

新型电机驱动充电一体化分析与研究*

张耀文, 张政权, 刘庆想, 欧伟丽

(西南交通大学 物理科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 提出了一种基于 AC-link 的新型电机驱动充电一体化拓扑结构, 可以满足电机驱动控制和充电两种工作模式。该拓扑正向工作时驱动电机为电机驱动控制状态、反向工作时给蓄电池充电为充电状态。首先对该新型拓扑结构两种工作模式的工作原理进行详细介绍, 采用有效的控制策略并使用 Simulink 软件搭建仿真模型, 对一体化拓扑结构和控制策略进行验证, 仿真结果表明, 该拓扑工作在充电模式时可以满足电池全部充电阶段的不同电压需求; 工作于电机驱动模式, 无论是加速过程还是正常工作过程, 定子电流均呈现良好的三相正弦形态, 并且转速可以达到给定值, 从而证明了这种拓扑结构和控制策略的可行性。

关键词: 电动汽车; 电机驱动; 一体化; AC-link; 矢量控制

中图分类号: TN82 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.190283

Analysis and research on new integrated motor-driving and charging topology

Zhang Yaowen, Zhang Zhengquan, Liu Qingxiang, Ou Weili

(School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper proposes a novel motor-driving charging integrated topology with high-frequency AC link (HF AC-link), soft-switching operation and high-frequency (HF) galvanic isolation, which can apply to the two modes of motor driving control and charging. The topology belongs to a new class of resonant AC-link topology, and its link is composed of a series ac inductor/capacitor (LC) pair. When the topology is working in the forward direction, the driving motor is in the motor driving control state, and the battery is being charged in the backward working period. In this paper, the principle of operation of the two working modes of the new topology is introduced in detail. The effective control strategy is used and the simulation model is built by MATLAB/Simulink software. The integrated topology and control strategy are verified. The simulation results show that the topology works. The charging mode can meet the different voltage requirements of the whole charging phase of the battery; working in the motor driving mode, the stator current exhibits a good three-phase sinusoidal shape in both the acceleration process and the normal working process, and the rotation speed can reach a given value, thereby proving the feasibility of this topology and control strategy.

Key words: electric vehicle; motor drive; integration; AC-link; vector control

当前社会随着现代经济迅猛的发展, 环境问题日益加剧, 节省能源以及降低能耗逐步引起人们的关注和重视, 大力发展新能源已经是未来经济发展的重要方向, 电动汽车作为新能源系统中重要的部分, 受到国家的高度重视和支持, 电机及其控制技术的发展也使电动汽车领域逐渐走向成熟。

在电动汽车电机控制系统中常用的电机有四种: 直流电机、异步电机、开关磁阻电机和永磁同步电机^[1]。直流电动机控制简单易行、价格便宜但效率低, 不能得到较宽和平滑的调速性, 只适用于一些小功率且调速范围要求不大的场合; 异步电机结构简单, 运行性能好但功率因数滞后, 调速性能稍差; 开关磁阻电动机的结构简单, 但控制系统的设计相对复杂, 准确的数学模型很难建立; 永磁同步电机是采用永磁体代替电励磁的一种同步电机, 它具有功率密度和效率较高、体积较小、惯性低、响应快、强耦合、时变非线性等特点, 因此在电动汽车中广泛使用。

传统的电机控制系统中电机驱动装置与车载充电机分别使用不同的拓扑结构。电动汽车运行时, 蓄电池侧的

* 收稿日期: 2019-08-02; 修订日期: 2019-12-02

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目

作者简介: 张耀文 (1994—), 男, 硕士研究生, 从事开关电源及控制技术研究; 15538723799@163.com。

通信作者: 张政权 (1983—), 男, 博士, 副研究员, 从事脉冲功率技术和能量变换与控制技术研究; zhangzhengquan@163.com。

直流电经电机驱动器被调制为永磁同步电机需要的三相交流电;当电动汽车停止运行需要充电时,通常采用车载充电机连接电网或家用电,此时电网的交流电经过车载充电机的滤波环节和DC-AC环节变换为直流电,再依据蓄电池的不同充电阶段使用DC-DC变换器把直流电调压至需要的直流电压。

