

三相永磁容错电机单相故障的容错控制*

徐晓辉, 朱景伟, 赵英序, 杨博涵, 马 瑞
(大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘 要: 为了使三相永磁容错电机在单相故障后仍能输出满足要求的转矩, 提出了容错电流优化控制方法。针对开路故障, 利用故障前后磁动势不变的原则, 得到了故障时的容错补偿电流, 实现对转矩脉动的补偿。针对短路故障, 利用分开补偿的策略, 对由短路电流引起的转矩脉动和缺相不对称转矩脉动进行分开补偿, 进行了电流矢量合成, 实现了电机在短路时输出转矩脉动的最小化。通过 MATLAB/Simulink 进行仿真, 验证了所提出容错控制方法的有效性。

关键词: 三相永磁容错电机; 故障; 转矩脉动; 容错控制

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)06-0001-05

Fault-Tolerant Control for Three-Phase Permanent Magnet Fault-Tolerant Motor Under Single Phase Fault Condition*

XU Xiaohui, ZHU Jingwei, ZHAO Yingxu, YANG Bohan, MA Rui
(Marine Electrical Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In order to make the three-phase permanent magnet fault-tolerant motor still meet the requirements of the torque output after single-phase fault, a fault-tolerant current optimization control method was proposed. For the open-circuit fault, based on the unchangeable principle of magnetic motive force, the fault-tolerant compensation current was obtained, and the compensation of the torque ripple was achieved. For the short-circuit fault, the torque ripple caused by short circuit current and the phase missing asymmetrical torque ripple were separately compensated by the strategy of separate compensation, and then the current vector synthesis was carried out to realize the minimization of the output torque ripple when the motor was short. The simulation experiment of MATLAB/Simulink was used to verify the effectiveness of fault-tolerant control method.

Key words: three-phase fault tolerant permanent magnet motor; fault; torque ripple; fault-tolerance control

0 引 言

永磁容错电机是永磁同步电机与开关磁阻电机相结合的新型电机, 既具有永磁同步电机效率高、体积小、噪声低的优点, 也具有开关磁阻电机的高可靠性和故障容错性能^[1]。目前国内外许多学者对永磁容错电机控制策略以及容错控制方法进行了广泛和深入的研究, 使得永磁容错电机被广泛应用于机车牵引、航空航天、船舶运输等对控

制系统有着较高要求的领域^[2]。

对于永磁容错电机的控制策略主要有查表法^[3]、最优转矩控制法^[4-6]和最优电流控制法^[7-8]。文献[9]针对四相永磁容错电机采用空间电压矢量控制策略, 但是并未涉及故障时的容错控制。为解决上述问题, 文献[10]采用直接转矩补偿方法和旋转磁动势不变方法进行容错控制。文献[11-12]根据故障前后磁动势不变的原则, 得到了开路故障下的容错补偿电流,

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51777024)

作者简介: 徐晓辉(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁容错电机控制技术。

朱景伟(1963—), 男, 教授, 研究方向为永磁电机设计与控制、电力电子技术及装置、新能源发电。

并未涉及短路时的容错控制。文献[13-14]对六相永磁容错型磁通切换电机分别采用基于磁动势不变的原则和瞬时转矩不变原则进行开路补偿,并针对短路故障采用故障分解补偿法,实现了电机在开路和短路时的容错控制。文献[15-16]对双绕组永磁容错电机采用矢量控制的方法,并根据瞬时转矩不变的原则对电机进行容错控制,使得电机在开路和短路故障情况下能有效地抑制转矩脉动,维持输出转矩和转速的稳定。文献[17]针对六相永磁容错电机建立了具有容错能力的直接转矩控制策略,适合于转矩不敏感的大惯量负载。综上可知,目前针对电机的容错控制策略大致可分为基于磁动势不变和瞬时转矩不变的原则,实现了电机在故障态下,仍能输出满足要求转矩的目标,从而实现对电机的容错控制。

