

# 基于增量观测器的 MPCC 一拍滞后补偿方法研究

王治国<sup>1,2</sup>, 郑泽东<sup>1</sup>, 李永东<sup>1</sup>, 孙嘉伟<sup>1</sup>

(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;

2. 陆军装甲兵学院 兵器与控制系, 北京 100072)

**摘要:**模型预测控制具有概念简单、容易处理包含约束条件的多变量控制问题等优点,已经成为电力传动领域研究的热点。针对三相异步电机的连续控制集模型预测电流控制(CCS-MPCC),通过系统闭环模型研究了一拍滞后对模型预测控制的影响,并给出了基于增量观测器的滞后补偿方法。首先,介绍了三相异步电机 CCS-MPCC 的基本原理;其次,利用系统闭环模型分析了一拍滞后对 CCS-MPCC 的影响;然后,给出了增量观测器及其设计方法;最后,通过实验验证了一拍滞后及基于增量观测器的补偿方法对模型预测控制的影响。实验结果表明,增量观测器具有良好的一拍滞后补偿特性,可以明显的改善 CCS-MPCC 的控制性能。

**关键词:**模型预测控制;电流控制;三相异步电机;一拍滞后;滞后补偿;增量观测器

中图分类号:TM343;TM921 文献标识码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID)

DOI:10.19457/j.1001-2095.dqed20980



## Research on One-step Delay Compensation Method for Model Predictive Current Control Based on Incremental Observer

WANG Zhiguo<sup>1,2</sup>, ZHENG Zedong<sup>1</sup>, LI Yongdong<sup>1</sup>, SUN Jiawei<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Control Engineering, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China)

**Abstract:** Model predictive control (MPC) has several important advantages such that concepts are very intuitive and the multivariable case with constraints can be easily considered. So, MPC has become a hot research topic in electric drives. By using the CCS-MPCC as a workbench, the effect of one-step delay on MPC characteristics which investigated by system closed-loop model was focused on. At the same time, the compensation methods based on incremental observer was presented. Firstly, the basic principle of CCS-MPCC which used for three phase induction machine was introduced. Secondly, the effect of one-step delay on CCS-MPCC was analyzed by using the closed-loop model of the system. Thirdly, the incremental observer and its design method were presented. Finally, the effect of one-step delay and its compensation by incremental observer on MPC performances were verified by experiments. The experimental results show that the incremental observer has a good one-step delay compensation characteristic, which can obviously improve the control performance of CCS-MPCC.

**Key words:** model predictive control(MPC), current control; three phase induction machine; one-step delay; delay compensation; incremental observer

模型预测控制(model predictive control, MPC)通过模型预测被控变量未来变化的趋势,通过优化算法得到输入变量的最优解。由于 MPC 具有动态特性好<sup>[1-2]</sup>且易于处理多变量控制问题<sup>[3-4]</sup>等优点,使其成为电力传动领域研究的热点。

MPC 是典型的数字控制方法,通常需要使用数字控制系统实现。实际的电机数字控制系统通常采用滞后一拍的控制方式,以解决采样、计算以及占空比更新等环节导致的最大占空比受限等问题<sup>[5-6]</sup>。滞后一拍控制方式的反馈信号采样、控制变量计算与控制变量实现并不同步,

从而导致 MPC 出现超调和振荡,严重时系统不能稳定工作<sup>[7]</sup>。

电力传动领域中,常用基于模型的预测补偿方法实现一拍滞后补偿。这种方法包括开环补偿和闭环补偿 2 种类型。开环补偿直接使用电机模型计算被控变量在下一拍的预估值<sup>[8-10]</sup>,闭环补偿则通常采用观测器得到被控变量的预估值<sup>[11-12]</sup>。传统观测器理论上可以完全消除观测误差,但实际应用中存在的建模误差、采样噪声以及计算延迟等因素会导致观测器不能实现无误差估计<sup>[13]</sup>。