这种控制系统的不足之处在于电机驱动装置与车载充电机分别使用不同的拓扑结构,因此,在一种装置被使用时,另一种装置处于闲置状态,造成了资源的浪费^[2-3]。

本文提出了一种基于AC-link的新型电机驱动充电一体化拓扑结构,对其工作原理控制策略进行分析,并对此进行仿真分析验证。

1 拓扑结构

本文提出的驱动充电一体化拓扑结构如图1所示,拓扑结构中四个单向开关S1~S4组成全桥电路,根据模式的不同可以工作在逆变状态,也可以工作在整流状态; L_r 为谐振回路串联电感, C_r 为谐振回路串联电容,两者构成谐振回路;开关矩阵由六个双向开关组成,实现了能量的双向流动;接电机时,电容与电机内部电感组成二阶滤波器,与电网连接时,需串联三个电感构成滤波器,滤波器可以滤除电流谐波。与前面提到的驱动充电一体化拓扑结构相比,减少了DC-DC变换环节,降低了整体结构的体积和重量。

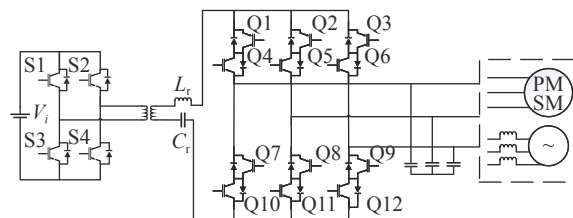


Fig. 1 New driving charging integrated topology

图1 新型驱动充电一体化拓扑结构

2 工作原理

定义三相期望输出电压瞬时值中绝对值最大的一相为 V_i ,绝对值最小的一相为 V_k ,剩余那一相为 V_j (其中, i , j 和 k 可以表示 a , b 和 c 任意一相),计算得到输出合成电压 V_{out} ,如式(1)所示^[4]。通过比较输出合成电压与输入电压的大小关系,可以确定工作状态为升压或降压,并以此选取合适的工作模式,通过控制每个开关周期各个工作模式的工作时序和导通时长,进而控制谐振槽为输出侧各相提供的电荷量,使得输出侧合成期望的瞬时电压^[5-7]。

$$V_{out} = \frac{|V_j||V_i - V_k|}{|V_j| + |V_k|} + \frac{|V_k||V_i - V_j|}{|V_j| + |V_k|} \quad (1)$$

该拓扑结构用于电机驱动时,能量从蓄电池侧流向电机,逆变电路决定蓄电池侧流出至谐振槽的总电荷量,开关矩阵中开关导通状态决定电荷量分配路径。依据各个开关通断情况可划分4个工作模式,如图2所示。

