

基于电池功率的永磁同步电机预测电流控制

张利国¹ 厉风² 李宇剑² 李航² 张增财²

(1. 东北石油大学秦皇岛校区 秦皇岛 066000; 2. 东北石油大学 大庆 163000)

摘要: 纯电动汽车动力电池的荷电状态下降到一定程度时,会出现电池实际输出功率无法满足控制需求的情况。考虑电池功率对电机控制的影响,建立基于电池输出功率的永磁同步电机预测电流控制策略。使用无差拍预测控制预测电流值,进而计算电机期望功率。当电机期望功率超出电池功率时,通过降低目标转速和对控制电流限幅的方式降低期望功率值。通过仿真及实验验证,提出的控制策略能够在电池输出功率下降的情况下,降低电机期望功率,使电机能继续正常运转。并且与传统控制策略相比,电机动态响应速度更快,响应时间缩短 50% 以上,功率波动更小,动态性能明显提升。结果表明,基于电池输出功率的永磁同步电机电流预测控制策略是有效的。

关键词: 动力电池; 永磁同步电机; 无差拍预测控制; 功率

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4024

Predictive current control of permanent magnet synchronous motor based on battery power

Zhang Ligu¹ Li Feng² Li Yujian² Li Hang² Zhang Zengcai²

(1. Qinhuangdao Campus Northeast Petroleum University, Qinhuangdao 066000, China;

2. Northeast Petroleum University, Daqing 163000, China)

Abstract: When the state of charge of the pure electric vehicle power battery drops to a certain level, the actual output power of the battery cannot meet the control requirements. Considering the influence of battery power on motor control, a predictive current control strategy for permanent magnet synchronous motor (PMSM) based on battery output power is established. Use deadbeat predictive control to predict the current value and then calculate the desired motor power. When the desired power of the motor exceeds the battery power, the desired power value is reduced by reducing the target speed and limiting the control current. Through simulation and experimental verification, the control strategy proposed in this paper can reduce the expected power of the motor when the output power of the battery decreases, so that the motor can continue to operate normally. And compared with the traditional control strategy, the dynamic response speed of the motor is faster, the response time is shortened by more than 50%, the power fluctuation is smaller, and the dynamic performance is significantly improved. The results show that the current predictive control strategy of PMSM based on battery output power is effective.

Keywords: power battery; permanent magnet synchronous motor; deadbeat predictive control; power

0 引言

永磁同步电机具有高功率密度、高可靠性、高效率等特性,被广泛应用于电动汽车领域^[1-3]。纯电动汽车中,动力电池组为控制电机提供能量,动力电池的输出特性直接影响电机的动力性能^[4]。在电动汽车行驶过程中,电池荷电状态不断下降,电池实际输出能力随之下降,电池输出

功率等参数不断变化。当电池实际输出能力下降到一定程度时,会出现无法满足驱动电机当前的控制需求的情况。根据电池输出能力选择合适的电机控制方式,必须要建立起动力电池与驱动电机之间的联系。Mishra 等^[5]对基于太阳能电池供电的电机控制进行了建模研究。Ren 等^[6]研究了影响电动汽车行驶里程的因素,针对防爆电池电动汽车,提出了在电池能量密度较低的情况下,最大限

度地提高电动汽车行驶里程的方法。Shen 等^[7]考虑了电池与电机控制器的相互影响,优化了电池管理系统,但并未从电机控制的角度来考虑。上述研究给基于动力电池供电的永磁同步电机控制提供了参考。众多学者对电机功率进行了相关研究。何绍民等^[8]对电动汽车功率控制单元软件设计方面进行了研究。张剑等^[9]对电机单位功率因数控制策略进行了研究。黄庆等^[10]针对驱动策略中功率脉动大的问题,将预测控制与直接功率控制算法结合。Peng 等^[11]提出了一种考虑燃料电池效率和功率变化率的增量模糊逻辑方法,保证电池效率的同时产生增量输出功率。同时,电池输出功率是表示电池输出能力的重要参数,以功率为媒介,考虑电池输出功率对电机控制的影响,建立两者间的联系。电动汽车行驶过程中工况复杂多变,对电机控制的动态性能要求高,传统的PI控制器固有的迟滞性导致其动态性能较差,而预测电流控制动态响应迅速,能准确对电机电流进行控制^[12],被越来越多地应用到车用永磁同步电机的控制策略中^[13-18]。