本文首先对三相永磁容错电机基本结构和数学模型进行了研究,然后针对单相开路的情况,提出了基于磁动势不变原则的容错补偿方法,实现了电机在开路时的容错运行。对于单相短路情况,采用分开补偿的策略,即分别对短路电流造成的转矩脉动和缺相不对称转矩脉动进行补偿,实现了电机在短路时输出转矩脉动最小。其次介绍了适合于三相永磁容错电机的矢量控制系统。最后通过 MATLAB 仿真验证所提出的容错控制策略的正确性。

1 三相永磁容错电机的数学模型

三相四极永磁容错电机的结构如图 1 所示。电机的转子采用表贴式转子磁钢结构,定子绕组采用单层集中绕组,并且各相绕组由如图 2 所示的 H 桥电路驱动,从而实现了电机相与相之间的物理隔离、热隔离、磁隔离和电气隔离。



图 1 三相四极永磁容错电机结构

三相永磁容错电机电压方程为

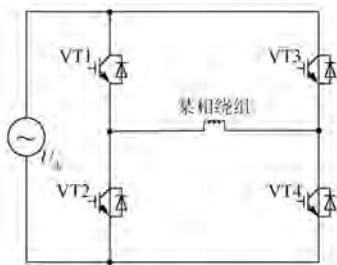


图 2 H 桥驱动拓扑

$$U_s = R_s I_s + \frac{d}{dt} \psi_s \quad (1)$$

磁链方程为

$$\psi_s = L_s I_s + \psi_f(\theta) \quad (2)$$

$$f(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (3)$$

转矩方程为

$$T_e = p(\psi_s I_s) \quad (4)$$

式中: U_s ——绕组电压;

R_s ——电阻;

I_s ——电流;

ψ_s ——磁链;

L_s ——自感;

ψ_f ——转子永磁体的磁链;

θ ——转子空间电角度;

T_e ——电磁转矩;

p ——极对数。

从三相静止坐标到两相静止坐标变换矩阵为

$$C_{3/2} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2 三相永磁容错电机单相故障容错控制算法

2.1 开路补偿

三相永磁容错电机无故障运行时,定子侧相电流总的磁动势 F 表示为

$$F = F_A + F_B e^{\frac{2\pi}{3}j} + F_C e^{\frac{4\pi}{3}j} = \frac{3}{2} F_m e^{j\theta} \quad (6)$$

根据磁动势与电流的关系,将式(6)改写成

电流的形式:

$$\frac{3}{2}I_m e^{j\theta} = I_A + I_B e^{\frac{2\pi}{3}} + I_C e^{\frac{4\pi}{3}} \quad (7)$$

不失一般性,假设当 A 相绕组发生开路故障, $I_A=0$, 该相的磁动势也为零, 定子电流合成的磁势不再是圆形磁势, 会出现椭圆形磁链轨迹^[18], 椭圆形的磁链将会产生接近电机转速频率的转矩脉动, 使得转矩产生较大波动。

为了保持缺相前后定子合成的总磁势不变, 只需满足式(7)成立即可。为了方便计算, 现将相电流表示成如下形式

$$\begin{cases} i_B = x_b \cos \theta + y_b \sin \theta \\ i_C = x_c \cos \theta + y_c \sin \theta \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)中分离实部与虚部可得:

$$\begin{cases} x_b + x_c = -3 \\ y_b + y_c = 0 \\ \sqrt{3}x_b - \sqrt{3}x_c = 0 \\ \sqrt{3}y_b - \sqrt{3}y_c = 3 \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)解得补偿电流为

$$\begin{aligned} i_B^* &= \sqrt{3}I_m \cos\left(\theta - \frac{5}{6}\pi\right) \\ i_C^* &= \sqrt{3}I_m \cos\left(\theta + \frac{5}{6}\pi\right) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: i_B^* 、 i_C^* ——故障后 B、C 相电流的瞬时值;

I_m ——电流幅值。

可见, 为了保障电机在 A 相故障后合成磁动势不变, 需要将 B 相和 C 相的幅值和相位进行调整, 幅值均为正常相电流的 $\sqrt{3}$ 倍, 相位分别滞后和超前正常相位 $\frac{\pi}{6}$, 如图 3 所示。