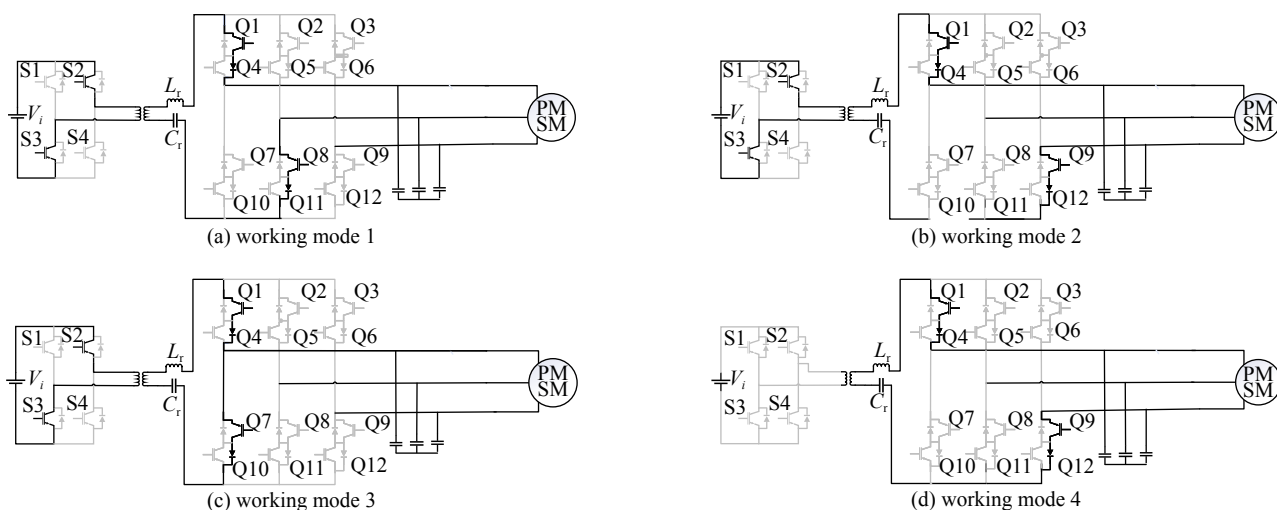


Fig. 2 Diagram of motor driving mode

图2 电机驱动工作模式图

基于电荷分配的思想,对各工作模式作简要描述。当逆变环节导通,蓄电池接入电路,其电压为谐振槽提供激励,此时开关矩阵可通过不同的开关组合,使谐振槽可为输出侧任意两相提供电荷量,如模式1和模式2;开关矩阵亦可导通同一桥臂的上下开关,与变压器的次级侧构成回路,使谐振槽不再为输出侧提供电荷量,电荷在谐振槽

累积,即为模式3;当逆变环节断开,蓄电池停止工作,不再为谐振槽提供电荷量,但谐振槽仍可通过其本身存储的电荷供给输出侧任意两相,如模式4。

降压模式下,为了实现降压目的,需相应减少单个开关周期内流入谐振槽的总电荷量。若期望输出的三相电压瞬时值 V_i , V_j 和 V_k 均不为0,则开关矩阵必须换流以保证每一相都有电流流经路径。此时,每个开关周期的工作模式应为2, 1, 4。若 V_j 为0,则谐振槽仅需为 i, k 两相提供电荷量,无需换流,故每个开关周期的工作模式应为1, 4。

升压模式下,利用谐振升压原理的同时应保证蓄电池全程参与工作。因此,其每个开关周期的工作模式在需要换流的情况下应为3, 2, 1。若无需换流,则为3, 2。

同理,该拓扑结构用于车载充电机时,能量从电网侧流向蓄电池侧,同样有4个工作模式,如图3所示。从谐振槽是否有激励,以及是否为输出侧提供电荷量来分析,工作模式5, 6, 7, 8可对应工作模式1, 2, 3, 4。因此,当处于升压模式时,工作模式应为7, 5和6;当处于降压模式时,工作模式应为5, 6和8。

