

基于模糊自适应 PI 策略的并网逆变器死区补偿^{*}

赵启明¹, 徐国祥¹, 王煜伟¹, 杨沛豪², 郭新宇²

(1. 国家能源集团谏壁发电厂, 江苏 镇江 212006;

2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘 要: IGBT 死区效应的存在使三相并网逆变器输出电流不能准确跟踪参考电流, 导致系统控制性能较差, 而传统的死区补偿方法在相电流过零时存在电流极性判断不准确的问题。针对以上问题, 提出一种基于模糊自适应 PI 策略的三相并网逆变器死区补偿方法。该方案将扰动观测器应用到电流双环模糊自适应 PI 控制系统中, 将死区效应引起的电压误差视为外部扰动, 经过扰动观测器估算后, 反馈到输入端用以抵消死区效应的影响。模糊自适应 PI 电流双环控制策略可以解决实际系统响应速度慢、动态特性差的问题。通过 MATLAB/Simulink 仿真和试验验证了所提方案能够有效降低死区效应的影响, 提高系统动态响应。

关键词: 并网逆变器; 死区效应; 模糊自适应 PI 控制; 动态特性

中图分类号: TM 464 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)07-0094-06

Grid-Connected Inverter Dead-Time Compensation Based on Fuzzy-Adaptive PI Strategy^{*}

ZHAO Qiming¹, XU Guoxiang¹, WANG Yuwei¹, YANG Peihao², GUO Xinyu²

(1. Jianbi Power Plant of National Energy Group, Zhenjiang 212006, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: The existence of IGBT dead-time effect made the output current of three-phase grid-connected inverters unable to track the reference current accurately, which led to poor control performance. However, the traditional dead-time compensation method had the problem of inaccurate current polarity judgment when the phase current was zero. Based on the above problems, a dead-time compensation method for three-phase grid-connected inverter based on fuzzy-adaptive PI strategy was proposed. The disturbance observer was applied to the current double-loop fuzzy-adaptive PI control system. The voltage error caused by dead-time effect was regarded as an external disturbance. After the estimation of the disturbance observer, the voltage error was fed back to the input to counteract the dead-time effect. Fuzzy-adaptive PI current double-loop control strategy could solve the problems of slow response and poor dynamic characteristics of the actual system. The simulation of MATLAB/Simulink and experiment showed that the method could effectively reduce the influence of dead-time effect and improve the dynamic response of the system.

Key words: grid inverter; dead-time effect; fuzzy-adaptive PI; dynamic characteristics

0 引 言

在新能源并网发电领域, 电压并网逆变器应用非常广泛, 如何有效控制逆变器的并网电流, 使电流满足电网输送标准, 一直是电力行业急需解

决的问题。然而 IGBT 死区时间、开关管开通关断时间和通态压降的共同影响, 使逆变器并网电压产生误差, 导致并网电流发生畸变, 加重了系统对电网的谐波污染。

针对双逆变器驱动的永磁同步电机(PMSM)

^{*} 基金项目: 国家能源江苏公司科技项目(JSKJ-2019-01)

作者简介: 赵启明(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为发电与电气技术。

系统复杂性高的问题,文献[1]提出一种具有少开关特性的四桥臂变换器驱动永磁电机的新型拓扑结构,在四桥臂逆变器输出有效电压矢量和空间矢量脉宽调制(SVPWM)策略分析的基础上,分析了系统中桥臂产生的非对称死区电压分布规律及对相绕组电流畸变的影响,设计了具有平均死区电压补偿的谐波电流抑制策略,将死区补偿后的永磁电机绕组电流总谐波含量抑制至约5%。针对PMSM控制过程中参数失配问题,文献[2]深入分析了PMSM的数学模型,设计了基于模型参考自适应(MRAS)系统,即MRAS^[3-4]的参数在线辨识方法,通过将死区压降补偿到MRAS参考模型及自适应律^[5]中,以提高辨识算法的稳定性和准确性。针对死区时间导致逆变器输出电压和电流畸变、谐波含量增加等问题,文献[6]以单相二极管钳位三电平逆变器为对象,分析死区时间对桥臂输出电平的影响,根据桥臂电流方向选择延迟开关器件驱动信号的上升沿或下降沿来对死区时间进行合理补偿。针对三相四桥臂逆变器在传统空间矢量调制策略上运算较复杂的缺点,文献[7]提出一种快速计算每相桥臂导通时间的方法。与传统调制方法相比,该算法在运算速度上有很程度的提高,在此简化算法的基础上,加入了死区补偿算法,并分析出了与死区等效的时间量,再将时间量叠加到开关管导通时间上。对于SVPWM^[8]逆变器PMSM驱动系统,死区效应的存在会造成电机电流发生畸变,电机转矩脉动加大,特别在低速运行下更加明显^[9]。针对上述问题,文献[10]提出一种基于扩张状态观测器的死区补偿方法,将死区效应作为给定电压矢量的一种扰动矢量,通过抗扰动控制策略实现对死区时间补偿的效果。

