

基于模糊在线调整权重因子的三相六开关容错 逆变器驱动异步电机 FCS-MPTC^{*}

余现飞¹, 缪仲翠^{1,2}, 张文宾¹, 王志浩¹, 李东亮¹

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 为了进一步提高异步电机的控制性能, 减小磁链和电流脉动, 针对传统异步电机有限控制集模型预测转矩控制(FCS-MPTC)中目标代价函数权重因子的配置问题, 提出一种模糊在线调整权重因子的异步电机 FCS-MPTC 方法。通过判断转矩和磁链误差, 采用 Takagi-Sugeno 模糊控制方法实现对权重因子的动态调整, 并给出了模糊论域和相应的模糊规则设计。同时考虑到三相异步电机驱动系统中逆变器开关故障给控制系统带来的影响, 采用三相六开关容错控制策略对系统进行容错控制。仿真结果表明: 该控制方法能够平滑磁链和电流输出, 减小电流谐波。

关键词: 三相六开关容错控制; 模糊控制; 权重因子; 有限集模型预测转矩控制(FCS-MPTC)

中图分类号: TM 343; TM 464 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)04-0027-05

Three-Phase Six-Switch Fault-Tolerant Inverter Driven Asynchronous Motor FCS-MTPC Based on Fuzzy Online Adjusting Weight Factor^{*}

YU Xianfei¹, MIAO Zhongcui^{1,2}, ZHANG Wenbin¹, WANG Zhihao¹, LI Dongliang¹

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control, Ministry of Education,
Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to further improve the control performance of asynchronous motor and reduce flux and current ripple, a method of fuzzy online adjusting of weight factor was proposed for the allocation of objective cost function weight factor in traditional finite control set model predictive torque control (FCS-MPTC). The Takagi-Sugeno model fuzzy control method was used to realize the dynamic adjustment of the weighting factor by judging the torque and flux linkage error, and the domain of fuzzy control and its reasoning rule were also built. At the same time, considering the influence of the inverter switch fault on the control system in the three-phase asynchronous motor drive system, a three-phase six-switch tolerant control strategy was used as the tolerant control strategy. The simulation results showed that the control method could smooth the flux linkage and current output and reduce the current harmonics.

Key words: three-phase six-switch fault-tolerant control; fuzzy control; weight factor; finite control set model predictive torque control (FCS-MPTC)

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(61663022)

作者简介: 余现飞(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为感应电机预测控制。

缪仲翠(1971—), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为感应电机先进控制。

张文宾(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机控制。

0 引言

20 世纪 80 年代,模型预测控制(MPC)作为继矢量控制、直接转矩控制(DTC)后发展起来的一种先进控制策略开始应用于电机控制领域^[1-2]。MPC 按应用分类主要可分为连续状态的连续控制集模型预测控制(CCS-MPC)和离散状态下的有限控制集模型预测控制(FCS-MPC)两类^[3]。与 CCS-MPC 相比,FCS-MPC 无需调制单元,运算量小,且能够与逆变器的离散特性和其开关状态的有限性相结合,逐渐成为了交流电机控制领域研究的热点。FCS-MPC 按控制目标的不同又可分为预测转矩控制和预测电流控制,其中预测转矩控制成本函数中权重因子的选取一直是难点。传统的有限控制集模型预测转矩控制(FCS-MPTC)以定子磁链的幅值和电磁转矩为控制目标,需要选取一个合适的权重因子来保证控制系统的性能,但如何选取权重因子尚缺乏完整的理论指导,一般根据经验或仿真试验得到,不具备通用性,限制了其在实际中的应用。为此,国内外学者提出了不同的解决方案。文献[4-6]将基于排序方法的多目标优化代替单个成本函数,消除了权重因子,但相对比较复杂。文献[7-9]选择定子磁链作为目标函数中唯一的控制参数,消除了权重因子的整定,简化了计算量,但并没有给出转矩转化过程的理论推导。文献[10]通过判断转速偏差及转速变化率,应用模糊算法对权重系数进行多目标动态优化分配,提高了动态过程中系统电流响应速度,降低了逆变器开关频率,获得了较好的控制效果。

