

针对直流母线电压跌落的永磁同步电机 弱磁控制策略*

姚超¹, 颜建虎¹, 应展烽², 张旭东², 周鑫昇¹

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏南京 210094;

2. 南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏南京 210094)

摘要: 针对车用永磁同步电机(PMSM)运行过程中直流母线电压跌落造成电机基速发生变化的问题, 提出了一种根据直流母线电压实时调整 PMSM 直轴电流的弱磁控制方法。当电机母线电压低于给定转速所需要的母线电压, 且电压极限椭圆与电流极限圆有交点时, 通过判断电流调节器输出的电压综合矢量与实时直流母线电压, 来调整电机直轴电流, 从而维持恒定转速。根据所提控制方法搭建了基于 MATLAB/Simulink 的仿真模型, 仿真结果验证了所提控制方法能够解决直流母线电压跌落带来的转速突变的问题。最后, 在仿真的基础上搭建了试验平台, 通过试验验证了该弱磁控制算法的有效性。

关键词: 永磁同步电机; 弱磁控制; 直轴电流; 母线电压

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)07-0001-06

Flux-Weakening Control Strategy for Permanent Magnet Synchronous Motor with DC Bus Voltage Drop*

YAO Chao¹, YAN Jianhu¹, YING Zhanfeng², ZHANG Xudong², ZHOU Xincheng¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To solve the problem of the base speed change of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) caused by the DC bus voltage drop during operation, a flux-weakening control method by adjusting the d -axis current of the PMSM based on the DC bus voltage was proposed. When the bus voltage of the motor was lower than the bus voltage required for a given speed as well as the voltage limit ellipse intersected the current limit circle, the d -axis current of the motor was adjusted by judging the voltage vector from the current regulator output value and the real-time DC bus voltage, so as to maintain the constant speed. The simulation model was built on MATLAB/Simulink according to the proposed control method. The simulation results verified that the proposed control method could solve the problem of sudden speed change caused by the DC bus voltage drop. Finally, an experimental platform was constructed to validate the effectiveness of the flux-weakening control method.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); flux-weakening control; d -axis current; DC bus voltage

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51607091)

作者简介: 姚超(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机弱磁控制技术。

颜建虎(1983—), 男, 副教授, 研究方向为新型永磁电机的设计与控制技术。

应展烽(1982—), 男, 副教授, 研究方向为电机控制技术。

0 引言

永磁同步电机(PMSM)由于高效率、体积小、低损耗和结构简单等优点已成为电动汽车电机驱动系统的首选。但电动汽车电池的直流母线电压跌落造成电机的基速和转折速度发生变化,可能导致电机系统失控。为防止电机运行时母线电压跌落造成电机失控,需要选择合适的弱磁控制算法。

传统的PMSM弱磁控制方法是基于直流母线电压是恒值情况下的方法,主要包括:公式计算法^[1]、查表法^[2]、梯度下降法^[3]等。其中,公式计算法完全依赖电机的参数,由于电机在运行中,电感与磁链参数受到电流的变化而发生变化,则不再适用于直接的公式计算,虽有理论意义,但很少在实际中应用;查表法需要大量的试验数据搭建表格,虽解决了公式计算法对电机参数的依赖性,但不具备普遍性,实现困难;梯度下降法是根据电机的电压极限椭圆的电压递减的方向与恒转矩运行曲线之间的夹角大小,来确定电机运行所在的弱磁区域,虽避免了使用大量试验数据带来的不便,但实现程序复杂。

对于考虑直流母线电压变化的PMSM弱磁控制方法,国内外也开展了一些研究。文献[4]根据转速、转矩和母线电压建立了三维指令表,解决了电流调节器饱和和带来转速失调的问题,同时也增强了动态性能,但创建表格难度大。文献[5]采用了电压反馈指令法,创建了二维指令表,将转速、转矩和电压按照一定的比例作为控制指令来修正电流,在一定程度上减少了三维指令表所需要的试验数据量,但创建的表格不具备普遍性。文献[6]在母线电压跌落时,引入了有效电压矢量的闭环控制,实时修正直轴电流,虽避免了电流调节器饱和的情况,缺点是引入的PI调节器多,调节困难。文献[7]提出将实际母线电压向额定母线电压等效折合,同比调整作为查表依据的电角速度指令值,虽拓宽了电机工作区的范围,但仍需要创建表格。文献[8]提出一种逆变器的电压空间矢量脉宽调制(PWM)过调制算法,虽提高了母线电压的利用率,但算法复杂。

