

一种新型的基于单电流调节器提高永磁同步电机系统负载与抗扰能力的算法^{*}

杨海靖, 迟 颂, 宋桂英, 李 雪

[1. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学), 天津 300130;

2. 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室(河北工业大学), 天津 300130]

摘 要: 提出了一种根据永磁同步电机(PMSM)转速来调节交轴电压的最大转矩法。算法对电压极限矢量圆与电流极限矢量圆定量分析, 找到电机稳定运行时的最大转矩点, 通过在电压极限矢量圆补偿定子电阻压降修正最大转矩点。通过直接给定交轴电压的方式, 充分利用修正最大转矩点的电磁转矩, 提高电机的负载能力和抗干扰能力。仿真验证了该算法的有效性和可行性。对于最大转矩点的定量分析, 使此模型具有良好的可移植性。

关键词: 永磁同步电机; 弱磁控制; 单电流调节器; 电压极限矢量圆修正; 最大转矩

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)05-0077-06

A Novel Algorithm for Improving Load and Immunity of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Single Current Regulator^{*}

YANG Haijing, CHI Song, SONG Guiying, LI Xue

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The maximum point of the motor at given speed was found by a quantitative analysis of both the voltage limit vector circle and the current limit vector circle. The maximum torque point was corrected by compensating stator resistance voltage at the voltage limit vector. Through the direct given cross-axis voltage to take full advantage of this point of electromagnetic torque, the motor load capacity and anti-jamming capability were improved. The simulation proved that the algorithm had been well designed in terms of validity and feasibility. The model has a good portability by the quantitative analysis of the maximum torque point.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); flux-weakening control; single current regulator; voltage limit vector circle correction; maximum torque

0 引 言

永 磁 同 步 电 机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 具有体积小、效率高、

功率密度大、转动惯量小、动态响应快及调速范围宽、转矩脉动小等优点。其转速可高达数万转每分钟, 在大功率压缩机、鼓风机、新能源飞轮储能等领域均有广泛应用, 可省去机械提速装置, 提高

^{*} 基金项目: 河北省高层次人才项目(E2015100007)

作者简介: 杨海靖(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电机控制。

迟 颂(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为高频电力电子变换技术及应用, 高精度电力电子控制算法。

宋桂英(1971—), 女, 副教授, 研究方向为电机及其控制。

系统的运行效率^[1]。在工业应用中,受限于变流器直流端电压,PMSM 需要弱磁增速。弱磁控制致力于拓宽 PMSM 的调速范围,并提升高速域的电机运行稳定性^[2-3]。

当电机在恒转矩区运行时,双电流调节器也能较好地调节电流。弱磁轨迹可以通过公式计算法、查表法、梯度下降法以及负直轴电流补偿法等弱磁策略得到^[4-7]。但是当电机工作在弱磁区时,随着电机转速的升高,直轴电流与交轴电流之间的耦合会越来越严重^[8-9]。双电流调节器之间的竞争会使系统剧烈的抖动以至于失控。双电流调节器高速弱磁区域难以取得理想的控制结果^[10-12]。文献[13]通过给定交轴电压的方式利用了直轴电流与交轴电流之间的耦合。利用单电流调节器同时调节直轴电流与交轴电流,同时避免了两电流之间的竞争。经过试验,证明调试简单,具有良好的鲁棒性。本文在文献[13]的基础上提出一种新的交轴电压给定方法,在保证系统动态相应的基础上同时提高其抗负载突增和带载能力。

1 数学模型与约束

PMSM 的数学模型为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d p i_d - \omega L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q p i_q + \omega L_d i_d + \omega \lambda_m \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q ——定子电压的直轴与交轴分量;

R_s ——电机定子电阻;

i_d 、 i_q ——定子电流的直轴与交轴分量;

L_d 、 L_q ——电机直交轴电感;

p ——微分算子;

ω ——电机电角速度;

