

电动汽车牵引用永磁同步电机的场路联合仿真^{*}

黄 闯, 代 颖, 赵剑飞, 王小飞

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘 要: 基于 Maxwell 2D 和 Simplerer 联合仿真平台, 以 1 台额定功率 20 kW 的电动汽车牵引用永磁同步电机为研究对象, 建立考虑电机饱和问题和损耗影响的电机牵引系统仿真模型。通过分析恒转矩工作区间 $i_d = 0$ 控制与 MTPA 控制、高速运行区间 $i_d = 0$ 控制与弱磁控制的牵引特性, 具体对比了电机的磁链、电流、转矩脉动、驱动效率等特性。通过试验测试, 验证了仿真方法的正确性, 为电动汽车牵引电机调速系统的控制仿真提供了参考。

关键词: 永磁同步电机; 电动汽车; 联合仿真; 最大转矩电流比; 弱磁

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)06-0102-07

Field Circuit Co-simulation of Traction PMSM for Electric Vehicle^{*}

HUANG Chuang, DAI Ying, ZHAO Jianfei, WANG Xiaofei

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Based on the Maxwell 2D and Simplerer co-simulation platform, a permanent magnet synchronous motor (PMSM) for electric vehicle traction with a rated power of 20 kW was used to study the simulation model of the motor traction system which could consider the motor saturation problem and the loss, analyzing and comparing the constant torque interval $i_d = 0$ control and MTPA control, high speed interval $i_d = 0$ controlled and weakened the magnetic control traction characteristics-specific comparative analysis of the motor flux, current, torque ripple, drive efficiency and other characteristics. And the correctness of the simulation method was validated through experimental tests, and provided reference for the control simulation of electric traction motor speed control system.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); electric vehicle; co-simulation; maximum torque per ampere (MTPA); weaknesses

0 引 言

永 磁 同 步 电 机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 是电动汽车牵引用电机的主要类型。2016 年整个新能源汽车驱动电机的装机量达 59.5 万台, 其中 PMSM 装机量超过 45 万台, 占比高达 77%^[1-5]。电机的饱和问题及各种损耗的存在, 增加了电机数学模型精确建模的难度, 导致电机控制系统中难以得到较为准确的反馈量, 降低了控制效果。因此, 本文基于

Ansys Maxwell 2D 和 simplorer 场路联合仿真平台, 模拟实际电机牵引系统运行过程中各种损耗和磁路饱和存在时电机牵引系统的外特性。以 1 台 20 kW 电动汽车牵引用 PMSM 为研究对象, 建立电机的 2D 电磁场和控制系统的场路耦合仿真模型, 分析控制策略对电机牵引系统性能实现的影响。仿真结果能较为准确地反映实际电机的运行特性。

20 kW 电动汽车牵引用 PMSM 的外形如图 1 所示。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51007050); 台达环境与教育基金会《电力电子科教发展计划》项目(DREG2016015)

作者简介: 黄 闯(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机的驱动控制, 电机的多物理场分析。

代 颖(1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电机设计, 电机的振动噪声, 电机的多物理场分析。

赵剑飞(1977—), 男, 博士, 研究方向为电力电子与电力传动。

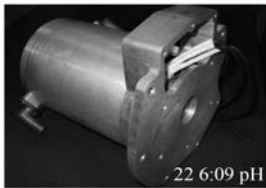


图1 20 kW 电动汽车牵引用 PMSM

1 PMSM 牵引系统的场路联合仿真

电机的 2D 电磁场仿真模型如图 2 所示,场路联合仿真的主要参数如表 1 所示。

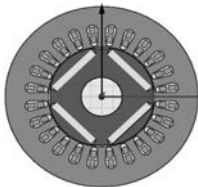


图2 内置式 PMSM

表 1 内置式 PMSM 参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	20
极数	4
额定电压/V	288
额定电流/A	120
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
冷却方式	水冷

2 矢量控制联合仿真模型

直接转矩控制 (Direct Torque Control, DTC) 采用两个 Bang-bang 控制器分别对转矩和磁链幅值进行控制,提高了转矩响应速度,但逆变器开关频率不恒定,实际开关频率不够高,在一个数字控制周期中所选用的有效电压矢量与期望的电压矢量不一致导致磁链和转矩脉动过大,调速范围较小,因此本文采用矢量控制。