针对上述问题,本文提出一种基于电池实际输出功率的永磁同步电机电流预测控制策略。在电流环中采用无差拍预测控制代替传统的PI控制,根据预测电流值计算期望功率,并将期望功率与电池实际功率进行比较与判定,如若电池实际输出功率小于电机期望功率,则更改电机控制策略。电机处于高速运转状态时,降低电机目标转速;电机处于启动加速状态时,对控制电流进行限幅。通过这种方式减小电机期望功率值,保证电机的正常运转,提高了电机的动态性能。通过仿真分析和实验,对控制策略的有效性进行了验证。

1 加入电池输出功率的永磁同步电机预测控制模型

电机的矢量控制是通过坐标变换解耦,将电机定子三相交流量变换为两相正交的直流量,通过电极电流矢量得到参考电压矢量,进而生成逆变器 PWM 开关信号。根据永磁同步电机的数学模型和无差拍预测电流控制算法,在将得到的两相旋转坐标系下的直、交轴电流转换为参考电压矢量的部分加入了功率模块,对电机的期望功率进行了计算,并且考虑了纯电动汽车动力电池实际输出功率的影响。

依据永磁同步电机在两相旋转坐标系下的电压方程和磁链方程,以 d 、 q 轴电流作为状态变量,可以得到电机电流的状态方程为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d}i_d + \frac{\omega_e L_q}{L_d}i_q + \frac{1}{L_d}u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q}i_q - \frac{\omega_e L_d}{L_q}i_d + \frac{1}{L_q}u_q - \frac{\omega_e}{L_q}\Psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_d 、 i_q 分别为直、交轴电流; u_d 、 u_q 分别为直、交轴电压; L_d 、 L_q 分别为直、交轴电感; ω_e 为电角速度; Ψ_f 为永磁体磁链; R_s 为定子电阻。

利用前置欧拉法将式(1)离散化,在 k 时刻根据前一周得到的电压矢量计算得到 $k+1$ 时刻的电流:

$$\begin{cases} I_d^{k+1} = I_d^k - \frac{R_s T_s}{L_d} I_d^k + \frac{L_q T_s \omega_e}{L_d} I_q^k + \frac{T_s}{L_d} U_d^k \\ I_q^{k+1} = I_q^k - \frac{R_s T_s}{L_d} I_q^k - \frac{L_d T_s \omega_e}{L_q} I_d^k + \frac{T_s}{L_q} U_q^k - \frac{\psi_f T_s \omega_e}{L_q} \end{cases} \quad (2)$$

进一步,预测 $k+2$ 时刻的电流为:

$$\begin{cases} I_d^{k+2} = I_d^{k+1} - \frac{R_s T_s}{L_d} I_d^{k+1} + \frac{L_q T_s \omega_e}{L_d} I_q^{k+1} + \frac{T_s}{L_d} U_d^{k+1} \\ I_q^{k+2} = I_q^{k+1} - \frac{R_s T_s}{L_d} I_q^{k+1} - \frac{L_d T_s \omega_e}{L_q} I_d^{k+1} + \frac{T_s}{L_q} U_q^{k+1} - \frac{\psi_f T_s \omega_e}{L_q} \end{cases} \quad (3)$$

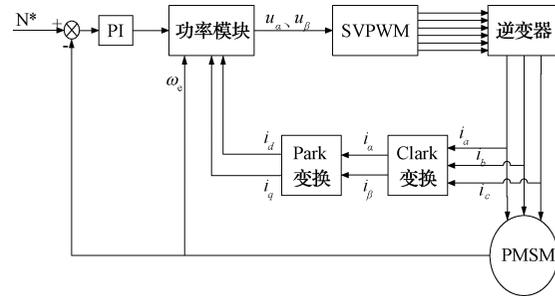


图1 考虑电池输出功率的永磁同步电机
电流预测控制框图

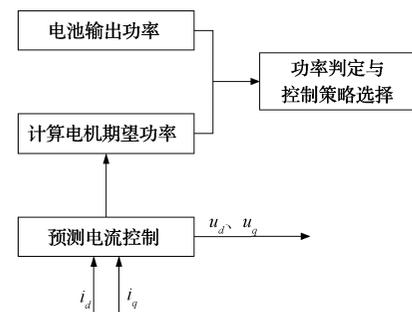


图2 功率模块

结合式(1)~(3),直轴和交轴的电压则可以表示为:

$$\begin{cases} U_d^{k+1} = \frac{L_d}{T_s} I_d^{k+2} + \left(R_s - \frac{L_d}{T_s}\right) I_d^{k+1} - \omega_e L_q I_q^{k+1} \\ U_q^{k+1} = \frac{L_q}{T_s} I_q^{k+2} + \left(R_s - \frac{L_q}{T_s}\right) I_q^{k+1} + \omega_e L_d I_d^{k+1} + \omega_e \Psi_f \end{cases} \quad (4)$$

电机的期望功率通过计算得到:

$$P = u_d i_d + u_q i_q \quad (5)$$

结合式(1)可得:

$$P = R_s (i_d^2 + i_q^2) + L_d i_d \frac{di_d}{dt} + L_q i_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d -$$

$$L_q)i_d i_q + \omega_e \psi_f i_q \quad (6)$$

根据式(3)、(4)计算出预测电流值和预测电压值,计算式(6)功率的离散化结果:

$$P^{k+1} = R_s [(i_d^{k+1})^2 + (i_q^{k+1})^2] + L_d i_d^{k+1} \frac{i_d^{k+2} - i_d^{k+1}}{T_s} + L_q i_q^{k+1} \frac{i_q^{k+2} - i_q^{k+1}}{T_s} + \omega_e i_d^{k+1} i_q^{k+1} (L_d - L_q) + i_q^{k+1} \omega_e \psi_f \quad (7)$$

2 功率判定下的永磁同步电机电流预测控制策略

动力电池荷电状态下降到一定程度时,会出现最大输出功率无法满足当前行驶需求的情况,影响电机的控制性能和电动汽车的驾驶体验。当汽车高速行驶时,输出功率不足会导致转速抖动增大,汽车起步时,则容易出现电池无法提供电机所需的输出功率而起步失败的情况。对此,在功率模块中,对电机期望功率与电池实际输出功率比较与判定,电池输出功率小于电机期望功率时,通过降低参考转速值、限制控制电流的大小的方式对电机进行控制。

2.1 功率判定

在功率模块中,得到实时电池实际输出功率以及永磁同步电机期望功率值后,将二者的大小进行比较与判定。若电池实际输出功率小于电机期望功率,则根据当前行驶状态发出降低目标转速或者控制电流限幅的指令。

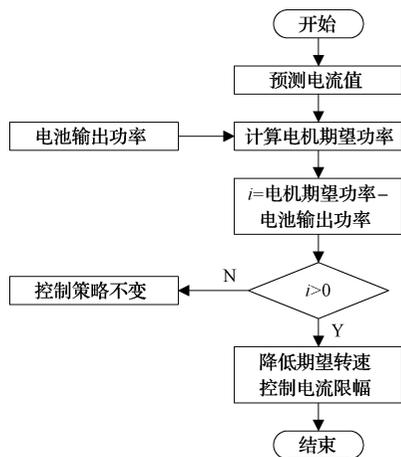


图3 功率判定流程

2.2 基于功率判定的永磁同步电机电流预测控制策略

以降低电机期望功率为出发点,根据电动汽车行驶状态的不同,选择不同的控制方式,电动汽车处于高速行驶状态时,选择降低目标转速;电动汽车处于起步、加速状态时,选择对控制电流进行限幅的控制方式。