三相六开关逆变器作为传统 FCS-MPTC 系统重要的组成部分,以其优良的控制效果,广泛应用于交流电机驱动系统。但逆变器的电力电子器件相对脆弱,易发生故障,会降低控制系统的控制性能。有关文献对逆变器在故障状态下电机的不同容错控制方法进行了研究^[11-14]。其中,三相四开关拓扑重构方式最为简单易行且成本最小,被广泛采用作为容错控制的主回路。但与传统三相六开关逆变器相比,其所能提供的电压矢量数量少、大小不一,且没有零矢量。这说明其空间上扇区的分配更加粗糙,调节作用不够精细,影响系统的动静态性能。针对这一问题,文献[15]提出三相六开关容错控制策略,并将其应用于直接转矩控

制系统,获得了较好的控制效果。

本文针对传统 FCS-MPTC 存在的问题做了以下改进。首先,针对目标函数权重因子多为一固定的参考值,会加剧磁链脉动、引起电流谐波畸变的缺点,提出通过判断转矩和磁链误差,应用模糊算法实现对权重因子的在线调整,进而实现降低磁链脉动、平滑电流输出的目的。其次,针对逆变器易发生故障对控制系统带来的影响,将三相六开关容错控制策略应用于 FCS-MPTC。最后,考虑到数字控制延时对系统的影响,对系统进行了延时补偿以提高控制系统的控制性能。仿真结果表明控制系统具有良好的动静态性能。

1 容错逆变器驱动异步电机模型

三相电压源型六开关容错逆变器驱动异步电机拓扑结构如图 1 所示,其中 U_{dc} 为直流母线电压。

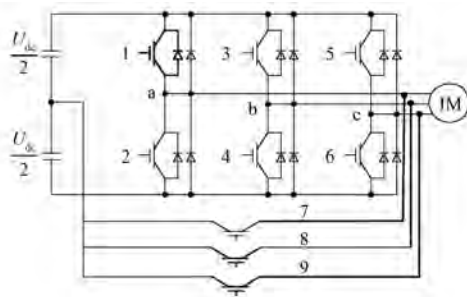


图 1 三相六开关容错逆变器驱动异步电机拓扑结构

设 $S_i (i = a, b, c)$ 为第 i 条桥臂上的开关函数。 $S_i = 1$ 表示桥臂上通下断, $S_i = 0$ 表示桥臂上断下通, 共有 (000)、(100)、(110)、(010)、(011)、(001)、(101) 7 种开关状态。通过分析,推导出三相六开关容错逆变器输出的定子绕组三相电压公式:

$$\begin{cases} u_a = \frac{1}{3} U_{dc} (S_a - S_b - S_c) \\ u_b = \frac{1}{3} U_{dc} \left(2S_b - \frac{1}{2} S_a - S_c \right) \\ u_c = \frac{1}{3} U_{dc} \left(2S_c - \frac{1}{2} S_a - S_b \right) \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)转换到两相静止 $\alpha\beta$ 坐标下可得:

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[u_a - \frac{1}{2} (u_b + u_c) \right] \\ u_{s\beta} = \frac{\sqrt{2}}{2} (u_b - u_c) \end{cases} \quad (2)$$

选取定子电流 i_s 和定子磁链 ψ_s 为状态变量, 则电机在两相静止坐标系 ($\alpha\beta$ 坐标系) 中的动态数学模型如下:

$$p\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (3)$$

其中,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s L_r + R_r L_s}{\sigma L_s L_r} \mathbf{I} + j\omega & \frac{1}{\sigma L_s} \left(\frac{1}{T_r} \mathbf{I} - j\omega \right) \\ -R_s \mathbf{I} & 0 \end{bmatrix};$$

$$j = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \sigma = 1 - \frac{L_s L_r}{L_m^2}; \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix}; \mathbf{x} = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad \psi_{s\alpha} \quad \psi_{s\beta}]^T;$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}.$$