λ_m ——反电动势系数。

电机工作时的定子电压合成矢量受到逆变器直流侧电压的限制,给定过高的电压矢量指令时,逆变器无法跟随。电机工作稳定时的电流矢量受到电机本体的限制。电流矢量过大时,会因温升过高而损害电机。设电压矢量的模长最大为 U_{smax} ,电流矢量的模长最大为 I_{smax} 。

电机在稳定工作时,合成电压矢量不能超过电压矢量的最大模长,合成电流矢量不能超过电流矢量的最大模长。由式(2)体现:

$$\begin{cases} u_d^2 + u_q^2 = U_s^2 \leq U_{smax}^2 \\ i_d^2 + i_q^2 = I_s^2 \leq I_{smax}^2 \end{cases} \quad (2)$$

PMSM 的电磁转矩为

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

式中: p ——电机极对数。

电机稳定运行时,电流极限矢量圆对应 i_d - i_q 图上的轨迹如图 1 正圆所示。电机运行至某一转速时,电压极限矢量圆对应 i_d - i_q 平面上的轨迹如图 1 椭圆所示。电压极限矢量圆内与电流极限矢量圆内的交集是电机在该转速下全体稳定工作点的集合,如图 1 阴影部分所示。集合内电磁转矩最大的点是电机在该转速下能输出的最大转矩。电机工作在此点时,电磁转矩最大,带载能力最强。负载增加时,工作点若有经过此点的趋势,则可以输出此转速下的最大转矩,电机的带载能力得到充分利用。

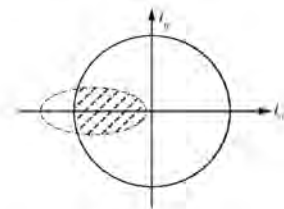


图 1 电机稳态工作点位置集合

2 最大转矩工作点的分析

2.1 理论分析

由式(1)和式(2)可得:

$$i_q = \frac{1}{L_q} \sqrt{\left(\frac{U_{smax}}{\omega} \right)^2 - (L_d i_d + \lambda_m)^2} \quad (4)$$

联立式(3)、式(4),有:

$$T_e = \frac{3}{2} p \left[\frac{\psi_f}{L_q} \sqrt{\left(\frac{U_{smax}}{\omega} \right)^2 - (L_d i_d + \lambda_m)^2} + \frac{(L_d - L_q) i_d}{L_q} \sqrt{\left(\frac{U_{smax}}{\omega} \right)^2 - (L_d i_d + \lambda_m)^2} \right] \quad (5)$$

令:

$$X = \sqrt{\left(\frac{U_{smax}}{\omega_e} \right)^2 - (L_d i_d + \lambda_m)^2} \quad (6)$$

求 T_e 关于 i_d 的导数可得:

$$\frac{dT_e}{di_d} = \frac{3}{2} p \left[\frac{-\lambda_m L_d (L_d i_d + \lambda_m)}{L_q X} + \frac{L_d - L_q}{L_q} X - \frac{L_d i_d (L_d - L_q) (L_d i_d + \lambda_m)}{L_q X} \right] \quad (7)$$

令 $\frac{dT_e}{di_d} = 0$, 解得:

$$i_d = \frac{1}{L_d} \left[\frac{\lambda_m L_q}{4(L_q - L_d)} - \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{\lambda_m L_q}{L_d - L_q} \right)^2 + 8 \left(\frac{U_{smax}}{\omega} \right)^2} - \lambda_m \right] \quad (8)$$

取

$$c1 = \frac{1}{L_d} \left[\frac{\lambda_m L_q}{4(L_q - L_d)} - \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{\lambda_m L_q}{L_d - L_q} \right)^2 + 8 \left(\frac{U_{smax}}{\omega} \right)^2} - \lambda_m \right]$$

因为在电压限制圆上半轴上电磁转矩连续可导且存在极值点, $i_d = c1$ 为电压限制圆上唯一导数为零的点, 则此点为电磁转矩极大值点。当此点在电流限制圆内时, 应使电机在负载增加时过渡到此点稳定工作。当此点不在电流限制圆内时, 电机无法跟踪到此点。应使电机在负载增加时过渡到电压限制圆上, 电流限制圆内距离此点最近的点。

