

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.03.007

永磁同步电机转矩脉动抑制方法研究

张超¹, 郭辉^{1*}, 袁涛¹, 孙裴¹, 肖兰兰¹, 孙金辉²

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620;
2. 中国人民解放军32128部队, 山东 济南 250000)

摘要:针对由电流谐波导致转矩脉动而影响电机性能的问题,课题组建立了谐波转矩模型,同时基于三相瞬时无功功率理论结合PI控制搭建了谐波抑制模块,并以谐波电流环的方式并入控制系统实现抑制电流谐波和降低转矩脉动的目的。仿真结果表明:将谐波抑制模块加入到永磁同步电机矢量控制系统后,永磁同步电机定子端相电流波形的正弦度提高,各次谐波失真率均有所降低,转矩脉动受到抑制。该研究为永磁同步电机的转矩脉动抑制提供了一种有效方法。

关键词:永磁同步电机; Simulink建模; 谐波抑制; 转矩脉动; 瞬时无功功率

中图分类号: TM382; TH-39 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2023)03-0049-06

Torque Ripple Suppression Method of Permanent Magnet Synchronous Motor

ZHANG Chao¹, GUO Hui^{1*}, YUAN Tao¹, SUN Pei¹, XIAO Lanlan¹, SUN Jinhui²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
2. 32128 Units of Chinese People's Liberation Army, Jinan 250000, China)

Abstract: Aiming at the problem of torque ripple caused by current harmonics affecting motor performance, a harmonic torque model was established. Simultaneously, a harmonic suppression module integrated into the control system through a harmonic current loop was built based on the theory of three-phase instantaneous reactive power combined with a PI controller, and the purpose of suppressing current harmonics and reducing torque ripple were achieved. The simulation results show that when the harmonic suppression module is added to the PMSM vector control system, the sinusoidal degree of the stator phase current waveform is increased, the content of each harmonic is reduced, and the torque ripple is suppressed. It can provide some guidance for PMSM torque ripple suppression.

Keywords: PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor); Simulink modeling; harmonic suppression; torque ripple; instantaneous reactive power

永磁同步电机具有构造简单、几何尺寸小、效率高和响应快等特点。由于永磁体材料性能的逐步优化以及相关控制理论与制造技术的不断成熟,永磁同步电机逐渐在各工业领域推广应用^[1]。输出转矩的稳定性作为评判电机整体性能优劣的主要指标之一,其相关研究具有重要意义。在传统控制策略中,往往对逆变器电子器件理想化,因此实际中相电流波形正弦度会有所下降,出现大量的高次谐波电流。谐波电流在增加电机损耗的同时会降低输出转矩的平滑度,出现

转矩脉动的现象。因此,谐波电流的控制是削弱电机转矩脉动、提高电机性能的有效方式。

转矩脉动是由于电机输出的转矩掺杂有谐波成分导致。按照谐波的性质通常可以将其分为空间谐波与时间谐波^[2]。空间谐波产生的首要原因是电机在运转时气隙磁场的畸变;空间谐波的特点是其由转子位置决定,转子位置不同其谐波表达式不同。因此产生空间谐波的主要原因有齿槽效应、磁路不对称以及定子不同轴等。时间谐波则主要由电驱控制系统中逆

收稿日期:2022-10-20;修回日期:2023-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51675324)。

第一作者简介:张超(1998),男,安徽宿松人,硕士研究生,主要研究方向为汽车驱动电机振动噪声控制。通信作者:郭辉(1981),男,山东曹县人,教授,硕士研究生导师,主要研究方向为车辆振动噪声控制。E-mail:hgsues@163.com

变器的非线性特性造成的;时间谐波的特点是其由时间决定,时间不同其谐波表达式不同。逆变器所使用的电力电子器件在实际中并不是理想的开关器件,开关管管压降以及续流二极管的导通压降不能被完全忽略,同时为了防止短路往往会设置一定时间的死区。这致使逆变器输出电压存在误差,使其波形发生畸变,进而出现谐波电流。

根据谐波的分类及产生原因,其抑制方法一般从电机本体设计以及控制算法优化两方面考虑。对于电机本体结构的研究,一般以优化结构来提高气隙磁场的正弦度为主^[3];而对于控制算法的研究,主要是补偿死区效应以及抑制电流谐波。补偿死区效应通常可以采用时间补偿法^[4]和误差电压补偿^[5]等;抑制电流谐波通常采用迭代学习法^[6]、梯度下降法^[7]和谐波注入法^[8-9],往往仅针对 5 次、7 次谐波进行抑制,而忽略其他谐波的影响。

