

双零序分量注入的六相载波脉宽调制技术

闫 岩, 冯九一, 宋文祥

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘 要: 针对常规六相正弦脉宽调制(PWM)算法直流电压利用率低的问题, 研究了一种基于双零序信号注入的六相载波脉宽调制算法。该算法通过在正弦调制波中注入一定双零序分量来提高六相逆变器的控制性能。分析了该算法双零序分量变化范围以及直流电压利用率的提升原理, 给出了3种具有不同输出特性的双零序注入方法。通过对均值零序注入法进行仿真可以看出, 该算法能增大直流电压利用率, 改善系统运行特性, 验证了该 PWM 算法的有效性和可行性。

关键词: 双零序分量注入; 载波 PWM; 直流电压利用率; 六相逆变器

中图分类号: TM 464 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)09-0054-05

Double Zero-Sequence Component Injection of the Six-Phase Carrier Pulse Width Modulation Technique

YAN Yan, FENG Jiuyi, SONG Wenxiang

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Aiming at the problem of low utilization of DC voltage in conventional six-phase SPWM algorithm, a six-phase carrier PWM algorithm based on double zero-sequence signal injection was studied. The algorithm improved six-phase inverter control performance by injecting a certain double zero-sequence component into a sine wave. The change range of the double zero-sequence component of the algorithm and the principle of raising the DC voltage utilization ratio were analyzed. Three double zero-sequence injection methods with different output characteristics were given. Through the simulation of the mean zero-sequence injection method, it was seen that the algorithm could increase the utilization of DC voltage, and the system operating characteristics was improved, so that the effectiveness and feasibility of the PWM algorithm were verified.

Key words: double zero-sequence component injection; carrier PWM; DC voltage utilization; six-phase inverter

0 引 言

六相脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)算法大多是从三相 PWM 算法延伸而来的, 这里主要包括空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)算法和正弦脉宽调制(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)算法。SVPWM 算法具有直流电压利用率高、物理概念清晰、谐波抑制效果好等优点, 在三相电机控制系统中得到了广泛的应用^[1]。六相电机控制系统通过 SVPWM 算法需要 4 个基本电压矢量以

获得良好的谐波抑制效果, 其电压矢量作用时间的计算和作用顺序的安排难度提高。对于六相电机控制系统, SVPWM 算法具有开关频率高、开关损耗较大等缺点, 尤其是四维电流控制需要同时合成两个子平面的参考矢量, 造成采用 SVPWM 算法控制难度进一步提高^[2]。

采用 SPWM 算法对六相电机控制系统具有更大的优势, 然而常规的 SPWM 算法输出相电压基波幅值仅 $0.5U_d$, 通常需要采用零序注入的方法获得与 SVPWM 算法一样的线性电压调节范围^[3]。这就引出了 3 种典型的双零序信号注入算

作者简介: 闫 岩(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子变换与电机驱动技术。

法。算法将 SPWM 算法中的调制波信号注入零序分量,通过注入双零序信号的方法,使得调制波信号得到优化,从而改变逆变器输出电压,减小电流 THD,优化系统运行特性。注入零序电压并不会影响线电压特性,但是会改变逆变器输出电压调节范围、开关规律及谐波分布等特性,该算法本质上是一种线性叠加的控制策略^[4]。

六相逆变器主电路如图 1 所示。首先对各相参考电压注入一定零序信号分量,得到各相参考电压与高频三角载波比较输出的 PWM 波形。由于每一相桥臂的上下 2 个开关器件都工作在互补导通状态,所以每一相桥臂都有 2 个开关状态,整个逆变器共有 2^6 个开关状态。双零序信号注入法就是通过控制这些开关状态实现对逆变器控制的。与传统的三相 PWM 算法相比,多相 PWM 算法具有更加宽广的自由度。双零序分量注入 SPWM 算法有更大的运用空间^[5]。