由运动方程可知,电机的转动惯量 J 、阻尼系数 B 和磁极对数 p 是确定的。对于负载转矩,在空载、加载时也可以看成是确定的,电机的转速只与电磁转矩有关,而电机的控制系统实质是对电机的速度进行控制以及调节,因此可以通过控制转矩来控制电机转速。利用矢量控制理论,将定子电流分解成交轴分量和直轴分量,保持直轴分量为零,通过调节交轴电流实现对转矩的控制,进而实现转速控制,即 $i_d = 0$ 控制。本文样机负载试验受电机控制器功能限制,控制系统采用 $i_d = 0$ 控制,因此首先分析车用 PMSM 采用 $i_d = 0$ 控制方法时电机的转矩-转速特性。建立样机的 $i_d = 0$ 矢量控制场路联合仿真模型如图 3 所示。

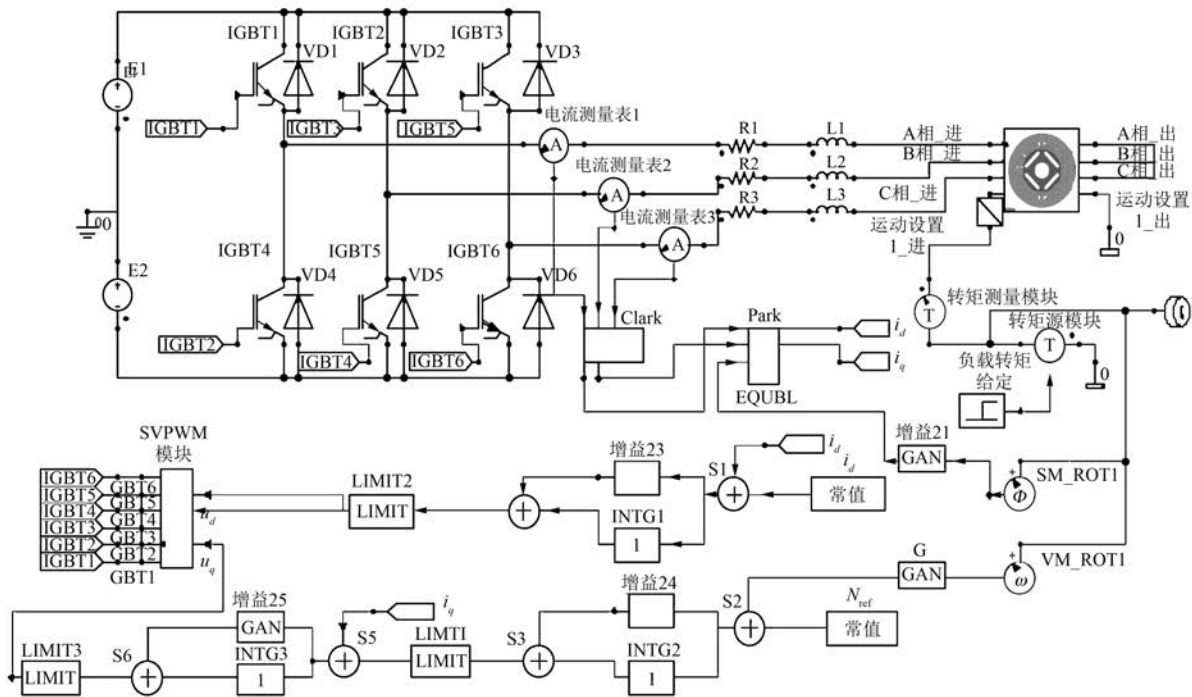


图3 PMSM 联合仿真模型

电动汽车牵引电机恒转矩最高转速工作点是车用电机的关键工作点之一。本文样机恒转矩最高转速工作点为 3 600 r/min, 仿真该工作点的外特性(直流母线电压 540 V, 0~0.16 s 负载给定转矩 50 N·m, 速度给定 3 600 r/min), 得出的仿真波形分别如图 4~图 6 所示。

