的下桥臂 IGBT 开关信号,结合三相电机绕组,该重构型三相 DC/DC 变流器工作在三相交错型 Buck 模式。同时,在充电模式下,由于流进电机绕组的电流为直流电流,电机绕组中不会形成旋转磁场,所以电机内部不会产生电磁转矩,充电过程中电机将一直保持静止状态。

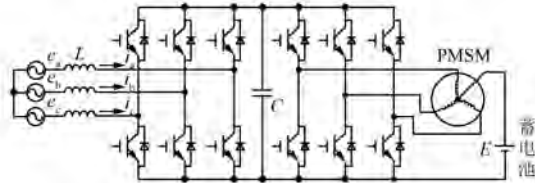


图 2 充电模式系统拓扑结构

1.2.2 驱动模式

图 3 所示为集成系统工作在驱动模式下的电路图。在该模式下,图 1 中开关 K2 断开,开关 K1 投切至 b 位置,动力电池经过三相桥式逆变器后驱动电机。该系统通过将蓄电池的直流电通过 DC/AC 逆变器(即三相桥式逆变电路)转换成交流电,通过一定的控制策略控制开关管的导通与关断,实现性能良好的 PMSM 变频调速控制系统,进而保证电动汽车安全稳定的运行。

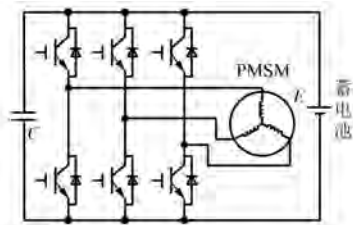


图 3 驱动模式系统拓扑结构

2 三相 DC/DC 变流器数学模型

双向 DC/DC 变流器^[14-16]由于结构简单、成本较低、无变压器损耗等优点得到了广泛应用。随着设备功率等级的增加,双向 DC/DC 变流器作为能量管理系统的核心装置其功率等级也不断增大。传统单重双向 DC/DC 拓扑输出功率受到单个功率器件的限制,其输出功率通常较小,不适宜在大功率场合应用,且传统单重双向 DC/DC 变流器具有电流纹波系数大、滤波元件大等缺点。

针对传统双向 DC/DC 变流器的输出电感电流纹波幅值较大的问题,本文将三相交错型双向 DC/DC 变流器应用到电动汽车的驱动-充电集成系统中。图 4(a)所示为三相交错并联 DC/DC 变流器的拓扑结构。充电模式时,三相全桥变换器作为 DC/DC 变流器,电机绕组作为滤波电感;驱动模式时,三相全桥变换器作为 DC/AC 逆变器,将蓄电池直流电转换成正弦交流电通入电机绕组驱动电机。

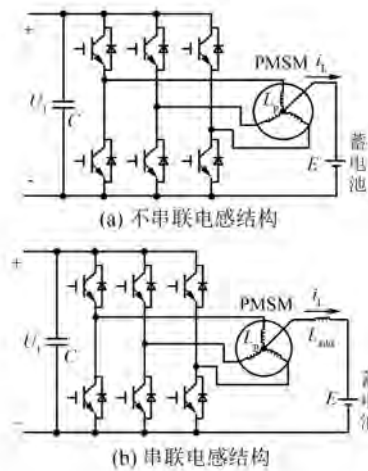


图 4 三相交错并联重构型 DC/DC 变流器拓扑结构

采用三相交错拓扑结构减小了纹波幅值,并且使总输出电流平均分配到三对桥臂上,减小开关管的电流应力,保护开关管,使得电路运行安全可靠。该拓扑结构使开关管的开关频率成倍增加。

由于三相交错并联 DC/DC 的三相电感使用的是永磁电机绕组,绕组电感较小,故本次设计在三相绕组并联电感后串联 1 个滤波电感,使系统工作于电流连续导通模式(CCM)。其拓扑结构如图 4(b)所示。

下面对电感值进行计算。

设计三相交错并联重构型 DC/DC 变流器的拓扑结构如图 4 所示,其中高压侧 U_1 的值为 400 V,低压侧 U_2 为 300 V,对每相电流进行控制,其流过每相的电流值最大不超过 20 A,从而对电路进行过流保护。