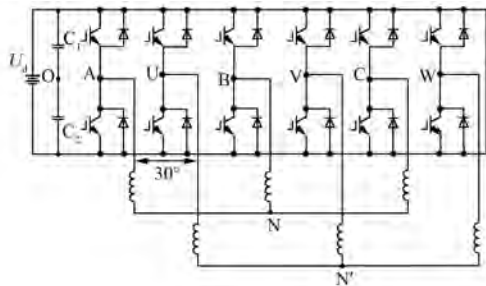


图 1 六相逆变器主电路

本文首先分析了双零序信号注入法应用于六相电机控制系统的方法,然后阐述了双零序信号注入基本概念并介绍了 3 种典型的双零序信号取值方法,最后通过对均值零序信号注入法进行仿真可以看出,采用双零序信号注入 PWM 算法的六相逆变器能够提高其控制性能,而且该算法实现简单,通用性强,输出电流谐波小,可以通过选取适当的零序信号类型以实现不同的运行特性。

1 双零序信号注入 PWM 实现原理

双零序分量注入 PWM 算法实现框图如图 2 所示。

首先在 6 组桥臂的各相参考电压中注入一定幅值的零序分量,然后将得到的各相参考电压与三角载波进行比较输出 PWM 波形。相邻 2 套绕

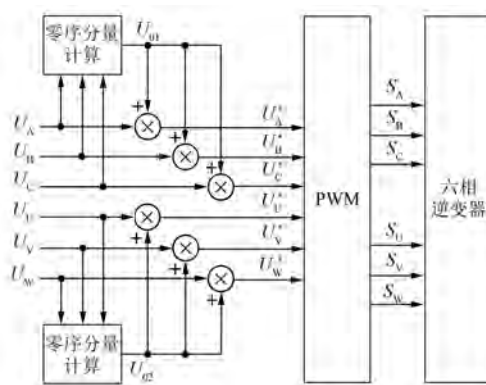


图 2 双零序信号注入 PWM 算法实现框图

组互差 30° 电角度,定义调制度 m 为零序注入前调制波幅值与三角载波幅值之比。零序注入后调制波表达式为

$$\begin{cases} U_A^* = \frac{U_d}{2} m \sin \omega t + U_0 \\ U_B^* = \frac{U_d}{2} m \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) + U_0 \\ U_C^* = \frac{U_d}{2} m \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) + U_0 \\ U_U^* = \frac{U_d}{2} m \sin \left(\omega t - \frac{1}{6} \pi \right) + U_0 \\ U_V^* = \frac{U_d}{2} m \sin \left(\omega t - \frac{5}{6} \pi \right) + U_0 \\ U_W^* = \frac{U_d}{2} m \sin \left(\omega t + \frac{1}{2} \pi \right) + U_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_0 ——零序分量。

忽略零序信号注入环节即传统 SPWM 算法^[6],建模可以按照三相 SPWM 算法进行搭建。

由于六相电机 2 套三相绕组中性点隔离,因此可看成 2 组独立的三相零序注入 PWM 算法,即双零序信号注入 PWM 算法^[7]。

1.1 零序电压幅值范围分析

理论上,注入零序电压幅值不能超过一定范围。由于直流母线电压限制,逆变器输出相电压变化范围为

$$-\frac{U_d}{2} \leq U_{j0} \leq \frac{U_d}{2} \quad (2)$$

式中: U_d ——直流母线电压;

U_{j0} ——逆变器输出相电压;

$j=A, B, C, U, V, W$ 。

以 U_d 为基值对式(1)进行标么化可得:

$$-1 \leq U_{j0} \leq 1 \quad (3)$$

逆变器相电压也可表示为负载相电压与零序电压之和的形式:

$$U_{j0} = U_{jN} + U_0 \quad (4)$$

由此可得:

$$-1 - U_{jN} \leq U_0 \leq 1 - U_{jN} \quad (5)$$

式中: U_{jN} ——逆变器负载相电压。

假设:

$$U_{\max} = \max(U_{AN}, U_{BN}, U_{CN}, U_{UN}, U_{VN}, U_{WN})$$

$$U_{\min} = \min(U_{AN}, U_{BN}, U_{CN}, U_{UN}, U_{VN}, U_{WN}) \quad (6)$$

则可得 $U_{\min} \leq U_{jN} \leq U_{\max}$, 因此双零序分量的取值范围为

$$-1 - U_{\min} \leq U_0 \leq 1 - U_{\max} \quad (7)$$

双零序分量在此区间内任意选取都符合 PWM 控制要求。

1.2 直流电压利用率分析

定义直流电压利用率为线电压基波幅值与直流母线电压之比。逆变器 A、B 相零序分量注入后相电压可以表示为

$$U_{AN} = \frac{U_d}{2} m \sin \omega t + U_0$$

$$U_{BN} = \frac{U_d}{2} m \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) + U_0 \quad (8)$$

