考虑数字延迟的 IPMSM 有源阻尼电流环控制策略

吴复霞1,杨艳1*,徐英东1,吴旭2

1南京邮电大学 江苏南京

2国电南瑞集团 江苏南京

【摘要】考虑到永磁同步电机电流环的优化研究目前主要聚焦于其跟踪性能的提升,即动态性能,而对其抗扰动能力的研究相对较少,本文在考虑数字延迟影响的复矢量电流环基础上,提出了一种结合有源阻尼策略的改进型复矢量电流环设计方法,改进策略有效抑制了扰动电压作用下电流的震荡幅值,并缩短了电流恢复稳态的时间,从而提升了电流环的抗扰动能力。仿真与实验结果表明,所提出的改进复矢量有源阻尼电流环设计方法在数字延时较大的工况下能够有效改善电流环的抗干扰能力。

【关键词】永磁同步电机; 电流环; 数字延迟; 有源阻尼

【基金项目】国家自然科学基金(52077106)

【收稿日期】2025年2月20日 【出刊日期】2025年3月18日 【DOI】10.12208/j.jeea.20250069

Active damped current loop control strategy for IPMSM considering digital delays

Fuxia Wu¹, Yan Yang^{1*}, Yingdong Xu¹, Xu Wu²

¹School of Automation and Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu

²Electric Control Branch, State Grid Nanrui Group, Nanjing, Jiangsu

[Abstract] Considering that the optimisation research on the current loop of permanent magnet synchronous motor mainly focuses on the improvement of its tracking performance, i.e., dynamic performance, while the research on its perturbation resistance is relatively less, this paper proposes an improved complex vector current loop design method combined with an active damping strategy based on the complex vector current loop considering the effect of the digital delay, and the improved strategy effectively suppresses the amplitude of the current oscillations under the action of the perturbation voltage, and The improved strategy effectively suppresses the current oscillation amplitude under the disturbance voltage, and shortens the time for the current to return to the steady state, thus improving the anti-disturbance capability of the current loop. Simulation and experimental results show that the proposed improved complex-vector active-damped current loop design method can effectively improve the anti-disturbance capability of the current loop under the condition of large digital delay.

Keywords Internal permanent magnet synchronous motor; Current loop; Digital delay; Active damping

1 引言

永磁同步电机(IPMSM)具有功率密度高、转矩密度大、结构稳定等特点,因其高效率和优秀的动态响应被广泛地应用于新能源汽车,在高性能工业机械设备和风力发电机以及其他可再生能源系统中也有大量应用[1-3]。电流环作为永磁同步电机控制系统的最内环,往往决定了控制系统的性能,高品

质的电流环是转速、位置外环的保证。现有研究大部分都聚焦于永磁同步电机电流环的跟踪能力优化,即通过改进控制策略提升电流指令的跟踪精度与响应速度。然而,在实际运行环境中,永磁同步电机的电流环不仅需要具备良好的跟踪性能,还需具备一定的抗扰动能力,以应对电机参数变化、反电动势(EMF)波动、逆变器非线性效应及母线电压波动

^{*}通讯作者: 杨艳

等因素所引入的扰动电压。

在传统 IPMSM 电流环设计中,阻尼特性主要依赖于定子电阻。然而,由于 IPMSM 通常采用低定子电阻以降低铜损,缺乏被动阻尼机制,因此阻尼特性较差,导致电流环在外部扰动作用下容易产生振荡甚至失稳,特别是在高性能应用场景下,如高精度伺服系统或高速高动态响应电机控制。为提升电流环的抗扰动能力,通常采用干扰观测器或有源阻尼策略。其中,有源阻尼策略[4-6]因其算法结构简单、实现效果显著,成为近年来学术界广泛关注和深入研究的热点方向。

