

基于复合控制的永磁同步电机电流谐波抑制策略

陈 瑶, 张钊源, 冯鑫鹏, 谢世瑞, 赵朝会
(上海电机学院 电气学院, 上海 201306)

摘 要: 当电机转速发生变化时, 重复控制(RC)器控制的谐振频率将偏离电流谐波的频率, 系统的谐波抑制能力会降低。针对该问题, 分析了永磁同步电机(PMSM)的电流谐波数学模型和谐波产生原因, 介绍了传统 RC 原理, 并在传统 RC 的基础上, 引入 Fal 函数, 构建了一种基于 Fal 函数的复合控制策略, 使传统 RC 在稳态过程中具有更好的效果。同时, 对传统 RC 的内模进行改进, 并将其嵌入电流环, 进一步提高复合控制器的谐波抑制能力。最后以一台 5.5 kW PMSM 作为研究对象进行仿真分析和试验验证, 结果表明了该方法的有效性。

关键词: 永磁同步电机; 重复控制; Fal 函数; 谐波抑制

中图分类号: TM341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)07-0030-08

doi: 10.12177/emca.2022.051

Suppression Strategy of Current Harmonic in Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Compound Control

CHEN Yao, ZHANG Zhaoyuan, FENG Xinpeng, XIE Shirui, ZHAO Chaohui
(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: With the motor speed changes, the resonant frequency of the repetitive control (RC) deviates from the frequency of the current harmonic, and the harmonic suppression ability of the system is reduced. Aiming at this problem, combing the mathematical model of permanent magnet synchronous motor (PMSM) current harmonic and the causes of harmonic, the repetitive control principle is introduced, and on the basis of the conventional repetitive control, a Fal function is introduced, a compound control strategy based on Fal function is built. Through these measures, traditional repetitive control in the process of steady state has a better effect. At the same time, the internal mode of the traditional repetitive control is improved and embedded into the current loop to further improve the harmonic suppression ability of the composite controller. Finally, a 5.5 kW PMSM is taken as the research object for simulation analysis and experimental verification. The simulation and experimental results show the effectiveness of the proposed method.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); repetitive control (RC); Fal function; harmonic suppression

0 引 言

永磁同步电机(PMSM)具有高运行效率、高功率密度和高可靠性等优点, 在电动汽车等领域获得了较为广泛的应用^[1-3]。由于逆变器中死区

的存在, 电机定子电流中含有大量的谐波, 电流波形发生畸变, 从而导致电机损耗增加、电机发热、产生电磁噪声及造成转矩波动, 会严重影响系统的性能^[4-5]。

针对电机电流谐波产生的原因, 国内外学者们

收稿日期: 2022-05-30; 收到修改稿日期: 2022-06-09

作者简介: 陈 瑶(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

赵朝会(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电机与电器、电力电子与电力传动。

主要从以下两个方面展开研究。(1)在电机结构方面,改良电机结构,降低反电动势的波形畸变,降低反电动势中的谐波含量^[6-8]。(2)在控制策略方面,借助谐波补偿算法来抑制谐波,主要有旋转 PI 控制^[9]、复矢量 PI 控制^[10]、重复控制(RC)^[11-12]、比例谐振控制(PRC)^[13]、自抗扰控制^[14-15]。

PI 控制器能够满足系统动态响应上的要求,但是对于正弦量,PI 控制器无法实现无静差跟踪,电流环的控制精度有所降低^[16]。PRC 和 RC 可以对正弦交流信号实现无静差跟踪^[17]。文献[4]采用 PR 来改善电流正弦度,电机的控制系统结构更为简单,整定参数更少,但是只能保证对特定频率谐波进行抑制。RC 在基波及其整数倍处跟踪效果较好,可对多个谐波成分同时抑制^[18],近年来得到了国内外学者的广泛研究^[19-20]。然而,RC 内模中的延迟环节使其动态性能较差,因此很多学者对 RC 进行不断的改进和完善。文献[21-22]中的相位延迟是因为内模中引入了低通滤波器,所以采用相位超前环节进行补偿,提高了系统的误差收敛速度,改善了系统的动态性能。文献[23]研究了一种基于 RC 的复合控制策略,即在此研究基础上加入状态反馈环节,利用状态反馈实现对被控对象极点的优化,但较多的状态反馈变量会增加成本。文献[24]研究了一种实时相位超前有限长单位冲激响应(FIR)滤波器,提高了 RC 对给定信号的谐波抑制能力,改善了系统的误差收敛速度。文献[25]采用了六倍频 RC,RC 的延时时间减少,系统的偏差收敛速度变快,对系统谐波的抑制能力增强。