目前,研究 MPC 在电力传动领域中应用的文献通常将一拍滞后补偿作为一个细节来研究,专门研究该问题的文献较少。本文以连续控制集模型预测电流控制(continuous control set model predictive current control, CCS-MPCC)方法为例,重点研究一拍滞后对模型预测控制产生的影响及基于增量观测器的补偿方法。

## 1 CCS-MPCC 原理

### 1.1 三相异步电机模型

在采用转子磁链定向的同步坐标系中,选择电机定子电流为状态变量并将转子磁链及反电势项作为扰动,可得三相异步电机的离散状态空间模型如下式所示:

$$\begin{cases} x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) + E_d d(k) \\ y(k) = C_d x(k) \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} x(k) &= [i_{sd}(k) \quad i_{sq}(k)]^T \\ u(k) &= [u_{sd}(k) \quad u_{sq}(k)]^T \\ d(k) &= [\Psi_r(k) \quad \omega_r(k)\Psi_r(k)]^T \\ y(k) &= [i_{sd}(k) \quad i_{sq}(k)]^T \end{aligned}$$

式中: $x(k)$ 为状态变量; $u(k)$ 为输入变量; $d(k)$ 为扰动量; $y(k)$ 为输出变量。系统矩阵、输入矩阵和输出矩阵可分别表示为

$$\begin{aligned} A_d &= \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{\sigma L_s} \left[ R_s + \frac{L_m^2}{L_r^2} \cdot R_r \right] T_s & T_s \omega_s \\ -T_s \omega_s & 1 - \frac{1}{\sigma L_s} \left[ R_s + \frac{L_m^2}{L_r^2} \cdot R_r \right] T_s \end{bmatrix} \\ B_d &= \begin{bmatrix} \frac{T_s}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{T_s}{\sigma L_s} \end{bmatrix} & C_d &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ E_d &= \begin{bmatrix} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} T_s & 0 \\ 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau_r} T_s \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\tau_r = L_r / R_r \quad \sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$$

式中: $u_{sd}, u_{sq}$ 为定子  $d, q$  轴电压; $i_{sd}, i_{sq}$ 为定子  $d, q$  轴电流; $R_s, R_r$ 分别为定子和转子电阻; $L_s, L_r, L_m$ 为定子电感、转子电感以及互感; $\Psi_r$ 为转子磁链幅值; $\omega_s, \omega_r$ 分别为同步转速和电机实际转速; $\tau_r$ 为转子时间常数; $\sigma$ 为漏磁系数; $T_s$ 为采样周期。

当采样频率较高时,利用式(1)在 2 个相邻采样周期相减,得到电流增量模型,如下式所示。采用增量模型可以消除转子磁链和反电势对预测的影响,同时将输入变量表示为增量的形式:

$$\begin{cases} \Delta x(k+1) = A_d \Delta x(k) + B_d \Delta u(k) \\ \Delta y(k+1) = C_d \Delta x(k+1) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta x(k) &= [\Delta i_{sd}(k) \quad \Delta i_{sq}(k)]^T \\ \Delta u(k) &= [\Delta u_{sd}(k) \quad \Delta u_{sq}(k)]^T \\ \Delta y(k) &= [\Delta i_{sd}(k) \quad \Delta i_{sq}(k)]^T \end{aligned}$$

式中: $\Delta x(k)$ 为状态变量增量; $\Delta u(k)$ 为输入变量增量; $\Delta y(k)$ 为输出变量增量。

### 1.2 电流预测与滚动优化

利用式(2)可以预测异步电机电流在  $N_p$  个采样周期内的变化,如下式所示:

$$Y = Y_0 + L [F_Y \Delta x(k) + \Phi_Y \Delta U] \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} Y_0 &= \begin{bmatrix} y(k) \\ y(k) \\ \vdots \\ y(k) \end{bmatrix} \Delta U \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_p-1) \end{bmatrix} \\ F_Y &= \begin{bmatrix} C_d A_d \\ C_d A_d^2 \\ \vdots \\ C_d A_d^{N_p} \end{bmatrix} & L &= \begin{bmatrix} I & 0 & \cdots & 0 \\ I & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ I & I & \cdots & I \end{bmatrix} & I &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \Phi_Y &= \begin{bmatrix} C_d B_d & 0 & \cdots & 0 \\ C_d A_d B_d & C_d B_d & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ C_d A_d^{N_p-1} B_d & C_d A_d^{N_p-2} B_d & \cdots & C_d B_d \end{bmatrix} \end{aligned}$$