则线电压基波 U_{AB} 表达式为

$$U_{AB} = U_{AN} - U_{BN} = -\frac{\sqrt{3}}{2} m U_d \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{3} \right) \quad (9)$$

由于电机同一套绕组三相系统具有对称性, 其余线电压基波也可表示成类似于式(9)的形式, 同时线电压幅值必须小于等于直流母线电压, 可列不等式

$$|U_{AB}| \leq \frac{\sqrt{3}}{2} m U_d \leq U_d \quad (10)$$

即:

$$m \leq \frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1.1547 \quad (11)$$

由此可知六相逆变器 PWM 算法调制度最大可为 1.1547。当调制度为 1 时线电压输出基波幅值为 $0.866U_d$, 而当调制度为 1.1547 时线电压输出基波幅值为 U_d 。根据直流电压利用率定义, 可得直流电压利用率提高了 15.47%。

2 几种典型的零序信号

零序分量计算有多种方法, 选择不同的零序信号分量可以改变 PWM 算法特性, 实现例如提高线性电压调节范围、减小逆变器开关损耗等调制效果。几种不同的零序分量信号如下所述。

2.1 均值零序信号

U_0 可以取极值的均值, 即:

$$U_0 = -\frac{1}{2}(U_{\max} + U_{\min}) \quad (12)$$

由该方法得到的零序信号 U_0 、原始信号 U_{m1} 及合成的参考信号 $U_0 + U_{m1}$ 可知, 原正弦信号由于注入了一定高次谐波信号, 波顶被优化, 因此提高了电压线性调节范围。

在 MATLAB/Simulink 环境下以标么值搭建第 1 套三相绕组零序信号注入 PWM 算法仿真模型, 其中电压幅值 $U_m = 1$, 开关频率 $f_{\text{pwm}} = 5 \text{ kHz}$, 正弦波调制频率 $f = 50 \text{ Hz}$, 最终得到均值零序信号仿真结果如图 3 所示。

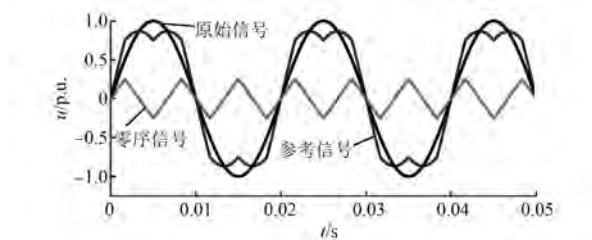


图3 均值零序信号仿真结果

由仿真可以看出, 调制波由正弦波变为了鞍形波, 削平了参考信号波峰波谷, 合成基波线电压时, 各相电压零序注入分量互相抵消, 提高了电压调节范围。当鞍形波极值达到 ± 1 时, 直流电压利用率可以提高 15.47%。

2.2 极值零序信号

取 U_0 的极大值作为零序信号, 即:

$$U_0 = 1 - U_{\max} \quad (13)$$

也可取 U_0 的极小值作为零序信号, 即:

$$U_0 = -1 - U_{\min} \quad (14)$$

以同样方式搭建仿真模型, 参数设置与均值零序信号注入相同, 由这种方法得到的零序信号 U_0 、原始信号 U_{m1} 及合成的参考信号 $U_0 + U_{m1}$ 仿真结果如图 4 所示。