为此,本文在 RC 的基础上,于内置式永磁同步电机(IPMSM)中引入 Fal 函数,并对 RC 内模进行改进。与传统 RC 相比,复合控制具有更好的谐波抑制特性和鲁棒性。

1 IPMSM 数学模型

在 dq 坐标系下,IPMSM 的基波电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \varphi_f \end{cases} \quad (1)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p [\varphi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为电机定子电压 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 为 d 、 q 轴电流分量; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; R_s 为电机定子电阻; ω_e 为电机电角速度; φ_f 为电机永磁体磁链; p 为电机的极对数。

在 IPMSM 正常工作时,采用脉宽调制(PWM)方式,会加入很短的死区时间,逆变器输入与输出的电压矢量存在误差,会导致电流波形畸变^[26-27]。当谐波次数增加时,谐波幅值降低^[28],本文主要考虑抑制 5 次、7 次谐波,电机定子电流可表示为

$$\begin{cases} i_a = i_1 \cos(\omega t + \theta_1) + i_5 \cos(5\omega t + \theta_5) + \\ i_7 \cos(7\omega t + \theta_7) + \dots \\ i_b = i_1 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta_1\right) + i_5 \cos\left(5\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta_5\right) + \\ i_7 \cos\left(7\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta_7\right) + \dots \\ i_c = i_1 \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta_1\right) + i_5 \cos\left(5\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta_5\right) + \\ i_7 \cos\left(7\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta_7\right) + \dots \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_a 、 i_b 、 i_c 分别为 A、B、C 相电流; i_1 、 i_5 、 i_7 分别为基波、5 次谐波、7 次谐波电流幅值; θ_1 、 θ_5 、 θ_7 分别为基波、5 次谐波、7 次谐波电流初始相位; ω 为角速度。

采用等幅坐标变换,得到了 d - q 坐标系下的电流为

$$\begin{cases} i_d = i_{d1} + i_5 \cos(-6\omega t + \theta_5) + i_7 \cos(6\omega t + \theta_7) \\ i_q = i_{q1} + i_5 \sin(-6\omega t + \theta_5) + i_7 \sin(6\omega t + \theta_7) \end{cases} \quad (4)$$

式中: i_{d1} 、 i_{q1} 分别为基波电流的 d 、 q 轴分量; i_5 、 i_7 分别为 5 次和 7 谐波电流分量。

由式(4)可知,在 d - q 坐标系下基波变为直流分量,5 次、7 次谐波变为 6 次负序和 6 次正序谐波。因此,可以采取谐波抑制策略,降低 5 次和 7 次电流谐波含量,同时可以有效降低转矩波动。

2 RC 原理与设计

RC 源于内模原理^[29],RC 内模结构框图如图 1 所示。图 1 中, $R(z)$ 为参考输入信号, $Y(z)$ 为输出信号。

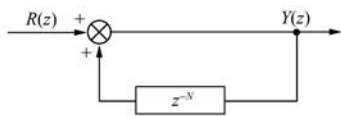


图1 理想 RC 内模结构框图

在离散域下的 RC 内模传递函数为

$$G(z) = \frac{1}{1 - z^{-N}} \quad (5)$$

式中: N 为一个基波周期内的采样次数; z^{-N} 为延时环节。

延时因子会导致控制系统动态响应变差, 致使系统不稳定。 $Q(z)$ 可以是一个低通滤波器, 也可以是一个小于且接近 1 的常数, 其作用是保证系统的稳定性, 改进 RC 控制框图如图 2 所示。图 2 中, $C(z)$ 为补偿器。