课题组基于瞬时无功功率理论提取谐波来达到抑制谐波的目的。在永磁同步电机转速矢量控制基础上设计谐波抑制模块,并通过增设谐波电流环的方式来达到减小转矩脉动的目的。谐波抑制模块通过三相瞬时无功功率理论对电机相电流进行实时的总谐波提取,结合 PI 控制器完成谐波电压的注入,抑制永磁同步电机定子端相电流总谐波,进而抑制电机转矩脉动。

1 永磁同步电机谐波分析

1.1 PMSM 基波电压模型

课题组研究了永磁同步电机在磁场定向控制(field oriented control, FOC)下对转矩脉动的抑制方法。在控制系统中,三相交流电信号会存在相互耦合,不利于电机的控制,因此在 FOC 控制中,三相静止坐标系由坐标变换转换到两相旋转坐标系上实现对三相信号的解耦,通过对两相直流电的控制来实现对三相电信号的控制^[10]。

在两相旋转坐标系下,电压方程为:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d - \omega_r L_q i_q; \\ u_q &= L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q + \omega_r (\Psi_f + L_d i_d) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: u_d, u_q 为 d, q 轴电压; i_d, i_q 为 d, q 轴电流; L_d, L_q 为 d, q 轴电感; R_s 为定子电阻; Ψ_f 为转子永磁体磁链;

ω_r 为电角速度。

在电机稳定运行时,理想情况下,如果仅存在基波,那么两相旋转坐标系下电流电压均是直流量。实际中,由于电机本体及控制系统存在的非线性因素产生的空间谐波以及时间谐波的存在, d, q 轴的电流与电压不再是直流量,而是由直流量与谐波变换而来的交流分量混合,其中的交流分量会对电机产生较大的影响。

1.2 转矩谐波模型

永磁同步电机一般为三相三线系统,定子绕组接线方式为星形连接,因此在定子电流中不含 3 次和 3 的倍数次谐波。同时不存在偶次谐波,而其他一系列谐波分量中 5 次和 7 次谐波失真率较高。因此课题组以 5 次和 7 次谐波产生的 6 次以及 12 次脉动为例^[11],建立转矩谐波模型。

在稳态下,三相绕组中定子电流基波与感应电动势基波同相位。为方便计算,假设初始相位为 0,结合式(1)可以将 A 相感应电动势和电流表示为:

$$u_A(t) = U_{m1} \sin \omega_r t + U_{m5} \sin 5\omega_r t + U_{m7} \sin 7\omega_r t + \dots; \quad (2)$$

$$i_A(t) = I_{m1} \sin \omega_r t + I_{m5} \sin 5\omega_r t + I_{m7} \sin 7\omega_r t + \dots \quad (3)$$

式中: I_{m1}, I_{m5}, I_{m7} 分别表示 A 相电流基波以及 A 相电流 5 次和 7 次谐波的幅值; U_{m1}, U_{m5}, U_{m7} 分别表示 A 相感应电动势基波以及 A 相感应电动势 5 次和 7 次谐波的幅值; ω_r 表示电角速度。

因此 A 相电磁功率为:

$$P_A = i_A(t)u_A(t) = P_0 + P_2 \cos 2\omega_r t + P_4 \cos 4\omega_r t + P_6 \cos 6\omega_r t + \dots \quad (4)$$

式中: P_A 表示 A 相电磁功率; P_0, P_2, P_4, P_6 分别表示电磁功率恒定值以及电磁功率 2 次、4 次、6 次谐波分量的幅值。

故在考虑定子端三相电流含有 5 次、7 次谐波后,输出电磁转矩可以表示为:

$$T_e = \frac{1}{\Omega_r} (P_A + P_B + P_C) = T_0 + T_6 \cos 6\omega_r t + T_{12} \cos 12\omega_r t + \dots \quad (5)$$