该方法特点为正负半周波形不对称且调制波

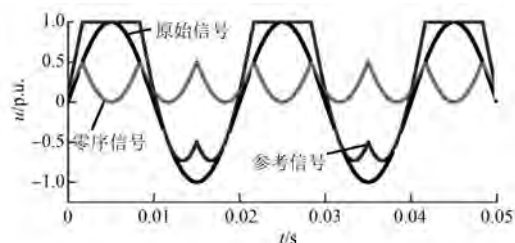


图4 极值零序信号仿真结果

每个周期有一段时间开关状态保持不变,这意味着在一段时间内如图1所示的逆变器开关状态保持不变,因此该方法在一定程度上可以减小开关损耗。

2.3 交替零序信号

如果某一瞬间 U_0 极大值幅值大于极小值幅值,则取极大值作为零序信号,否则取极小值作为零序信号,换言之,零序信号由3个给定的正弦信号瞬时值幅值最大的那个确定,即:

$$U_0 = \begin{cases} 1 - U_{\max}, & |U_{\max}| \geq |U_{\min}| \\ -1 - U_{\min}, & |U_{\max}| \leq |U_{\min}| \end{cases} \quad (15)$$

其中, $U_{\max1} = \max\{U_A, U_B, U_C\}$, $U_{\min1} = \min\{U_A, U_B, U_C\}$, $U_{\max2} = \max\{U_U, U_V, U_W\}$, $U_{\min2} = \min\{U_U, U_V, U_W\}$ 。

对其进行仿真可得交替零序信号仿真结果如图5所示。

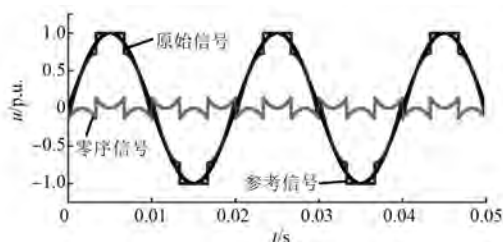


图5 交替零序信号仿真结果

该方法调制波同样在每个周期有一段时间状态保持不变,使得开关器件在一定时间内开关状态也保持不变,故该方法同样可以减小开关损耗,而且该方法正负半周波形保持对称,保留了均值零序信号注入法电压调制范围大的优点^[8]。

3 双零序信号特点分析

下文以均值零序注入 PWM 算法为例验证双零序注入的一些特性。对于正常的六相电机,由于中性点隔离,2套三相绕组之间的线电压没有

实际意义,故只考虑了同一套绕组之间的线电压。仿真中直流母线电压为540 V,载波频率为5 kHz,基波频率为50 Hz,六相逆变器输出为对称阻感负载,其中电阻为8 Ω ,电感为50 mH。

3.1 输出线电压分析

图6所示为常规 SPWM 算法在最大调制度下得到的线电压波形及稳态 FFT 分析。

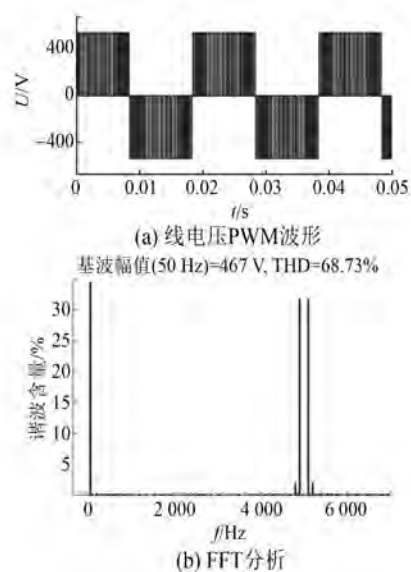


图6 常规 SPWM 算法线电压

图7所示为均值零序分量注入 SPWM 算法在最大调制度下得到的线电压波形及 FFT 分析。

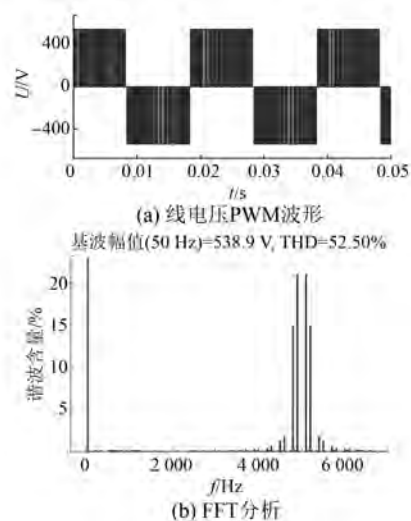


图7 均值零序算法线电压

2种调制方法线电压 PWM 波幅值均为540 V,输出为两电平。由 FFT 分析可以看出,常

规 SPWM 算法在最大调制度时输出基波线电压幅值为 467, 满足前述理论得到的 $0.866U_d$ 结果。均值零序分量注入 SPWM 算法在最大调制度时所得到的基波线电压幅值为 538.9, 线电压幅值相较常规 SPWM 算法增加了 15.40%, 基本符合之前的理论推导结果, 验证了双零序分量注入对于直流电压利用率的提升。

