

一种基于电容电流有源阻尼的带 LC 输出滤波器永磁同步电机驱动系统谐振抑制策略

高大朋¹, 骆攀^{1,2}, 李杰², 何亮^{1*}, 刘品超¹, 陈凯旋¹,
韩剑波¹, 周炳呈¹, 刘堂胜¹

(1. 中国核动力研究设计院核反应堆技术全国重点实验室, 四川 成都 610200;

2. 华中科技大学人工智能与自动化学院, 湖北 武汉 430074)

A Resonant Suppression Strategy for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System with LC Output Filter Based on Capacitive Current Active Damping

GAO Dapeng¹, LUO Pan^{1,2}, LI Jie², HE Liang^{1*}, LIU Pinchao¹,
CHEN Kaixuan¹, HAN Jianbo¹, ZHOU Bingcheng¹, LIU Tangsheng¹

(1. National Key Laboratory of Nuclear Reactor Technology, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610200, China;

2. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: [Objective] The output terminal of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive system is often connected to an LC filter, which is used to eliminate high-frequency voltage pulse. However, the introduction of an LC output filter can induce inherent resonance, leading to instability in the PMSM control system. In order to suppress the resonant caused by LC output filter in permanent magnet synchronous motors drive system, a resonance suppression strategy based on active damping via capacitor current feedback is proposed at the paper. [Methods] Firstly, a mathematical model of the PMSM control system with LC output filter was established. Meanwhile, the causes of resonance were analyzed and located by analyzing the transfer function and Bode diagram of the control system. Then, a control method based on active damping of capacitive current was designed. The effectiveness of the method was analyzed and confirmed by the frequency domain perspective. Subsequently, in order to ensure the stability of the control

system, the parameter design of the current regulator and the design of the active damping coefficient was carried out. To verify the effectiveness of the proposed method, it was compared with traditional vector control methods and passive damping control methods. [Results] Compared with traditional vector control methods, the capacitor current active damping control strategy proposed in this paper has a small overshoot and response time, which exhibited better stability. Compared with passive damping control methods, the proposed strategy achieved a good solution to the resonance problem of the control circuit without increasing hardware, which showed good anti-interference ability in the case of sudden load loading and unloading. [Conclusion] The above work indicates that, for PMSM control systems with LC output filters, the capacitor current active damping method proposed in this paper can achieve smooth control of motor speed and effectively solve the problem of control system resonance.

Key words: permanent magnet synchronous motor; LC filter; active damping; resonance suppression

基金项目: 国家自然科学基金(U2267206); 中国国家原子能机构稳定支持项目(WDZC-2023-05-03-04)

National Natural Science Foundation of China (U2267206);
China National Atomic Energy Agency Stable support Project (WDZC-2023-05-03-04)

摘 要: [目的] 永磁同步电机(PMSM)驱动系统输出端常接 LC 滤波器用于消除高频电压脉冲。然而加入 LC 输出滤波器后易引起固有谐振, 导致控制系统不稳定。为了解决带 LC 输出滤波器 PMSM 的谐振抑制问题, 本文提

出了一种基于电容电流有源阻尼的谐振抑制策略。【方法】首先建立了带 LC 输出滤波器的 PMSM 控制系统数学模型,通过分析控制系统传递函数和伯德图定位了谐振产生的原因。然后设计了一种基于电容电流有源阻尼的控制方法,并从频域的角度分析并确认了该方法的有效性,并针对所提控制方法开展了电流环控制器参数设计。为验证所提方法的有效性,将其和传统的矢量控制方法及无源阻尼控制方法进行了对比。【结果】本文所提控制策略,相比传统矢量控制方法超调小、响应快,稳定性更优;相比无源阻尼方法,在不增加硬件的情况下解决了控制电路谐振问题,在负载突变时表现出优秀的抗干扰能力。【结论】研究表明,针对带 LC 输出滤波器的 PMSM 控制系统,本文提出的电容电流有源阻尼策略可实现对电机转速的平稳控制并解决了该控制系统谐振问题。

关键词: 永磁同步电机;LC 滤波器;有源阻尼;谐振抑制

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 具有结构简单、体积小、质量轻、损耗小、效率高及运行可靠等显著特点。传统的 PMSM 控制是将逆变器输出侧直接通过长电缆与电机连接驱动,但随着逆变器开关器件的高频化,这种逆变器电机驱动方式会导致更加明显的长线效应,逆变器输出的脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 波会在传输中产生过电压等问题,造成电机绝缘损坏,严重时还会烧毁电机^[1-4]。国内外的学者做了大量的研究来抑制或消除 PWM 带来的负面影响。Annette Von Jouanne 等人^[5]指出, PWM 波会导致过电压、电磁干扰和轴电流等负面现象,提出用轴绝缘方法可以有效抑制轴电流,但是无法抑制过电压及电磁干扰。姜艳姝等人^[6]指出, PWM 负面现象的根本原因是共模电压,并提出一种改进型 LC 滤波器,这种滤波器既能滤除差模电压,也能滤除一部分共模电压。在逆变器侧加入 LC 输出滤波器是一种简单有效方式,能够用较低的成本对 PWM 高频电压进行抑制,目前国内外学者在这方面开展了大量的研究工作^[7-10]。然而,这就导致逆变器的控制对象从一个纯电机变成了 LC 输出滤波器与 PMSM 组成的高阶系统。传统 PMSM 控制多为双闭环矢量控制,加入 LC 滤波器后的高阶系统,如果仍用电机端的电流进行闭环反馈,此时只能保证电机端电