CCS-MPCC 通常采用二次型评价函数实现滚动优化。将评价函数写成向量形式,如下式所示:

$$J = [Y^* - Y]^T Q [Y^* - Y] + \Delta U^T R \Delta U \quad (4)$$

式中: $Y^*$ 为电流参考值; $Q = Q^T \geq 0$ 为电流误差权重系数矩阵, $Q$ 中的权重系数越大,对电流误差要求越严格; $R = R^T > 0$ 为电压增量权重系数矩阵,

$R$  中的权重系数越大,对电压变化的限制越严格。

$Q, R$  以及  $Y^*$  的定义如下:

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & q_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & q_{N_p} \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & r_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & r_{N_p} \end{bmatrix}$$

$$q_i = \begin{bmatrix} q_i^d & 0 \\ 0 & q_i^q \end{bmatrix} \quad r_i = \begin{bmatrix} r_i^d & 0 \\ 0 & r_i^q \end{bmatrix} \quad Y^* = \begin{bmatrix} y^*(k) \\ y^*(k) \\ \vdots \\ y^*(k) \end{bmatrix}$$

式中:  $q_i^d$  和  $q_i^q$  分别为第  $i$  步预测  $d, q$  轴电流误差权重系数;  $r_i^d$  和  $r_i^q$  分别为第  $i$  步预测的  $d, q$  轴电压增量权重系数,  $i=1, 2, \dots, N_p$ 。

不考虑约束条件时,将  $Y^* - Y$  带入式(4),利用评价函数  $J$  对输入变量  $\Delta U$  求导数,可得下式:

$$\Delta U = [(L\Phi_Y)^T Q L\Phi_Y + R]^{-1} \cdot (L\Phi_Y)^T Q [Y^* - (Y_0 + LF_Y \Delta x(k))]$$

MPC 控制中,通常仅采用最优控制序列中与当前时刻对应的部分作为实际输入。定义 Hessian 矩阵  $H = (L\Phi_Y)^T Q L\Phi_Y + R$ , 可得实际输入变量如下式所示:

$$\Delta u(k) = K'_{mpc} [Y^* - (Y_0 + LF_Y \Delta x(k))]$$

其中

$$K'_{mpc} = [I \ 0 \ \cdots \ 0] H^{-1} (L\Phi_Y)^T Q$$

## 2 一拍滞后对 CCS-MPCC 的影响及补偿

不补偿一拍滞后时, CCS-MPCC 的控制原理如图 1 所示。由图 1 可见,由于存在一拍滞后,闭环系统需要将电流增量作为新的状态变量,从而使系统阶数增加,导致系统动态特性和稳定性发生变化。

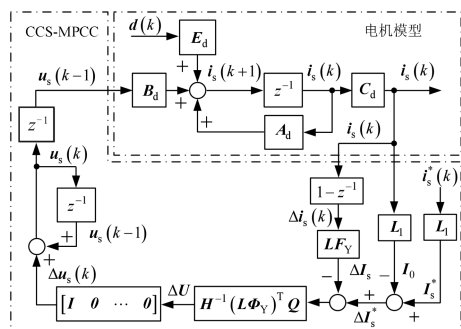


图 1 不补偿一拍滞后时 CCS-MPCC 的控制原理  
Fig. 1 The control principle of CCS-MPCC without one-step delay compensation