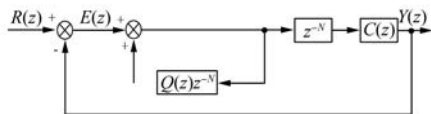


图2 改进 RC 结构框图

补偿器 $C(z)$ 可补偿控制系统的幅值和相位, 增大系统的稳定裕度。 $C(z)$ 表达式为

$$C(z) = K_r Z^k S(z) \quad (6)$$

式中: K_r 为幅值补偿系数, $K_r \leq 1$; Z^k 为超前环节用于补偿 $S(z)$ 和控制对象引起的相位滞后; $S(z)$ 为滤波器, $S(z)$ 的作用是被控对象在低频段的增益保持为 1, 使中高频段增益快速衰减, 提高系统的稳定性和鲁棒性。

3 基于复合控制的谐波抑制策略

PI 控制器能够满足系统动态响应上的要求, 但是对于正弦量, PI 控制器无法实现无静差跟踪, 电流环的控制精度有所降低。由经典控制理论可知, 增大比例系数 K_p 可以减小稳态误差, 增强跟踪效果, 但是随着 K_p 的增大, 会导致超调量增大(振荡变严重), 甚至会造成系统不稳定^[30]。RC 可以跟踪给定指令信号, 同时 PI 控制器对误差信号能够立即产生校正作用, 并且动态响应性能好^[31]。为此, 将两者进行结合, 将 PI+RC 的复合控制方案用于电流环, 转速外环仍然采用 PI 控制器, 使得系统在保证补偿精度、稳态性能的同时, 兼具较好的动态响应能力。基于 PI+RC 的 IPMSM 矢量控制系统框图如图 3 所示。

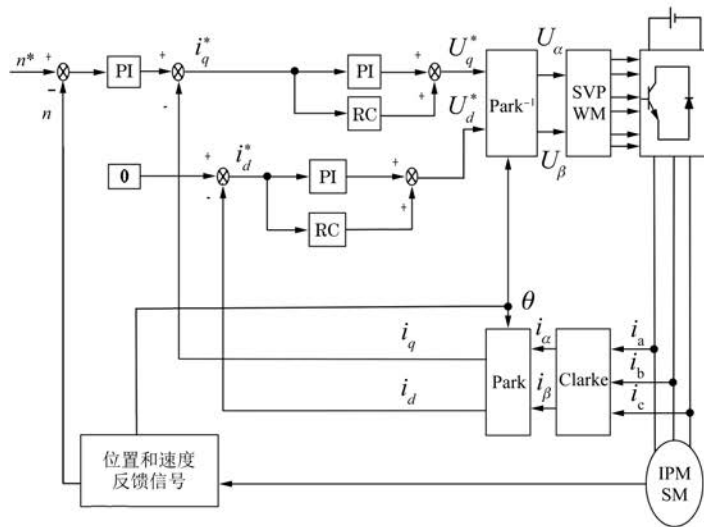


图3 IPMSM 控制系统框图

3.1 基于 Fal 函数的复合控制结构

PI+RC 的复合控制策略动态响应由比例环节和 RC 共同作用, 两控制器之间存在控制耦合, PMSM 在动态过程中电流发生畸变, 转矩波动明显, 复合控制并没有考虑到两种控制方

式会互相影响^[32]。因此, 引入 Fal 函数, Fal 是一种特殊的非线性结构, 在动态过程中比例环节起主要的作用, 在稳态过程中 RC 起主要作用。

Fal 函数具有以下形式:

$$\text{Fal}(s, \beta, \delta) = \begin{cases} |s|^{\beta} \text{sign}(s), & |s| > \delta \\ \frac{s}{\delta^{1-\beta}}, & |s| \leq \delta \end{cases} \quad (7)$$

式中: s 为 Fal 函数变量; δ 为线性段的间隔的长度; β 为非线性因子; sign 为符号函数。

Fal 函数为第 I、III 象限镜像对称的非线性函数, 图 4 为 Fal 函数在第一象限的示意图, 其中 β 取值为 0.6, δ 取值为 0.5。

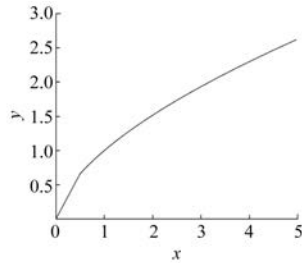


图 4 Fal 函数示意图

本文所设计的 PI+RC 在 RC 前面增加了 Fal 函数模块, 图 5 是基于 Fal 函数的复合控制结构框图。图 5 中, $I_{q\text{ref}}$ 为 q 轴参考电流, $G_{\text{pl}}(z)$ 为 PI 控制器, $P(z)$ 为控制对象, $D(z)$ 为扰动信号, I_q 为 q 轴输出电流。