流可控,而 LC 滤波器的输入电流和电机电压等变量都不可控。因此,需要重新对带 LC 输出滤波器的 PMSM 矢量控制进行研究。

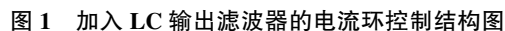
Janne Salomaki 等人^[7]提出了一种串联型比例积分 (Proportional Integral, PI) 控制方法。在传统电机电流环、转速环双闭环控制的基础上,对电机端电压和 LC 输出滤波器的输入电流进行了闭环控制,形成了全闭环控制结构。即所有的状态变量都可进行控制,可有效解决电机控制的稳定性,但是该控制采用了多层 PI 结构,对各层 PI 调节器参数计算的难度提升,成本较大。Mari Kojima 等人^[8]提出一种无差拍控制方法,与传统双闭环相比,电机电流环的输出同 LC 的输入电流和输出电压一起作为无差拍控制器的输入,成功实现了四象限加减速,并且有较好的抗 LC 滤波器参数误差的鲁棒性。文献^[11-12]针对带 LC 滤波器结构的电机驱动系统阻尼特性进行了分析。赵仁德等人^[13]提出一种逆变器侧电流反馈 (Inverter Current Feedback, ICF) 加基波电容电流补偿的控制方法。ICF 控制有利于保护逆变器,但是由于电容分支会有分流,电机侧电流与逆变器侧电流会有误差,当电机转速很高时,误差很大。孙佳成等人^[14]提出以全通滤波器级联在前向通路设计有源阻尼控制,在整个变换器电流反馈控制区域内均可通过设计二阶全通滤波器使系统达到抑制谐振的目的。黄羽西等人^[15]提出了基于虚拟电阻法和低通滤波器的有源阻尼算法,并对这些方法在稳定性和鲁棒性方面进行了评估,实现了谐振抑制。赵双双等人^[16]提出了一种改进的虚拟电容电流反馈控制方法,并分析了其等效阻尼特性,该方法扩大了系统低频控制增益的取值空间并改善了系统的输出波形质量。文献^[17-19]针对并网逆变器中 LC 滤波器对系统稳定性的影响进行了分析。李超等人^[20]针对带有 LC 正弦波滤波器的内置式 PMSM 控制系统采用双闭环矢量控制时系统无法稳定运行的情况,研究了一种基于有源阻尼法的谐振抑制自调节电流控制器。文献^[21]建立带 LC 滤波器的三阶多步模型预测电流控制系统,并对逆变器电流、电容电压及电机电流进行预测控制。针对 LC 滤波器带来的固有谐振现象,吴翔等人^[22]通过在电流控制器中引入有源阻尼,可从理论上实现谐振抑制,获

本文研究了带 LC 输出滤波器的 PMSM 矢量控制时系统产生谐振现象的机理,分析影响系统稳定的原因。研究在电容电流支路引入有源阻尼的反馈的控制方法,从频域的角度来分析加入有源阻尼后对系统的稳定性的影响。通过频域分析来对有源阻尼系数、电流环 PI 控制器参数进行设计,再结合传统 PMSM 矢量控制设计转速环 PI 控制器的参数。

1.1 PMSM-LC 系统的数学模型

$$u_{sm} = R_s i_{sm} + L_s \frac{di_{sm}}{dt} + e_{sm} \quad (1)$$

同理,假设 LC 滤波器也为三相完全对称的 Y 连接,并且忽略其电阻,则 LC 滤波器与 PMSM 联立之后的数学模型可表示为


$$\frac{d(u_{sm} + u_o)}{dt} = \frac{1}{C_f} i_{im} - \frac{1}{C_f} i_{sm} \quad (2)$$

$$\frac{di_{im}}{dt} = \frac{1}{L_f} u_{im} - \frac{1}{L_f} (u_{sm} + u_o) \quad (3)$$

$$\dot{i}_{im} = \dot{i}_{em} + \dot{i}_{om} \quad (4)$$

1.2 PMSM-LC 系统的谐振分析

图2中将坐标变换、空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)和逆变器用系统延时来替代,系统的延时参数选择及延时对系统的稳定性影响比较复杂,本文不研究。令系统延时时间常数 T_d 与 T_s 相等, T_s 为系统的采样时间, k_p 和 k_i 为电流调节器的比例数与时间系数,控制系统的开环传递函数可描述为

$$\frac{i_{sq}(s)}{i_q^*(s) - i_{sq}(s)} = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) \cdot e^{-T_d s} \cdot G_{si}(s) = \frac{(k_p s + k_i) e^{-T_d s}}{L_f L_r C_f s^2 (s^2 + \omega_{\text{exc}}^2)} \quad (5)$$

式中: $G_{\text{oi}}(s)$ 为 LC 输出滤波器的传递函数,

$G_{si}(s) = \frac{i_{sq}(s)}{u_{iq}(s)} = \frac{1}{s^3 L_f C_f L_q + s(L_f + L_q)} = \frac{1}{L_f C_f L_q s(s^2 + \omega_{res}^2)}$; $i_{sq}(s)$ 为电机定子绕组 q 轴电流; L_q 为电机定子同步旋转 q 轴电感, 当电机为隐极式 PMSM 时, L_q 与 L_s 相等; $\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_f + L_q}{L_f C_f L_q}}$ 为 LC 输出滤波器的谐振角频率。

根据式 (5), 画出加入 LC 输出滤波器的 PMSM 系统的伯德图, 如图 3 所示。

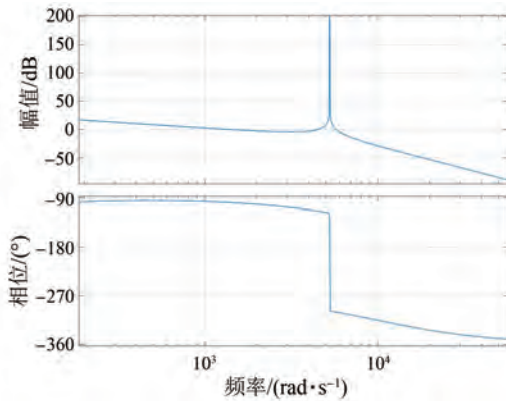


图 3 加入 LC 输出滤波器的 PMSM 系统的 Bode 图

Fig. 3 Bode plot of PMSM system with LC output filter

由图 3 可知, 带 LC 滤波器的 PMSM 控制系统会在谐振频率处有较大的谐振尖峰, 会产生远远高于 0 的幅频特性曲线。根据奈奎斯特稳定性判据可以得出, 加入 LC 滤波器后, 如果仍然采用传统方式进行控制, 将会导致系统失稳。