1) 匀速行驶阶段

由于动力电池荷电状态和功率输出能力的下降是一个较为缓慢的过程,与此同时,电动汽车匀速行驶过程中,电机功率基本为恒定值,在小范围内有一定的波动。如图4所示。

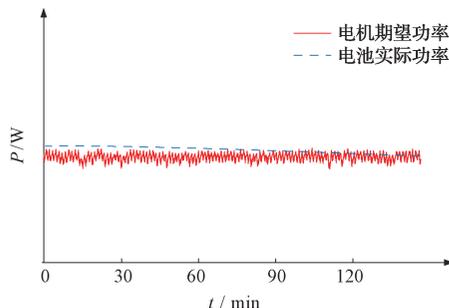


图4 汽车匀速状态的功率变化曲线

因此,在出现电池输出功率小于电机期望功率的情况后,二者的大小关系在一段时间内可能进行反复变化,而这种频繁的变动就会加剧驱动电机实际功率的变化,增大电机实际转速的抖动。对此制定转速控制策略,在原有基础上增加功率判定环节,比较电池最大输出功率和电机期望功率的大小,当出现电池输出功率满足不了电机当前正常运行要求的情况时,降低目标转速,从而降低电机期望功率,避免二者大小关系的频繁变动对电机转速稳定性产生的影响。

2) 起步及加速阶段

电动汽车起步与加速阶段,对功率要求较高。在电动汽车起步、加速的极短时间内,电池所能输出的最大输出功率可以看作不变。而电机期望功率的瞬时值较大。如图5所示。

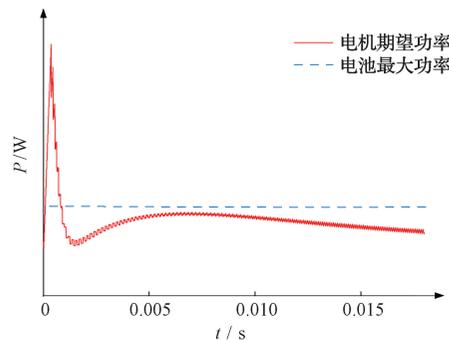


图5 汽车起步加速状态的功率变化曲线

加速和启动的初期,在电池荷电状态较低的情况下,电池输出功率很难满足电机需求,如果不采取措施,容易出现起步、加速失败的情况。对于电动汽车起步与加速的状态,根据电池最大功率输出能力对电机控制电流进行限制,电池最大输出功率越大,电流值的限幅数值越大;反之,电池最大输出功率越小,电流值的限幅数值越小。通过对控制电流的限制,降低电机期望的瞬时功率,使其在电池输出功率范围内。

3 仿真分析与实验验证

在 MATLAB/Simulink 中搭建控制策略模型,进行仿真。所用永磁同步电机参数设置如表1所示。

表1 永磁同步电机主要参数

参数	数值
定子电阻/ Ω	1.5
电感/mH	34
磁链/ W^b	0.58
极对数	4
额定功率/kW	1.5
额定转速/ $(r \cdot \text{min}^{-1})$	1 500

对匀速行驶过程中用到的降速控制策略进行仿真,如图6、7所示。电池荷电状态设置为40%SOC,电机初始参考转速设置为1 000 r/min。在 $t=0.4$ s时人为更改电池最大输出功率,模拟汽车长时间行驶后电池输出功率下降后的数值。对比采用传统PI控制和采用无差拍电流预测控制的控制效果。

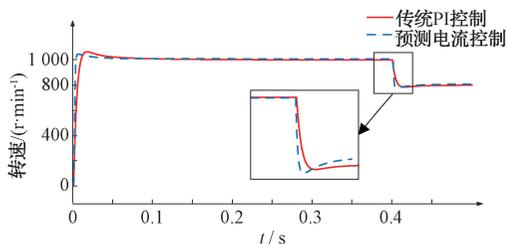


图6 降速控制下的电机转速变化曲线

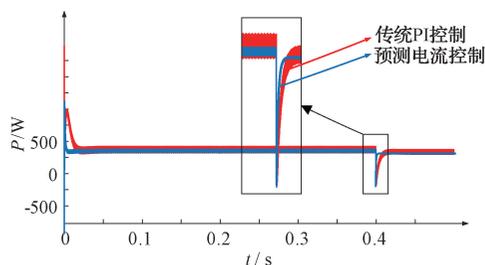


图7 降速控制下的电机功率变化曲线

由图7可以看出,本文提出的在匀速行驶阶段的降速控制策略可以达到预期效果。在 $t=0.4$ s处出现电机期望功率不及电池最大输出功率的情况,电机目标转速随即降低,电机功率也随之下降。并且通过对比可以看出,预测电流控制策略比传统的PI控制响应速度更快,响应时间由原来的0.07 s缩短为0.03 s,功率波动更小,更适合应用在电池输出功率不足时出现突发情况的控制策略中。