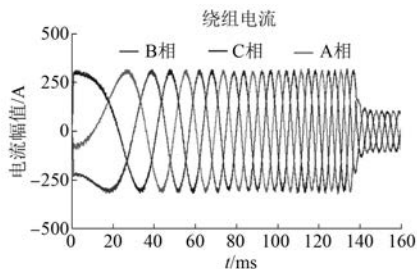


图 4 电流波形

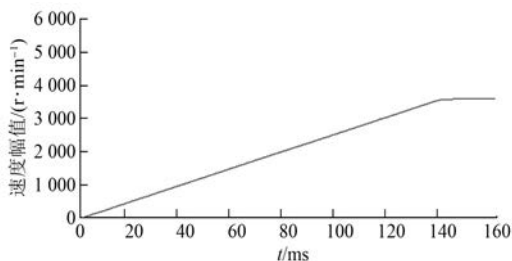


图 5 速度波形

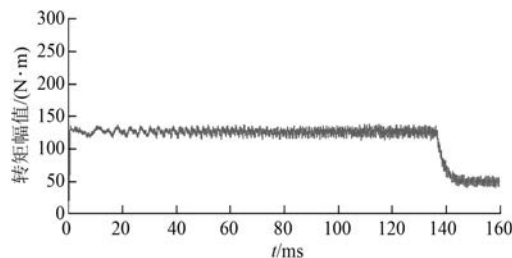


图 6 转矩波形

由图 4~图 6 可知电机带 50 N·m 负载运行, 在 0~0.136 s 时恒转矩运行, 此时对应的速度区间为 0~3 500 r/min。电机起动时电流较大, 在 0.144 s 电流达到稳定值, 转矩和速度跟踪上给定值, 电机达到稳定运行时电机效率为 93.05%。由于 IGBT 开关过程中电流的突变, 电流中含有少量的高频谐波分量。

为验证负载和转速突变对电机的影响, 本文在 0~0.185 s 负载转矩给定 60 N·m, 速度给定 3 600 r/min; 0.185~0.235 s 负载转矩给定

40 N·m, 速度给定 4 000 r/min; 0.235~0.3 s 负载转矩给定 20 N·m, 速度给定 5 200 r/min。仿真波形如图 7~图 9 所示。

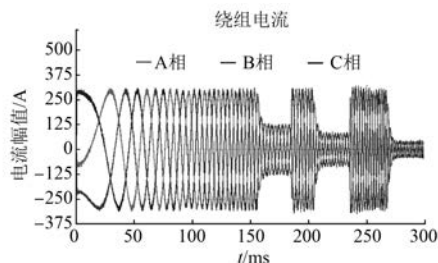


图 7 电流波形

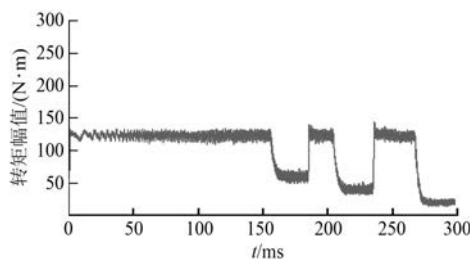


图 8 转矩波形

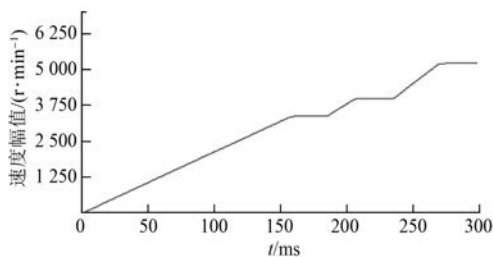


图 9 速度波形

由图 7 可知, 在电机加速运行过程中, 电流的幅值较大, 电机输出较大的电磁转矩使电机转速快速跟踪指令转速。由图 8、图 9 可知电机转速从 3 600 r/min 升到 4 000 r/min 耗时 0.02 s, 从 4 000 r/min 升到 5 200 r/min 耗时 0.033 s, 满足技术指标要求; 由电流和转矩波形可知 20 kW 电机运行在 0.238~0.268 s 时, 电机提供的转矩下降。由于 $i_d=0$ 控制不能弱磁, 所以电机带载运行最高转速为 5 200 r/min。

样机外特性测试结果如图 10 所示, 电机负载最高转速 5 200 r/min, 与仿真结果一致。

电动汽车牵引用 PMSM 转子采用永磁体内置式结构, $i_d=0$ 控制不能利用磁阻转矩提高电磁转

矩。此控制方式不能充分发挥内置式结构的优势,因而本文基速以下采用最大转矩电流比(Maximum Torque Per Ampere, MTPA)控制提高电磁转矩,基速以上采用弱磁控制提高负载最高转速。