分析开环传递函数的分母后可以发现, $G_{si}(s)$ 导致谐振出现, 即 LCL 电路产生的固有谐振。为解决加入 LC 输出滤波器后控制系统产生谐振尖峰的问题, 在电容支路采用加有源阻尼的电容支路电流反馈法, 从中间引入反馈来消除 LCL 电路带来的谐振, 从而实现对 PMSM-LC 系统的谐振抑制。

1.3 基于电容支路有源阻尼的 PMSM-LC 谐振抑制

在 LCL 控制系统上增加一个虚拟电阻变量, 用来模拟 LCL 系统的电阻与电容的并联关系, 以达到与无源阻尼同样的谐振抑制效果, 如图 4 所示。

图 4 中, 用变量 R 来充当真实的电阻, 用电容

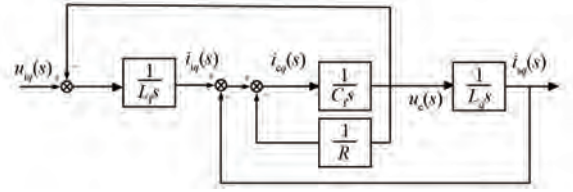


图 4 电阻电容并联控制框图

Fig. 4 Block diagram of resistor-capacitor parallel control

电压 u_c 的反馈回路来形成电阻与电容的并联连接效果。从 PMSM 传统的矢量控制可知, 控制变量基本上是对电流的控制, 故将图 5 控制框图中的反馈变量 u_c 变成 LCL 系统中的电容电流, 对其反馈参数进行调整, 可以得到如图 5 所示的控制框图。

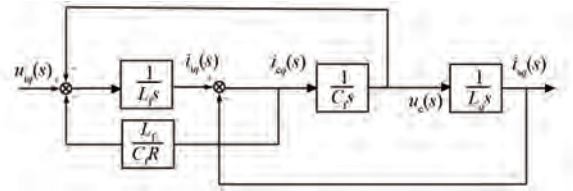


图 5 电容电流比例反馈控制框图

Fig. 5 Block diagram of capacitor current proportional feedback control

由图 5 可知, 调整后的控制框图中反馈系数是一个常数, 电容电流经过比例反馈给控制端, 可实现与无源阻尼中电阻与电容并联相似的效果。将电容电流比例反馈的反馈系数 k 加入 PMSM-LC 控制系统的电流环中, 来解决因谐振引起的开环传递函数在谐振频率处的幅频特性曲线远远高于 0 的问题。基于电容电流有源阻尼的电流环控制框图, 如图 6 所示。

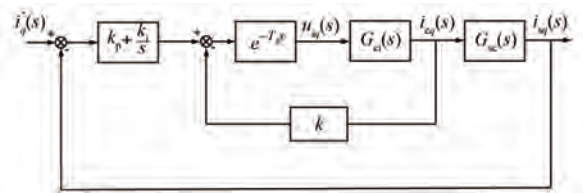


图 6 含有源阻尼的电流环反馈控制框图

Fig. 6 Block diagram of current loop feedback control with active damping

图 6 控制系统的开环传递函数可描述为

$$\frac{i_{sq}(s)}{i_q^*(s) - i_{sq}(s)} = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \cdot \frac{e^{-T_d s} \cdot G_{ci}(s) \cdot G_{sc}(s)}{1 + k e^{-T_d s} \cdot G_{ci}(s)} \Rightarrow$$

$$\frac{(k_p s + k_i) e^{-T_d s}}{L_f L_q C_f s^4 + C_f L_q k e^{-T_d s} s^3 + (L_q + L_f) s^2} \quad (6)$$

$$\text{式中: } G_{ci}(s) = \frac{i_{cq}(s)}{u_{iq}(s)} = \frac{s C_f L_q}{s^2 L_f C_f L_q + (L_f + L_q)} = \frac{s C_f L_q}{L_f C_f L_q (s^2 + \omega_{res}^2)}; G_{sc}(s) = \frac{i_{sq}(s)}{i_{cq}(s)} = \frac{1}{s^2 C_f L_q}。$$

比较式(5)、式(6)的分母,可以很明显的看出后者有一个额外的 s^3 项,其将两个极点进一步移入左半平面来提供阻尼,而其余的两个极点将保持在原点。这样就将式(5)中不稳定的极点移到虚轴的左边,从而保证系统的稳定性。

式(6)的开环传递函数的伯德图如图7所示,除了新增的参数 k ,其余各项参数都与图3的参数相同。由图7可知,电容支路有源阻尼法可有效抑制谐振频率处产生的谐振尖峰,也使控制系统拥有较好的相位裕度和幅值裕度。因此,可寻找选择合适的有源阻尼系数 k 来使系统的谐振现象得到抑制,来保证系统再加入 LC 输出滤波器后仍然可以稳定运行。

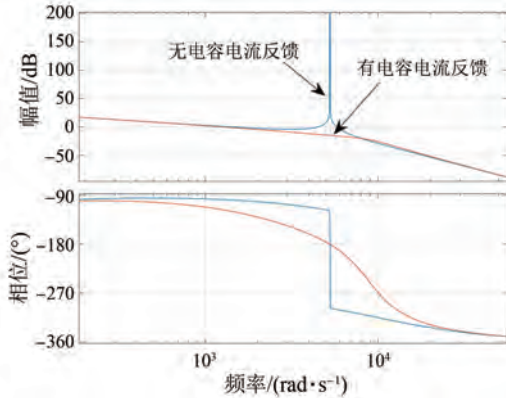


图7 基于电容电流有源阻尼 PMSM-LC 系统 Bode 图
Fig. 7 Bode plot of PMSM-LC system with capacitor current-based active damping

图7的伯德图很好地展示了有源阻尼法的有效性,但是在设计控制系统时最主要的是对各个参数进行设计,当 PI 控制器的参数或有源阻尼系数设计不当时,控制系统也不能正常稳定运行。