式中: P_B, P_C 分 B 相和 C 相电磁功率; T_e 表示电机输出电磁转矩; T_0, T_6, T_{12} 分别表示转矩脉动恒定值以及转矩

脉动6次、12次脉动量的幅值; Ω 表示机械角速度。

由式(5)可知,在电机定子端电流出现谐波后,输出转矩含有一定量的脉动分量。以5次和7次谐波电流为例,电磁转矩除了恒定值之外还存在6次以及12次转矩脉动分量。根据推导结果可知,对谐波电流的抑制能减小转矩脉动,从而提高系统稳定性,降低振动噪声。

2 谐波抑制策略

2.1 基于瞬时无功功率理论的谐波抑制策略

在永磁同步电机调速系统中,为了抑制电流中的谐波分量,通过谐波补偿的方式消除相电流中的有害谐波。为了能够抑制范围更广的谐波电流,首先要提取谐波。课题组基于瞬时无功功率理论对永磁同步电机三相定子电流的谐波进行提取^[12]。

在三相电压对称且没有发生畸变的情况下,将各相瞬时电压表示为 e_a, e_b, e_c ,各相瞬时电流表示为 i_a, i_b, i_c 。根据坐标变换理论,2组三相数据经过Clark变换可以得到2组两相数据: α, β 相的瞬时电压 e_α, e_β 和瞬时电流 i_α, i_β 。将其表示为:

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中:

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

如图1所示,在 $\alpha\beta$ 坐标系中对瞬时电压矢量以及瞬时电流矢量进行分解合成。

依据瞬时无功功率理论推导可得有功功率 p 和无功功率 r 分量表达式为:

$$\begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_r \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_r \end{bmatrix} \quad (13)$$

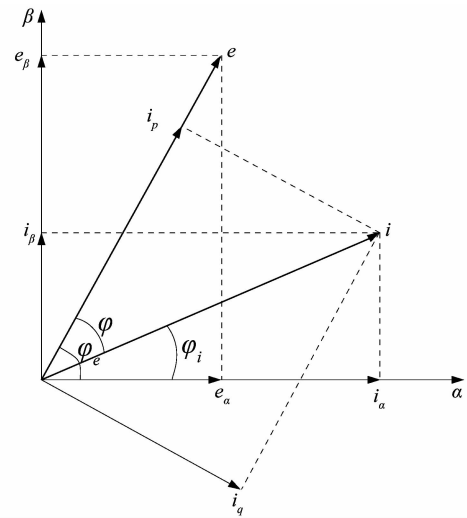


图1 瞬时电压和电流矢量在 $\alpha\beta$ 平面的分解与合成
Figure 1 Decomposition and synthesis of instantaneous current and voltage vectors in $\alpha\beta$ plane

$$\begin{bmatrix} p \\ r \end{bmatrix} = e \begin{bmatrix} i_p \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ e_\beta & -e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

三相瞬时有功电流 i_p 与瞬时无功电流 i_r 同三相瞬时电流关系为:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_r \end{bmatrix} = C C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:

$$C = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} \quad (11)$$

分解 i_p, i_r 为直流量跟交流量的叠加,有:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_p \\ \bar{i}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{i}_p \\ \tilde{i}_r \end{bmatrix} \quad (12)$$

在三相电压对称且没有发生畸变下, i_p 直流量 \bar{i}_p 对应基波有功电流,交流量 \tilde{i}_p 对应于谐波有功电流; i_r 直流量 \bar{i}_r 对应基波无功电流, \tilde{i}_r 对应谐波无功电流。因此所得电流经过滤波器处理,滤除交流量后得到的直流电流 \bar{i}_p 和 \bar{i}_r 即为基波电流。

式中 i_{a1}, i_{b1}, i_{c1} 为定子端三相电流基波。

原三相电流与该基波电流作差则得到三相电流谐波部分。

在课题组搭建的谐波抑制模块中,提取永磁同步电机定子端三相电流后,通过 Park 变换转换至两相静止坐标系中,依据瞬时无功功率理论得到 i_p 和 i_r ,再由滤波器提取直流部分,将结果经过逆变换得到三相坐标系下的基波部分,最后原信号减去该基波部分即得到三相电流谐波分量。

2.2 永磁同步电机谐波注入矢量控制模型

课题组以 8 极 48 槽内置式永磁同步电机为例,在控制系统中,根据内置式永磁同步电机特点采用最大转矩电流比(maximum torque per ampere, MTPA)控制方式,系统通过电流内环以及转速外环实现对电机的调速控制^[13]。在该控制系统基础上,课题组设计谐波抑制模块,将其以谐波电流环并入系统,达到抑制谐波电流进而减小转矩脉动的目的。