3.2 输出电流分析

六相电机控制系统对于谐波的控制相较于三相电机控制系统更难, 而通过对调制波注入双零序信号的方法改善电机控制系统谐波特性是较为简单的^[9-10]。图 8 所示为常规 SPWM 算法在调制度为 1 时得到的 A、U 相电流波形及稳态 FFT 分析。

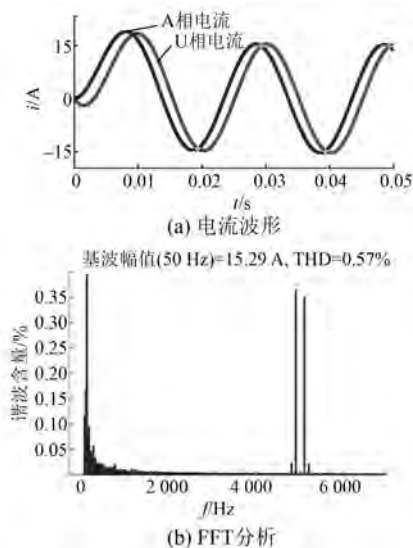


图 8 常规 SPWM 算法电流

图 9 所示为相同条件下均值零序分量注入 SPWM 算法在调制度为 1 时得到的 A、U 相电流波形及 FFT 分析。

2 组仿真结果电流幅值相差较小。由 FFT 分析可以看出, 在相同的仿真环境中, 常规 SPWM 算法电流稳态 THD 为 0.56%, 而零序注入 SPWM 算法电流稳态 THD 仅为 0.44%。这说明在调制度均为 1 的情况下, 运用均值零序注入 SPWM 算法有着良好的谐波分布特性, 注入零序分量能够抑制电流谐波。这里仅展示了均值零序算法仿真结果, 通过对极值零序和交替零序算法仿真可知, 2 种算法均可以达到与均值零序算法类似的效果。

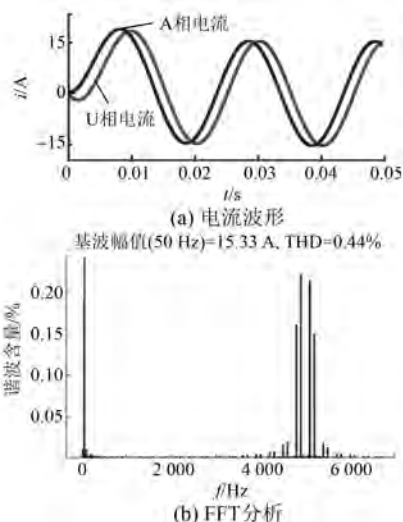


图 9 均值零序算法电流

4 结 语

本文分析了双零序分量变化范围及直流电压利用率的提升原理, 给出了 3 种具有不同输出特性的双零序分量实现方法。通过改变零序注入分量, 就可改变输出 PWM 波特性。双零序注入 PWM 算法实质上是对调制波进行改造优化的 PWM 算法。这种算法具有实现简单、综合性能好、易于扩展等优点。

通过仿真可以看出, 双零序分量注入 PWM 算法在提高直流电压利用率和改变输出电流谐波分布特性上有一定效果, 仿真结果也符合理论推导过程, 达到了使用双零序注入算法的目的。本文所采用的双零序注入法各有特点, 在实际运用中需要针对不同运行环境做相应调整。

【参考文献】

- [1] ZHOU K, WANG D. Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM: a comprehensive analysis [three-phase inverters][J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(1): 186-196.
- [2] BOJOI R, LAZZARI M, PROFUMO F, et al. Digital field-oriented control for dual three-phase induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 39(3): 752-760.
- [3] 谢路耀, 金新民, 吴学智, 等. 基于零序电压注入与调制波分解的三电平脉宽调制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 27-37.