2 参数设计

2.1 电流调节器参数设计

为了更好地评估电流调节器的性能与参数之间的关系,首先将一些复杂模型进行近似变换来

降低系统的复杂程度。

对系统的延时模块进行 Taylor 展开,并对其作近似处理可以得到:

$$e^{-T_d s} \approx \frac{1}{1 + T_d s} \quad (7)$$

探究系统在截止频率附近的频率特性时,PI 调节器的积分系数 k_i 对系统的作用很小,暂时只考虑比例系数 k_p 对系统的影响。控制系统在不同条件下的 Bode 图如图8~图10所示,具体分析系统与电流调节器各参数之间的关系。

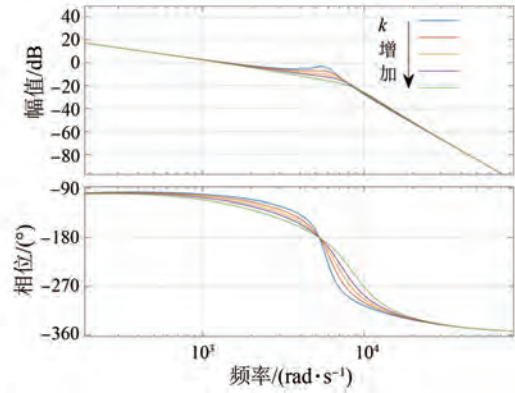


图8 k 增加、 k_p 不变的 PMSM 系统 Bode 图
Fig. 8 Bode plot of PMSM system with k increased, k_p unchanged

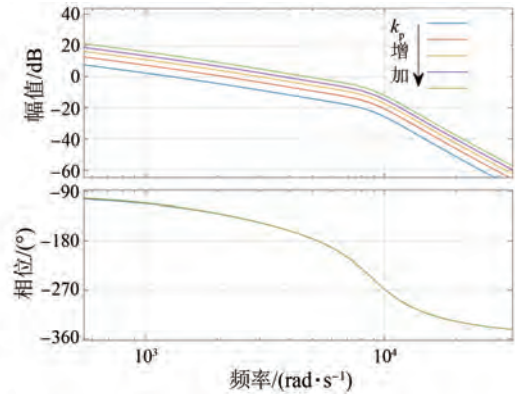


图9 k_p 增加、 k 不变的 PMSM 系统 Bode 图
Fig. 9 Bode plot of PMSM system with k_p increased, k unchanged

图8中,在保持比例系数 k_p 不变的情况下,逐渐增加有源阻尼系数 k 值的大小。从 Bode 图中看出, k 值只对系统在谐振频率处的幅值有影响,对于截止频率之前的频率特性影响不大,故在设计参数对系统的截止频率的影响时忽略 k 对系统的影响。

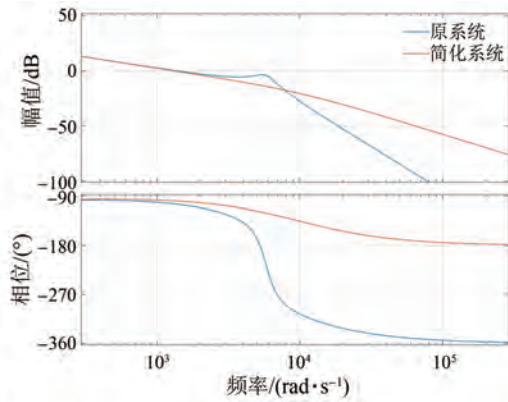
图 10 k_p 原系统与简化系统的 Bode 图Fig. 10 Bode plot of k_p original system and simplified system

图 9 中,在保持有源阻尼系数 k 值不变的情况下,逐渐增加比例系数 k_p 的大小。从 Bode 图中看出,当 k 值不变时, k_p 对于系统的幅值响应有很大的影响, k_p 的增加会使系统的幅频特性曲线上升从而使系统的截止频率逐渐靠近系统的谐振频率;当 k_p 过大时,会导致系统的相位在穿越 -180° 时,幅频响应大于 0,系统将不能稳定。 k_p 的逐渐增大会使系统的幅值裕度越来越小,而 k_p 的减小也会使系统的截止频率减小,导致系统的带宽变差。故必须折中考虑 k_p 的选择。

如图 10 所示,当 LCL 系统简化为单电感系统时,原系统与简化系统在低于谐振频率的频率段有着十分近似的幅频特性曲线;而在高于谐振频率的频率段,由于原控制系统带有电容,使得系统在大于谐振频率时幅值被有效的限制。因此在探究 k_p 时,可以将原系统简化为如图 11 所示的控制结构。

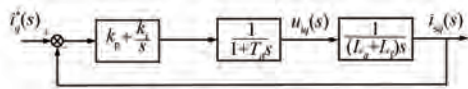


图 11 简化系统的电流环控制结构

Fig. 11 Current loop control structure of simplified system

在分析系统截至频率的表达式时,因为 PI 调节器积分增益的影响与延时环节的影响较小,可将其忽略,系统的截止频率可表示为

$$\omega_c = \frac{k_p}{L_f + L_q} \quad (8)$$

在图 10 中,对比基于电容电流有源阻尼的控

制系统与简化后的控制系统,可得在低于谐振频率时,二者具有相同的幅频特性,但是在高频段时,真实系统相位滞后比简化后系统相位滞后明显,因此在考虑 PI 调节器参数整定时也要对其相频特性的差异进行考虑。根据文献[16-17]可知,当忽略 PI 调节器的积分部分时,将系统的截止频率 ω_c 作为无阻尼谐振频率的一部分 ($\omega_c = \alpha \omega_{res}$),考虑为系统的控制留下足够的相位裕度,通过调整 k_p 的大小,将系统的截止频率设置为 $\omega_c = 0.25 \omega_{res}$,这样就可以使系统有较好的相位裕度和带宽,即 k_p 可用式(9)确定:

$$k_p = \frac{L_f + L_q}{4} \sqrt{\frac{L_q + L_f}{L_f L_q C_f}} \quad (9)$$

k_i 可以用系统的相位裕度来确定,简化后系统的开环传递函数为

$$\frac{i_{sq}(s)}{i_q^*(s) - i_{sq}(s)} = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \cdot \frac{1}{1 + T_d s} \cdot \frac{1}{s(L_q + L_f)} \quad (10)$$