谐波抑制模块中,由瞬时无功功率理论提取的电机定子端相电流谐波,经过比例积分控制(proportional-integral control, PI)得到谐波补偿电压信号,将补偿信号经过 Park 逆变换后加入到空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)模块进行调速控制。

注入谐波抑制模块的永磁同步电机谐波电流抑制控制模型如图 2 所示。

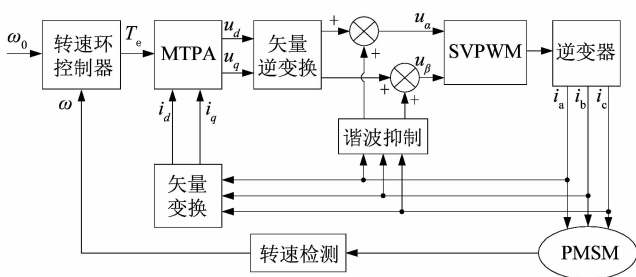


图 2 永磁同步电机加入谐波抑制模块控制框图
Figure 2 Control block diagram of PMSM with harmonic suppression module

3 仿真分析

为验证课题组采用的转矩抑制方法是否有效,在 MATLAB/Simulink 中通过对内置式永磁同步电机控制

系统进行建模完成仿真分析,永磁同步电机具体参数见表 1。同时考虑逆变器非线性带来的谐波电流及对应的转矩脉动对逆变器相关参数进行设置,逆变器具体参数见表 2。最后通过比较加入谐波抑制模块前后定子端三相电流总谐波失真率(total harmonic distortion, THD)以及转矩脉动大小来验证谐波抑制模块的有效性。

表 1 永磁同步电机参数

Table 1 Parameters of permanent magnet synchronous motor

极对数 p	定子电阻 R_s/Ω	d 轴电感 L_d/mH	q 轴电感 L_q/mH	永磁体磁链 ψ_f/Wb	转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	阻尼系数 $B/(N \cdot m \cdot s)$
4	0.627 1	4.06	8.17	0.199 8	0.016 8	0.011 4

表 2 逆变器参数

Table 2 Inverter parameters

直流侧电压 u_{dc}/V	开关频率 f_{PWM}/kHz	采样周期 $T_s/\mu s$	死区时间 $T_{Dead}/\mu s$	管压降 u_d/V
311	10	10	5	3

课题组比较了永磁同步电机在转速 $n = 1\ 000\ r/min$,负载 10 N 下加入谐波抑制模块前后的 A 相仿真波形,并进行了快速傅里叶变换(fast fourier transformation, FFT)分析,通过转矩脉动及其快速傅里叶变换分析来判断抑制方法的有效性。

图 3~6 是加入谐波抑制模块前后的 A 相仿真波形及其快速傅里叶变换分析对比。

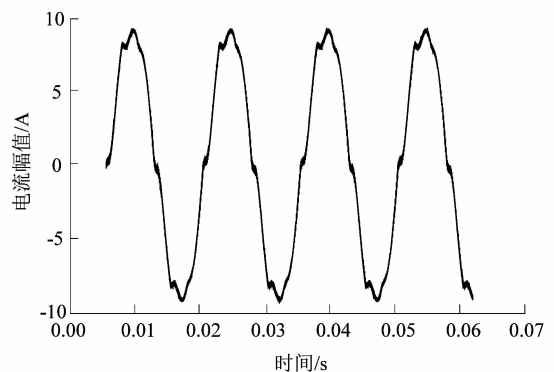


图 3 未加入谐波抑制模块的 A 相电流
Figure 3 A phase current without harmonic suppression module