为了消除一拍滞后对 CCS-MPCC 产生的影响,可以在第  $k$  个控制周期内,先根据  $k$  时刻电流采样值  $i_s(k)$ , 利用模型估计出  $k+1$  时刻的电流值  $\hat{i}_s(k+1)$ , 然后利用该电流估计值来计算  $k+1$  控制周期内的电压参考值  $\hat{u}_s^*(k+1)$ 。电压参考值  $\hat{u}_s^*(k+1)$  在  $k+1$  时刻通过更新 PWM 实现, 从而消除了数字控制系统存的一拍滞后。包含一拍滞后补偿算法的 CCS-MPCC 控制原理如图 2 所示。

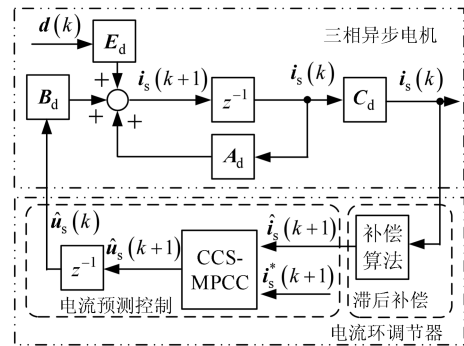


图 2 包含一拍滞后补偿算法的 CCS-MPCC 控制原理  
Fig. 2 The control principle of CCS-MPCC including one-step delay compensation

由于开环补偿算法存在参数鲁棒性差等问题,因此常采用基于观测器的闭环补偿算法。

## 3 基于增量观测器的滞后补偿方法

实际应用中,传统观测器因为建模误差、观测噪声以及计算延迟等原因会出现观测误差。为了消除观测误差,可以采用基于增量模型式(2)的增量观测器,其滞后补偿方法如图 3 所示。

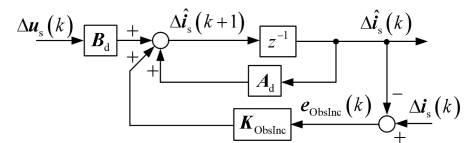


图 3 增量观测器滞后补偿方法  
Fig. 3 The compensation method based on incremental observer

增量观测器预测公式如下式所示:

$$\Delta \hat{i}_s(k+1) = A_d \Delta \hat{i}_s(k) + \Delta \hat{i}_s B_d u_s(k) + K_{obs} e_{obs}$$

$$K_{obs} e_{obs}$$

$$e_{obs} = \Delta i_s(k) - \Delta \hat{i}_s(k)$$

其中

$$K_{obs} = \begin{bmatrix} k_{obs\_1} & k_{obs\_2} \\ k_{obs\_2} & k_{obs\_1} \end{bmatrix}$$

式中: $e_{obs}$ 为观测误差; $\mathbf{K}_{obs}$ 为观测误差反馈系数矩阵, $\mathbf{K}_{obs}$ 中的元素可以通过极点配置来确定。

则  $k+1$  时刻,电流观测值如下式所示:

$$\hat{i}_s(k+1) = i_s(k) + \Delta \hat{i}_s(k+1) \quad (8)$$

式(2)与式(7)相减可得增量观测器的状态空间模型如下式:

$$e_{obs}(k+1) = (\mathbf{A}_d - \mathbf{K}_{obs})e_{obs}(k) \quad (9)$$

增量观测器模型式(9)的特征方程可表示为下式:

$$|\lambda \mathbf{I}_{2 \times 2} - (\mathbf{A}_d - \mathbf{K}_{obs})| = [\lambda - (a_{11} - k_{obs\_1})]^2 + (a_{12} - k_{obs\_2})^2 = 0 \quad (10)$$

其中  $a_{11} = 1 - \frac{1}{\sigma L_s} [R_s + \frac{L_m^2}{L_r^2} \cdot R_r] T_s$   $a_{12} = T_s \omega_s$