针对PMSM的直流母线电压突然下降导致电机失控的不足,本文提出了在母线电压过低的

情况下,采用负直轴电流补偿的方法。该方法有效地解决了PMSM母线电压突然跌落导致转速失调的问题,而且能够迅速稳定转速,使电机仍旧维持恒定速度,试验过程中运算速度快,同时鲁棒性好。

1 PMSM在dq坐标系下的数学模型

考虑到PMSM系统多变量、非线性、强耦合等特点,为了建立正弦PMSMdq坐标系下的数学模型,首先假设:忽略电机的铁心饱和、涡流及磁滞损耗,且电动机的电流为三相正弦波的电流^[9]。

dq坐标系下的定子电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \omega_e \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \omega_e \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 、 ψ_d 、 ψ_q 、 ω_e 、 R_s ——直轴电压、交轴电压、直轴电流、交轴电流、直轴磁链、交轴磁链、转子电角速度和电枢绕组电阻。

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_d 、 L_q 、 ψ_f ——直轴电感、交轴电感和永磁体磁链。

稳态时,dq坐标系下的定子电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d - L_q i_q \omega_e \\ u_q = R_s i_q + \omega_e (\psi_f + L_d i_d) \end{cases} \quad (3)$$

电机运行在高速时,可以忽略电阻压降,即dq坐标系下的定子电压方程为

$$\begin{cases} u_d = -L_q i_q \omega_e \\ u_q = \omega_e (\psi_f + L_d i_d) \end{cases} \quad (4)$$

电流极限圆方程为

$$i_s^2 = i_d^2 + i_q^2 \quad (5)$$

式中: i_s ——定子相电流。

电压极限椭圆方程为

$$u_s^2 = (\omega_e L_q i_q)^2 + (\omega_e L_d i_d + \psi_f)^2 \quad (6)$$

式中: u_s ——定子端电压。

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (7)$$

式中： p 、 T_e ——极对数和电磁转矩。

2 母线电压恒定条件下的弱磁控制原理

在母线电压恒定条件下的弱磁控制原理中，电机直流母线电压恒定不变，即电压极限值是常值。当电机转速低于基速，运行在恒转矩区时，电机的最大转矩输出能力受逆变器电流额定值的限制，因此通常采用最大转矩电流比（MPPT）控制方法，在给定的转矩条件下消耗最小的定子电流，达到单位电流下电机输出转矩最大^[10]。当电机转速在基速以上，则运行在恒功率区，此时电机受到电压椭圆与电流圆的双重限制，运行在弱磁区。图 1 所示为在 PMSM 运行过程中，转速变化时的电流轨迹。

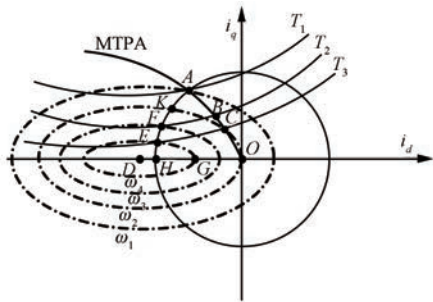


图 1 PMSM 运行过程中转速变化电流轨迹

图 1 中， T_1 、 T_2 、 T_3 为恒转矩曲线； ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 ω_4 为电机转子电角速度。其中， $T_1 > T_2 > T_3$ ， $\omega_4 > \omega_3 > \omega_2 > \omega_1$ 。图 1 可以划分为 2 个区域。