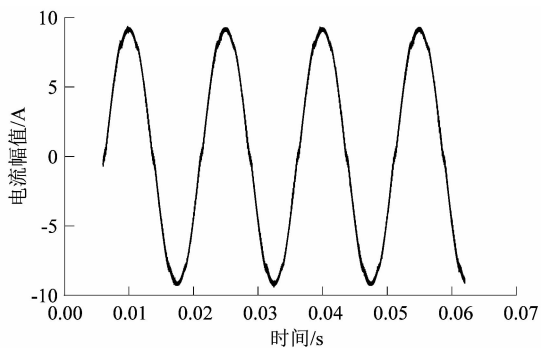


图4 加入谐波抑制模块的A相电流

Figure 4 A phase current with harmonic suppression module

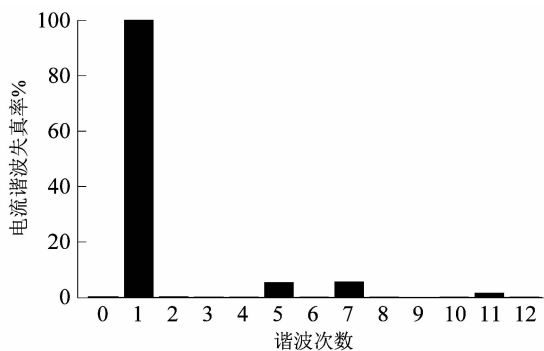


图5 未加入谐波抑制模块的A相电流谐波失真率

Figure 5 Harmonic distortion of A phase current without harmonic suppression module

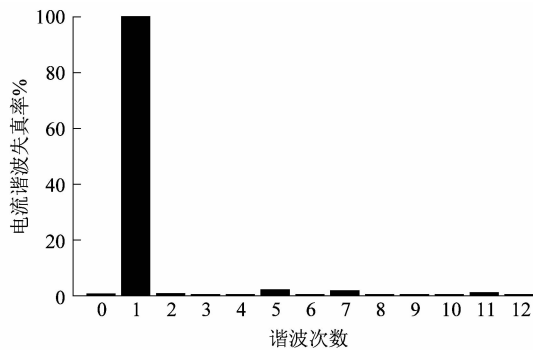


图6 加入谐波抑制模块的A相电流谐波失真率

Figure 6 Harmonic distortion of A phase current with harmonic suppression module

由图3可知,在未加入谐波抑制时A相电流波形正弦度较差,且具有一定的畸变。如图5所示,对其进行快速傅里叶变换分析也验证了5次、7次等谐波的存在。由图4可以看出谐波抑制模块的加入有效地抑

制了各次谐波电流,A相电流波形变得平滑,正弦度得到提高。由表3可知,电流总谐波失真率降低了61.4%,表明谐波抑制算法可有效抑制谐波。

表3 A相电流抑制前后电流谐波失真率对比

Table 3 Comparison of harmonic distortion of A phase current before and after suppression

谐波次数	A相电流谐波失真率/%	
	抑制前	抑制后
5	5.182	1.777
7	5.325	1.427
11	1.332	0.721
总谐波失真率/%	7.800	3.010