式中: p ——电机磁极对数;

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}, \psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ —— $\alpha\beta$ 轴上的定子电流、转子磁链和定子电压分量;

L_s, L_r, L_m ——定、转子电感和互感;

R_s, R_r ——定、转子电阻;

ω ——转子电角速度;

T_r ——转子时间常数, $T_r = L_r / R_r$;

σ ——漏感系数。

定子磁链幅值方程表达式为

$$\psi_s = \sqrt{\psi_{s\alpha}^2 + \psi_{s\beta}^2} \quad (4)$$

电磁转矩方程表达式为

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (5)$$

2 容错逆变器模糊预测控制

2.1 容错预测控制

依据 FCS-MPTC 的控制思想, 根据预测模型预测在容错逆变器产生的 7 个电压矢量分别作用下的转矩和磁链下一时刻的轨迹, 通过价值函数对每个电压矢量的作用效果进行实时评估, 选择出使目标函数最小的电压矢量作为系统的输入。控制系统结构框图如图 2 所示。

为了得到下一时刻定子电流和定子磁链的预测值, 并保证预测精度, 采用二阶欧拉法对式(3)进行离散化, 可得定子电流和定子磁链的预测模型:

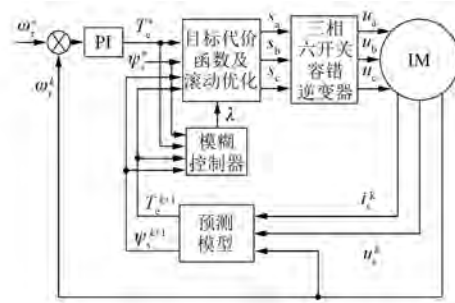


图2 三相六开关容错逆变器 FCS-MPTC

$$\mathbf{x}_n(k+1) = \mathbf{x}(k) + T_s [\mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k)]$$

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}_n(k+1) +$$

$$\frac{T_s}{2} \mathbf{A} [\mathbf{x}_n(k+1) - \mathbf{x}(k)] \quad (6)$$

式中: T_s ——系统采样周期;

$\mathbf{x}(k), \mathbf{x}(k+1)$ ——当前时刻和下一时刻的状态变量;

$\mathbf{x}_n(k+1)$ ——中间预测校正变量。

根据式(6)可得 $k+1$ 时刻的 $\mathbf{x}(k+1) = [i_s(k+1) \quad \psi_s(k+1)]^T$, 进而由式(4)、式(5)得到 $k+1$ 时刻的电磁转矩 $T_e(k+1)$ 和定子磁链幅值 $\psi_s(k+1)$ 。以磁链和电磁转矩误差绝对值之和最小化为控制目标, 选取目标函数:

$$g = |T_e^* - T_e(k+1)| + \lambda |\psi_s^* - \psi_s(k+1)| \quad (7)$$

式中: T_e^*, ψ_s^* ——给定电磁转矩和给定磁链;

λ ——权重系数。

2.2 延时补偿

在实际系统中, 采样和计算无法同时完成, 存在控制延迟, 使得预测所得的最优开关状态无法直接应用于当前时刻, 影响系统控制性能。为此, 对转矩和定子磁链进一步预测, 同时对目标函数作出以下修改。

将由式(3)所得的 $k+1$ 时刻的变量作为初值, 对 $k+2$ 时刻的变量进行预测, 可得 $k+2$ 时刻的变量表达式为

$$\mathbf{x}_n(k+2) = \mathbf{x}(k+1) +$$

$$T_s [\mathbf{A}\mathbf{x}(k+1) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k+1)]$$

$$\mathbf{x}(k+2) = \mathbf{x}_n(k+2) +$$

$$\frac{T_s}{2} \mathbf{A} [\mathbf{x}_n(k+2) - \mathbf{x}(k+1)] \quad (8)$$

延时补偿后的目标函数为

$$g = |T_e^* - T_e(k + 2)| + \lambda |\psi_s^* - \psi_s(k + 2)|$$

(9)