针对常规矢量控制下的抗扰动能力来说,文献 ^[7]提出了一种基于有源阻尼矩阵的电流闭环控制方法,用于内置式永磁同步电机。该方法显著增强了电机的抗干扰能力,能够有效抑制 *q* 轴电流分量中常见的振荡现象。然而,尽管具有较好的抑制效果,该方法在提升抗干扰性能的同时,却牺牲了一部分动态跟踪能力。文献^[8]开环电流预测与有源阻尼相结合,以增加低开关频率比工况中的稳定裕度。

文献^[9]基于考虑延时的永磁同步电机简化模型,利用 Pade 延时近似方法和根轨迹法分析了系统延时对有源阻尼方法的影响,然后提出了两种有源阻尼电流环设计方法。文献二^[10]在文献^[9]的基础上,提出了基于虚拟阻抗的电流环参数设计原则,但是二者在工作在低开关频率工况下的效果均有待考量。文

献[11]提出了一种新的电流控制器结构,结合无误差 采样和有源电阻反馈,通过扩展有源电阻的允许值 范围提升抗干扰能力,在保持了输入阶跃响应的稳 定性的前提下提升了一定的抗扰动能力,但是干扰 抑制能力仍有提高空间。文献[12]则在仅考虑电感和电流的变化率的基础上给出了有源阻尼取值的经验公式,并通过逐点扫描的方式确定有源阻尼的最终取值,给常规设计提供了一定的参考。

为了进一步提高永磁同步电机电流环的抗扰动能力,本文基于有源阻尼控制策略,考虑到低开关频率下带来的系统延时问题,重构有源阻尼复矢量电流环闭环传递函数,保留了复矢量电流调节器结构,对复矢量有源阻尼电流环设计方法做出改进,在参数设计中考虑电流环数字延时与主动电阻。

仿真和实验结果表明,所提出的改进方法能够在保证电流环跟踪能力的前提下,提高电流环的抗扰动能力,增强系统的动态性能,为高性能 IPMSM 电流环控制系统的设计提供了一种高效可行的技术途径。

2 IPMSM 复矢量电流环数学模型

2.1 IPMSM 数学模型

一个典型的 IPMSM 电流环控制如图 1 所示,包括电流调节器、被控电机以及延迟环节三部分,对三者准确建模是完成电流环设计及性能评估的关键步骤。

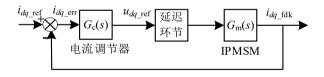


图 1 IPMSM 电流环简化控制框图

在旋转坐标系下基于分量形式的 IPMSM 定子电压方程为:

$$u_d = R_s i_d + p L_d i_d - \omega_e L_q i_q$$

$$u_a = R_s i_a + p L_a i_a + \omega_e (L_d i_d + \psi_f)$$
(1)

其中 u_d 、 u_q 分别为 dq 轴定子电压分量, i_d 、 i_q 分别为 d-q 轴定子电流分量,p 为微分算子, R_s 为定子电阻, w_e 为电气角速度, L_d 、 L_q 分别为 d-q 轴电感, y_f 为永磁体磁链。

由于 IPMSM 永磁体内嵌在转子铁芯内,其 L_d 和 L_q 并不相等,复矢量建模困难,可以通过拓展反电动势的方法使得 IPMSM 也能利用复矢量建模,并且反电动势项可视为变化较慢的扰动项,得到内置式凸极永磁同步电机的传递函数表达式[13-14]为:

$$G_m(s) = \frac{i_{dq}(s)}{u_{dq}(s)} = \frac{1}{L_q s + R_s + j\omega_e L_q}$$
(2)

2.2 电流环延迟环节数学模型

实际伺服控制系统是数模混合控制系统,从电流采样,RC 低通滤波电路、电流调节器计算时间、逆变器输出延迟、死区时间和光耦合信号传输等都是造成系统延迟的原因。本文主要是针对前向通路中的电流调节器设计,因此控制环路延时建模主要考虑电流调节器计算延迟和逆变器输出延迟这两个前向通路延迟 $^{[14]}$ 。常规做法采用的是在一个 PWM周期内电流单次采样电压单次更新,并且逆变器的输出延迟可以等效为零阶保持器。基于此得到总延迟时间 T_d ,当相角延迟已补偿时,则延迟环节的传递函数可以表示 $^{[15]}$ 为:

$$G_d(s) = e^{-sT_d} = e^{-s1.5T_s}$$
 (3)