在确定 k_p 之后,系统的相位裕度为

$$\gamma = \arctan \left[\frac{\omega_c^2 (L_q + L_f)}{k_i} \right] - \arctan(\omega_c T_d) \quad (11)$$

为了使系统有更大的相位裕度,将前一项设置为接近 $\pi/2 (89^\circ)$,即 k_i 的表达式为

$$k_i \approx \frac{(L_q + L_f)^2}{915 L_f L_q C_f} \quad (12)$$

2.2 有源阻尼系数 k 的参数设计

由图 9 可知,电容电流有源阻尼系数 k 会影响控制系统在谐振频率处的频率响应。在谐振频率处,PI 调节器的积分环节对系统的影响不大,将 PI 环节用比例环节来代替。比例系数为 k_p ,延时环节用一阶惯性来替代,将式(7)代入式(6)中,式(6)中的比例积分用 k_p 替代,控制系统的开环传递函数为

$$\begin{aligned} \frac{i_{sq}(s)}{i_q^*(s) - i_{sq}(s)} &= \frac{k_p}{1 + T_d s} \frac{G_{ci}(s) G_{sc}(s)}{1 + \frac{k}{1 + T_d s} G_{ci}(s)} \Rightarrow \\ &= \frac{k_p / \{ L_f L_q C_f T_d s^4 + L_f L_q C_f s^3 + \\ &\quad [(L_q + L_f) T_d + k L_q C_f] s^2 + (L_q + L_f) s \} \end{aligned} \quad (13)$$

根据开环传递函数算出其闭环传递函数,可

得特征方程为

$$D(s) = L_f L_q C_f T_d s^4 + L_f L_q C_f s^3 + [(L_q + L_f) T_d + k L_q C_f] s^2 + (L_q + L_f) s + k_p \quad (14)$$

根据 Routh 稳定性判据,可以算出 k 的下限值为

$$k > \frac{k_p L_f}{L_f + L_q} \quad (15)$$

在探究 k 的上限值时,考虑到原系统通过数字控制来实现,连续域的模型会对实际系统的响应产生一定的影响,故将图 6 连续域的系统模型转换为离散域,即离散系统的开环传递函数为

$$\frac{i_{sq}(z)}{i_q^*(z) - i_{sq}(z)} = \frac{k_p G_{ci}(z) G_{sc}(z)}{z + k G_{ci}(z)} \quad (16)$$

$$\text{式中: } G_{ci}(z) = \frac{i_{cq}(z)}{u_{iq}(z)} = \frac{(z-1)\sin(\omega_{res} T_s)}{\omega_{res} L_f [z^2 - 2z\cos(\omega_{res} T_s) + 1]}; G_{sc}(z) = \frac{i_{sq}(z)}{i_{cq}(z)} = \frac{T_s^2(z+1)}{2L_q C_f (z-1)^2}$$

离散系统的特征方程为

$$D(z) = z + k_p G_{ci}(z) G_{sc}(z) + k G_{ci}(z) \quad (17)$$

在分析参数 k 对系统稳定性的影响时,要得到系统关于参数 k 的根轨迹,需将式(16)转化为等效开环传递函数 $G_e(z)$,则:

$$G_e(z) = \frac{k G_{ci}(z)}{z + k_p G_{ci}(z) G_{sc}(z)} \quad (18)$$

根据 $G_e(z)$ 画出系统关于参数 k 的根轨迹,如图 12 所示。

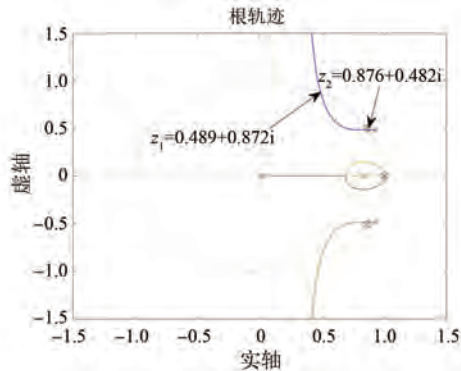


图 12 有源阻尼系数 k 的根轨迹图

Fig. 12 Root locus diagram of active damping coefficient k

图 12 所用系统的参数均与之前的参数相同,将 z_1 与 z_2 两个临界点代入式(17)算出 k 值的大小,发现 k 的下限值与式(15)近似,上限值由式(19)确定:

$$k < \left| \frac{z_1 + k_p G_{ci}(z_1) G_{sc}(z_1)}{G_{ci}(z_1)} \right| \quad (19)$$

在实际系统应用时,可以离线按照推论确定电流 PI 调节器的 k_p 和 k_i ,在确定 LC 滤波器的电容与电感值后,算出 k 的上下限,不需要对 k 进行实时计算。

3 试验验证

根据分析与探究,构建基于电容电流有源阻尼的 PMSM-LC 系统的控制如图 13 所示,电机的参数如表 1 所示。

表 1 电机的参数

Tab. 1 Parameters of the motor

参数名称	参数值	参数名称	参数值
极对数 p_n	4	$C_f/\mu\text{F}$	75
d 轴电感 L_d/mH	5.25	L_f/mH	0.5
q 轴电感 L_q/mH	12	q 轴 k_p, k_i	16.47, 379.5
定子电阻 R/Ω	0.958	d 轴 k_p, k_i	7.76, 183.5
磁链 ψ_f/Wb	0.183	q, k 限值	4.02, 0.67
$f_{\text{PWM}}/\text{kHz}$	10	d, k 限值	4.09, 0.67
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.003	阻尼比 $B/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	0.008