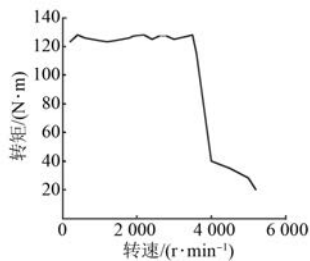


图 10 样机转矩-转速特性试验曲线

样机的实验室测试现场如图 11 所示。

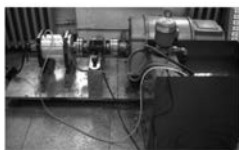


图 11 电机试验现场照片

3 MTPA

采用 MTPA, 指定电流值, 可合理利用磁阻转矩、提高电磁转矩输出; 指定转矩值, 可降低定子电流, 减小铜耗。

电机恒转矩最高转速工作点(直流母线电压 540 V, 0~0.16 s 负载给定 60 N·m, 速度给定 3 600 r/min), MTPA 仿真波如图 12~图 14 所示。

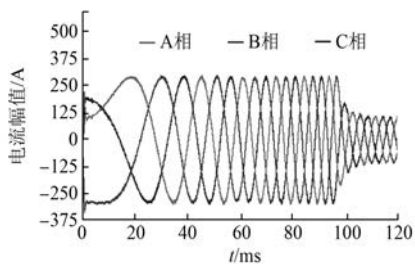


图 12 MTPA 控制电流波形

由图 12~图 14 可知, 采用 MTPA 控制速度追踪上给定值需要 0.1 s, 比 $i_d=0$ 控制 0.164 s 追踪到相同转速时间要短, 因此采用 MTPA 控制电机牵引系统对转矩变化的响应更快。

仿真对比峰值转矩工作点采用 MTPA 和 $i_d=0$ 控制两种控制方式时电机牵引系统的牵引

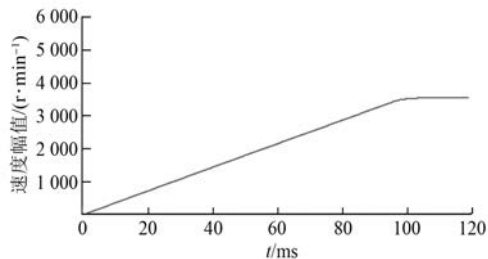


图 13 MTPA 速度波形

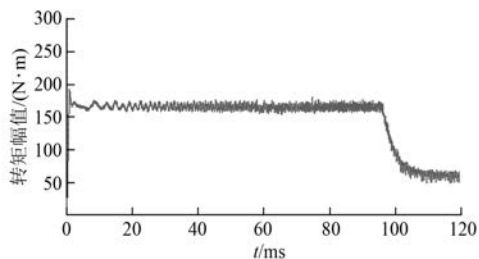


图 14 MTPA 转矩波形

特性, 两种控制方式的转矩波形仿真结果如图 15 所示。在相同电流情况下, 采用 MTPA 控制电机的输出转矩为 165 N·m, 采用 $i_d=0$ 控制电机的输出转矩为 123 N·m, 采用最大转矩电流比控制比 $i_d=0$ 控制转矩增加 22 N·m; 在电机带载 60 N·m、速度 3 600 r/min 稳定运行的条件下, 采用 $i_d=0$ 控制时电机的驱动效率为 90%, 采用 MTPA 电机的驱动效率为 93%, 采用 MTPA 控制电机输出转矩和效率均有提高。

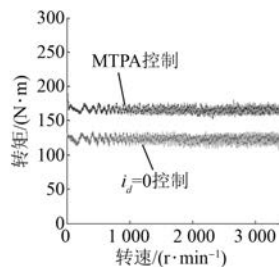


图 15 不同控制方式恒转矩区转矩比较

随着速度的增加, 反电动势增大。当所需电压达到逆变器容量的极限值时, 若要保持恒功率运行, 必须通过弱磁削弱电机的负载反电动势。

4 弱磁控制

电动汽车牵引用 PMSM 弱磁工作在高速区时, 要保持一定的转矩输出能力, 对电流控制环要

求比较高,传统的矢量控制中电流 PI 调节器只能对交直轴反馈的电流进行控制,忽略了交直轴电流的耦合作用^[6]。由电压方程可知速度越高,这种耦合效应越明显,对电流和转矩的影响也越突出。为了对电流进行精确的控制,本文采用反馈补偿的方式解耦交、直轴电流,电流的解耦原理如图 16 所示。