这样就使得在 k 时刻开始计算 $k+2$ 时刻的最优开关矢量,经过一个周期的计算应用在 $k+2$ 时刻的控制上,从而避免了算法存在的控制延时的问题。

2.3 模糊在线调整权重因子

由于固定参数的权重因子难以满足电机大范围调速时对性能的要求^[4],为了获得良好的控制效果需要,所以对权重因子 λ 进行在线动态调整。采用零阶 Takagi-Sugeno (T-S) 模糊模型,以磁链和转矩误差作为 T-S 模糊模型的输入,同时为了简化模糊计算,采用 ΔT_e 、 $\Delta |\psi_s|$ 为模糊输入,输入变量定义如下:

$$\Delta T_e = \frac{|T_{ref} - T_e(k + 2)|}{|T_{ref}|}$$

(10)

$$\Delta |\psi_s| = \frac{|\psi_{s,ref} - \psi_s(k + 2)|}{|\psi_{s,ref}|}$$

(11)

使得模糊输入值介于 0~1 之间,并根据模糊输入量的大小分为以下 5 个等级:VS、S、M、B、VB。对于模糊输入,采用相同的隶属函数对输入变量模糊化,如图 3 所示。

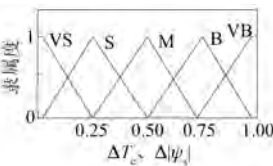


图 3 输入变量隶属度函数

每一对模糊输入对应一个模糊输出,因此同样对模糊输出即权重因子划分为 5 个等级,如图 4 所示。

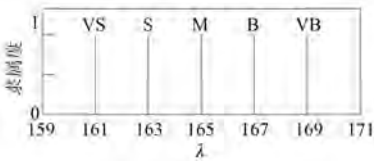


图 4 输出变量隶属度函数

模糊输入输出对应的模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则

λ	ΔT_e				
	VS	S	M	B	VB
$\Delta \psi_s $	VS	M	S	VS	VS
	S	B	M	S	VS
	M	VB	B	M	VS
	B	VB	VB	B	S
	VB	VB	VB	VB	VB

3 仿真试验

在 MATLAB/Simulink 仿真平台进行仿真试验。试验用异步电机参数选取: $R_s = 1.85 \Omega$, $R_r = 2.65 \Omega$, $L_s = 0.294 \text{ H}$, $L_r = 0.289 \text{ H}$, $p = 2$, $L_m = 0.283 \text{ H}$, $J = 0.128 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。仿真时长为 0.8 s,直流母线电压 U_{dc} 为 510 V,磁链给定值为 1.2 Wb,给定转速为 500 rad/s,负载转矩初值为 5 N·m,在 0.5 s 时突变负载至 10 N·m,系统采样周期为 10 μs 。

为了验证和比较基于模糊在线调整权重因子的预测转矩控制系统的控制性能,将基于固定权重因子的三相六开关容错预测转矩控制系统(系统 1)与基于模糊在线调整权重因子的三相六开关容错预测转矩控制系统(系统 2)进行仿真对比。仿真结果如图 5~图 8 所示。