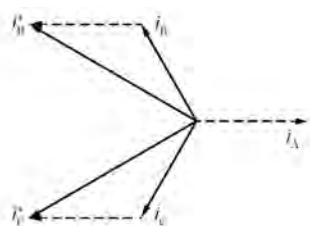


图 3 A 相开路故障后电流矢量

2.2 短路补偿

相比于开路故障, 短路故障不仅存在由短路故障引起的缺相不对称转矩脉动, 还存在由短路电流引起的转矩脉动。针对短路故障, 本文采用

分解补偿的策略^[12], 将短路故障分解为两部分补偿。第一步: 假设当 A 相短路后, 通过 B 和 C 相补偿因 A 相短路而造成的转矩脉动, 使其脉动磁动势为零。第二步: 对正常相电流缺失造成的转矩脉动进行补偿, 即使用开路故障的补偿策略。之后将这两部分电流矢量合成, 从而实现对短路故障的补偿。

当 A 相短路后, 其短路电流为

$$i_{as} = I_k \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \quad (11)$$

式中: I_k ——短路电流幅值。

令合成的磁动势为零, 由式(7)可得:

$$\begin{cases} i_{bl} - i_{cl} = 0 \\ i_{bl} + i_{cl} + 2I_k \sin \theta = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: i_{bl} 、 i_{cl} ——补偿 A 相短路时的非故障相电流。

又由式(8)可得:

$$\begin{cases} x_b - x_c = 0 \\ y_b - y_c = 0 \\ x_b + x_c = 0 \\ y_b + y_c + 2I_k = 0 \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)解得补偿电流为

$$\begin{cases} i_{bl} = I_k \sin \theta = I_k \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \\ i_{cl} = I_k \sin \theta = I_k \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (14)$$

上述完成了对 A 相短路造成的脉动磁动势的补偿, 然后对因 A 相的缺失造成的转矩脉动进行补偿。这里直接采用 2.1 节中的开路故障补偿电流, 然后将两部分矢量合成, 得到最终的补偿电流为

$$\begin{cases} i_{bl1} = I_k \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) + \sqrt{3}I_m \cos\left(\theta - \frac{5}{6}\pi\right) \\ i_{cl1} = I_k \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) + \sqrt{3}I_m \cos\left(\theta + \frac{5}{6}\pi\right) \end{cases} \quad (15)$$

B 相和 C 相故障时也可以用相同的方法得到故障时的容错补偿电流。

3 三相永磁容错电机矢量控制系统

本文采用电压空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 的策略。

SVPWM 基本原理是在一个控制周期内,选择与参考电压矢量相邻的两个非零电压矢量和零电压矢量,并通过控制它们的作用时间,从而合成所需要的电压空间矢量。在图 4 中, u_x 和 u_y 是两个相邻基本电压空间矢量,其作用时间分别是 T_1 和 T_2 , u_{out} 为输出的参考电压矢量, α 为 u_{out} 与 u_x 之间的夹角,由平行四边形法则可得:

$$\begin{cases} u_{out} = u_x T_1 + u_y T_2 \\ T_s = T_1 + T_2 + T_0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: T_s ——PWM 控制周期;

T_0 ——零电压矢量作用时间。

可在一个采样周期内的不同扇区调制出更多的等效电压矢量用于逆变器开关状态的选择。

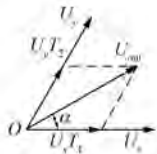


图 4 电压空间矢量合成图

图 5 所示为基于 SVPWM 控制的三相永磁容错电机矢量控制原理图。电机在正常状态时,根据速度与位置传感器检测出转子实际速度 ω ,与给定速度 ω_{ref} 做差后经过速度 PI 调节器得到所需要的电流分量 i_{qref} 。将采样得到的相电流 i_A 、 i_B 、 i_C 经过 $3s/2r$ 变换,转换为 dq 坐标系中的实际电流 i_d 和 i_q ,与参考输入 i_{dref} (其中 $i_{dref}=0$) 和 i_{qref} 进行比较,经过电流 PI 调节器得到所需的电压分量 U_d 和 U_q 。把上述电压分量经过 $2r/2s$ 坐标变换后输入到 SVPWM 模块中,产生新的 PWM 波^[19],再结合三相 H 桥逆变器将重新生成的三相定子电压矢量送入到三相永磁容错电机中,从而实现对三相永磁容错电机的矢量控制。当电机某相绕组出现故障时,故障判断模块判断是发生开路故障