1 逆变器死区效应

电压型三相桥式逆变电路拓扑结构如图1所示。

图1中,V1、V2、V3为功率开关器件,VD1、VD2、VD3为续流二极管。

死区效应简图如图2所示。从图2(a)可以看出,开关死区会产生误差脉冲信号。在V1的一个工作周期内,开关死区会产生2个误差脉冲信号,一个是开通时间为 T_{on} 的负脉冲,还有一个

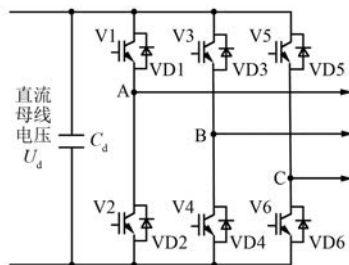


图1 三相桥式逆变器主电路拓扑结构

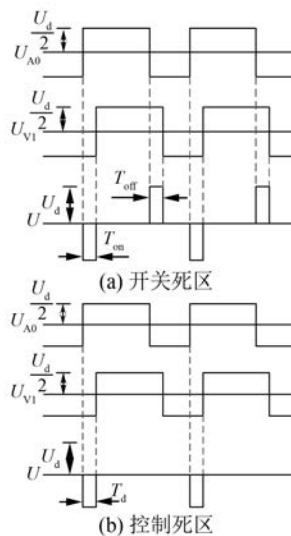


图2 死区效应图

是关断时间为 T_{off} 的正脉冲。相对于理想电压正弦波形,实际输出电压正相脉冲宽度也增加了 $T_{off}-T_{on}$,实际输出电压负相脉冲宽度增加了 $T_{off}-T_{on}$;在电流小于零时,结论相同。从图2(b)可以看出,在V1一个工作周期内,控制死区会产生一个宽度为 T_d 的控制死区负脉冲,相对于理想电压正弦波,实际输出电压的正相脉冲宽度减少了 T_d ,实际输出电压的正相脉冲宽度增加了 T_d ,当电流小于零时,结论相同。

与控制死区相比,开关死区对系统的影响作用较小,故一般仅考虑控制死区效应。虽然死区的单个误差脉冲不足以影响整个系统的性能,但累积作用会严重影响逆变器的控制性能,使逆变器输出电流发生波形畸变,因此死区效应的抑制就显得至关重要。

2 模糊自适应PI控制策略

模糊自适应PI控制建立在模糊控制理论的

基础上,将模糊控制理论、PI 参数调节等信息应用于控制系统。通过运用模糊推理对 PI 参数进行自动调节以获得最佳的控制参数,结构如图 3 所示。

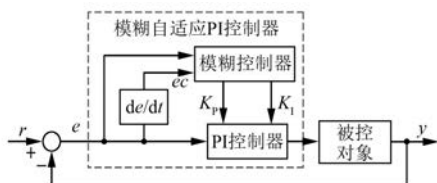


图3 模糊自适应PI控制原理图

根据系统的响应速度、超调量和稳态误差等要求,优化出一组初始PI参数,即 K_{p0} 、 K_{i0} ,并分析得到这3个参数对系统控制的影响;其次构建误差量 e 、误差变化率 ec 、 ΔK_p 、 ΔK_i 等控制参数之间的模糊推理关系;最后,在计算过程中对误差量 e 、误差变化率 ec 进行在线检测,制定模糊规则实现模糊推理,通过实时查询模糊矩阵规则表对参数 K_p 、 K_i 在线整定,满足不同时刻的 e 和 ec 对控制参数的要求。