当上桥臂 IGBT 导通及下桥臂 IGBT 关断时,电流由高压侧流向低压侧,可得蓄电池充电状态方程为

$$L_p \frac{di_L(t)}{dt} + L_{add} \times 3 \frac{di_L(t)}{dt} = U_1 - E \quad (1)$$

$$\Delta I_{Lon} = \frac{1}{L_p + 3L_{add}} \int (U_1 - E) dt = \frac{U_1 - E}{L_p + 3L_{add}} T_{on} \quad (2)$$

$$L_p + 3L_{add} = \frac{U_1 - E}{\Delta I_{Lon}} T_{on} \quad (3)$$

式中： i_L ——蓄电池充电电流；
 L_{add} ——附加电感值；
 U_1 ——三相交错 Buck 电路的高压侧电压；
 ΔI_{Lon} ——开通纹波电流；
 T_{on} ——开关管导通的时间。

当所有 IGBT 关断时，电感续流作用，由于电流经下桥臂续流二极管，继续向蓄电池充电，有：

$$L_p \frac{di_L(t)}{dt} + L_{add} \times 3 \frac{di_L(t)}{dt} = -E \quad (4)$$

$$\Delta I_{Loff} = \frac{1}{L_p + 3L_{add}} \int E dt = \frac{E}{L_p + 3L_{add}} T_{off} \quad (5)$$

$$L_p + 3L_{add} = \frac{E}{\Delta I_{Loff}} T_{off} \quad (6)$$

式中： ΔI_{Loff} ——关断纹波电流；
 T_{off} ——开关关断的时间。

代入具体数值至式(5)和式(6)便可求得 L_p+3L_{add} 的电感值。经求解，相绕组电感 L_p 值为 16 mH，附加电感 L_{add} 值为 100 mH。

3 重构型充电机系统仿真建模

3.1 系统控制策略

本文的永磁驱动重构型车载充电机系统包括 AC/DC 整流器模块和 DC/DC 变流器模块。整流器模块为三相全桥拓扑，采用电压外环电流内环的双闭环 PI 控制策略。该控制策略是采样和反馈中间直流母线电压，将其与给定值进行比较，通过 PI 控制器得到稳定的电流参考值，与电感电流共同作用于内环，同时利用 SVPWM 算法产生脉冲驱动信号，实现各开关管的通断。DC/DC 变流器模块采用三相交错并联 Buck/Boost 斩波电路，控制策略同样是基于电压外环电流内环的双闭环 PI 控制方式，通过采样直流侧输出电压和电感电流，将其与给定值进行对比，通过 PI 调节器得到稳

定的输出电压电流值，其输入侧直流电压经过 AC/DC 整流电路可得，通过 AC/DC 整流电路将家用交流电经过 PI 控制策略转换成直流电。在此基础上，对同步 PWM 与交错 PWM 控制策略进行对比分析研究。充电系统的控制框图如图 5 所示。

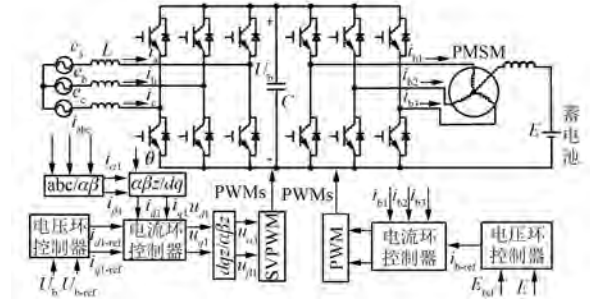


图 5 充电系统控制框图

在 MATLAB/Simulink 仿真软件中搭建基于重构型充电系统的同步 PWM 控制和交错 PWM 控制系统模型，对系统交流侧的电压电流、直流侧电机电感和蓄电池电压的静、动态特性进行仿真研究，并对 2 个控制系统的仿真结果进行分析和对比。

3.2 三相交错 DC/DC 变流器建模

在 MATLAB/Smulink 中搭建三相交错并联 DC/DC 变流器的仿真模型。该仿真模型的主电路如图 6 所示。PWM 触发脉冲产生模块如图 7 所示。PWM 产生模块根据 DC/DC 变流器的控制电路输出脉冲的占空比对 PWM 进行移相，同时用系统设置的每相电感最大电流值对每相电流进行限流。通过将三角载波的参数设置为同相位和相位相差 120°，将对 DC/DC 变流器进行同步 PWM 和交错 PWM 控制策略进行控制。

本文将三角载波的周期设置为 6×10^{-3} s，分别对每相电路三角载波等相位和相位相差 120° 控制方法进行仿真研究。DC/DC 变流器输入电压设为 400 V，输出蓄电池电压设为 300 V，电机绕组电感选定为 16 mH，总串联电感设为 100 mH，滤波电容设为 2 200 μ F。