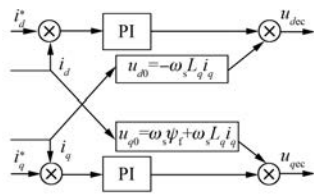


图 16 电流解耦原理图

电流解耦方程为

$$u_d = u_d^* - \omega_e i_q L_q$$
$$u_q = u_q^* + \omega_e \psi_f + \omega_e i_d L_d$$

式中： u_d^* 、 u_q^* ——电流 PI 调节器后的电压给定值；

i_d 、 i_q ——经过 3s/2r 变换得到的实际值；

u_d 、 u_q ——经电枢反应和反电动势补偿后得到的电压参考值。

在经 Park 反变换后作为 SVPWM 的输入信号,最终实现交直轴电流之间的解耦,电流响应和转矩输出脉动更小。

与 $i_d=0$ 控制高速工作点给定一致,速度给定值为 5 200 r/min,负载转矩给定 20 N·m,电机牵引系统的磁链波形、电流波形、转速波形、转矩波形分别如图 17~图 20 所示。

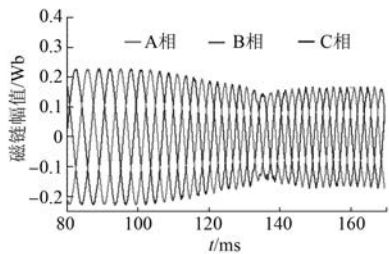


图 17 磁链波形

由图 17 可知,弱磁后磁通减小,在 0.14 s 时磁通逐步稳定,电机稳态运行。样机恒转矩运行时三相定子磁链幅值约为 0.23 Wb;弱磁控制稳定运行时由于直轴电流的去磁作用,定子磁链幅值减小,为 0.17 Wb。

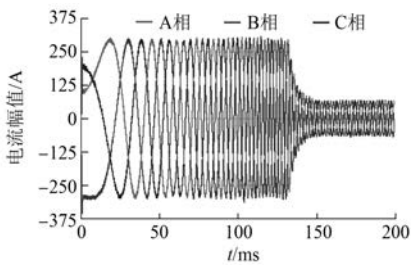


图 18 弱磁控制三相电流波形

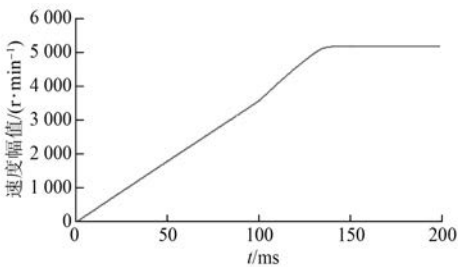


图 19 弱磁控制速度波形

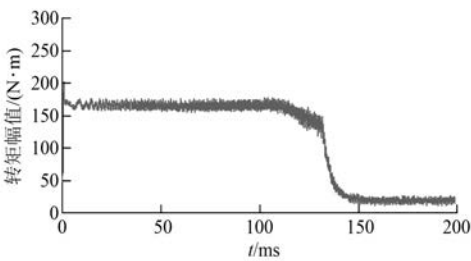


图 20 弱磁控制转矩波形

由图 19、图 20 可知,采用弱磁控制直轴电流的去磁效应导致磁场畸变,使弱磁控制时电机的转矩脉动增大、效率降低。相对 $i_d=0$ 控制,电机的转矩脉动增加了 14% 左右,驱动效率降低了 2.44%。5 200 r/min 弱磁控制三相电流波形如图 21 所示。