图 2 中正圆是电流极限矢量圆, 椭圆是电压极限矢量圆。阴影部分是电压极限矢量圆与电流极限矢量圆的交集, 是全体电机稳态工作点的集合。A 点是 $i_d = c1$ 对应的点, 是电压极限圆上电磁转矩最大的点。B 点是稳态工作点集合中, 电压极限矢量圆上, 距离 A 点最近的点。当点 A 在集合内时, 电机能追踪到 A 点, 即 A 点与 B 点为同一点。电机在此点工作时能输出最大电磁转矩, 如图 2(a) 所示。当点 A 不属于集合时, 电机不能在 A 点稳定工作, B 点是电机能稳

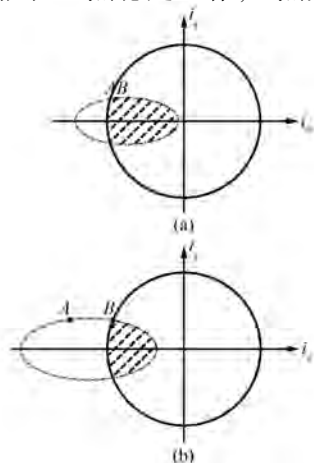


图 2 电机稳定工作的最大转矩点

定工作且输出电磁转矩最大的点, 如图 2(b) 所示。

当 A 点位于电流极限圆内时, 若随着负载增加工作点有过渡到点 A 的趋势, 则可以最大限度发挥电机最大电磁转矩的作用, 增强电机的运行稳定性。当点 A 不在电流极限矢量圆内时电机无法在 A 点稳定运行。B 点是电机此时电机可以稳定运行工作点中电磁转矩最大的点。若随着负载转矩的增加, 电机运行时可以经过 B 点, 则可以充分发挥电机的最大电磁转矩。

2.2 控制策略

单电流调节器是一种新颖的 PMSM 弱磁控制的策略。由于电机工作在高速弱磁区域时, 两个电流调节器极易饱和, 模型难以稳定。固定给定交轴电压, 让直轴电流自由调节简化了控制模型, 缓解了调节器的饱和问题, 同时使直轴电流与交轴电流耦合关系简明而直观。

由式(1)可得:

$$i_q = \frac{u_q - \omega \lambda_m}{R_s} - \frac{\omega L_d i_d}{R_s} \quad (9)$$

交轴电压固定时, 可将电机的稳定工作点被限制在一条直线上。如图 3 所示, 交轴电压对稳定工作点的限制, 正圆是电流极限矢量圆, 椭圆是电压极限矢量圆, 虚线是等电磁转矩线, 线上每一点的电磁转矩相同, 实线是定交轴电压对应 i_d-i_q 平面上的轨迹。设电机在 C 点稳定工作。