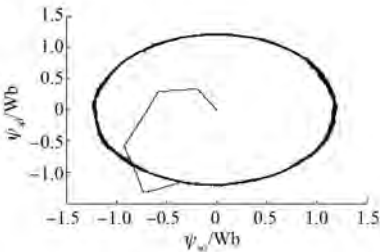


图 5 系统 1 定子磁链响应

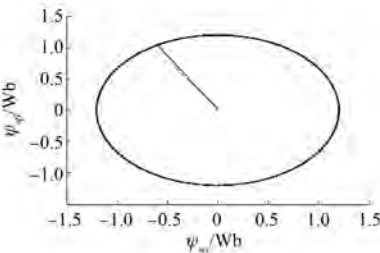


图 6 系统 2 定子磁链响应

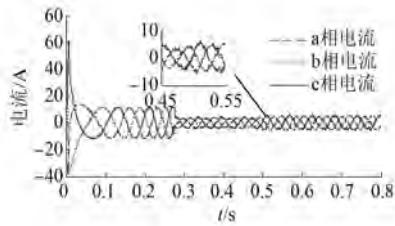


图7 系统1 定子三相电流响应

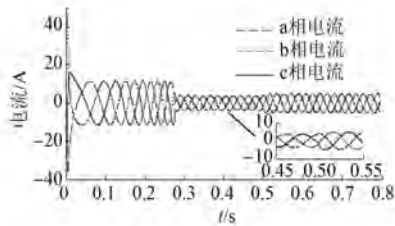


图8 系统2 定子三相电流响应

由图5~图8可以看出,系统1和系统2均可持续稳定地运行。但对比系统1和系统2的磁链和电流仿真图可知,采用基于在线调整权重因子预测控制方法的控制系统2,输出的磁链轨迹更为平滑,电流响应曲线较光滑。表2所示为两控制系统三相定子电流谐波失真(THD)。

由表2可知,与固定权重因子的控制系统相比,采用模糊在线调整权重因子的控制系统三相电流具有更小的THD值。

表2 定子电流 THD 值				%
相电流	a 相电流	b 相电流	c 相电流	
系统1	13.7	12.9	12.52	
系统2	6.38	5.98	7.39	

4 结 语

本文首先针对逆变器运行过程中易发生故障的问题,引入三相六开关容错控制策略;然后介绍了一种基于模糊在线调整权重因子的预测控制方法,通过应用模糊控制方法对磁链和转矩误差进行模糊化,并通过模糊规则设计实现对权重因子的在线调整。仿真结果表明:该控制方法有效地减小了定子电流谐波,平滑了定子磁链,验证了所提方法的有效性。

【参 考 文 献】

[1] HOLTZ J, STADTFELD S. A predictive controller for the stator current vector of AC machines fed from a switched voltage source[C] //Proceedings of the IEEE International Power Electron Conference, 1983: 1665.

[2] 张虎,张建伟,郭孔辉,等.基于扰动观测器的电动助力转向系统用永磁同步电机鲁棒预测电流控制[J].吉林大学学报(工学版),2015,45(3): 711.

[3] 柳志飞,杜贵平,杜发达.有限集模型预测控制在电力电子系统中的研究现状和发展趋势[J].电工技术学报,2017,32(22): 58.

[4] ROJAS C A, RODRIGUEZ J, VILLARROEL F, et al. Predictive torque and flux control without weighting factors[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013,60(2): 681.

[5] SIAMI M, SAVADKOOHI H K, ABBASZADEH A, et al. Predictive torque control of a permanent magnet synchronous motor fed by a matrix converter without weighting factor[C] // IEEE Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference, 2016.

[6] RAVI E K M, KUNISETTI V P K, THIPPIRIPATI V K. Enhanced predictive torque control for open end winding induction motor drive without weighting factor assignment [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018,34(1): 503.

[7] ZHANG Y, YANG H. An improved two-vectors-based model predictive torque control without weighting factors for induction motor drives [C] // IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems, 2014: 2766.

[8] MUDDINENI V P, SANDEPUDI S R, BONALA A K. Simplified finite control set model predictive control for induction motor drive without weighting factors[C] //IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2016.

[9] XIA C, QIU X, WANG Z, et al. Predictive torque control for voltage source inverter-permanent magnet synchronous motor based on equal torque effect[J]. IET Electric Power Applications, 2016,10(3): 208.

[10] 涂文聪,骆光照,刘卫国.基于模糊动态代价函数的永磁同步电机有限控制集模型预测电流控制[J].电工技术学报,2017,32(16): 89.