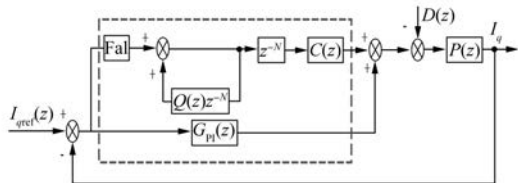


图 5 基于 Fal 函数的复合控制结构框图

3.2 改进 RC 内模

传统的 RC 包含扰动信号的数学模型, 系统具有较好的谐波抑制能力, 但是因为 RC 中有一个周期的延时, 系统存在动态响应慢的问题, 而且在数字控制中需要很大的数据空间, 对于控制芯片的要求也会增加^[33]。电机三相电流中的 5 次、7 次谐波电流分量在 dq 坐标系下为 6 次谐波电流分量, 当 N 变为 $N/6$ 时, RC 正好可以抑制 $6k$ 次周期性谐波电流信号。因此, 为了降低控制器的数字空间需求, 提高复合控制器对 PMSM 的电流谐波抑制性能, 设计了控制频率为 6 倍基频的 RC 内模结构, 离散域下 $G_6(z)$ 表达式如下:

$$G_6(z) = \frac{z^{-N/6}}{1 - z^{-N/6}} \quad (8)$$

假设指令信号频率 f_0 为 180 Hz 时, 传统 RC 与改进内模后的 RC 伯德图如图 6 所示。

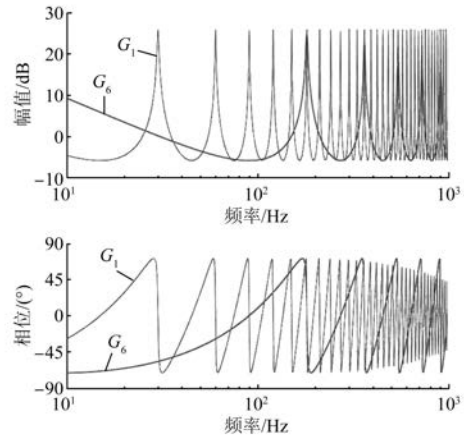


图 6 RC 与改进内模后的 RC 伯德图

根据图 6 不同控制器的伯德图可知, RC 的内模改进后只会对基波的 6 倍频处信号提供高增益, 对其他频率的信号无抑制能力, 还可以避免指令信号中的噪声信号。根据图 6 不同控制器的幅频特性曲线可知, 其内模在 $6kf_0$ ($k=1, 2, 3, \dots$) 处谐振带宽增大, 有效增强了 RC 对电机系统频率偏移的鲁棒性。图 7 为内模系数改进后的 RC 基本框图。

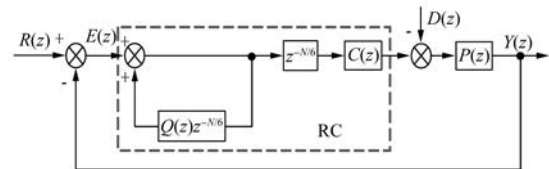


图 7 内模系数改进后的 RC 基本框图

为了简化分析, 令扰动信号为零, 得到输入信号与误差信号的表达式如下:

$$E(z) = \frac{[1 - P(z)][z^{N/6} - Q(z)]}{z^{N/6} - Q(z) + C(z)Q(z)} R(z) \quad (9)$$

延时环节由 z^{-N} 变为 $z^{-N/6}$, 延时时间变成原来的 $1/6$, 系统的误差收敛速度变快。

3.3 复合控制系统稳定性分析

在不计外界扰动的前提下, 复合控制器的闭环传递函数为

$$\frac{I_q}{I_{q\text{ref}}} =$$

$$\frac{1 - z^{-N/6} [Q(z)G_{PI}(z) - C(z)] \frac{P(z)}{1 + G_{PI}(z)P(z)}}{1 - z^{-N/6} \left[Q(z) - C(z) \frac{P(z)}{1 + G_{PI}(z)P(z)} \right]}$$

(10)

RC 的等效控制对象 $P^*(z)$ 为

$$P^*(z) = \frac{P(z)}{1 + G_{PI}(z)P(z)}$$

(11)