4 仿真研究

本文仿真试验所设计的永磁驱动重构型车载充电机参数如表 1 所示。仿真条件设置为：采用变步长 ode45 算法，相对误差设置为 0.001，仿真时间设置为 0.5 s。

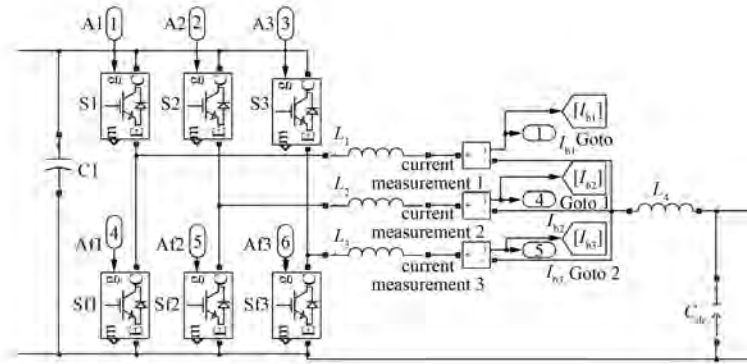


图 6 DC/DC 变流器主电路

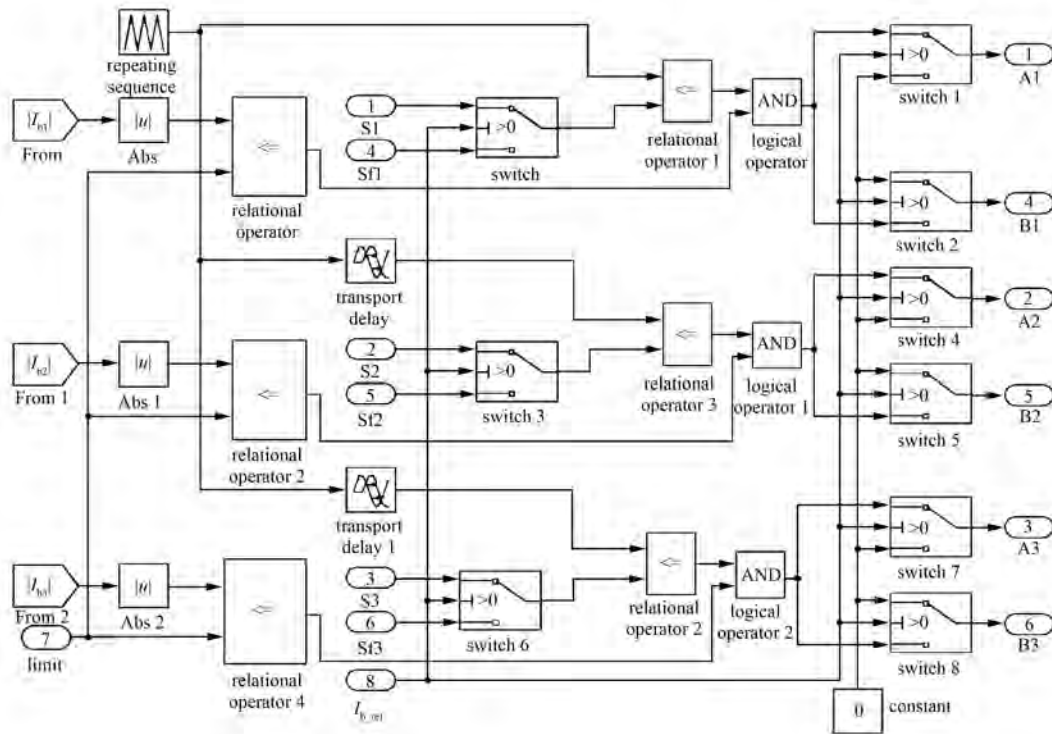


图 7 PWM 产生模块

表 1 永磁驱动重构型车载充电机参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
交流侧电压/V	220	整流开关频率/Hz	10 ⁴
额定频率/Hz	50	斩波开关频率/Hz	8.3×10 ³
交流侧电感/mH	2	电机绕组电感/mH	16
直流母线电容/μF	2 200	串联电感/mH	100
直流母线电压/V	400	滤波电容/μF	2 000
动力电池电压/V	300	电机额定电流/A	6.8