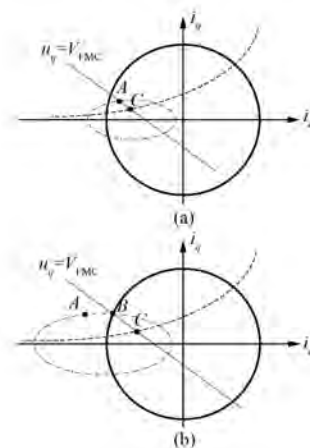


图 3 交轴电压对稳定工作点的限制

电机稳态工作点被限制在给定交轴电压线与电磁转矩线上。通过直轴电流调节器可单独的调节工作点的位置以对抗负载扰动。当 A 点属于电

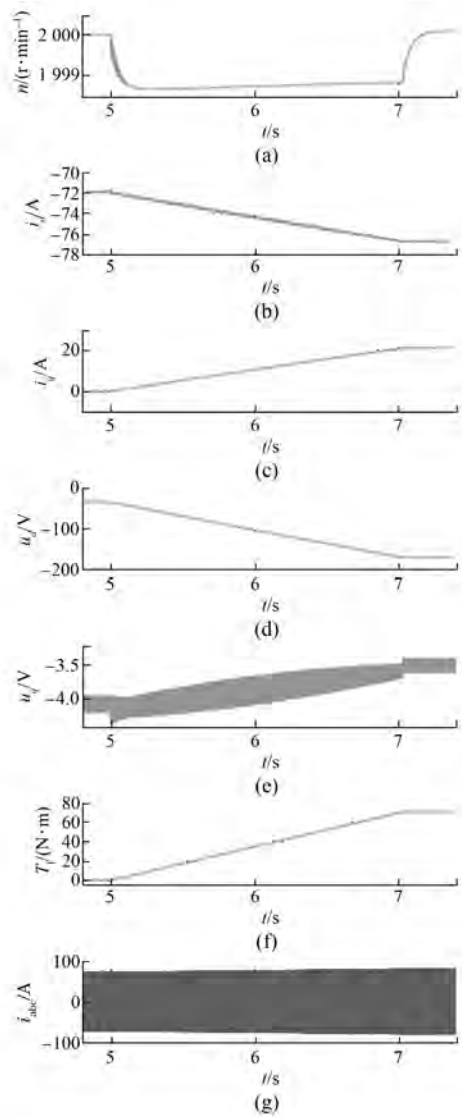


图6 电机状态

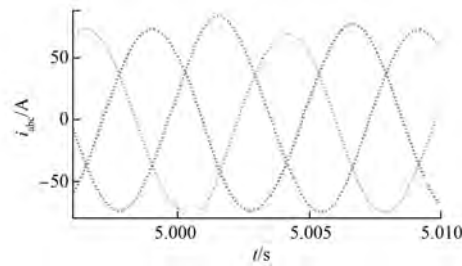


图7 5 s时电机三相线电流

随着负载转矩增加,电机的稳定工作点沿着 V_{FMC} 对应 i_q-i_d 平面上的曲线电磁转矩增加的方向移动,如图(9)所示。图(9)直线为 PLECS 软件仿真得到的稳态点运行轨迹。随着负载转矩增加,电机稳态工作点过渡到了补偿定子压降的电

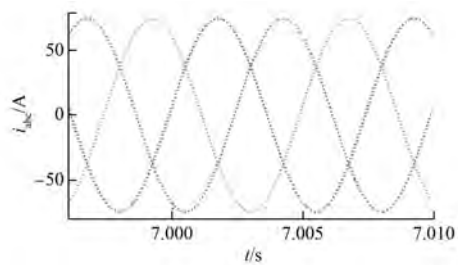


图8 7 s时电机三相线电流

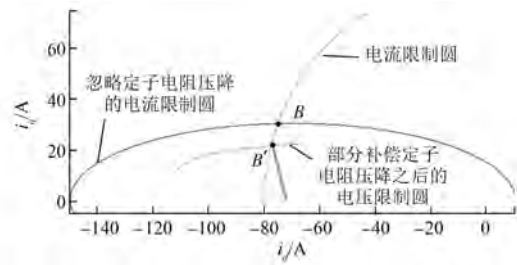


图9 稳态工作点变化

压极限矢量圆与电流极限矢量圆的交点 B' 上。

3.3 带载能力对比仿真

仿真试验设置试验组与对照组,试验组模型为最大转矩模型,对照组模型的给定固定交轴电压为 160 V。电机转速 2 000 r/min 时电机以 35 N·m/s 的速度加载至 71 N·m,最大转矩模型转速如图 10(a)所示,其负载转矩如图 10(b)所示。定交轴电压模型转速如图 11(a)所示,其负载转矩如图 11(b)所示。