整个系统稳定的条件是:

$$F(z) = |Q(z) - C(z)P^*(z)| < 1$$

(12)

式中: $z = e^{j\omega T}$; $\omega \in [0, \pi/T_s]$ 。

当角频率 ω 从 0 逐渐增加至奈奎斯特频率期间, $F(e^{j\omega T})$ 的轨迹在单位圆内, 则闭环系统是稳定的。图 8 是系统稳定条件的矢量图。

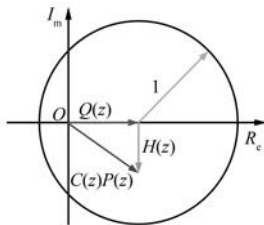


图 8 系统稳定条件的矢量图

4 仿真分析

为了验证设计的基于复合控制的电流谐波抑制策略的有效性,在仿真软件中搭建基于复合控制的 IPMSM 系统模型。仿真中采用的 IPMSM 参数如表 1 所示。本文所设计的 RC 参数如表 2 所示。

表 1 IPMSM 参数	
参数名称	参数值
额定功率/kW	5.5
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
q 轴电感/mH	1.78
d 轴电感/mH	7.45
定子电阻/Ω	0.26
磁链/Wb	0.201
极对数	4

表 2 RC 参数	
参数名称	参数值
N	100
Q(z)	0.96
K _r	0.9
k	2

当转速在小范围内波动,基波频率也会发生变化时,通过仿真验证所提算法的有效性。图 9(a)为基于传统 RC 的转矩波形,图 9(b)为基于复合控制器的转矩波形。从图 9 的转矩波形可以看出,当电机在转速发生小波动时,传统 RC 的转矩波动较大;采用基于复合控制器的谐波抑制策略,转矩脉动较小。

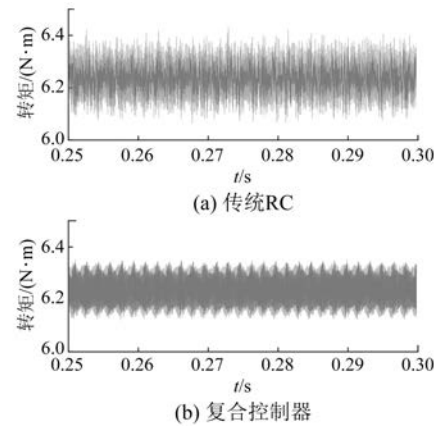


图 9 电机转矩波形

图 10 为传统 RC 与复合控制下的三相电流波形,从图 10 可以看出,三相电流波形呈现较好的正弦波。

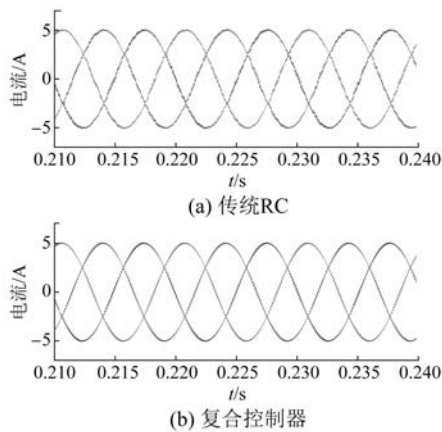


图 10 三相电流波形

对基于传统 RC 和复合控制器的电流谐波抑制算法进行了快速傅里叶变换 (FFT) 分析。由图 11 可以看出,基于复合控制器的电流正弦度比基于传统 RC 的电流正弦度高。采用复合控制器后,电流总谐波失真 THD 从 4.58% 下降到 3.76%,5 次谐波含量从 1.35% 降至 0.61%,7 次谐波含量从 0.92% 降至 0.50%。仿真结果说明,当