区域 1(基速以下区域)：电流限制区，即图 1 中 AO 段曲线。当 $\omega_e \leq \omega_1$ 时，电机在恒转矩调速区采用 MPTA 法，实现同等输出转矩的情况下，消耗最小的定子电流，从而减小电机和逆变器的损耗。此时，电机定子端电压未达到电压极限值，即

$$|u_s| \leq u_{lim} \text{ (其中: } u_{lim} = \frac{u_{dc}}{\sqrt{3}}, u_{dc} \text{ 为直流母线电压)}。$$

随着转速的上升，由于电机定子端电压受到了逆变器母线电压的限制，不能够继续以较大的电磁转矩来提高速度，即 A 点转速是由恒转矩区向恒功率区过渡的转折点，也是电磁转矩最大点。

区域 2(基速以上区域)：电压和电流共同限制区^[11]，即图 1 中 OAH 区域和 AH 段曲线。当 $\omega_1 < \omega_e$ ，且电机工作点在 AH 曲线上时，电机在恒功

率运行，满足定子相电流不超过电流极限值，并且电机定子端电压不超过逆变器电压极限值，即 $|i_s| \leq i_{lim}$ ， $|u_s| \leq u_{lim}$ 。此区域中，由于电机的反电动势无法超过电机端电压，而反电动势与转速和磁通成正比，若要在此基础上继续升速的话，只能使气隙磁链减小，即增大直轴去磁电流的幅值进行弱磁，故该区域称为弱磁区。此外不能无限制的增大 i_d 的幅值，因为会造成永磁体退磁，需要控制去磁电流达到最大的允许值，随着转速的升高，转矩电流 i_q 在下降。

3 母线电压跌落情况下的弱磁控制原理

对电机直流母线电压跌落情况进行分析，即电压极限值突然变小。当母线电压低于给定转速需要的母线电压值时，电机转速会突然下降。当电机母线电压突然跌落到一定程度时，可能会导致电机定子电流在未达到饱和的情况下，就进入电压饱和。为了保证电机转速恒定，则电机工作点从区域 1 进入区域 2，需要弱磁。图 2 所示为在 PMSM 运行过程中，母线电压变化时的电流轨迹。

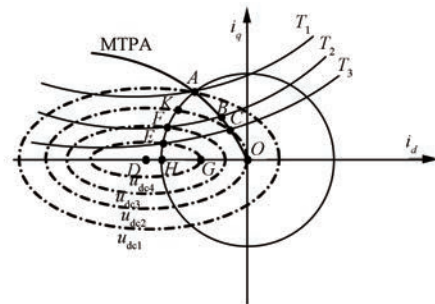


图 2 PMSM 运行过程中母线电压变化电流轨迹

图 2 中， u_{dc1} 、 u_{dc2} 、 u_{dc3} 、 u_{dc4} 为直流母线电压。其中， $T_1 > T_2 > T_3$ ， $u_{dc4} > u_{dc3} > u_{dc2} > u_{dc1}$ 。由图 2 可以

看出，此时电机的电压极限椭圆以 $D\left(-\frac{\psi_f}{L_d}, 0\right)$ 为

中心点，长轴的右端点为 $G\left(\frac{u_s - \omega_e \psi_f}{\omega_e L_d}, 0\right)$ ；而电流

极限圆以原点 O 点为中心点，半径为 i_{lim} 。当电机的转速恒定不变时，随着直流母线电压跌落，电机的电压极限椭圆会缩小。当电机工作在 A 点时，母线电压从 u_{dc1} 跌落到 u_{dc2} ，则电机的转折点从 A 点变成 C 点，而维持电机的转速恒定，则要从 C 点

向 K 点转移, 此时需要通过弱磁控制手段。

本文在基速以下区域采用 MTPA 控制法, 在基速以上区域采用负直轴电流补偿法。

3.1 基速以下区域

该区域仅受到逆变器电流容量的限制, 为增大输出转矩, 采用 MTPA 控制法。该控制法使电机在相同的电磁转矩下定子电流最小, 有利于减小电机运行过程中的铜耗, 提高定子电流的利用率。为了利用最小的电流获得最大的转矩, 采用拉格朗日极值定理, 对转矩方程分别求直轴电流与交轴电流的给定, 即:

$$\begin{cases} \frac{\partial (T_e/i_s)}{\partial i_d} = 0 \\ \frac{\partial (T_e/i_s)}{\partial i_q} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