由式(10)可见, $\mathbf{K}_{obs}$ 可以将增量观测器的极点配置在如下式所示的位置上。

$$\lambda_{1,2} = (a_{11} - k_{obs\_1}) \pm j |a_{12} - k_{obs\_2}| \quad (11)$$

为了使增量观测器的动态特性不受电机转速影响,同时在观测时避免出现振荡,应当取  $k_{obs\_2} = T_s \omega_s$ 。这时,通过调节  $k_{obs\_1}$  可将增量观测器配置在实轴上的  $\lambda_{1,2} = a_{11} - k_{obs\_1}$  极点处。

### 4 实验结果

为了验证增量观测器的滞后补偿效果,进行了实验,实验用电机参数如下:额定功率 2.2 kW,额定频率 50 Hz,额定电压 380 V,额定电流 5.3 A,极对数 2,定子电阻 1.97  $\Omega$ ,转子电阻 2.34  $\Omega$ ,定子电感 281.2 mH,转子电感 281.2 mH,互感 270.0 mH。

实验系统由电流环调节器、坐标变换、调制、磁链观测以及功率变换等部分组成,如图 4 所示。实验系统采用转子磁场定向控制,电流环调节器采用 CCS-MPCC。磁链观测采用同步坐标系下的电流模型;调制采用空间矢量脉宽调制。

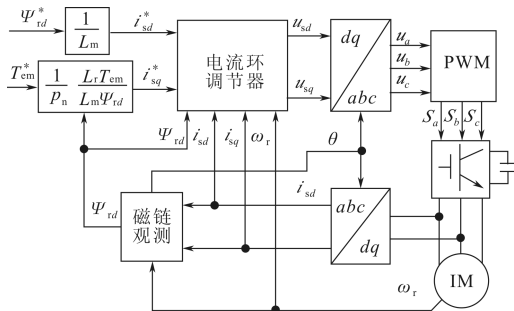


图 4 实验用磁场定向控制系统

Fig. 4 FOC system for experiment

由于  $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$  矩阵对 CCS-MPCC 的影响由其相

对值决定,因此将  $\mathbf{Q}$  取为单位阵;为了简化分析, $\mathbf{R}$  按照下式的形式取值:

$$r_1 = r_2 = \dots = r_{N_p} = \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix} \quad (12)$$

一拍滞后补偿对 CCS-MPCC 控制稳定性的影响如图 5 所示。

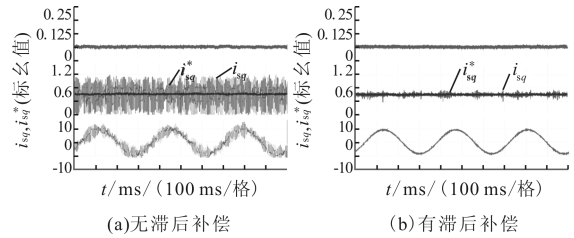


图 5 一拍滞后补偿对 CCS-MPCC 控制特性的影响

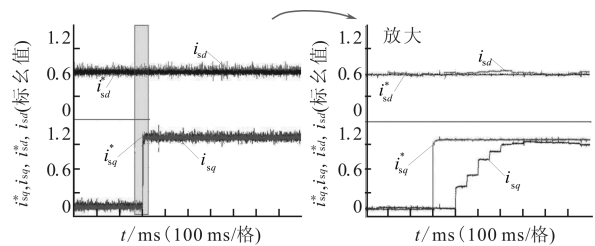
Fig. 5 The effect of one-step delay compensation on the performance of CCS-MPCC

一拍滞后补偿采用增量观测器方法,具体参数如下式所示:

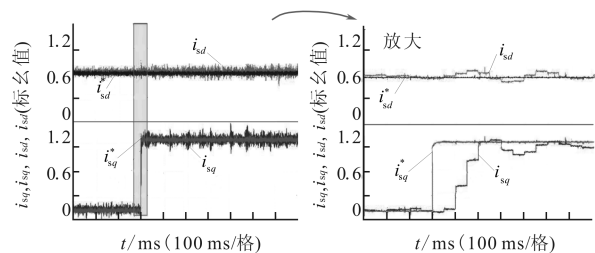
$$\mathbf{K}_{obs} = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.157 \ 1\omega_s \\ -0.157 \ 1\omega_s & 0.3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