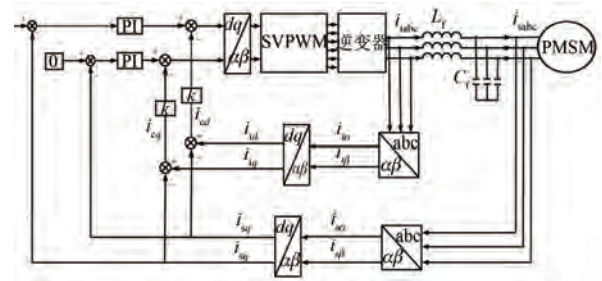


图 13 基于有源阻尼的 PMSM-LC 控制系统结构图

Fig. 13 Block diagram of an active-damping-based PMSM-LC control system

矢量控制下 PMSM-LC 转速的波形如图 14 所示。其中,图 14(a)为电机在矢量控制下保持原有带宽的转速波形,图 14(b)为电机在矢量控制下减小系统带宽的转速波形。

如图 14(a)所示,电机加入 LC 输出滤波器后如果用矢量控制法且在原有带宽的基础上运行

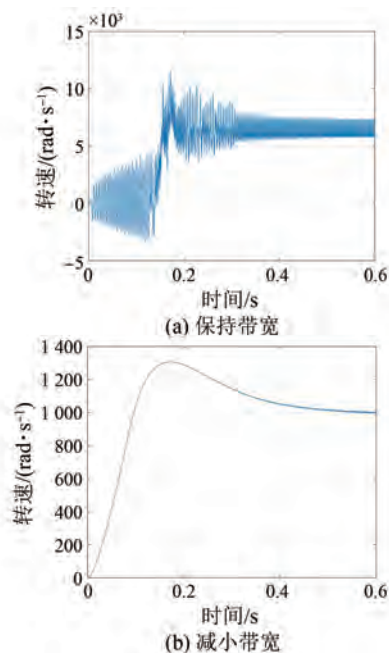


图 14 矢量控制下的 PMSM-LC 转速波形
Fig. 14 Speed waveforms of PMSM-LC under vector control

时,电机的转速会发散。而为了使电机能够稳定运行,只能将电流环以及电压环的 PI 参数调小,减小系统的带宽使系统远离谐振频率运行。如图 14(b)所示,可以看出虽然系统最后可以稳定,但这样会导致系统的超调量以及调整时间增大,这种情况下系统的稳态性能较差。

加入 LC 输出滤波器后基于无源阻尼 PMSM-LC 控制的转速与三相电流波形如图 15 所示,基于电容电流有源阻尼的 PMSM-LC 控制的转速与三相电流波形如图 16 所示。

由图 15 可知,基于无源阻尼的 PMSM-LC 控制方法可以对转速进行控制,在该方法下,电机可以保持十分平稳的转速,稳态时几乎没有波动,电机端三相电流也处于十分稳定的状态,并且由于多加了 LC 滤波器,三相电流波形呈现较好的正弦性。对比图 4~图 7(b)中转速的波形,可以明显看出,基于无源阻尼的控制方法可以使系统有更小的超调量、更短的调整时间,动态性能与稳态性能比矢量控制下的 PMSM-LC 系统的性能要好很多。此外,基于无源阻尼的控制方法解决了谐振问题,能够使系统有更大的带宽。

由图 16 可知,基于有源阻尼的 PMSM-LC 的控制方法的转速和三相电流波形与基于无源阻尼

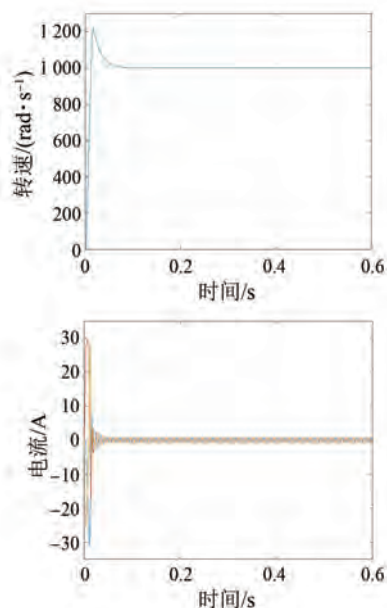


图 15 无源阻尼的 PMSM-LC 转速和三相电流波形
Fig. 15 Speed and three-phase current waveforms of PMSM-LC under passive damping

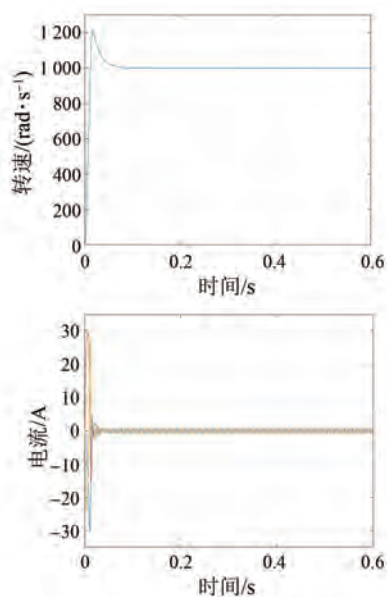


图 16 有源阻尼的 PMSM-LC 转速和三相电流波形
Fig. 16 Speed and three-phase current waveforms of PMSM-LC under active damping

的 PMSM-LC 的控制方法的转速和三相电流波形十分相似,这也恰好证明了基于电容电流有源阻尼法与无源阻尼法中的电阻与电容的并联效果可以进行等效,也进一步证明了基于电容电流有源阻尼控制的有效性。有源阻尼控制法通过改变控制算法,从软件的角度解决 LCL 电路的谐振问

题,该方法的参数选择可以通过仿真来校验。此外,无源阻尼法会给系统带来有功损耗,而有源阻尼法则不会带来损耗。

电机基于有源阻尼运行保持期望转速不变时,突加负载和突减负载时转速与三相电流的波形图、保持负载不变下突然加速和突然减速时转速与三相电流波形分别如图 17、图 18 所示。