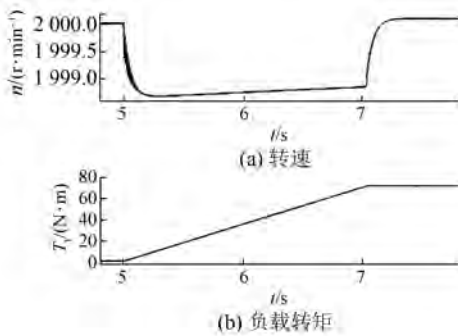


图10 最大转矩模型转速

由仿真结果可知,最大转矩模型与传统定交轴电压模型相比,恒转速运行时可以负载更大的负载转矩,最大转矩模型具有更强的带载能力。

3.4 抗扰能力对比仿真

仿真试验设置试验组与对照组,试验组模型为最大转矩模型,对照组模型的给定固定交轴电

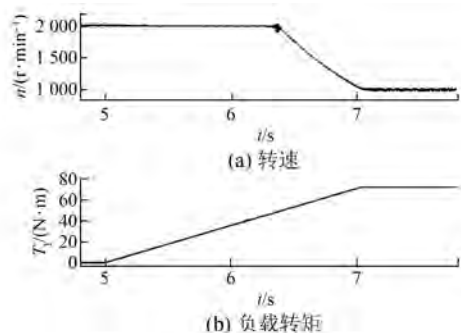


图 11 定交轴电压模型转速

压为 160 V。电机带载 $20 \text{ N} \cdot \text{m}$, 5 s 时负载突增 $10 \text{ N} \cdot \text{m}$, 试验组转速如图 12(a) 所示, 其负载转矩如图 12(b) 所示。对照组转速如图 13(a) 所示, 其负载转矩如图 13(b) 所示。

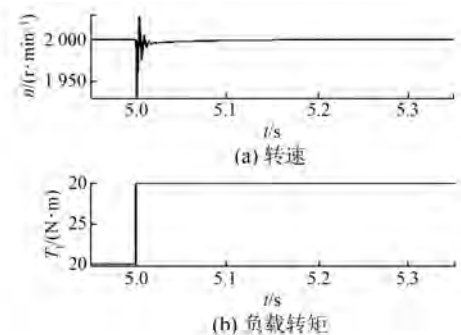


图 12 最大转矩模型转速与负载转矩

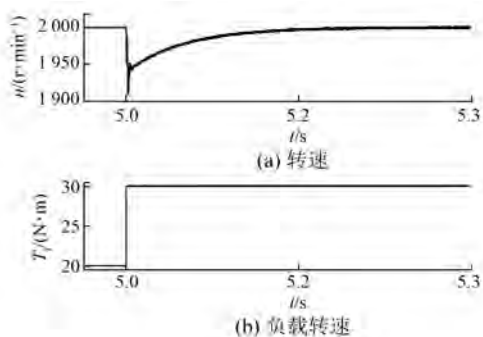


图 13 定交轴电压模型转速与负载转矩

由仿真结果可知负载突变时, 最大转矩模型与传统定交轴电压模型相比可以更快地恢复到给定转速, 最大转矩模型的抗扰能力要优于传统定交轴电压模型。

4 结 语

本文提出的基于 PMSM 单电流调节器的最

大转矩法通过对电压补偿后的电压极限矢量圆、电流极限矢量圆和最大转矩点的分析, 确定了电机所能跟随的最大转矩点。根据转速给定适当的交轴电压来引导静态工作点的运动轨迹, 保证随着负载增加电机稳态工作点有过渡到最大转矩点的趋势。带载能力对比仿真证明, 最大转矩法模型相比传统定交轴电压模型充分发挥了电机的带载能力。抗扰能力对比仿真验证证明, 最大转矩模型在负载突增后更快地恢复到了给定转速。算法在保持单电流调节器控制法优势的前提下提高了电机的带载、抗负载突变能力。仿真验证了该算法的准确性以及有效性。