电流环调节器采用 CCS-MPCC,权重系数和预测域长度取值为  $r=0.1, N_p=3$ 。

由图 5 可见,没有滞后补偿时, $q$  轴电流出现很大的电流纹波,纹波幅度约为 0.4(标么值),相电流上也存在明显的电流纹波。采用增量观测器补偿一拍滞后时, $q$  轴电流及相电流的纹波大幅减小,控制性能得到明显改善。



(a) 漏感存在60%误差



(b) 漏感存在200%误差

图 6 基于增量观测器的模型预测电流控制方法参数鲁棒性

Fig. 6 Parameter robustness of model predictive current control method based on incremental observer

图6实验波形验证了本文提出的增量观测器及预测电流控制方法对漏感的鲁棒性。

实验采用转矩控制模式, $q$ 轴电流从0.1(标么值)阶跃至1.0(标么值),电机带 $7\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载启动,权重系数矩阵 $R$ 如下式所示:

$$R=\text{diag}[5\ 5\ 10\ 10\ 15\ 15] \quad (14)$$

由图6可见,当漏感存在 $+60\%$ 和 $+200\%$ 误差时,本文提出的控制方法均能实现 $d,q$ 轴电流的无静差控制,同时具有较好的动态特性。

## 5 结论

论文可以得到以下结论:一拍滞后会导致闭环系统阶次增加,系统稳定性下降甚至出现不稳定的情况,MPC控制的特性变差;增量观测器可以实现无静差电流预测。

相对传统观测器补偿方法,增量观测器的滞后补偿特性更佳。

### 参考文献

- [1] Morel F, Xuefang L, Jean-Marie Rétif, *et al.* A Comparative Study of Predictive Current Control Schemes for a Permanent-magnet Synchronous Machine Drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(7): 2715-2728.
- [2] Kazmierkowski M P, Malesani L. Current Control Techniques for Three-phase Voltage-source PWM Converters: A Survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, 45(5): 691-703.
- [3] Scoltock J, Geyer T, Madawala U K. A Model Predictive Direct Current Control Strategy with Predictive References for MV Grid-connected Converters with LCL Filters[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2015, 30(10): 5926-5937.
- [4] Rawlings J B, Mayne D Q. Model Predictive Control: Theory and Design[M]. Madison, Wisconsin: Nob Hill Publishing, 2009.
- [5] 李春鹏,孙绍华. 数字控制对并网逆变系统稳定性和动态性能的影响[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 23-27.
- [6] 童力,邹旭东,丰树帅,等. 基于预测无差拍算法的永磁同步发电机无传感器控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 17-26.
- [7] 王伟华,肖曦. 考虑一拍滞后的PMSM电流环改进PI调节器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1882-1888.
- [8] Cortes P, Rodriguez J, Silva C, *et al.* Delay Compensation in Model Predictive Current Control of a Three-phase Inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 323-325.
- [9] Zhang Y, Xia B, Yang H. Performance Evaluation of an Improved Model Predictive Control with Field Oriented Control as a Benchmark[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(5): 677-687.
- [10] Miranda H, Cortés P, Yuz J I, *et al.* Predictive Torque Control of Induction Machines Based on State-space Models [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2009, 56(6): 1916-1924.
- [11] 何英杰,刘进军,王兆安,等. 基于重复预测原理的三电平APF无差拍控制方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 114-120.
- [12] 牛里,杨明,王庚,等. 基于无差拍控制的永磁同步电机鲁棒电流控制算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 78-85.
- [13] 贺明智,许建平,游小杰,等. 环路延时对数字峰值电压控制开关变换器瞬态性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6): 1-7.

收稿日期:2019-10-09

修改稿日期:2019-12-28