图 8 所示为充电机系统交流侧电压电流波形曲线。同步 PWM 控制策略下的电压幅值保持在 220 V, 电压波形平滑, 正弦度高, 电流波形幅值基本保持在 80 A, 电流有少许谐波, 电压与电流相位相同, 功率因数较高; 交错 PWM 控制策略下电压幅值也能保持在 220 V, 电压波形正弦度较高, 电流波形幅值保持在约 85 A, 电流谐波较大, 电压电流相位基本保持一致, 功率因数较高。

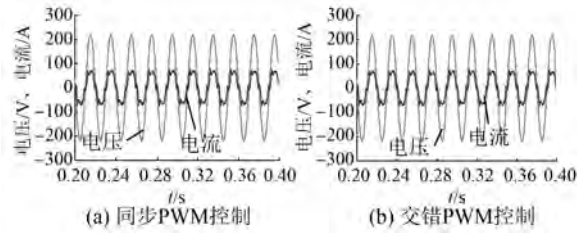


图8 AC/DC变流器交流侧电压电流波形

图9所示为AC/DC变流器直流侧电压波形曲线。两种控制策略的电压都能够实现快速响应,响应时间约为0.1s,稳态时两种控制策略均能使电压保持在给定值400V,而且同步PWM控制策略下的电压波形更加平滑、稳定。

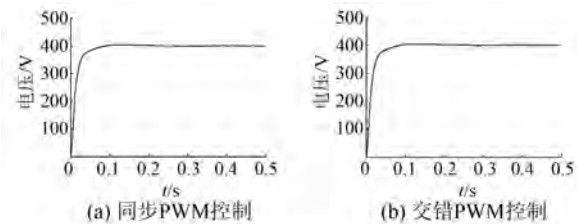


图9 AC/DC变流器直流侧电压波形

图10所示为DC/DC变流器输出侧电压波形曲线。可以看出,两种控制策略均在0.1s后实现稳定运行,稳态时波形都有少许波动,但电压值基本维持在300V,结果比较理想。

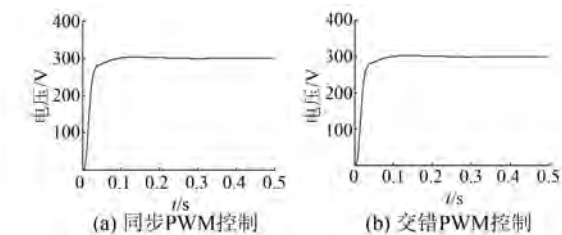


图10 DC/DC变流器输出侧电压波形

图11所示为绕组相电感电流及总电流波形曲线。从图11中可以看出,同步PWM控制策略下的电流波形响应迅速,电流脉动率约为1%,而交错PWM控制策略下的电流波形转矩脉动率较大,电流脉动率能够达到24%。同步PWM控制策略下的绕组电流脉动更小,即电机绕组电流纹波较小,该控制策略下的电机损耗也较小,更加适合应用在电动汽车等长时间运转的电机。

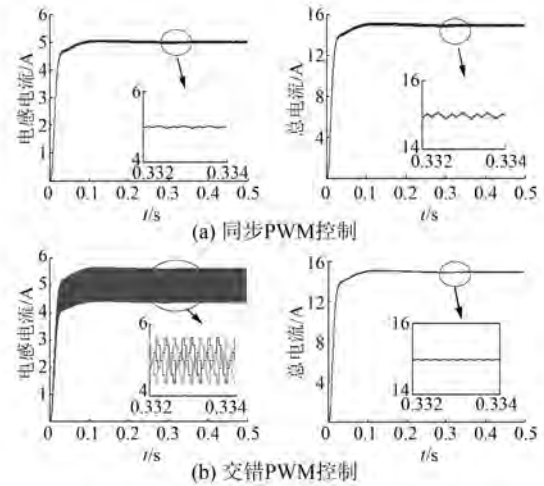


图11 绕组电感电流波形

5 结 语

本文基于一种新型永磁驱动重构型车载充电机三相交错DC/DC变流器系统,研究分析了在PI控制策略下的同步PWM与交错PWM控制方式。研究结果表明:同步PWM控制策略下的功率因数高,电机绕组电感电流纹波小;交错PWM控制策略下的功率因数也较高,但电机绕组电感电流纹波较大。仿真研究表明,同步PWM控制策略控制该新型永磁驱动重构型车载充电机具有更好的性能。

【参考文献】

[1] 于晓勇,赵晨晓,马晶.基于专利分析的我国电动汽车技术发展趋势研究[J].科学学与科学技术管理,2011,32(4):44-51.