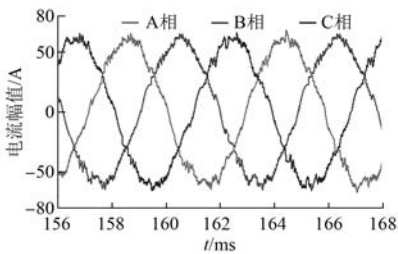


图 21 5 200 r/min 弱磁控制三相电流波形

5 200 r/min $i_d=0$ 控制三相电流波形如图 22 所示。

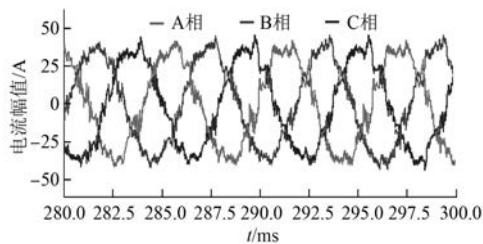


图 22 5 200 r/min $i_d=0$ 控制三相电流波形

5 200 r/min 弱磁控制电流谐波波形如图 23 所示。

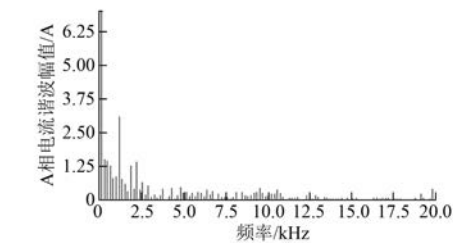


图 23 5 200 r/min 弱磁控制电流谐波波形

5 200 r/min $i_d=0$ 控制电流谐波波形如图 24 所示。

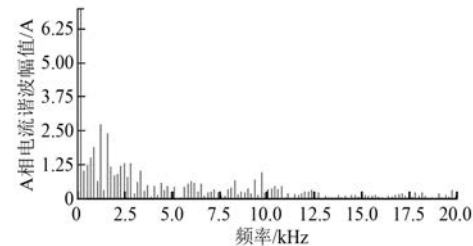


图 24 5 200 r/min $i_d=0$ 控制电流谐波波形

5 200 r/min、20 N·m 工作点2种控制方法的电流谐波对比如表 2 所示。

表 2 电流谐波幅值

次数	基波	3	5	7	9	11	13
$i_d=0$ 控制/A	37.69	1.25	1.9	2.74	2.41	0.82	1.23
弱磁控制/A	63.11	1.45	0.82	3.09	1.27	1.27	1.44

由表 2 可知,弱磁控制在 5 200 r/min 时 3、7、11、13 次谐波幅值均高于 $i_d=0$ 控制,从而导致了转矩脉动的增大和效率的降低。但采用弱磁控制,电机负载运行最高转速可达到 6 000 r/min,比 $i_d=0$ 控制的调速范围超出了 16%。弱磁控制转矩-转速特性曲线如图 25 所示。

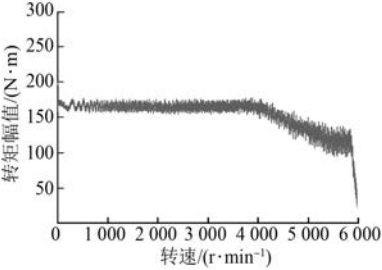


图 25 弱磁控制转矩-转速特性曲线

通过以上分析可知,电动汽车牵引用 PMSM 恒转矩运行区间适合采用 MTPA 控制,恒转矩最高转速以上转速工作点适合采用弱磁控制,实现电机的高速带载运行。

5 结 语

本文以 1 台 20 kW 红旗牌混合动力轿车牵引用内置式 PMSM 为研究对象。基于 Ansys Maxwell 2D 与 Simplerer 联合仿真平台,对电动汽车牵引用 PMSM 进行场路双向耦合仿真。仿真结果准确地反映了电机在起动和稳定运行时电机各相电流的走势和电机输出的外特性。本文首先建立电机牵引系统的 $i_d=0$ 控制仿真模型,通过仿真与试验结果的对比,验证了仿真方法的正确性。然后提出低速采用 MTPA 控制利用磁阻转矩提高电机转矩输出,高速通过弱磁控制提高电机高速负载运行的最高转速,并与 $i_d=0$ 控制进行了对比。对比结果表明,低速采用 MTPA 控制,电机最大输出转矩相对 $i_d=0$ 控制增加了 22 N·m,高速采用弱磁控制,电机的转矩脉动增大、驱动效率下降,但电机的调速范围增加了 16%。综合考虑电机的各项性能,低速采用 MTPA 控制,高速采用弱磁控制更适合样机。

【参考文献】

[1] 王建设.电动汽车驱动用永磁同步电机的设计与分析[D].上海:上海电机学院,2017.

[2] 田硕,阳林,叶磊,等.电动汽车动力系统矢量控制策略仿真研究[J].机电工程技术,2017,46(8): 164-168.

[3] 郑志军.电力牵引永磁同步电机矢量控制与调制算研究[D].成都:西南交通大学,2016.

[4] 武龙星.电动汽车用永磁同步电动机弱磁控制策略综述[J].轻工科技,2015,19(4): 66-67.