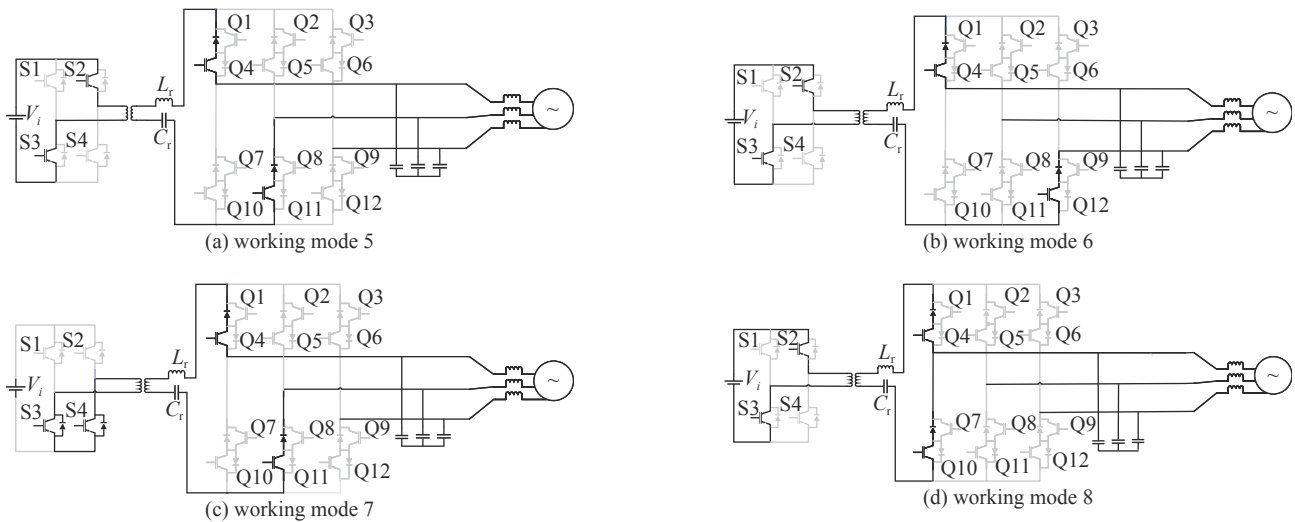


Fig. 3 Diagram of battery charging mode

图3 电池充电工作模式图

3 控制策略

3.1 电机数学模型

永磁同步电机主要是通过定子绕组电流和旋转磁场相互作用进行工作的^[8],当转子静止时,永磁体产生不在空间内旋转的直流磁场,三相定子绕组通入直流电流后形成的直流磁场与永磁体产生的直流磁场之间产生相互作用力,转子磁场受力后旋转,两磁场的相对位置发生变化,为使两磁场的相互作用力保持不变,则需要给定子绕组通入正弦交流电使其产生一个与永磁体磁场等效的电气旋转磁场,旋转磁场的转速为

$$n = n_1 = \frac{60f}{n_p} \quad (2)$$

式中: n 为转子的转速; n_1 为旋转磁场的转速; f 为三相正弦交流电的频率; n_p 为电机的磁极对数。因此可以通过改变输入电机的三相信号源的频率和电机的磁极对数来实现对转子转速的控制。为了实现对电机的控制,需要对永磁同步电机进行理论分析,永磁同步电机的数学模型主要包括电压方程、磁链方程、转矩方程和运动方程。由于永磁同步电机具有强耦合、时变、非线性等特点,电机在三相坐标系下的电压、磁链等都是非线性时变量,因此需要通过坐标变化将其变换到两相旋转坐标系下进行分析^[9-10]。永磁同步电机在三相定子坐标系下定子电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: u_a, u_b, u_c 分别为电机三相定子电压; i_a, i_b, i_c 分别为电机三相定子电流; ψ_a, ψ_b, ψ_c 分别为电机三相定子磁链; p 为微分算子; R_a, R_b, R_c 分别为电机三相定子电阻。由于上式所述的电压方程中存在非线性时变量,为了约去这些时变量,需要将电压方程通过坐标变换转变成两相旋转坐标系下的电压方程,即

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p & -\omega_e \\ \omega_e & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

同样,永磁同步电机在三相定子坐标系下的磁链方程也存在非线性时变量,坐标变换后可以得到两相旋转坐标系下的电机磁链方程,即

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \psi_f \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

两相旋转坐标系下的电机转矩方程

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (6)$$

两相旋转坐标系下的电机运动方程

$$T_e - T_l = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (7)$$

式中: T_e 电机输出电磁转矩; T_l 为负载转矩; J 为转动惯量; ω 为转子机械角速度; B 为电机粘性阻尼系数。

3.2 控制框图

电机控制系统如图 4 所示,电机控制采用磁场定向矢量控制,针对定子电流的励磁电流和转矩电流分别进行控制。采集电机三相定子电流、位置,位置经过速度计算得到电机实际转速,与给定转速一起经过式 (6), (7) 计算得到电流参考值 i_{qref} , 采用直轴电流为零的控制策略 $i_{dref} = 0$, 三相定子电流经过坐标变换得到 i_d 和 i_q , 与电流参考值一起经过电流调节得到电压参考值 u_{qref}^* , u_{dref}^* , 根据式 (4)~(5), 得到真正的控制量 u_{qref} 和 u_{dref} , 经过坐标反变换得到三相控制电压 u_a^* , u_b^* 和 u_c^* 。由三相控制电压计算得到输出合成电压 V_{out} , 由输出合成电压和输入电压的大小关系确定工作模式, 选择相应的工作模式。并进行导通时长的计算, 设计相应的驱动脉冲实现对开关的导通控制, 完成对电机的控制。