令 ΔK_p 、 ΔK_i 为模糊控制器的输出参数,那么模糊自适应PI参数整定公式为

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + r_p \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + r_i \Delta K_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: r_p 、 r_i ——矫正速度。

图4为模糊自适应PI控制器在线校正流程图。模糊自适应PI调节器的作用需要通过不断的检测 e 和 ec ,找出 K_p 、 K_i 与 e 和 ec 之间的模糊关系。

在进行控制前,先由系统的模型优化出初始的

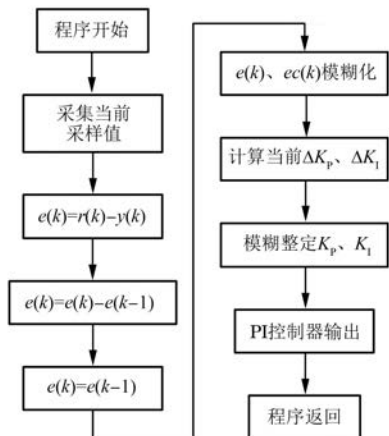


图4 模糊自适应PI控制器整定流程图

PID 参数 K_{p0} 、 K_{i0} ,控制时,再根据 e 和 ec 从上述的模糊规则表中推算出控制参数 ΔK_p 、 ΔK_i ,最后计算出模糊自整定PID控制器输出的实际参数。

3 死区补偿

3.1 DOB 控制原理

扰动观测器(DOB)的基本原理是将被控对象的实际输出与标准模型的差值当作扰动信号,利用DOB估算出扰动量,作为补偿信号反馈到输入端,用以消除扰动对输出造成的影响。DOB控制原理如图5所示。

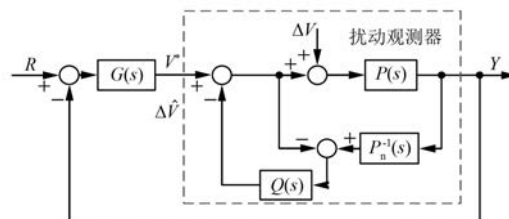


图5 扰动观测器原理图

图5中, $P(s)$ 为被控对象的实际模型; $P_n(s)$ 为被控对象的标称模型; ΔV 为扰动信号; $\Delta \hat{V}$ 为DOB估算出的扰动量; R 为系统输出、 Y 为系统输入; V^* 为控制器的输出。

为说明DOB的作用,先令 $Q(s)=1$,可推导出未加入DOB时,由 $R(s)$ 、 $\Delta V(s)$ 到 $Y(s)$ 的传递函数为

$$Y(s) = \phi_R(s)R(s) + \phi_{\Delta V}(s)\Delta V(s) \quad (2)$$

其中:

$$\phi_R(s) = \frac{G(s)P(s)}{1 + G(s)P(s)}, \quad \phi_{\Delta V}(s) = \frac{P(s)}{1 + G(s)P(s)}.$$

加入DOB时,由 $R(s)$ 、 $\Delta V(s)$ 到 $Y(s)$ 的传递函数为

$$Y'(s) = \phi'_R(s)R(s) + \phi'_{\Delta V}(s)\Delta V(s) \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} \phi'_R(s) &= \frac{G(s)P(s)P_n(s)}{G(s)[P(s) - P_n(s)] + [1 + G(s)P(s)]}, \\ \phi'_{\Delta V}(s) &= \frac{P(s)P_n(s)[1 - Q(s)]}{Q(s)[P(s) - P_n(s)] + P_n(s)[1 + G(s)P(s)]}. \end{aligned}$$

对比式(2)和式(3)可以看出,加入DOB以后,传递函数 $Y(s)$ 与 $Y'(s)$ 区别较大。在中低频段时,令 $Q(s) \approx 1$,DOB可以将实际模型等效成

标称模型,能够完全抑制中低频段的扰动;在高频段时, $Q(s)=0$,系统与未加入 DOB 时的特性一样,DOB 的控制性能消失。

3.2 DOB 死区补偿

将 DOB 应用到电流环控制系统中,把死区造成的电压误差干扰 ΔV 视为外界扰动,利用 DOB 对 ΔV 进行准确估算,将估算中的 ΔV 作为补偿信号反馈到输入端,以抵消死区效应对逆变器输出电压的影响,从而实现了死区补偿。