转速发生小波动时,复合控制器可以有效抑制 5 次、7 次电流谐波,增强了控制系统的鲁棒性。

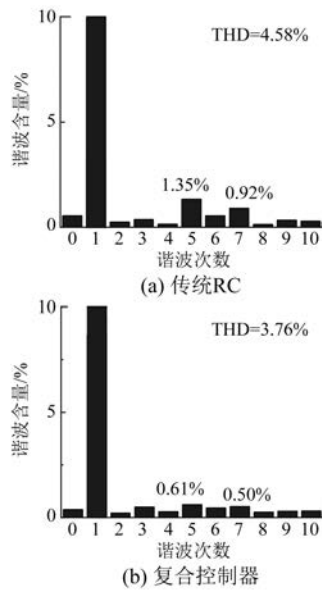


图 11 相电流 FFT 分析

5 试验验证

为了进一步验证本文所提出的谐波电流抑制算法的合理性,在 Dspace1202 快速原型开发平台对算法进行试验验证,对拖电机平台的实物图如图 12 所示。



图 12 对拖电机平台的实物图

图 13(a)为采用传统 RC 时,电机的相电流波形,此时电流波形含有较多尖峰。通过 FFT 进行谐波分析[图 13(b)],其中 5 次谐波含量为 5.61%,7 次谐波含量为 4.50%。

图 14 为采用复合控制器时,电机的相电流波形及 FFT 谐波分析结果。由图 14 可知,采用复合控制器后电流波形发生改变,正弦度提高;谐波分量得到抑制,5 次谐波含量为 4.83%,7 次谐波含量为 3.57%。验证了该方法在电机实际系统中的有效性。