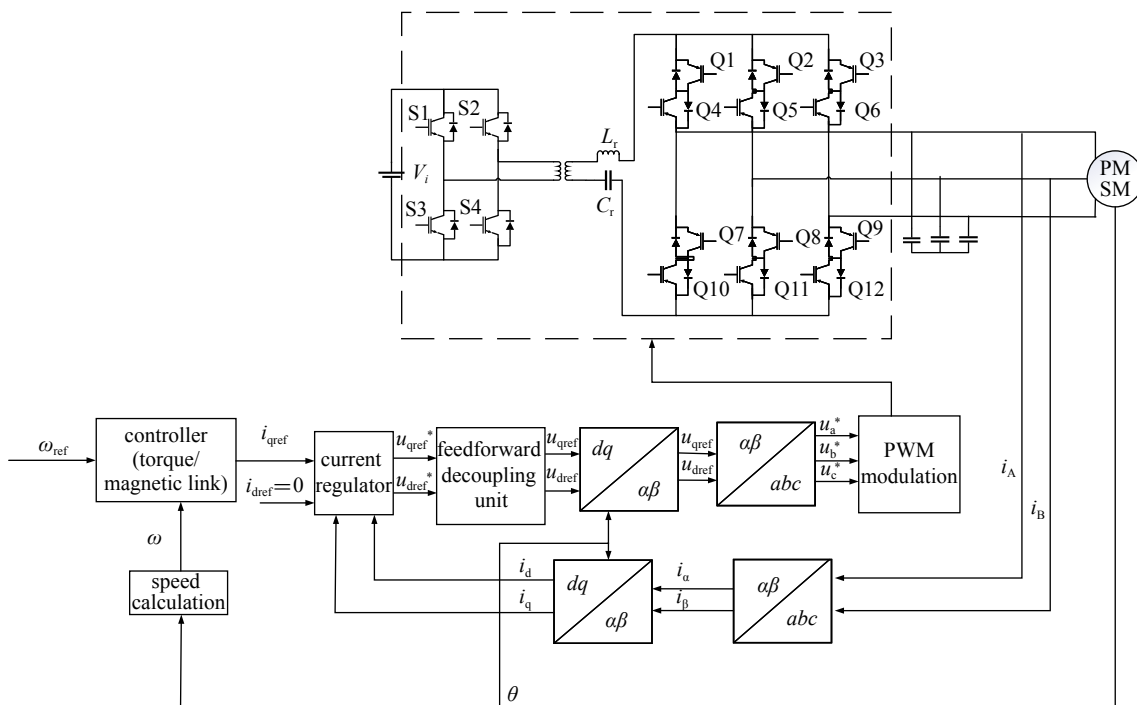


Fig. 4 Block diagram of motor control system

图 4 电机控制框图

当变换器工作在正常状态下时,它的工作模式是按图 2 和图 3 的工作模式有规律地变换,每个工作回路对应的开关管的通断也不同,可以分析正常工作和开关管故障时对应的输出状态来快速判断故障所在位置^[11]。故障诊断主要是依据逻辑电平的变换,因此可以通过诊断数个开关周期的电平变换来获得可靠的故障诊断结果。当电机出现故障时,输出电流波形异常,给予控制系统一个中断信号,控制电路不再向电机输出可得到指定要求转速的三

相交流电。

4 仿真验证

基于 MATLAB 的 Simulink 平台建立的电机驱动充电一体化仿真模型, 谐振电感为 $0.02 \mu\text{H}$, 谐振电容为 $0.9 \mu\text{F}$, 变压器的匝数比为 $1.5 : 1$, 永磁同步电机的参数为: 额定功率 50 W , 相电感 0.0073 H , 相电阻 12Ω , 额定转速 10000 r/min , 额定电压 266 V , 电机极对数 2, 转动惯量 $J=0.00028 \text{ g}\cdot\text{m}^2$ 。

在电机驱动的仿真研究中, 蓄电池侧电压设置为 430 V , 电路工作在降压模式下, 转速由外部给定为 10000 r/min , 仿真结果如图所示。由图 5 知, 电机的转速从 0 上升至指定转速共耗时 0.032 s , 整个过程加速转矩为恒定值 $0.14 \text{ N}\cdot\text{m}$, 转速以恒定加速度线性上升, 电机所消耗的功率线性增加。 0.03 s 后, 加速过程结束, 负载转矩降至 $0.05 \text{ N}\cdot\text{m}$, 电机转速到达设定值并维持不变, 电机功率也从 160 W 降至额定功率 50 W , 如图 6 所示。由图 7 可知, 无论是加速过程还是正常工作过程, 定子电流均呈现良好的三相正弦形态。