其中 T_d 为总延迟时间, T_d =1.5 T_s , T_s 为 PWM 占空比更新周期。可以看到纯延迟环节在数学上表现为一个超越函数,其特性使得系统的零点和极点无法明确表示,因此在电流环的设计和性能评估中无法直接利用纯延迟环节的形式。传统方法中,通常将纯延迟环节近似为线性模型,以便在系统分析和设计中使用。本文选用将纯延迟环节近似为一阶低通滤波器,其传递函数形式为:

$$G_d(s) = e^{-sT_d} \approx \frac{1}{T_d s + 1} \tag{4}$$

2.3 复矢量电流调节器数学模型

复矢量电流调节器的基本原理是通过添加复数零点,使之与受控电机的复极点抵消,从而实现电流解耦控制。具体做法是在电流调节器的积分环节中加入 $j\omega_e K_p$ 项,由此可以得到复矢量电流调节器的传递函数 $^{[16]}$ 为式 $^{(5)}$ 。 K_p 、 K_i 分别为复矢量电流调节器比例增益和积分增益。

$$G_c(s) = \frac{K_p s + K_i + j\omega_e K_p}{s}$$
 (5)

3 引入有源阻尼的复矢量电流环

3.1 传统有源阻尼电流环设计与分析

有源阻尼的本质是通过改变特征值从而优化控制系统极点分布,实现路径是在电流反馈通道上增加一个虚拟的电阻 R_a ,给永磁同步电机电流环控制中抗扰动能力的提升提供了思路。因此,本节围绕有源阻尼复矢量电流环设计方法展开研究。结合上节可以得到完整复矢量有源阻尼电流环控制框图如

图 2 所示。

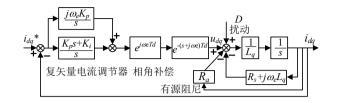


图 2 复矢量有源阻尼电流环

可以通过图 2 看到通过在反馈通道上增加主动电阻后,电机传递函数调整可表达为:

$$G_m(s) = \frac{1}{L_a s + (R_s + R_a) + j\omega_e L_a}$$
 (6)

在不考虑电流环延时的情况下,复矢量电流调 节器的参数可以根据零极点对消调整为:

$$K_p = \omega_c * L_s$$

$$K_i = \omega_c * (R_s + R_a)$$
(7)

式中 ω 。为电流环预设带宽,为了抑制开关器件开关动作引入的高频噪声,通常 PWM 的开关频率应该远离电流环的带宽频率,以抑制系统的噪声。 TI(德州仪器)公司通过实测建议取到开关频率的 1/20,最大取到 1/10,否则噪声再大将严重影响到系统性能,本文结合硬件实验平台与测试,最终取到开关频率的 1/15 左右。 L_s 的取值由于交直轴电感,q 轴电流调节器的比例增益为 ω_*L_q ,d 轴电流调节器的比例增益为 ω_*L_q 。

因此在角度进行补偿后且不考虑延时固有的滞 后效应的情况下,电流环的开环传递函数表达式为:

$$G_{open}(s) = G_c(s) \times G_m(s)$$

$$= \frac{K_p s + K_i + j\omega_e K_p}{s} \times \frac{1}{L_a s + R_s + R_a + j\omega_e L_a}$$
(8)