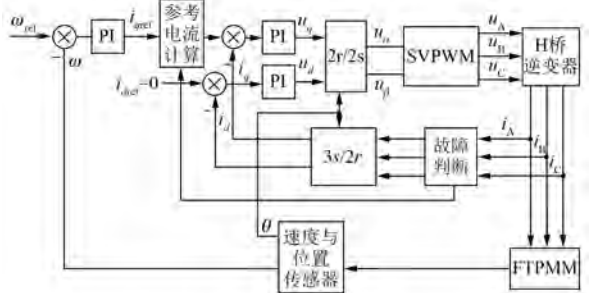


图 5 三相永磁容错电机的矢量控制原理

障还是短路故障,然后根据判断的结果,采取相应的容错策略,并通过参考电流计算模块生成故障时的给定电流,进而实现电机在故障时的容错控制。

4 仿真实验

采用 MATLAB/Simulink 对三相永磁容错电机矢量控制系统以及故障时的容错控制策略进行仿真验证。其中三相永磁容错电机参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

参数名称	参数值
额定转矩/(N·m)	1.5
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 000
转动惯量 J/(kg·m ²)	0.009 7
阻尼系数 B	0
定子电阻 R/Ω	1.59
绕组电感 L/mH	40
极对数 p	2

电机在前 0.2 s 内无故障运行,控制系统启动速度较快,转速快速上升,在 0.04 s 时达到给定转速,系统趋于稳定。在 0.2 s 时,A 相绕组突然开路,在不采取任何容错控制方法到 0.4 s 时加入容错补偿电流,仿真结果如图 6~图 8 所示。由仿真结果可知,电机在正常运行时转矩脉动约为 4.3%,在 A 相断路后,B 和 C 相电流幅值变大,转速和转矩出现波动,转矩脉动约为 30%,在 0.4 s 时采取容错控制方法,系统重新进入稳定状态,转速和转矩趋于平稳,此时转矩脉动约为 4.6%,实现了电机在开路故障时输出转矩的平滑,从而验证开路时容错控制算法的正确性。

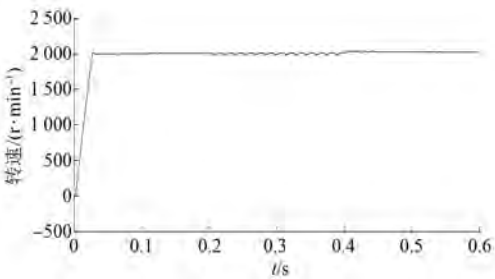


图 6 开路故障时转速波形

电机在正常运行 0.2 s 时,A 相绕组发生短路

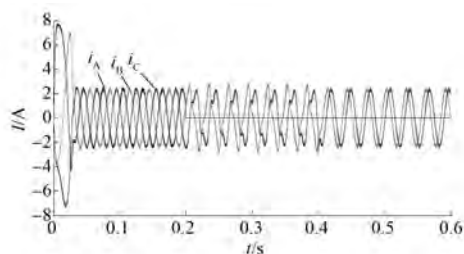


图7 开路故障时三相电流波形

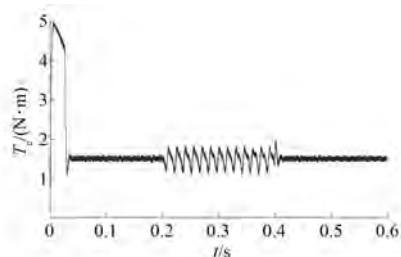


图8 开路故障时转矩波形

故障,在无容错控制工作到 0.4 s 时,采取容错控制方法进行控制,其仿真波形如图 9~图 11 所示,电机正常工作时转矩脉动约为 4.3%,在 A 相短路后,转矩脉动约为 34%,采用容错控制方法后转矩脉动约为 4.5%,正常工作时电流为 2.5 A,短路电流为 3.54 A。可见该容错控制方法能够有效地抑制短路时候的转矩脉动,实现了电机在短路故障时输出转矩脉动最小化。