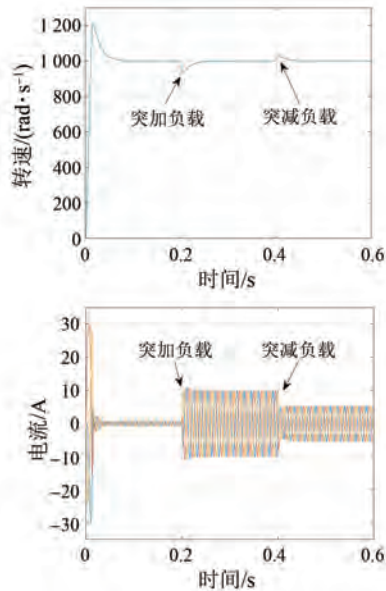


图 17 突加负载和突减负载时转速与三相电流波形
Fig. 17 Waveforms of speed and three-phase current under sudden load increase/decrease

由图 17 可知,当电机的负载突然增加时,电机转矩会小于负载转矩且转速会有一定下降,但通过控制能够使电机转矩增大且恢复到原来的转速,三相电流也能在峰值增加后保持正弦性;当电机的负载突然减小时,电机转矩会大于负载转矩、转速会有一定增加,但通过控制能够使电机转矩增大且恢复到原来的转速,三相电流也能在峰值增加后保持正弦性。基于电容电流有源阻尼的控制方法对电机负载扰动有较高的抗干扰能力。

由图 18 可知,当期望转速增大或减小时,实际转速与期望转速的差值发生改变,但是经过一段时间的控制,转速依旧可以稳定在期望值上,而由于负载转矩没有变化,三相电流的峰值没有改变,只是频率会随着转速的变化而变化。从而也能证明基于电容电流有源阻尼的控制方法对转速变化有较好的抗干扰能力。

最后将无 LC 输出滤波器的 PMSM 控制系统

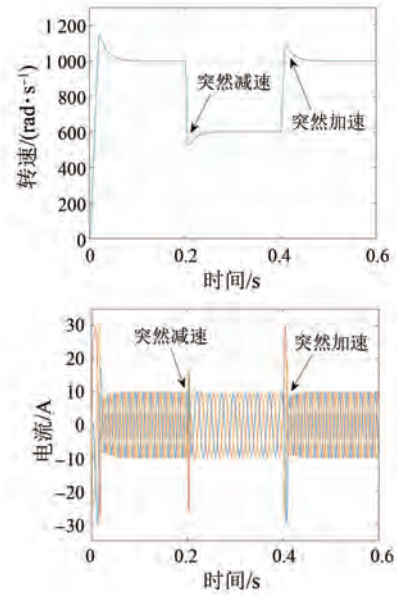


图 18 突然加速和突然减速时转速与三相电流波形
Fig. 18 Waveforms of speed and three-phase current during sudden acceleration/deceleration

的三相电流的波形与基于电容电流有源阻尼的 PMSM-LC 控制系统的三相电流进行比较,如图 19 和图 20 所示。

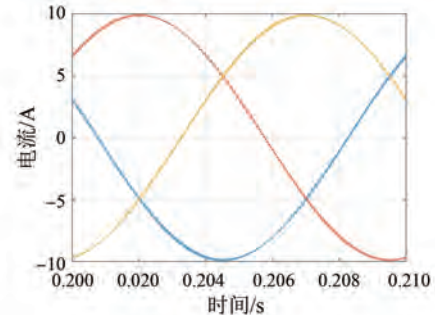


图 19 传统 PMSM 矢量控制下的三相电流波形
Fig. 19 Three-phase current waveforms under conventional PMSM vector control

由图 19 可知,传统 PMSM 矢量控制下的三相电流具有高次谐波,在某些极端环境中,电机与逆变器之间会用长轴电缆进行信号的传输。而在长线效应的作用下,很可能会产生过电压等负面效应,从而导致电机的绝缘损坏,严重时会将电机烧毁。本文在传统的 PMSM 矢量控制的基础上,采用基于电容电流有源阻尼的 PMSM-LC 控制技术。由图 20 可知,加入 LC 滤波器之后可滤除大部分高频谐波,输入给电机的三相电流能够呈现较好的正弦特性,避免其在长轴电缆上传输时的

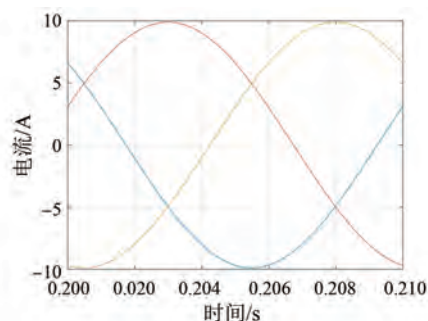


图 20 有源阻尼的 PMSM-LC 控制下的三相电流波形

Fig. 20 Three-phase current waveforms under PMSM-LC control with active damping

过电压等问题,对电机的保护起到了关键作用。

4 结语

本文详细分析了带 LC 输出滤波器 PMSM 控制系统的谐振抑制问题。首先分析了系统产生谐振现象的原因,依次推导出基于电容电流有源阻尼反馈的控制方法,通过传递函数画出其频率响应并推导出其有效性,对 LC 输出滤波器的参数、PI 调节器的参数以及有源阻尼系数进行设计,最后通过试验验证了有源阻尼方法的有效性。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