代入电流调节器参数后闭环传递为:

$$G_{close}(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \tag{9}$$

从式 (9) 可以看出闭环传递函数在零极点对消后仍然为经典一阶惯性环节,复矢量电流环在忽略数字延时的情况下加入有源阻尼保持了传统电流环的跟踪能力。

根据图 2 可得从扰动到实际电流的闭环传递函数为:

$$G_{close}(s) = \frac{s}{L_{\sigma}s^{2} + (R_{s} + R_{a} + j\omega_{\sigma}L_{a} + \omega_{\sigma}L_{a})s + \omega_{\sigma}(R_{s} + R_{s})}$$
(10)

从系统传递函数的角度分析,主动电阻 Ra 的引入改变了分母多项式的结构,具体表现为关于传递函数的一次项系数与常数项均显著增大。这一变化直接导致系统极点向复平面左侧偏移,从而增强了电流环在低频段与中频段的扰动抑制能力,随着 Ra 值的增加,系统对负载扰动、参数摄动等外部干扰的鲁棒性显著提升。

3.2 数字延迟对有源阻尼电流环的影响

在进行电压的角度补偿后,考虑系统存在的总延时 T_d 时,IPMSM 复矢量有源阻尼电流环的简化模型式可以重写为:

$$G_{open}(s) = \frac{K_p s + K_i + j\omega_e K_p}{s}$$

$$\times \frac{e^{-T_d s}}{L_q s + R + R_a e^{-T_d s} + j\omega_e L_q}$$
(11)

尽管随着 R_a 值的增加,系统对负载扰动、参数 摄动等外部干扰的鲁棒性显著提升,但是主动阻尼 的阻值是否可以选择无限大呢? 答案显然不是,因 为还需要考虑固有的数字延迟的影响。根据表达式 绘制控制系统的零极点图,在系统延时 T_a 固定的情 况下,逐步增大主动电阻 R_a 的取值,图为复矢量有 源阻尼电流环零极点图,可以看到随着主动电阻的 增大,存在一对极点逐渐靠近虚轴,系统趋于不稳 定。事实上有源阻尼的方法对系统固有延时较为敏 感,因此,研究考虑数字延时的复矢量有源阻尼电 流环设计方法是有必要的。

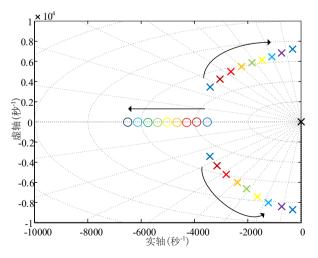


图 3 带延时的复矢量有源阻尼电流环零极点图

然而,目前尚无文献对虚拟电阻取值的理论分析与推导进行系统研究,其稳定性边界及相关稳定性问题仍缺乏深入探讨。具体而言,虚拟电阻的选择不仅受电机参数、负载特性及控制算法的制约,还与电机运行工况、系统动态响应及外部扰动等因素密切相关,其取值范围及优化方法仍有待进一步研究。

因此本文采用文献[12]提出的经验公式对有源阻尼进行取值,有源阻尼的经验公式如下:

$$R_a = \frac{R_s e^{-2R_s T_s / L_s}}{4(1 - e^{-R_s T_s / L_s})}$$
 (12)

4 改进的有源阻尼的复矢量电流环设计方法

然而,在数字控制系统中,由于计算延迟与逆变器电压输出等原因,电流环不可避免地受到数字延迟的影响。传统有源阻尼策略未充分考虑数字延迟对系统稳定性和阻尼特性的影响,可能导致阻尼效果降低甚至引入新的不稳定因素,从而限制其在高性能电机控制中的应用。针对这一问题,本文在充分分析数字延迟影响的基础上,提出了一种改进的复矢量有源阻尼电流环设计方法。该方法在基于有源阻尼策略的前提下,使其在考虑数字延迟的情况下提高系统的抗扰动能力,有效的提高了系统的鲁棒性。

从式 (5) 可以看到传统复矢量电流调节器的比例系数和部分积分系数共用一个系数 K_p ,为了方便引入有源阻尼的复矢量电流环设计,更好的采用零极点对消来整定电流调节器参数。将式 (13) 中比例系数 K_{p1} 和部分积分系数 K_{p2} 进行区分。复矢量电流调节器的表达式改写如下:

$$G_c(s) = \frac{K_{p1}s + K_i + j\omega_e K_{p2}}{s}$$
 (13)