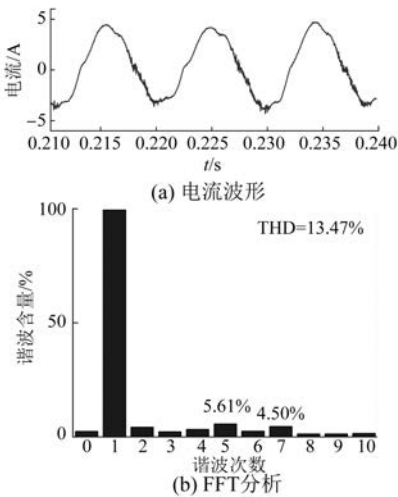


图 13 传统 RC

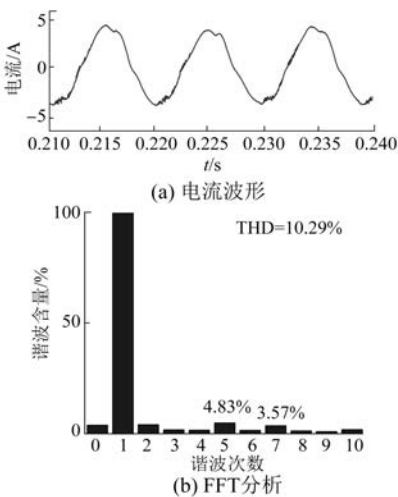


图 14 复合控制器

图 15 为传统 RC 和复合控制器下的转矩对比,由图 15 可见,使用复合控制器后,转矩的波动

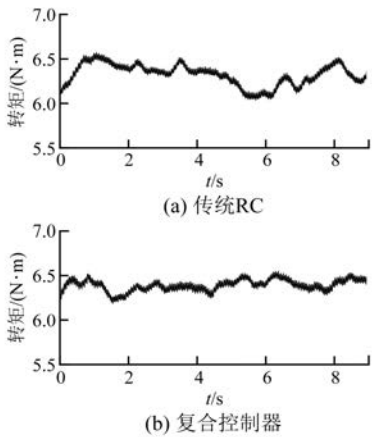


图 15 两种控制方法的转矩对比

得到了有效地抑制,提高了电机运行的平稳性。

6 结 语

针对电机转速发生波动时,系统的采样频率偏离电流谐波频率,导致 RC 的谐波抑制能力降低,研究一种复合控制器来抑制电流谐波。

(1) 在 RC 的基础上引用 Fal 函数,使 RC 更好地运行在稳态过程中。

(2) 改进 RC 内模系数可以增加 RC 带宽,5 次、7 次谐波含量分别从 1.35%、0.92% 降至 0.61%、0.50%,提高了电机电流的正弦度。

(3) 本文所提算法可以减小转矩脉动,降低损耗,提高电机的控制精度。

【参 考 文 献】

- [1] KIM S, PARK S. Compensation of dead-time effects based on adaptive harmonic filtering in the vector-controlled AC motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(3): 1768.
- [2] 廖勇,甄帅,刘刃,等. 用谐波注入抑制永磁同步电机转矩脉动[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 119.
- [3] QIAN W, NONDHAL T A. Mutual torque ripple suppression of surface-mounted permanent magnet synchronous motor [C] // 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005.
- [4] 魏艺涵,罗响,朱莉,等. 基于比例谐振控制器的高凸极率永磁同步电机电流谐波抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2526.
- [5] 李立毅,于吉坤,曹继伟,等. 基于 PWM 逆变电路供电的永磁同步电机电压和电流的谐波通用型新算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6203.
- [6] WU D, ZHU Z Q. Design tradeoff between cogging torque and torque ripple in fractional slot surface-mounted permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 8108704.
- [7] MARKOVIC M, JUFER M, PERRIARD Y. Reducing the cogging torque in brushless DC motors by using conformal mappings [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 451.
- [8] 黄克峰,李槐树,周羽. 利用辅助槽削弱齿槽力的方法研究[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(3): 54.
- [9] 甄帅. 大功率永磁同步电机运行谐波分析与抑制方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.
- [10] 郭小强. 光伏并网逆变器通用比例复数积分控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3393.
- [11] TANG Z, AKIN B. Suppression of Dead-time distortion through revised repetitive controller in PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 918.
- [12] RASHED M, KLUMPNER C, ASHER G. Repetitive and resonant control for a single-phase grid-connected hybrid cascaded multilevel converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2224.
- [13] 朱明祥,王鑫,孙红艳,等. 永磁无刷直流电机的比例谐振控制[J]. 电气传动, 2019, 49(7): 14.
- [14] ZHANG Z, ZHAO C, TAN L, et al. Torque ripple suppression in flux-weakening region of IPMSM using LADRC [C] // 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2021.
- [15] 郑博元. 永磁同步电机系统死区效应抑制策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [16] 张剑,温旭辉,李文善,等. 基于谐波观测器的永磁同步电机谐波电流抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3336.
- [17] 赵强松,陈莎莎,周晓宇,等. 用于并网逆变器谐波抑制的重复-比例复合控制器分析与设计[J]. 2019, 34(24): 5189.
- [18] 田明赫. 基于自抗扰控制的永磁同步电机扰动抑制策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
- [19] 张巧芬,刘彦呈,郭昊昊,等. 用于永磁同步电机周期性转速脉动抑制的重复控制[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(3): 432.
- [20] 刘向辰,柴乾隆. 基于 ADRC+改进型重复控制的 PMSM 矢量控制方案[J]. 电力电子技术, 2020, 54(6): 1.
- [21] TSAI M, YAO W. Design of a plug-in type repetitive controller for periodic inputs [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(4): 547.
- [22] 王斯然,吕征宇. LCL 型并网逆变器中重复控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 69.
- [23] 刘飞,查晓明,周彦,等. 基于极点配置与重复控制相结合的三相光伏发电系统的并网策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(12): 130.
- [24] YE Y, ZHOU K, ZHANG B, et al. High-performance repetitive control of PWM DC-AC converters with real-time phase-lead FIR filter [J]. IEEE Transactions

- on Circuit and System II: Express Briefs, 2006, 53 (8): 768.
- [25] JIANG S, CAO D, LI Y, et al. Low-THD, fast-transient, and cost-effective synchronous-frame repetitive controller for three-phase UPS inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(6): 2994.
- [26] QIU T, WEN X, ZHAO F. Adaptive-linear-neuron-based dead-time effects compensation scheme for PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 2530.
- [27] 刘刚, 孙庆文, 肖烨然. 永磁同步电机用坐标变换的电流谐波抑制方法[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(5): 30.
- [28] 李帅, 孙立志, 刘兴亚, 等. 永磁同步电机电流谐波抑制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增1): 87.
- [29] 武永燎, 李红, 宋欣达, 等. 基于改进型重复控制器的永磁同步电机电流谐波抑制方法研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2277.
- [30] 王贺超, 夏长亮, 阎彦, 等. 基于谐振控制的表贴式永磁同步电机弱磁区电流谐波抑制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 83.
- [31] 赵强松. 新型比例积分多谐振控制及其并网逆变器应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [32] 张兴, 汪杨俊, 余畅舟, 等. 采用 PI+重复控制的并网逆变器控制耦合机理及其抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5287.
- [33] 刘兴亚. 永磁同步电机电流谐波抑制策略的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相

关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发刊,邮发代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。

扫码关注
《电机与控制应用》
微信公众号