高大朋、何亮进行了方案设计,高大朋进行了内容总结与论文撰写,骆攀、李杰进行了试验研究,刘品超、陈凯旋、韩剑波、周炳呈、刘堂胜参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design was carried out by He Liang and Gao Dapeng, the content summary and paper writing was carried out by Gao Dapeng. The experiment was conducted by Luo Pan and Li Jie. The manuscript was revised by Liu Pinchao, Chen Kaixuan, Han Jianbo, Zhou Bingcheng and Liu Tangsheng. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 鞠孝伟,程远,杨明亮,等. SiC 逆变器高频脉冲电压对 Hairpin 绕组绝缘安全的影响分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(24): 5115-5124.
JU X W, CHENG Y, YANG M L, et al. Influence analysis of high frequency pulse voltage of SiC inverter on insulation safety of Hairpin winding [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(24): 5115-5124.
- [2] ZHANG J, ZHANG Z R, XIA Y W, et al. Thermal analysis and management for doubly salient brushless dc generator with flat wire winding [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 1110-1119.
- [3] 段卓琳,张栋,范涛. SiC 电机驱动系统传导电磁干扰建模及预测[J]. 电工技术学报, 2020, 35(22): 4726-4738.
DUAN Z L, ZHANG D, FAN T. Modeling and prediction of electromagnetic interference in SiC motor drive systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(22): 4726-4738.
- [4] GANJAVI A, ZARE F, KUMAR D, et al. Mathematical model of common-mode sources in long-cable-fed adjustable speed drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2013-2028.
- [5] JOUANNE A V, ZHANG H, WALLACE A K. An evaluation of mitigation techniques for bearing currents, EMI and overvoltages in asd applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(5): 1113-1122.
- [6] 姜艳姝,徐殿国,陈希有,等. 一种新颖的用于消除 PWM 逆变器输出共模电压的有源滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 125-129.
JIANG Y S, XU D G, CHEN X Y, et al. A novel PWM inverter output active filter for common-mode voltage cancellation [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 125-129.
- [7] SALOMAKI J, HINKKANEN M, LUO M J. Influence of inverter output filter on maximum torque and speed of PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(1): 153-160.
- [8] KOJIMA M, HIRABAYASHI K, KAWABATA Y, et al. Novel vector control system using deadbeat-

- controlled PWM inverter with output LC filter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 40(1): 162-169.
- [9] 王明辉. 带LC滤波器永磁同步电机控制关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- WANG M H. Research on key technologies for control of permanent magnet synchronous motor connected with LC filter [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [10] 张建清. LCL型多逆变器谐振抑制方法研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- ZHANG J Q. Research of harmonic suppression for multiple inverter with LCL filter [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017.
- [11] TANG Y, LOH P C, WANG P, et al. Exploring inherent damping characteristic of LCL-filters for three-phase grid-connected voltage source inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1433-1443.
- [12] JIANG S Q, LIU Y T, LIANG W H, et al. Active EMI filter design with a modified LCL filter for single-phase grid-connected inverter in vehicle-to-grid application [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(11), 10639-10650.
- [13] 赵仁德, 赵斌, 徐海亮, 等. 带LC滤波器的永磁同步电机控制系统及策略研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊1): 79-86.
- ZHAO R D, ZHAO B, XU H L, et al. Research on control method of permanent magnet synchronous motor with LC filter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 79-86.
- [14] 孙佳成. 基于相位补偿的LCL滤波变换器鲁棒有源阻尼设计与分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
- SUN J C. Design and analysis of robust active damping for LCL filtered converter based on phase compensation [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [15] 黄羽西. 有源前端LCL滤波器的谐振抑制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- HUANG Y X. Research on resonance damping technology of active front end LCL filter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [16] 赵双双. LCL型并网逆变器的主动阻尼控制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- ZHAO S S. Research on active damping control of the LCL-type grid connected inverter [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [17] GULUR S, IYER V M, BHATTACHARYA S. A partially rated LC trap type ac filter for grid-tied voltage source converters [J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2024, 5: 852-863.
- [18] ABDELLATIF M A, DESMET J, KNOCKAERT J. A novel active power filter for supharmonic emissions of single phase grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(6): 8109-8124.
- [19] LI Y W. Control and resonance damping of voltage-source and current-source converters with LC filters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 56(5): 1511-1521.
- [20] 李超. 带有LC正弦波滤波器的永磁同步电机无位置传感器控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- LI C. Research on position sensorless control of permanent magnet synchronous motor equipped with LC sinusoidal filter [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [21] 李耀华, 王孝宇, 吴庭旭, 等. 带LC滤波器的永磁同步电机多步模型预测电流控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(11): 21-31.
- LI Y H, WANG X Y, WU T X, et al. Multi-step model predictive current control of permanent magnet synchronous motor with LC filter [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(11): 21-31.
- [22] 吴翔, 李超, 刘志恒, 等. 带有LC正弦波滤波器的内置式永磁同步电机电流控制器谐振抑制参数设计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6082-6093.
- WU X, LI C, LIU Z H, et al. Resonance suppression parameter design of built-in permanent magnet synchronous motor current controller with LC sine wave filter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22): 6082-6093.
- [23] CHEN X, WU X, LI R Y. Virtual reduced-order model-based back EMF estimation and speed sensorless control for LC-filtered PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(7): 9749-9763.
- [24] XU J Q, ZHANG R T, JIA P F, et al. Multivariable

- feedback damping control of LC-filtered PMSM for resonance suppression with fast dynamic response [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2025.
- [25] ZHENG C M, XIE M, DONG X X, et al. Design and analysis of predictive inductor current control for PMSM drives with LC filter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(1): 1872-1885.
- [26] 吴拓, 庞科旺, 经鹏宇. 带 LC 滤波器的 UPS 三电平 NPC 逆变器改进模型预测控制[J]. 计算机与数字工程, 2021, 49(7): 1491-1497.
- WU T, PANG K W, JING P Y. Improved model predictive control for UPS three-level NPC inverter with LC filter [J]. Computer & Digital Engineering, 2021, 49(7): 1491-1497.
- [27] 宁宗祺, 毛耀, 黄永梅. LC 滤波器对电机速度闭环控制的影响分析和设计方法研究[J]. 电光与控制, 2022, 29(12): 118-122.
- NING Z Q, MAO Y, HUANG Y M. Influence of LC filter on motor velocity-loop control and an LC filter design method [J]. Electronics Optics & Control, 2022, 29(12): 118-122.
- [28] 郑长明, 董萱萱, 肖子语, 等. 基于虚拟电阻有源阻尼的 LC 滤波型永磁同步电机系统预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6059-6069.
- ZHENG C M, DONG X X, XIAO Z Y, et al. Virtual resistance active damping based predictive current control of LC-filtered permanent magnet synchronous motor system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22): 6059-6069.

收稿日期:2025-03-26

收到修改稿日期:2025-05-08

作者简介:

高大朋(1985-),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力电子及电气控制,371299512@qq.com;

*通信作者:何亮(1982-),男,双学士,研究员级高级工程师,研究方向为仪表与控制、电力电子及电气控制,bulk3695@sina.com。