- [5] 汤新舟. 永磁同步电机的矢量控制系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [6] 张鹏. 永磁同步电动机弱磁调速控制方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [7] 方晓春, 胡太元, 林飞, 等. 基于交直流电流耦合的单电流调节器永磁同步电机弱磁控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 141-147.
- [8] 陈宁士, 张跃, 桂卫华, 等. 内埋式永磁同步电机驱动系统的弱磁控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(6): 718-723.
- [9] CHE H S, LEVI E, JONES M. Current control methods for an asymmetrical six-phase induction motor drive [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1): 407-417.
- [10] PILLAY P, KRISHNAN R. Modeling, simulation and analysis of permanent magnet motor drives, Part 1: The permanent-magnet synchronous motor drive [J]. IEEE Trans Ind Applicat, 1989(25): 265-273.
- [11] DING S H, WU Q H. Research on inverse model based on and analytic method for induction motor [J]. International Journal of Automation & Control, 2011, 5(4): 356-370.
- [12] BOWES S R, LAI Y S. The relationship between space-vector modulation and regular-sampled PWM [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 1997, 44(5): 670-679.
- [13] YAZDANI D, KHAJEHODDIN S A, BAKHSHAI A. Full utilization of the inverter in split-phase drives by means of a dual three-phase space vector classification algorithm [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2009, 56(1): 120-129.
- [14] 纪志成, 周寰, 李三东. 基于 PSIM 永磁同步电机矢量控制系统的仿真建模[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 898-901.
- [15] 左曙光, 林福, 吴旭东. 车用永磁同步电机转矩解析模型和波动特性分析[J]. 浙江大学学报, 2015, 49(9): 1731-1736.
- [16] 王斯博, 赵慧超, 李志宇, 等. 电动车永磁同步电机转矩波动分析及测试[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(9): 95-101.
- [17] 杨贵杰, 孙力, 崔乃政. 空间矢量脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 79-83.
- [18] 王立欣, 王宇野, 王丰欣. 基于 DSP 的电动车用永磁同步电机的控制方法[J]. 电机与控制学报, 2005, 9(1): 51-54.

收稿日期: 2017 -12 -06

(上接第 87 页)

- [8] 肖蕙蕙, 熊隽迪, 李川, 等. 基于定子电流监测方法的电机故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(1): 54-57.
- [9] 张文秀, 武新芳. 风电机组状态监测与故障诊断相关技术研究[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(2): 50-56.
- [10] YU J. Local and nonlocal preserving projection for bearing defect classification and performance assessment [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2012, 59(5): 2363-2376.
- [11] DU Z. Feature identification with compressive measurements for machine fault diagnosis [J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2016, 65(5): 977-987.
- [12] BANGALOR P. An artificial neural network approach for early fault detection of gearbox bearings [J]. IEEE Trans Smart Grid, 2015, 6(2): 980-987.
- [13] 朱俊, 刘天羽, 王致杰, 等. 基于蜂群算法的选择性神经网络集成的风机齿轮箱轴承故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(1): 6-11.
- [14] 于生宝, 何建龙, 王睿家, 等. 基于小波包分析和概率神经网络的电磁法三电平变换器故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 102-112.
- [15] 史丽萍, 汤家升, 王攀攀, 等. 采用最优小波树和改进 BP 神经网络的感应电动机定子故障诊断[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 38-45.
- [16] 杨凌霄, 朱亚丽. 基于概率神经网络的高压断路器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015(10): 62-67.
- [17] 程声烽, 程小华, 杨露. 基于改进粒子群算法的小波神经网络在变压器故障诊断中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014(19): 37-42.
- [18] 李彦冬, 郝宗波, 雷航. 卷积神经网络研究综述[J]. 计算机应用, 2016, 36(9): 2508-2515.
- [19] YUAN Y, CHAO M, LO Y C. Automatic skin lesion segmentation using deep fully convolutional networks with jaccard distance [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2017, 36(9): 1876-1886.
- [20] DOSOVITSKIY A, SPRINGENBERG J T, TATARCHENKO M, et al. Learning to generate chairs, tables and cars with convolutional networks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016, 39(4): 692-700.
- [21] 常亮, 邓小明, 周明全, 等. 图像理解中的卷积神经网络[J]. 自动化学报, 2016, 42(9): 1300-1312.

收稿日期: 2017 -10 -10