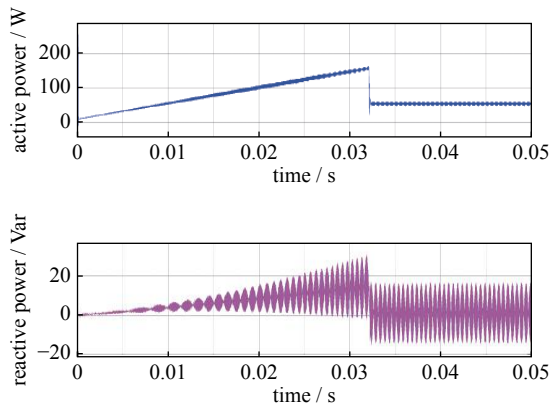


Fig. 6 Active power reactive power waveform

图 6 有功功率无功功率波形图

在电池充电的仿真研究中, 电网电压设置为 380 V , 50 Hz , 设定蓄电池侧全部充电阶段需求电压范围 $400 \sim 850 \text{ V}$, 当电池电压需 850 V 时, 电路工作在升压模式, 仿真结果如图 8(a) 所示。当电池电压需 400 V 时, 电路工作在降压模式, 仿真结果如图 8(b) 所示。可以看到, 两个模式下的输出电压均稳在了设定值, 该拓扑用于充电模式完全可以满足电池全部充电阶段的不同电压需求。