[2] 刘莹,王辉,漆文龙.电动汽车驱动系统与蓄电池充电一体化混合拓扑研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(10):143-149.

[3] MOHANED S D, AHMED A E, AYMAN S A. A nine-switch converter based integrated motor drive and battery charger system for EVs using symmetrical six-phase machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(9): 5326-5335.

[4] MURAT Y, PHILIP T K. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2151-2169.

(下转第33页)

- [10] WELCHKO B A. A double-ended inverter system for the combined propulsion and energy management functions in hybrid vehicles with energy storage [C] // Industrial Electronics Society, IECON 2005, Conference of IEEE, 2005: 6.
- [11] KAWABATA T, EJIUGU E C, KAWABATA Y, et al. New open-winding configurations for high-power inverters [C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, IEEE, 1997: 457-462.
- [12] SRINIVAS S, SOMASEKGAR V T. Space-vector-based PWM switching strategies for a three-level dual-inverter-fed open-end winding induction motor drive and their comparative evaluation [J]. IET Electric Power Applications, 2008, 2(1): 19-31.
- [13] SEKHAR K R, SRINIVAS S. Discontinuous decoupled PWMs for reduced current ripple in a dual two-level inverter fed open-end winding induction motor drive [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2493-2502.
- [14] 孙丹, 林斌, 俞金云. 开绕组电机控制系统的共模电压抑制方法研究 [J]. 机电工程, 2013, 30(9): 1113-1117.
- [15] SOMASEKHAR V T, SRINIVAS S, PRAKASH R B, et al. Pulse width-modulated switching strategy for the dynamic balancing of zero-sequence current for a dual-inverter fed open-end winding induction motor drive [J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(4): 591-600.
- [16] 孙丹, 林斌, 周文志. 开绕组电机系统拓扑及控制技术综述 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 76-84.
- [17] 曾恒力, 年珩, 周义杰. 基于比例谐振控制的共直流母线开绕组永磁同步电机零序电流抑制技术 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 35-44.
- [18] 顾玮玮. 电动汽车用少稀土组合励磁永磁无刷电机的设计与分析 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [19] HARA S, YAMAMOTO Y, OMATA T, et al. Repetitive control system: a new type servo system for periodic exogenous signals [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1998, 33(7): 659-668.
- [20] TOMOZUKA M, KEMPF C. Design of discrete time repetitive controllers with applications to mechanical systems [C] // Proceedings of the IFAC 11th World Congress, 1991: 243-248.

收稿日期: 2018-01-30

(上接第 24 页)

- [5] HAGHBIN S, ZHAO S, ALAKULA M. An integrated 20-kW motor drive and isolated battery charger for plug-in vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(8): 4013-4029.
- [6] BRUYERE A, DE-SOUSA L, BOUCHEZ B, et al. A multiphase traction/fast-battery-charger drive for electric or plug-in hybrid vehicles: solutions for control in traction mode [C] // Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion, 2010: 1-7.
- [7] LACROIX S, LABOURE E, HILAIRET M. An integrated fast battery charger for electric vehicle [C] // Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion, 2010: 1-6.
- [8] 段朝伟, 徐海刚. 电动汽车电池智能充电系统设计与实现 [J]. 电子器件, 2013, 36(2): 256-259.
- [9] 卢增艺, 陈为. 多通道交错并联反激变换器磁集成技术研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(18): 41-46.
- [10] 郭建龙, 文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 1-9.
- [11] 张文亮, 武斌, 李武. 我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨 [J]. 电网技术, 2009, 33(4): 1-5.
- [12] 赵剑飞, 薛洋, 刘建波. 电动汽车用充电器与驱动器一体化拓扑研究 [J]. 电子器件, 2016, 39(5): 1215-1219.
- [13] 曹旭. 双向 DC/DC 变换器的数字控制研究与设计 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [14] 王冕, 田野, 李铁民. 应用于储能系统的双向 DC-DC 变换器研究 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 66-71.
- [15] 武琼. 电动汽车双向 DC/DC 变换器的数字化实现 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2013.
- [16] 杨玉岗, 李涛, 冯本成. 交错并联磁集成双向 DC/DC 变换器的设计准则 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 37-45.

收稿日期: 2018-03-26