为了在实际系统中实现 DOB, $Q(s)$ 的阶次 $\geq P_n(s)$ 的阶次,由于三相 L 型逆变器的传递函数为一阶惯性环节,故选用一阶低通滤波器来满足逆变器特性, $Q(s)$ 选择形式如下:

$$Q(s) = \frac{1}{sT_i + 1} \tag{4}$$

式中: T_i ——不同截止频率的时间常数。

基于模糊自适应 PI 的三相并网逆变器控制结构如图 6 所示。

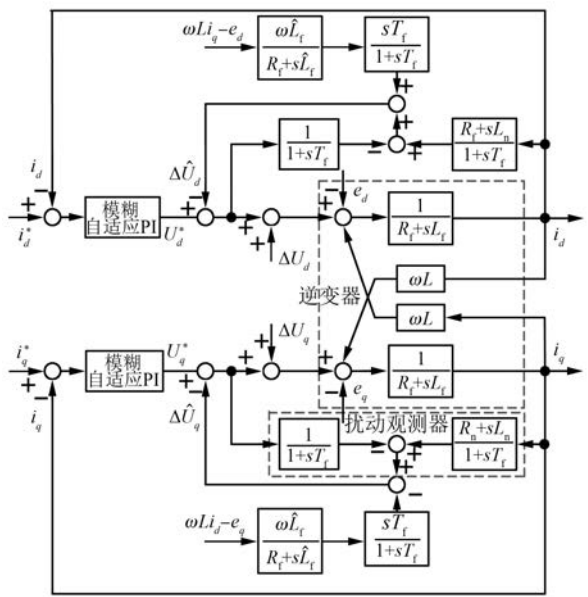


图 6 基于模糊自适应 PI 的并网逆变器控制结构图

当忽略死区效应且未加入 DOB 时,逆变器输出电压方程可以写成:

$$\begin{bmatrix} U_d^* \\ U_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL + R & -\omega L \\ \omega L & pL + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中: U_d^* 、 U_q^* ——模糊自适应 PI 产生的指令电

压信号;

U_d 、 U_q ——逆变器输出电压;

p ——微分算子;

i_d 、 i_q ——逆变器输出电流;

e_d 、 e_q ——并网电压的 dq 轴分量。

当考虑死区效应,但未加入 DOB 时,逆变器输出电压方程可以写成:

$$\begin{bmatrix} U_d^* \\ U_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL + R & -\omega L \\ \omega L & pL + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta U_d^{th} \\ \Delta U_q^{th} \end{bmatrix} \tag{6}$$

从式(6)可以看出,由于存在电压误差 ΔU_{dq}^{th} ,因此式(6)和式(5)中的 U_{dq}^* 有区别。此时,模糊自适应 PI 控制器需要补偿死区电压,才能消除逆变器死区效应对输出电压的影响。

考虑死区影响且加入 DOB 时,逆变器输出电压方程可以写成:

$$\begin{bmatrix} U_d^* - \Delta \hat{U}_d^{th} \\ U_q^* - \Delta \hat{U}_q^{th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL + R & -\omega L \\ \omega L & pL + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta U_d^{th} \\ \Delta U_q^{th} \end{bmatrix} \tag{7}$$

比较式(6)、式(7)可以看出,当加入 DOB 以后,DOB 将扰动估算值 $\Delta \hat{U}_d^{th}$ 、 $\Delta \hat{U}_q^{th}$ 反馈到输入端,与 ΔU_d^{th} 、 ΔU_q^{th} 相互抵消,就能够消除死区效应对输出电压的影响。

4 仿真分析

4.1 dq 轴电流动态解耦特性分析

为了验证 AdMPC-DOB 控制方案的有效性,在 MATLAB/Simulink 平台上搭建多电平三相逆变电路控制系统。逆变器主要参数如表 1 所示。

表 1 三相逆变电路系统主要参数

参数名称	参数值
直流母线电压/V	300
逆变器滤波电感/mH	5
串联等效电阻/ Ω	10
滤波电容/ μF	50
负载变化前电阻/ Ω	400
负载变化后电阻/ Ω	300
额定频率/kHz	5

假设 $L_f = 0.8L_r$, 基于传统 PI 策略 dq 轴电流动态响应仿真波形如图 7 所示。基于模糊自适应 PI 策略 dq 轴电流动态响应仿真波形如图 8 所示。