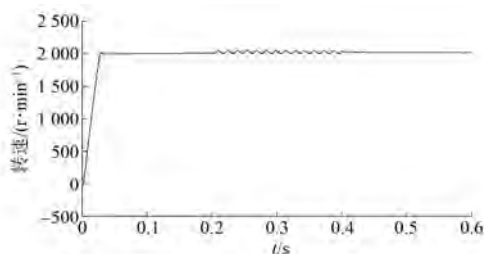


图9 短路故障时转速波形

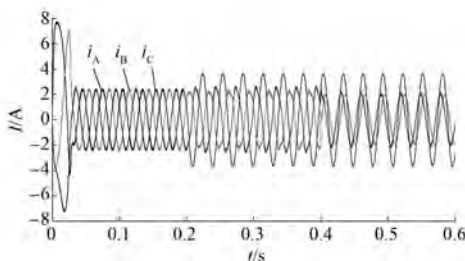


图10 短路故障时三相电流波形

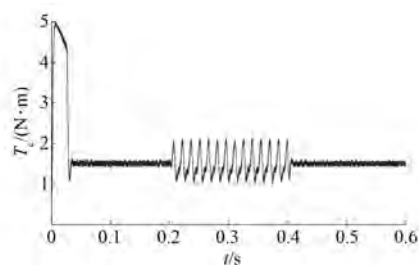


图11 短路故障时转矩波形

5 结 语

将 SVPWM 矢量控制策略应用于三相永磁容错电机控制系统中,扩展了矢量控制的应用范围,也充分发挥了其响应速度快的优势。当 A 相开路或者短路时,采用容错控制策略,输出的转矩脉动明显下降,转速和转矩恢复到稳定值,系统再次进入稳定状态。可见,基于磁动势不变原则得到的补偿电流可以实现电机在开路时的容错运行,针对短路故障所提出的分开补偿的方法,使得电机在短路时不仅能输出满足要求的转矩,使得转矩脉动最小,同时还避免了复杂的计算。本文下一步的工作是搭建三相永磁容错电机的硬件平台,实现对本文研究控制策略和容错控制算法的试验验证。

【参考文献】

- [1] 肖丽,范书瑞,刘卫朋,等.基于电流分析的四相关关磁阻电机气隙偏心故障综合检测方法[J].电工技术学报,2015,30(6): 122-132.
- [2] 郝振洋,胡育文.电力作动器用高可靠性永磁容错电机控制系统的设计及其试验分析[J].航空学报,2013,34(1): 141-152.
- [3] HAYLOCK J A, MECROW B C, JACK A G, et al. Enhanced current control of high-speed PM machine drives through the use of flux controllers[J]. Industry Applications IEEE Transactions on, 1999, 35(5): 1030-1038.
- [4] WANG J, ATALLAH K, HOWE D. Optimal torque control of fault-tolerant permanent magnet brushless machines[J]. Magnetics IEEE Transactions on, 2003, 39(5): 2962-2964.
- [5] 余文涛,胡育文,郝振洋,等.永磁容错电机最优转矩控制策略实验[J].航空学报,2010,31(8): 1622-1628.