根据式(5)、式(7)和式(8), 可求得直轴电流 i_d 与交轴电流 i_q 给定值:

$$\begin{cases} i_d = \frac{\psi_f - \sqrt{\psi_f^2 + 8(L_q - L_d)^2 i_s^2}}{4(L_q - L_d)} \\ i_q = \sqrt{i_s^2 - i_d^2} \end{cases} \quad (9)$$

在该区域里采用 MTPA 控制法使加入弱磁控制算法更加方便, 也能够很好地利用内埋式电机的磁阻转矩部分, 改善恒功率运行时输出转矩的性能。

3.2 基速以上区域

该区域是弱磁区, 采用负直轴电流补偿法。该方法通过不断检测电流调节器输出的电压指令与电机的母线电压幅值, 一旦电流调节器输出的电压综合矢量超过电压极限值, 则增大直轴电流的幅值, 使电机的工作点左移, 重新回到电压椭圆内。当电流调节器输出的电压综合矢量值大于逆变器电压极限值时, 则计算得出两者差值经过 PI

调节器后, 作为 i_d 的补偿值对 MTPA 控制下的 i_d 进行修改, 使得电机在弱磁区域不需要复杂计算也能够获得较好的工作特性。

此外, 电机工作在此区间, 电压与电流满足以下条件:

$$\begin{cases} i_d^2 + i_q^2 \leq i_{lim}^2 \\ \omega_e^2 (\psi_f + L_d i_d)^2 + \omega_e^2 (L_q i_q)^2 \leq u_{lim}^2 \end{cases} \quad (10)$$

由式(9)和式(10)计算可得电机的基速(转折速度)表达式为

$$\omega_1 = \frac{u_{lim}}{p \sqrt{(L_q i_{lim})^2 + \psi_f^2 + \frac{(L_d + L_q) C^2 + 8\psi_f L_d C}{16(L_d - L_q)}}} \quad (11)$$

其中: $C = -\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 8(L_d - L_q)^2 i_{lim}^2}$ 。

从式(11)可以看出电机的转折速度与母线电压成正比。当 $u_{dc} < u_{dc1}$ 时, 电机的转折点会从 A 点沿 AO 曲线向 O 点转移。当电压极限椭圆与电流极限圆无交点(D 点在电流极限圆外)时, 电机不再能够使用弱磁控制手段维持转速恒定, 即 $\left(\frac{u_{lim} - \omega_e \psi_f}{\omega_e L_d}\right) < -i_{lim}$ 。只有当 $u_{dc} \geq \sqrt{3}(\omega_e \psi_f - \omega_e L_d i_{lim})$ 时, 电机才可以通过使用弱磁手段来解决母线电压跌落情况下, 可能带来的转速突变的问题。

4 控制系统的仿真结果

根据以上的控制策略, 运用 MATLAB/Simulink 工具箱搭建母线电压跌落情况下的弱磁仿真模型, 可得 PMSM 的弱磁控制法框图, 如图 3 所示。从图 3 可见, 通过电流调节器输出的电压综合矢量与实时的直流母线电压值的 0.577 倍比较, 判断是否进入弱磁区。若进入弱磁区, 则使用电压差值经过