[11] 安群涛,孙醒涛,赵克,等.容错三相四开关逆变器控制策略[J].中国电机工程学报, 2010,30(3): 14.

(下转第 37 页)

调速系统在恒转矩区和恒功率区平滑切换,确保电机高速稳定运行。该策略缩短了电机恒转矩区启动时间,使电机更快达到给定速度;在受外界负载干扰时,具有良好的响应能力和鲁棒性。最后在仿真的基础上搭建了 dSPACE 试验平台,验证了该策略的可行性和正确性。

【参考文献】

- [1] 陈起旭,邹忠月,曹秉刚,等.纯电动汽车用内置式 PMSM 的 MTPA-FW 控制算法对比研究[J].微电机,2017,50(6): 44.
- [2] 周华伟,陈龙,刘国海,等.一种改善 PMSM 动态性能的弱磁策略[J].电机与控制学报,2014,18(9): 23.
- [3] MORIMOTO S, TAKEDA Y, HIRASA T, et al. Expansion of operating limits for permanent magnet motor by current vector control considering inverter capacity [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1990, 26(5): 866.
- [4] 康劲松,蒋飞,钟再敏,等.电动汽车用永磁同步电机弱磁控制策略综述[J].电源学报,2017,15(1): 15.
- [5] INOUE Y, MORIMOTO S, SANADA M. Comparative study of PMSM drive systems based on current control and direct torque control in flux-weakening control region [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6): 2382.
- [6] 王杰,谢源,谢涛.基于电压闭环反馈的永磁同步电机弱磁调速研究[J].电机与控制应用,2018,45(4): 27.
- [7] TURSINI M, CHIRICOZZI E, PETRELLA R. Feedforward flux-weakening control of surface-mounted permanent-magnet synchronous motors accounting for resistive voltage drop [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 57(1): 440.
- [8] 毛亮亮,梁悦,王旭东.内置式永磁同步电机弱磁过渡时的解耦补偿控制[J].电机与控制学报,2015,19(7): 14.
- [9] 宋建国,林强强,牟蓬涛,等.内置式永磁同步电机 MTPA 和弱磁控制[J].电力电子技术,2017,51(5): 89.
- [10] 陈坤华,孙玉坤,吉敬华,等.内嵌式永磁同步电动机弱磁控制分段线性化研究[J].电工技术学报,2015,30(24): 17.
- [11] 周永奎,胡冰乐,张翔.永磁同步电机电流前馈与电压补偿法的研究[J].机电技术,2015(1): 20.
- [12] 崔薇佳,黄文新,邱鑫.基于 Ansoft 的内置式永磁电机齿槽转矩优化研究[J].电机与控制应用,2014,41(7): 54.
- [13] 周湛清,夏长亮,陈炜,等.具有参数鲁棒性的永磁同步电机改进型预测转矩控制[J].电工技术学报,2018,33(5): 965.
- [14] 陈果.基于改进型电压外环弱磁控制的 IPMSM 控制器[J].微特电机,2016,44(5): 44.
- [15] 罗德荣,陈华进,高剑,等.内置式永磁同步电机新的深度弱磁策略[J].电测与仪表,2017,54(20): 6.

收稿日期: 2018-12-18

(上接第 31 页)

- [12] BOLOGNANI S, ZORDAN M, ZIGLIOTTO M. Experimental fault-tolerant control of a PMSM drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(5): 1134.
- [13] 贺虎成,张玉峰,王永宾,等.新型三相容错逆变器研究[J].电力自动化设备,2015,35(5): 89.
- [14] 金楠,衡龙雨,马孝强,等.电容均压三相四开关变换器预测功率控制[J].电机与控制应用,2018,45(5): 46.
- [15] 韩力,王崇任,李辉,等.基于 DTC 的异步电机三相六开关容错控制策略[J].电机与控制学报,2015,19(10): 7.

收稿日期: 2018-12-18