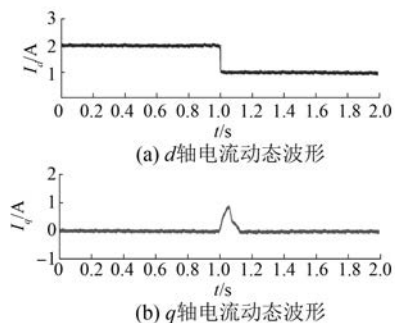


图 7 基于 PI 控制策略的逆变器 dq 轴电流动态仿真波形

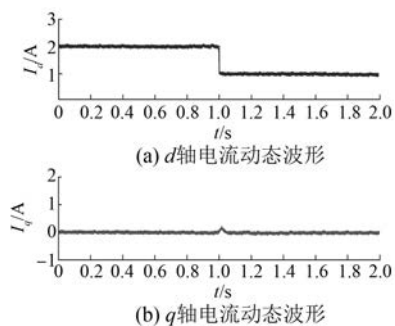


图 8 基于模糊自适应 PI 控制策略的逆变器 dq 轴电流动态仿真波形

从图 7 可以看出,在 $t=1$ s 时, d 轴参考电流从 2 A 下降到 1 A, 基于 PI 策略的逆变器控制算法的 q 轴电流动态响应出现一个 0.8 A 的脉动峰值, 且 0.1 s 后消失。

从图 8 可以看出,在 $t=1$ s 时, d 轴参考电流从 2 A 下降到 1 A, 基于模糊自适应 PI 策略的逆变器控制算法的 q 轴电流动态响应基本无脉动。

由此可以得出以下结论, 与 PI 控制策略相比, 基于模糊自适应 PI 策略的逆变器控制算法具有较好的 dq 轴电流动态解耦能力。

4.2 并网电流稳态特性分析

基于传统 PI 控制策略的三相并网电流稳态特性分析如图 9 所示。从图 9 可以看出, 基于 PI 控制策略下的三相并网电流波形不光滑, 波峰、波谷处均存在较大波动, 正弦稳定性较差, 且并网电流谐波畸变率 $\text{THD} = 8.71\%$, 不能满足 $\text{THD} < 5\%$ 的并网要求。

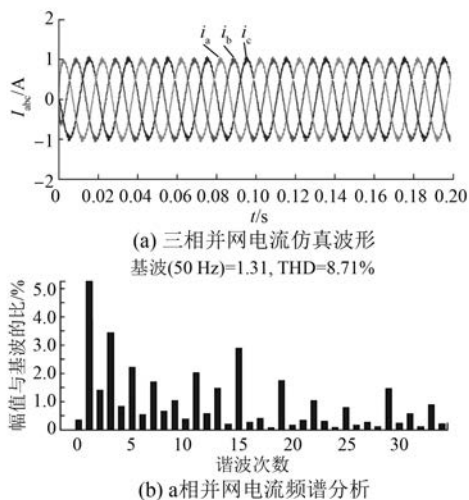


图 9 基于 PI 控制策略的三相并网电流稳态特性分析

基于模糊自适应 PI 控制策略的三相并网电流稳态特性分析如图 10 所示。

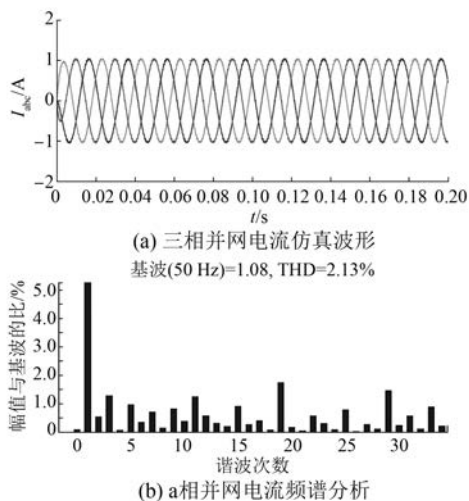


图 10 基于模糊自适应 PI 控制策略的三相并网电流稳态特性分析

比较图 9 和图 10 可以看到, 基于模糊自适应 PI 控制策略的三相并网电流正弦稳定性得到明显提高, 并网电流的谐波畸变率由之前的 $\text{THD} = 8.71\%$ 降低到 $\text{THD} = 2.13\%$, 满足并网要求。通过仿真验证了模糊自适应 PI 控制策略具有稳态控制精度高的优点。