(下转第 26 页)

- drives with parameter mismatch [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32 (9): 7160-7168.
- [2] FENG G, LAI C, KAR N C. An analytical solution to optimal stator current design for PMSM torque ripple minimization with minimal machine losses [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64 (10): 7655-7665.
- [3] 李耀华, 马建, 刘晶郁, 等. 电动汽车用永磁同步电机直接转矩控制电压矢量选择策略 [J]. 电机与控制学报, 2012, 16 (4): 43-49.
- [4] KRISHNAVENI D, SIVAPRAKASAM A, MANIGANDAN T. Optimum voltage vector selection in direct torque controlled PMSM using intelligent controller [C] // International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering, IEEE, 2014: 1-6.
- [5] ZHANG Y, LIU J, YUAN G, et al. An improved model predictive control with duty cycle control for PMSM drives [C] // 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiba, 2016: 1-5.
- [6] CHO Y, LEE K B, SONG J H, et al. Torque-ripple minimization and fast dynamic scheme for torque predictive control of permanent-magnet synchronous motors [J]. Power Electronics IEEE Transactions on, 2015, 30 (4): 2182-2190.
- [7] ALEXANDROU A D, ADAMOPOULOS N K, KLADAS A G. Development of a constant switching frequency deadbeat predictive control technique for field-oriented synchronous permanent-magnet motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63 (8): 5167-5175.
- [8] ZHU H, XIAO X, LI Y. Torque ripple reduction of the torque predictive control scheme for permanent-magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 59 (2): 871-877.
- [9] GUPTA N P, GUPTA P. Performance analysis of direct torque control of PMSM drive using SVPWM - inverter [C] // IEEE, India International Conference on Power Electronics, IEEE, 2013: 1-6.
- [10] LI Y H, JIAO S, QU Y F. Study on suppressing unreasonable torque ripple in SPMSM-DTC system [C] // Chinese Control Conference, 2017: 4780-4785.
- 收稿日期: 2017 -12 -04
-
- (上接第5页)
- [6] 荀倩, 秦海鸿, 马亚飞, 等. 基于最优转矩控制六相永磁容错电机故障补救策略的仿真研究 [J]. 电源学报, 2015, 13 (1): 28-34.
- [7] 郝振洋, 胡育文, 黄文新, 等. 永磁容错电机最优电流直接控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (6): 46-51.
- [8] BIANCHI N, BOLOGNANI S, PRE M D P. Impact of stator winding of a five-phase permanent-magnet motor on postfault operations [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55 (5): 1978-1987.
- [9] 任元, 孙玉坤, 朱纪洪. 四相永磁容错电机的 SVPWM 控制 [J]. 航空学报, 2009, 30 (8): 1490-1496.
- [10] 司宾强, 吉敬华, 朱纪洪, 等. 四相永磁容错电机的两种容错控制方法 [J]. 控制与决策, 2013 (7): 1007-1012.
- [11] 赵品志, 杨贵杰, 李勇. 五相永磁同步电动机单相开路故障的容错控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (24): 68-76.
- [12] RYU H M, KIM J W, SUI S K. Synchronous-frame current control of multiphase synchronous motor under asymmetric fault condition due to open phases [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42 (4): 1062-1070.
- [13] 吴一丰, 邓智泉, 王宇, 等. 六相永磁容错磁通切换电机及其单相故障的容错控制 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (3): 71-79.
- [14] 谢德娥, 王宇, 邓智泉. 考虑反电动势 2 次谐波的容错型磁通切换电机开路及短路故障控制策略 [J]. 电工技术学报, 2016, 31 (14): 130-138.
- [15] 王霞, 朱景伟, 曹林柏, 等. 双绕组永磁容错电机矢量控制及其容错策略分析 [J]. 电机与控制应用, 2015, 42 (2): 21-25.
- [16] 李小庆, 朱景伟, 孙军浩, 等. 双绕组永磁容错电机矢量控制系统研究 [J]. 电工技术学报, 2016, 31 (5): 26-34.
- [17] 郝振洋, 胡育文, 沈天珉. 永磁容错电机的直接转矩控制策略 [J]. 电工技术学报, 2014, 29 (3): 180-188.
- [18] 白洪芬, 朱景伟, 秦俊峰. 永磁同步电机开路故障容错补偿控制 [J]. 交通运输工程学报, 2016, 16 (6): 55-62.
- [19] 蒋家强, 曹建福. 永磁同步电机矢量控制及其仿真研究 [J]. 电气开关, 2011, 49 (4): 51-53.
- 收稿日期: 2017 -12 -04