角度补偿后的延时环节同上文所述采用一阶低 通滤波近似,表达式如下:

$$G_d(s) = e^{-sT_d} \approx \frac{1}{T_d s + 1}$$
 (14)

将式 13 和式 14 代入到 IPMSM 复矢量有源阻尼电流环的数学模型,传递函数可以重写为:

$$G_{open}(s) = \frac{K_{p1}s + K_{i} + j\omega_{e}K_{p2}}{s} \times \frac{1}{L_{q}T_{d}s^{2} + (L_{q} + T_{d}R_{s} + j\omega_{e}L_{q}T_{d})s + R + R_{a} + j\omega_{e}L_{q}}$$
(15)

由于式(15)中 L_q 与 T_d 的乘积很小可以忽略,采用零极点对消的方法可以重新整定电流调节器的参数,电流调节器的参数整定如下:

$$K_{p1} = \omega_c (L_q + T_d R_s)$$

$$K_i = \omega_c (R + R_a)$$

$$K_{p2} = \omega_c * L_a$$
(16)

其中, α 表示电流环的预设带宽, T_d 代表控制系统的总延迟时间。由此可见,改进后的复矢量电流调节器在结构上保持不变,对比例积分的参数进行了优化,在参数设计过程中引入了控制系统总延迟 T_d 和主动电阻 R_a 的影响。该优化方法在确保电流环快速跟踪能力的同时,进一步增强了系统的抗扰动能力,从而提高了控制系统在复杂工况下的稳定性与鲁棒性。

5 仿真和实验验证

5.1 有源阻尼电流环控制策略验证

为了验证上述改进策略的可行性和有效性,在 MATLAB 的 SIMULINK 搭建复矢量电流环仿真模 型,所用 IPMSM 参数如表 1 所示。

表 1 IPMSM 参数

电机参数	数值
d 轴电感 Ld/H	8e-4
q 轴电感 $L_{ m q}/{ m H}$	9.3e-4
定子电阻 R/Ω	0.31
极对数 Pn	4
开关频率 $f_{\rm s}/{ m kHz}$	5
额定转速 r/min	4000
永磁磁链 yī/Wb	0.01544
母线电压	28

首先为了保证有源阻尼的加入并不会改变电流

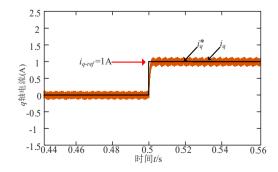


图 4 传统复矢量电流环电流阶跃响应图

环的动态性能,对其动态性能进行仿真分析,仿真条件为:工作在电流环模式下,在 0.5s 的时候给定 1A 的 q 轴阶跃电流参考信号,控制系统均设为理想无延时状态。图 4 图 5 分别是传统复矢量电流环电流阶跃响应图以及复矢量有源阻尼电流环电流阶跃响应图。从仿真图中可以看到,在理想无延时的工况下,传统复矢量电流环阶跃响应图基本与复矢量有源阻尼电流环阶跃响应图保持一致,验证了上文的分析,即复矢量电流环在忽略数字延时的情况下加入有源阻尼保持了传统电流环的跟踪能力。

接着为了验证所提考虑延时的复矢量电流环改进设计方法的有效性,对电流环的抗扰动能力进行仿真分析。仿真条件为:令q轴的参考电流保持 1A不变,为了模拟电机参数变化、反电动势(EMF)波动、逆变器非线性效应及母线电压波动等因素所引入的扰动电压,0.5s时在q轴的输出电压上加入5V的阶跃信号,总延时时间为 $1.5T_s$ (采样频率和开关频率保持一致)。