5 试验分析

为了验证所提方案的有效性, 设计了基于 TMS320F28335 为核心的 DSP 控制系统, DS2004

板卡负责数据采集,电力电子驱动板卡 DS5202 用于得到三相桥 6 个功率开关的驱动信号,示波器选择 Tektronix 公司的 MDO4104B-3 型示波器。试验平台结构如图 11 所示。

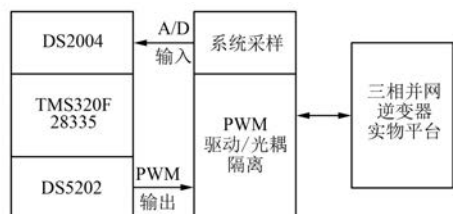


图 11 试验平台结构简图

并网电流动态特性分析如图 12、图 13 所示。其中图 12 为系统稳定运行至 40 ms,负载参数发生突变时,基于 PI 控制策略的 a 相并网电流动态试验波形图。图 13 为系统稳定运行至 40 ms,负载参数发生突变时,基于模糊自适应 PI 控制策略的 a 相并网电流动态试验波形图。

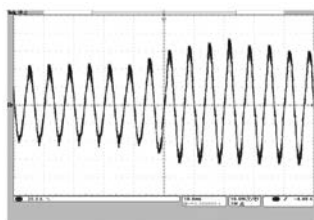


图 12 基于 PI 控制策略的 a 相并网电流动态试验波形

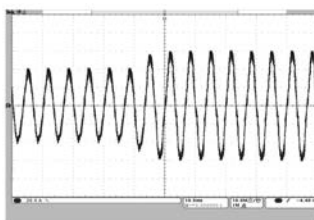


图 13 基于模糊自适应 PI 控制策略的 a 相并网电流动态试验波形

从图 12 可以看出,基于 PI 控制策略下的 a 相并网电流正弦稳定性较差,波形有“毛刺”不光滑;当负载参数突变时,电流虽然无超调,但调节时间为 20 ms。

从图 13 可以看出,基于模糊自适应 PI 控制策略下的 a 相并网电流正弦稳定性较好,波形光滑;当负载参数突变时,电流调节时间为 10 ms。证

明本文所提出的改进型控制系统具有良好的动态特性。

6 结 语

IGBT 死区效应的存在,使三相并网逆变器输出电压不稳定,导致了并网电流谐波畸变率较高的问题。本文将模糊自适应 PI 电流环控制策略应用于逆变器 DOB 死区补偿方法,提高了并网电流的稳态特性和动态特性。

【参考文献】

- [1] 魏佳丹,薛嘉成,周波,等.四桥臂变换器驱动开绕组永磁同步电机系统的死区效应分析与抑制[J].电工技术学报,2018,33(17): 4078.
- [2] LIN J, MU F Y, LEE W, et al. A chopper stabilized voltage reference using diode-connected MOS transistor [C] // 2010 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, 2010.
- [3] 张伟伟,肖飞,李超然,等.基于 MRAS 的感应电机无传感器控制策略优化[J].海军工程大学学报,2018,30(3): 21.
- [4] 杨沛豪.无刷直流电机无位置传感器控制系统研究[D].兰州:兰州理工大学,2018.
- [5] LIN J, YUAN J S. A 300 mV, 6-bit ultra-low power SAR ADC [C] // 2016 13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), 2016.
- [6] 李筱筠,杨淑英,曹朋朋,等.低速运行时异步驱动转速自适应观测器稳定性分析与设计[J].电工技术学报,2018,33(23): 5391.
- [7] 罗登,林宏健,舒泽亮.单相二极管箝位三电平逆变器死区时间补偿技术[J].电力自动化设备,2018,38(8): 147.
- [8] 胡博,马凯,肖柱,等.基于死区补偿的简化四桥臂逆变器调制策略[J].电力电子技术,2018,52(6): 49.
- [9] TAHERI S, LIN J, YUAN J S. Security interrogation and defense for SAR analog to digital converter[J]. Electronics, 2017, 6(2): 48.
- [10] 崔华阁,闫晓晓,江克峰.基于电机转矩波动控制的车内噪声优化研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2018,32(10): 58.

收稿日期: 2019-02-13