(下转第 78 页)

- Transactions on Energy Conversion, 2015, 30 (1): 175-182.
- [7] 陈小元, 邓智泉, 许培林, 等. 整距绕组分块转子开关磁阻电机的电磁设计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(36): 109-115.
- [8] 王毅, 马洪飞, 赵凯岐, 等. 电动车用感应电机磁场定向矢量控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 113-117.
- [9] 刘万振, 刘广强, 林岩, 等. 铁氧体辅助同步磁阻电机转子优化设计[J]. 微电机, 2017, 50(2): 17-20.
- [10] CAI H, GUAN B, XU L. Low-cost ferrite PM-assisted synchronous reluctance machine for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5741-5748.
- [11] ZHAO W, LIPO T A, KWON B I. Comparative study on novel dual stator radial flux and axial flux permanent magnet motors with ferrite magnets for traction application [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11): 8104404.
- [12] 潘绪前, 朱孝勇, 左月飞, 等. 定子永磁型双凸极非稀土永磁电机谐波电流抑制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(11): 72-78.
- [13] CHEN Q, LIU G, ZHAO W, et al. Design and analysis of the new high-reliability motors with hybrid permanent magnet material[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(12): 8207010.
- [14] LIU C, CHAU K T, JIANG J Z, et al. Design of a new outer-rotor permanent magnet hybrid machine for wind power generation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6): 1494-1497.
- [15] 符荣, 窦满峰. 电动汽车驱动用内置式永磁同步电机设计与实验研究[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(5): 737-743.

收稿日期: 2018-02-06

(上接第 58 页)

- [4] 于飞, 张晓锋, 乔鸣忠. 基于零序信号注入的载波型多相 PWM 控制技术[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 127-131.
- [5] 杨金波, 杨贵杰, 李铁才. 六相电压源逆变器 PWM 算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 205-211.
- [6] 周长攀, 苏健勇, 杨贵杰, 等. 基于双零序电压注入 PWM 策略的双三相永磁同步电机矢量控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2522-2533.
- [7] 史友情, 陶彩霞. 双 Y 移 30° 六相永磁同步电机谐波电流抑制技术[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(3): 90-95.
- [8] LEVI E. Multiphase electric machines for variable-speed applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(5): 1893-1909.
- [9] 周长攀, 杨贵杰, 苏健勇. 五桥臂逆变器驱动双三相永磁同步电机系统双零序电压注入 PWM 策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 5043-5052.
- [10] 梅杨, 王立朋, 李正熙. 提高五桥臂逆变器电压利用率的调制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 207-214.

收稿日期: 2018-04-25

(上接第 64 页)

- [3] 滕福林, 胡育文, 李宏胜, 等. 基于自抗扰控制器的交流位置伺服系统[J]. 电气传动, 2011, 41(11): 46-50, 58.
- [4] 胡金高, 程国扬. PMSM 位置伺服系统的鲁棒复合非线性控制[J]. 电气传动, 2013, 43(8): 49-52.
- [5] 王继超, 杨振强. 基于细菌觅食优化算法的永磁同步电机位置伺服系统模糊控制策略[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(6): 40-44.
- [6] 曹薇, 谢天驰. 高阶非线性系统的位置控制器 PID 参数优化[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(9): 84-87.
- [7] WORKMAN M L. Adaptive proximate time optimal servo mechanisms [D]. Palo Alto: Stanford University, 1987.
- [8] DHANDA A, FRANKLIN G F. An improved 2-DOF proximate time optimal servomechanism [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(5): 2151-2164.
- [9] CHOI J W, LEE S C. Anti-windup strategy for PI-type speed controller [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 2039-2046.
- [10] CHENG G Y, PENG K M. Robust composite nonlinear feedback control with application to a servo positioning system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 1132-1140.
- [11] 胡金高, 程国扬. 鲁棒近似时间最优控制及其在电机伺服系统的应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 163-172.
- [12] LU T, CHENG G Y. Expanded proximate time-optimal servo control of permanent magnet synchronous motor[J]. Optimal Control Applications and Methods, 2016, 37(4): 782-797.
- [13] 李传江. 最优控制[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

收稿日期: 2018-04-25