【参考文献】

- [1] 黄科元, 高丽真, 黄守道, 等. 基于电流环误差修正的高速永磁同步电机转子位置校正方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2391-2399.
- [2] 柴凤, 欧景, 裴宇龙. 双定子锥形永磁同步电机的弱磁研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 12-18.
- [3] 刘军锋. 感应电动机在弱磁区的高性能电流控制策略[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 61-66.
- [4] CHING T P, SUE S M. A linear maximum torque per ampere control for IPMSM drives over full-speed range[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2): 359-366.
- [5] 李珂, 顾欣, 刘旭东, 等. 基于梯度下降法的永磁同步电机单电流弱磁优化控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 8-15.
- [6] 余洋, 郭旭东, 郑晓明, 等. 基于反推控制的机械弹性储能永磁同步电机最大转矩电流比控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 82-90.
- [7] MORIMOTO S, SANADA M, TAKEDA Y. Wide-speed operation of interior permanent magnet synchronous motors with high-performance current regulator [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(4): 920-926.
- [8] YOON Y D, LEE W J, SUL S K. New flux weakening control for high saliency interior permanent magnet synchronous machine without any table[C]// European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2007: 1-7.
- [9] 盛义发, 喻寿益, 桂卫华, 等. 轨道车辆用永磁同步电机系统弱磁控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 74-79.

(下转第 87 页)

3.2 电机运行状态远程监控试验

电机云平台电机监控地图如图 7 所示。在设备地图上,软件平台以图形化的方式展示了平台上记录的所有电机,便于用户按需查找和监控。通过鼠标选择指定的地理区域后,可查看各区域电机的分布情况,也可以通过设备地图查看不同地区的电机数量,查看该地区的电机的在线数、离线数和故障数等状态信息。单个电机运行状态包括在线、离线、故障等状态,可以通过平台或手机 APP 软件搜索查看指定的电机的状态。



图 7 电机云平台电机监控地图示意图

4 结 语

电机智能制造远程运维系统是以生产线自动控制系统、工业网络、监控系统和云平台为基础,开发的智能化和远程化的自动运维系统^[7],能够为电机生产企业带来以下价值。

(1) 降低维护成本。厂家可事先对设备进行远程诊断,排除因客户操作失误引起的问题及部分软件故障,从而降低厂家对设备的维护成本。

(2) 增强电机运行的安全性。能够根据用户需求设置预警参数,一旦设备运行参数超过预设

值,云平台会提供设备故障预警;当现场设备发生故障,系统会快速报警,并对现场数据进行分析,配合厂商技术人员快速定位和解决问题。

(3) 故障预测。根据电机运行异常的工况或变坏的运行特性,通过数据分析处理,确定特定故障的概率,并对设备的维修计划、维修时间表、维修方案等做出决策。

电机智能制造远程运维系统可实现电机生产制造和运行时的远程运维,满足电机智能制造全生命周期管理的需求,符合电机行业智能制造的发展趋势。

【参 考 文 献】

- [1] 王永华.现代电气控制及 PLC 应用技术[M].2 版.北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [2] 颜亦军,李俊,廖坚强.企业远程运维服务系统可行性分析、研究[J].网络安全技术与应用,2013(7): 58-59.
- [3] 岳维松,程楠,侯彦全.离散型智能制造模式研究——基于海尔智能工厂[J].工业经济论坛,2017,4(1): 105-110.
- [4] 邓倩妮,陈全.云计算及其关键技术[J].计算机应用,2009,26(1): 2-6.
- [5] 陈康,郑纬民.云计算:系统实例与研究现状[J].软件学报,2009,20(5): 1337-1348.
- [6] 汪小澄,张峰.PLC 控制网络的组建与监控[J].计算机应用,2002,22(4): 34-36.
- [7] 贾坤,李玉秀,宋钦文.纺织机械远程运维平台构建应用[J].纺织器材,2017.

收稿日期: 2017-12-12

(上接第 82 页)

- [10] JANG M K, SEUNG K S. Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(1): 43-48.
- [11] 魏海峰,韦汉培,张懿.二维云模型在线优化永磁同步电机无传感器电压模型控制[J].电工技术学报,2017,32(23): 51-60.
- [12] 方晓春,胡太元,林飞,等.基于交直流耦合的

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): 140-147.

- [13] CHI S, XU L Y, ZHANG Z. Efficiency-optimized flux-weakening control of PMSM incorporating speed regulation [C] // Power Electronics Specialists Conference, 2007: 1627-1633.

收稿日期: 2017-12-04