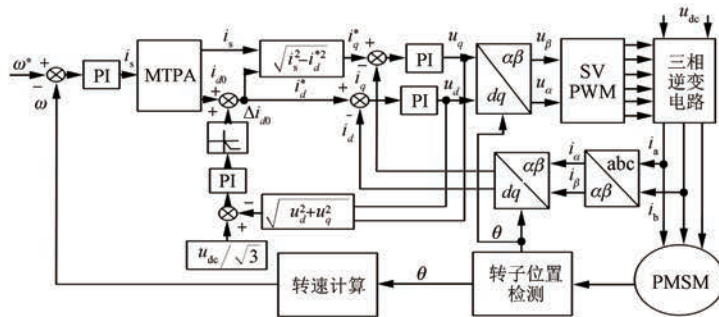


图 3 PMSM 弱磁控制法框图

PI 调节器输出在弱磁区域需要补偿的直轴电流值, 再与 MTPA 控制算法下得到的直轴电流进行累加, 即可得电机的给定直轴电流值。调整电机跌落的母线电压值, 使得电机从 MTPA 区域进入弱磁区域, 采用上述的弱磁控制手段维持电机恒定速度, 即可验证该控制法的可行性。

为了验证该控制方法的可行性以及考虑到试验装置的问题, 本文选用小功率的内置式 PMSM 作为试验对象。电机主要参数如表 1 所示。

表 1 电机主要参数

参数名称	参数值
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 000
额定功率/kW	3.1
极对数	3
定子相电阻/Ω	0.35
d 轴电感/mH	3.75
q 轴电感/mH	2.35
永磁体磁链/Wb	0.175 4
转动惯量/(kg·m ²)	0.004 3

图 4~图 7 所示为直流母线电压跌落到低于给定转速所需要的母线电压时, 为了保持 PMSM 维持给定转速不变, 采用负直轴电流补偿的弱磁控制方法的仿真结果。仿真时, 电机在理想空载条件下运行。图 5 表现出直流母线电压跌落情况下, 直轴电流 i_d 与交轴电流 i_q 的变化, 此时 i_d 在

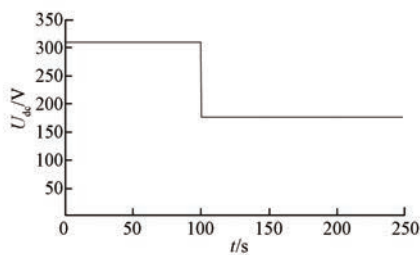


图 4 仿真直流母线电压

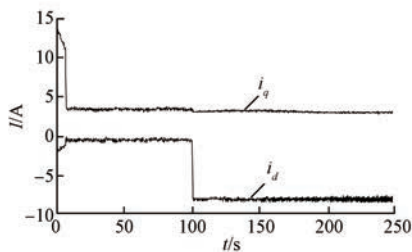


图 5 仿真 i_d 与 i_q

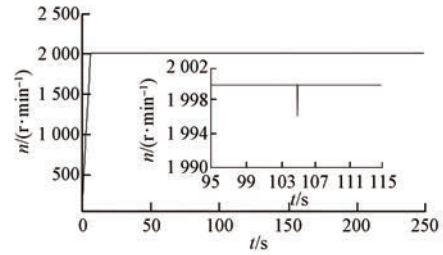


图 6 仿真转速

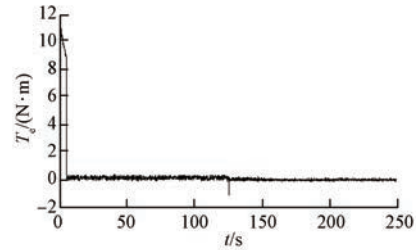


图 7 仿真输出转矩

母线电压大幅跌落的时候, 开始负向增大电流幅值, 进入弱磁区域。由图 6 可以看出, 直流母线电压跌落时, 电机转速发生了微小的波动, 响应迅速。

5 试验结果分析

为了充分验证该算法的有效性, 进行了相关样机的试验。进行试验的电机参数和仿真参数一致, 并且采用的 TI 公司的高速浮点型 DSP TMS320F28355 作为主控芯片。

图 8~图 11 所示为 PMSM 采用上述的弱磁控制算法在母线电压大幅跌落情况下, 交直轴电流、电机转速以及输出转矩跟踪情况波形。由图 9 可见, 电机在直流母线电压跌落到 170 V 时, 转速突然下降, 但由于采用了负直轴电流补偿控制方法, 使得电机维持恒定转速。因为本文试验电机在空载情况下, 采用转速电流闭环控制, 所以图 11 不能够体现电机是否运行在恒转矩或者恒功率区