图 6 和图 7 分别为传统复矢量电流环和改进复矢量有源阻尼电流环的抗扰动能力仿真结果。从仿真结果可以看出,传统复矢量电流环在受到外部扰动电压影响时,受限于系统固有的延迟特性,表现出明显的电流震荡现象,且稳态恢复时间较长。其中图 6 传统复矢量电流环的 q 轴电流峰值达到 3.83 A。相比之下,所提出的改进型复矢量有源阻尼电流环控制策略在设计中充分考虑了数字延迟对系统动态性能的影响,并通过引入虚拟主动电阻增强系统阻尼特性,有效提升了对扰动的抑制能力。仿真数据显示,在相同扰动条件下,q 轴电流峰值显著降低至 2.88 A,峰值幅度明显减小。同时,系统从扰动状态恢复至稳态所需时间也由传统控制下的 5 ms缩短至 1 ms,表明改进策略具备更优的抗扰动能力。

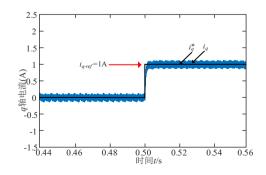


图 5 复矢量有源阻尼电流环电流阶跃响应图

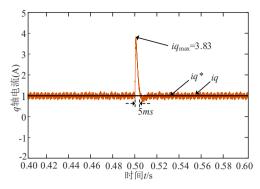


图 6 传统复矢量电流环抗扰动仿真结果

图 7 改进复矢量有源阻尼电流环抗扰动仿真结果

5.2 实验验证及分析

本文实验所用的硬件平台为图 8 所示,包括控制器、电流探头、示波器、开关电源、磁粉制动器、IPMSM、等。采用功率为 70W 的内置式永磁同步电机,详细参数与表 1 保持一致。磁粉制动器可为电机提供负载转矩,电源主要分为 24V 弱电、磁粉制动器所用电源和直流母线电压。

为了验证所提改进复矢量有源阻尼电流环设计方法对电流环抗扰动能力提升的有效性,进行了实验。首先为了验证有源阻尼的加入并不会影响电流环的动态能力,对q轴电流进行阶跃响应测试,受控电机工作在电流环模式,负载转矩由磁粉制动器提供,在0.5s的时候施加 1A 的 q 轴电流参考信号。图 9 (a)

图 9 (b) 分别是传统复矢量电流环电流阶跃响应图以及复矢量有源阻尼电流环电流阶跃响应图。

可以从实验波形图 9 (a) 和 9 (b) 看到,在加入主动电阻后,复矢量有源阻尼电流环阶跃响应图基本与传统复矢量电流环阶跃响应图保持一致,确保了其动态性能,验证了前文的分析与结论。

最后为了验证本文所提改进策略对电流环抗扰动能力的提升效果,进行实验。实验条件为:电机工作在电流环状态下,磁粉制动器提供转矩负载,q轴的参考电流信号值一直为1A,为模拟干扰条件,在q轴参考电压的输出上添加一个5V的阶跃信号。

图 10(a)图 10(b)分别是传统复矢量电流环电流实验图以及复矢量有源阻尼电流环电流实验图。

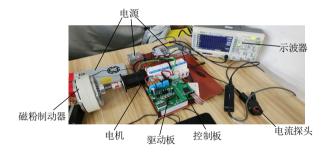
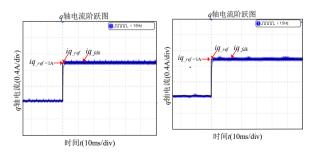
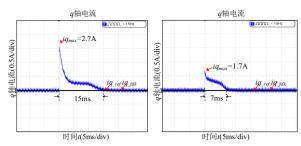