针对电动汽车起步加速阶段的控制策略进行仿真,如图8、9所示。电池荷电状态设置为60%SOC,电机参考转速设置为1 000 r/min。对比采用传统PI控制和采用无差拍电流预测控制的控制效果。

由图9可以看出,本文提出的对控制电流进行限幅的控制策略可以达到预期效果。由图7可以看出,电流限幅之前,电机启动阶段,瞬时功率极大,可以达到数千瓦,而

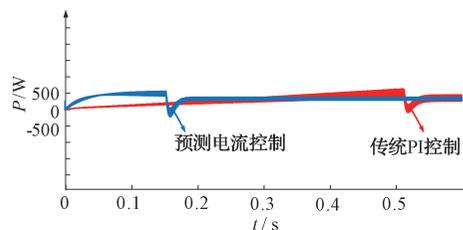


图8 控制电流限幅下的电机功率变化曲线

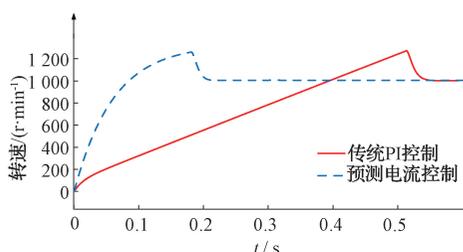


图9 控制电流限幅下的电机转速变化曲线

电机稳定运行时的功率在500 W左右。从图8可以看出,对控制电流限幅之后,电机起步阶段的瞬时功率大幅下降,满足电池输出能力。对比图6和9,在对控制电流限幅之后,电机启动加速的时间增加,对于传统PI控制来说,电机从启动到稳定的时间由0.07 s增加到了0.55 s,而预测电流控制策略中则是由0.03 s增加到了0.21 s。限制控制电流大小,延长电机加速时间,从而降低电机期望功率,避免因电机功率超出电池输出能力而导致的启动加速失败的情况出现。而且将传统PI控制与预测电流控制进行对比,发现预测电流控制的响应速度明显优于PI控制。

使用由研旭的快速原型控制器SP2000和Simulink组成的半实物仿真实验平台进行实验验证,该实验平台可以在Simulink中搭建好的仿真模型通过编译软件编译成可执行文件,下载到快速原型控制器中运行,搭配永磁同步电机和相应硬件电路进行实际的硬件控制。所测数据可以通过上位机软件进行查看。如图10所示。