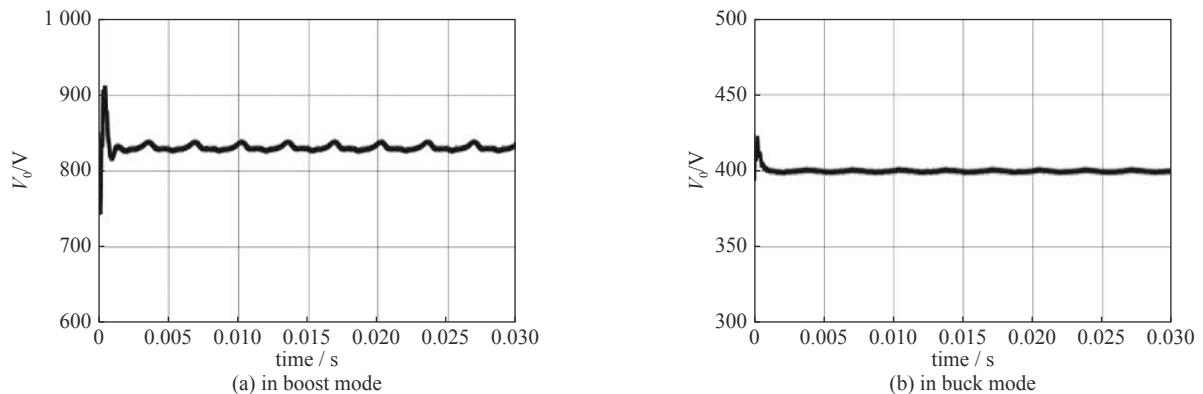


Fig. 8 Boost/buck output voltage waveform in charging mode

图 8 充电模式升压和降压输出电压波形

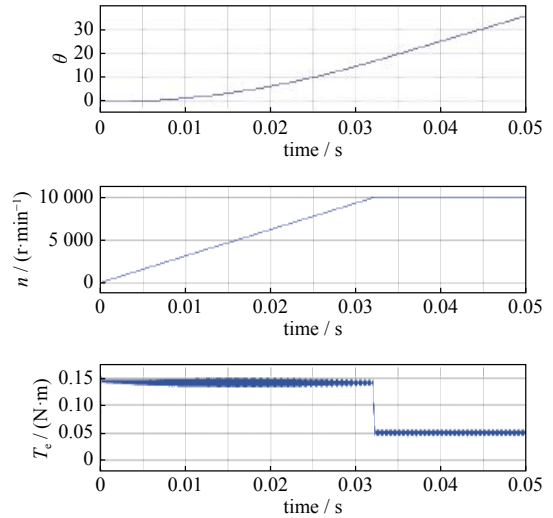


Fig. 5 Motor's main waveforms

图 5 电机主要波形图

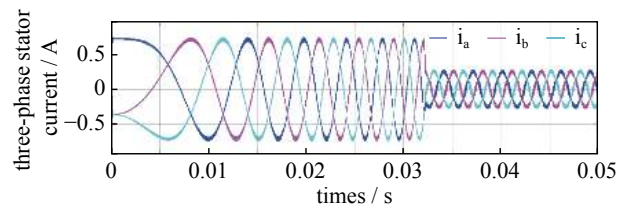


Fig. 7 Three-phase stator current waveforms

图 7 三相定子电流波形

5 结 论

本文提出了一种基于 AC-link 的新型电机驱动充电一体化拓扑结构,采用有效的控制策略并使用 Simulink 软件搭建仿真模型,对一体化拓扑结构和控制策略进行验证,仿真结果表明,该拓扑工作在充电模式时可以满足电池全部充电阶段的不同电压需求;工作于电机驱动模式,无论是加速过程还是正常工作过程,定子电流均呈现良好的三相正弦形态,并且转速可以达到给定值,从而证明了这种拓扑结构和控制策略的可行性。接下来会继续对控制系统的软件设计并搭建系统实验平台,通过实验平台对所提拓扑结构和控制策略可行性做进一步验证。

参考文献:

- [1] 司宇. 电动汽车PMSM位置检测失效的安全控制策略研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019: 5-7. (Si Yu. Research on safety control strategy of PMSM position detection failure of electric vehicle. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2019: 5-7)
- [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. (Liu Ying, Wang Hui, Qi Wenlong. A review of research on hybrid topologies integrating electric vehicle drive systems and battery charging[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(10): 143-149)
- [3] 高峰, 谈韵, 陶远鹏, 等. 电动汽车驱动充电一体化控制策略研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 73-76. (Gao Feng, Tan Yun, Tao Yuanpeng, et al. Research on integrated control strategy of electric vehicle drive and charge[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(2): 73-76)
- [4] 张政权, 刘庆想, 李相强, 等. 高频交流链接技术充电电源[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(3): 719-722. (Zhang Zhengquan, Liu Qingxiang, Li Xiangqiang, et al. Charging power supply with high frequency AC link technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(3): 719-722)
- [5] 张政权. 新型能量变换与控制技术在高功率微波系统中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012: 40-42. (Zhang Zhengquan. Application research of new energy conversion and control technology in high power microwave system. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012: 40-42)
- [6] 夏长亮, 阎彦. 矩阵变换器-永磁同步电机系统[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 1-9. (Xia Changliang, Yan Yan. Matrix converter-permanent magnet synchronous motor system[J]. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2015, 30(23): 1-9)
- [7] 武靖昊. 基于AC-Link串联谐振的Buck-Boost变换器的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018: 7-11. (Wu Jinghao. Research on buck-boost converter based on AC-link series resonance. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018: 7-11)
- [8] 袁登科, 徐延东, 李秀涛. 永磁同步电动机变频调速系统及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 20-25. (Yuan Dengke, Xu Yandong, Li Xiutao. Variable frequency speed regulation system of permanent magnet synchronous motor and its control. Beijing: China Mechine Press, 2015: 20-25)
- [9] 张丹. 基于DSP的永磁同步电机伺服控制算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017: 10-12. (Zhang Dan. Research on DSP-based servo control algorithm of PMSM. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017: 10-12)
- [10] 卜朗. LC并联谐振矩阵变换器及其永磁同步电机控制系统[D]. 成都: 西南交通大学, 2018: 39-42. (Bu Lang. LC parallel resonant matrix converter and its permanent magnet synchronous motor control system. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018: 39-42)
- [11] 汤清泉, 颜世超, 卢松升, 等. 三电平逆变器的功率管开路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 26-32. (Tang Qingquan, Yan Shichao, Lu Songsheng, et al. Open-circuit fault diagnosis of three-level inverter power tube[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(21): 26-32)