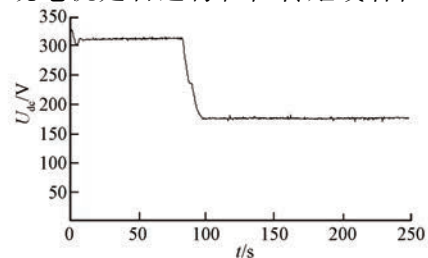


图 8 试验直流母线电压

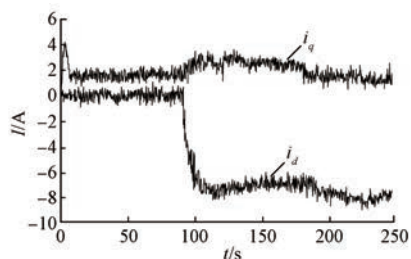
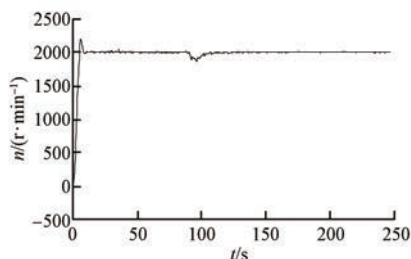
图9 试验 i_d 与 i_q 

图10 试验转速

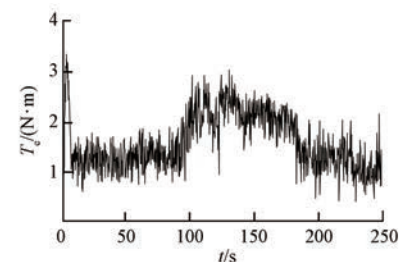


图11 试验输出转矩

域。但试验结果验证了在电机的交直流电流能够准确地跟踪,所提弱磁控制算法可行。

6 结 语

本文针对母线电压低于给定转速所需要的电压时,电机不能够维持恒定转速的问题,提出了采用负直轴电流补偿的弱磁控制手段可以保证转速不变。

通过理论分析得出母线电压一旦低于某个值时,电机的转折速度会发生变化。在此基础上,进行了仿真与试验。试验结果验证了在直流母线电压大幅跌落的情况下,采用负直轴电流补偿弱磁控制方法可以有效地维持恒定转速。该控制方

法通过判定电流调节器输出的电压综合矢量与实时得来的直流母线电压的大小来作为 MTPA 轨迹曲线向弱磁区的切换点,比计算实时的电机转折速度作为切换点更简单、可靠且响应迅速。

【参考文献】

- [1] 朱磊,温旭辉,赵峰,等.永磁同步电机弱磁失控制制及其应对策略研究[J].中国电机工程学报,2011,31(18): 67.
- [2] 王莹,唐任远,曹先庆,等.内置式永磁同步电动机弱磁控制实验研究[J].微电机,2008,41(11): 1.
- [3] 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.
- [4] LEE J H, LEE J H, PARK J H, et al. Field-weakening strategy in condition of DC-link voltage variation using on electric vehicle of IPMSM[C] // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011.
- [5] KIM B, KWAK M, CHUNG T, et al. A method for improving HEV motor system efficiency considering battery voltage variation [C] // 2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011.
- [6] 陈宁,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): 717.
- [7] 黄苏融,王维辰,王爽,等.基于母线电压动态变化的电动汽车永磁同步电机控制策略[J].电机与控制应用,2012,39(10): 24.
- [8] 吴芳,万山明,黄声华.一种过调制算法及其在永磁同步电动机弱磁控制中的应用[J].电工技术学报,2010,25(1): 58.
- [9] 唐朝晖,丁强,喻寿益,等.内埋式永磁同步电机的弱磁控制策略[J].电机与控制学报,2010,14(5): 68.
- [10] 陈亚爱,陈焕玉,周京华,等.永磁同步电机弱磁与过调制控制策略研究[J].电机与控制应用,2017,44(11): 26.
- [11] 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.

收稿日期: 2019-03-27