图10 半实物仿真实验平台

将基于电池功率的永磁同步电机PI控制策略编译烧录到快速原型控制器中运行,再将返回到上位机的数据绘

制成曲线,如图11和12所示,其中电机转速成功降低,电机三相电流也明显减小。经实验验证,这种控制思想是可行的。

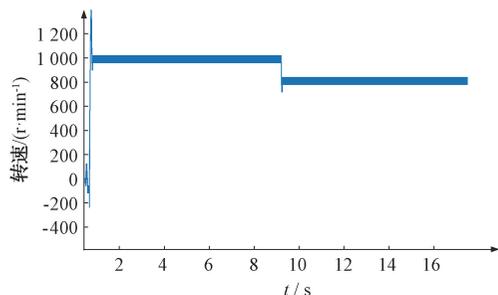


图11 电机转速变化曲线

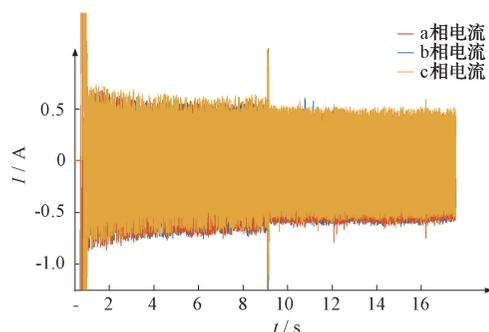


图12 电机三相电流变化曲线

4 结论

本文在永磁同步电机控制模型基础上,引入了电池功率与电机功率的比较,提出了一种基于电池输出功率的永磁同步电机电流预测控制策略。能够在电池输出功率小于电机期望功率时更改电机控制方式,通过功率判定模块,比较电池输出功率与电机期望功率的大小,进行降低目标转速与控制电流限幅的操作。实验结果表明,本文提出的控制策略能在电池输出功率不满足电机要求时,更改电机控制方式,并成功降低电机功率使其在电池输出范围内。与传统控制策略相比,电机响应速度加快,功率波动减小,动态性能明显提升。

参考文献

- [1] 张丽,朱孝勇,左月飞. 电动汽车用转子永磁型无刷电机与控制系统容错技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2019,39(6):1792-1802,1875.
- [2] 邓聪颖,舒杰,陈翔,等. 多参数变化下基于参数辨识的永磁同步电机偏差解耦控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2022,43(6):260-268.
- [3] 贾宁,程瑶,田又源. 基于电流前馈的电动汽车永磁同步电机矢量控制[J]. 国外电子测量技术, 2021,

40(12):61-66.

- [4] 张利国. 纯电动汽车电池参数与电机特性融合控制方法研究[D]. 西安:西北工业大学,2018.
- [5] MISHRA S, VARSHNEY A, SINGH B, et al. Driving cycle based modelling and control of solar-battery fed relsyn motor drive for light electric vehicle with energy regeneration [C]. 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2021: 5008-5013.
- [6] REN Z Y. Research on influence factors affecting driving range of flame-proof battery electric vehicles[C]. 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). IEEE, 2019: 1982-1986.
- [7] SHEN M, GAO Q. A review on battery management system from the modeling efforts to its multiapplication and integration [J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(10): 5042-5075.
- [8] 何绍民,杨欢,王海兵,等. 电动汽车功率控制单元软件数字化设计研究综述及展望[J]. 电工技术学报, 2021,36(24):5101-5114.
- [9] 张剑,李文善,温旭辉,等. 基于电压功率角前馈的永磁同步电机单位功率因数控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020,40(S1):281-293.
- [10] 黄庆,倪大成,马长军,等. 特种车辆电驱动系统的预测直接功率控制策略[J]. 兵工学报, 2021, 42(10): 2123-2129.
- [11] PENG H, WANG J, SHEN W, et al. Compound control for energy management of the hybrid ultracapacitor-battery electric drive systems [J]. Energy, 2019, 175: 309-319.
- [12] 刘建强,郝文瑾,陈爱峰,等. 永磁同步电机无差拍预测电流控制策略研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(8): 62-72.
- [13] 乔禹淇,杨瑞峰,郭晨霞. 永磁同步电机速度-电流预测的直接速度控制[J]. 电子测量技术, 2021,44(6): 1-5.
- [14] SUN X, CAO J, LEI G, et al. A robust deadbeat predictive controller with delay compensation based on composite sliding-mode observer for PMSMs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9): 10742-10752.
- [15] 高俊,张河山,彭志远,等. 基于状态转移约束的永磁同步电机模型预测控制策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2021,35(8):86-92.

- [16] XU C, HAN Z, LU S. Deadbeat predictive current control for permanent magnet synchronous machines with closed-form error compensation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(5): 5018-5030.
- [17] ZHOU Y, ZHANG S, ZHANG C, et al. Current prediction error based parameter identification method for SPMSM with deadbeat predictive current control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 1700-1710.
- [18] 靳东松,刘凌. 永磁同步电机的改进无差拍预测抗扰前馈控制[J]. 西安交通大学学报,2022,56(7):38-46.

作者简介

张利国,博士,副教授,主要研究方向为智能仪表与电机控制等。

E-mail:nai_fan@163.com

厉风,硕士研究生,主要研究方向为纯电动汽车永磁同步电机控制等。

E-mail:syntax_uu@163.com