图 8 永磁同步电机实验平台



(a) 传统复矢量电流环(b) 复矢量有源阻尼电流环图 9 电流 i_a 阶跃响应实验图



(a) 传统复矢量电流环(b) 改进有源阻尼电流环 图 10 抗扰动实验结果

通过实验图 10 可以看到,在受到电压扰动后,改进的复矢量有源阻尼电流环电流震荡峰值相较于传统方法有明显的降低,从 2.7A 下降到 1.7A。并且改进策略在电流回归稳态所需时间相较于传统策略有所缩短,实验与仿真的结论基本一致。

6 结论

本文主要对永磁同步电机电流环的抗扰动能力 展开研究,提出了一种改进的复矢量有源阻尼电流 环设计方法,通过仿真和实验得出如下结论:

(1)本文提出的改进的复矢量有源阻尼电流 环设计方法保留了复矢量电流调节器的结构,保证 电流环跟踪能力不受影响。

改进策略在考虑延时后有效降低了在扰动电压 的干扰下电流环的电流震荡的幅值以及加快了恢复 稳态的时间,显著提升了永磁同步电机电流环的抗 扰动能力。

参考文献

- [1] Pontt, Jorge A., et al. "Network-friendly low-switching-frequency multipulse high-power three-level PWM rectifier." IEEE Transactions on In-dustrial Electronics 56.4 (2008): 1254-1262.
- [2] A. Yu, S. Wang, C. Zhang, X. Chai and Z. Kan, Design of Digital Current Regulator for PMSM with Low Carrier Ratio, 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Harbin, China, 2019, pp. 1-7.
- [3] 伍小杰,袁庆庆,符晓,等.基于复矢量调节器的低开关频率同步电机控制[J].中国电机工程学报,2012,32(03): 124-129+6.
- [4] Hu M, Hua W, Ma G, et al. Improved current dynamics of

- proportional-integral-resonant controller for a dual threephase FSPM machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(12): 11719-11730.
- [5] Yim J S, Sul S K, Bae B H, et al. Modified current control schemes for high-performance permanent-magnet AC drives with low sampling to operating frequency ratio[J]. IEEE transactions on industry applications, 2009, 45(2): 763-771.
- [6] Harnefors L, Pietilainen K, Gertmar L. Torque-maximizing field-weakening control: design, analysis, and parameter selection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 48(1): 161-168.
- [7] Yang S, Wang Q, Xie Z, et al. Digital current controller with a novel active damping design for IPMSM[J]. IEEE Transactions on Energy C-onversion, 2021, 37(1): 185-197.
- [8] Yim J S, Sul S K, Bae B H, et al. Modified current control schemes for high-performance permanent-magnet AC drives with low sampling to operating frequency ratio[J]. IEEE transactions on industry applications, 2009, 45(2): 763-771.
- [9] 李福, 廖勇, 林豪. 引入主动电阻的永磁同步电机电流 环改进控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4495-4502+4591.
- [10] 廖勇, 李福, 林豪. 基于虚拟阻抗的永磁同步电机电流 环控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5759-5766+5853.
- [11] Hinkkanen M, Qu Z, Awan H A A, et al. Current control for IPMSM drives: Direct discrete-time pole-placement design[C]//2015 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD). IEEE, 2015:

156-164.

- [12] Yepes A G, Vidal A, Malvar J, et al. Tuning method aimed at optimized settling time and overshoot for synchronous proportional-integral current control in electric machines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(6): 3041-3054.
- [13] Hinkkanen, Marko, et al. "Current control for IPMSM drives: Direct discrete-time pole-placement design." 2015 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD). IEEE, 2015.
- [14] Steimel, Andreas. "Direct self-control and synchronous pulse techniques for high-power traction inverters in comparison." IEEE Transactions on Industrial

Electronics 51.4 (2004): 810-820.

- [15] 孙大南,刁利军,刘志刚.交流传动矢量控制系统时延补偿[J].电工技术学报,2011,26(05):138-145.
- [16] F.Briz,A.Diez,M.W.Degner,et al.Dynamic analysis of current regulators for AC motors using complex vectors. IEEE Transactions on Industrial Applications, 1999, 35(1):1424-1432.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