图7所示为加入谐波抑制模块前后的转矩对比,图8和9分别为未加入谐波抑制模块和加入谐波抑制模块的转矩谐波失真率。

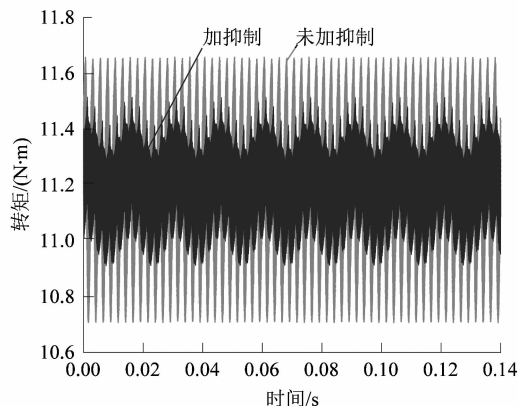


图7 加入谐波抑制模块前后的转矩

Figure 7 Torque before and after adding harmonic suppression module

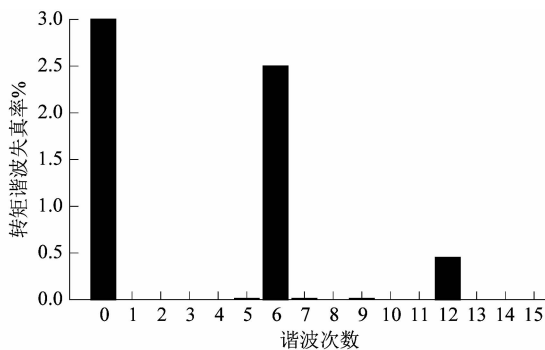


图8 未加谐波抑制模块的转矩谐波失真率

Figure 8 Harmonic distortion of torque without harmonic suppression module

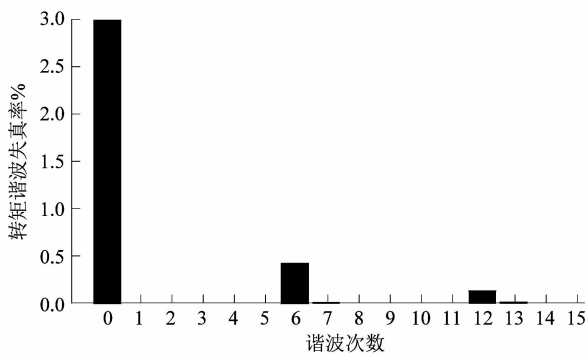


图9 加入谐波抑制模块的转矩谐波失真率

Figure 9 Harmonic distortion of torque with harmonic suppression module

由图7可知,加入谐波抑制模块后转矩脉动减小。由图8可以看出,转矩存在6次和12次脉动,验证了谐波转矩模型。而结合图9可以发现,在加入谐波抑制模块后,6次和12次转矩脉动明显降低。加入抑制模块前后输出转矩谐波失真率如表4所示,可以看出总转矩谐波失真率降低了46.2%,表明谐波抑制算法可有效降低转矩脉动。

表4 加入抑制模块前后输出转矩谐波失真率

Table 4 Comparison of output torque harmonic distortion before and after adding suppression module

谐波次数	输出转矩谐波失真率/%	
	抑制前	抑制后
6	2.500	0.420
12	0.450	0.130
总转矩谐波失真率/%	2.900	1.560

综上,课题组采用的谐波抑制方法对永磁同步电机定子端谐波电流有明显抑制效果,能较好控制转矩脉动。

4 结论

课题组针对永磁同步电机转矩脉动问题展开研究,分析得出电机定子端相电流谐波与转矩脉动关联,并针对性地设计了谐波抑制模块,同时对抑制方法进行仿真验证分析。研究得出如下结论:

1) 相电流波形的畸变会使其含有大量的谐波,谐波相互作用最终导致转矩脉动产生。

2) 课题组设计的谐波抑制方法能够对次数范围

更广的永磁同步电机定子端相电流谐波进行抑制。仿真结果表明抑制效果较好,经过抑制后相电流各次谐波的含量均得到了有效降低,电流总谐波失真率降低了61.4%,电流的正弦度得到提高;同时转矩脉动明显减小,转矩总谐波失真率降低了46.2%。

该研究可为永磁同步电机转矩脉动的抑制提供一定的参考,后续在转矩脉动抑制效果提升方面,可以做进一步研究。

参考文献:

- [1] 王道涵,彭晨,王柄东,等. 电动汽车新型转子内置式永磁同步电机转矩脉动和电磁振动抑制研究[J]. 中国电机工程学报,2022,42(14):5289-5290.
- [2] 陈静怡. 基于谐波电流注入的永磁同步电机转矩脉动抑制策略研究[D]. 重庆:重庆大学,2019:1-6.
- [3] PARK C B, JEONG G, JO I K, et al. Improvement of cogging torque characteristics of magnetic-gear PMSM for railway vehicles using pole-piece skew [J]. Journal of the Korean Society for Railway, 2019,22(9):684-685.
- [4] PARK C S, JUNG T U. Online dead time effect compensation algorithm of PWM inverter for motor drive using PR controller[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology,2017,12(3):1138-1139.
- [5] 王高林,于泳,杨荣峰,等. 感应电机空间矢量PWM控制逆变器死区效应补偿[J]. 中国电机工程学报,2008,28(15):80-81.
- [6] 赵林峰,陈久闪,陈无畏,等. 基于转角的迭代学习控制策略下永磁同步电机EPS转矩脉动抑制方法[J]. 中国机械工程,2017,28(24):2908-2910.
- [7] 燕罗成,廖勇,陈静怡. 基于梯度下降法的PMSM转矩脉动抑制策略[J]. 电力电子技术,2019,53(9):19-20.
- [8] 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(27):121-122.
- [9] 于吉坤,李立毅,杜鹏程,等. 基于谐波注入PWM的高速永磁同步电机纹波电流抑制方法[J]. 电气工程学报,2017,12(9):10.
- [10] 刘军杰,吴静波,郭志军,等. 纯电动汽车用内置式永磁同步电机弱磁控制策略综述[J]. 微电机,2022,55(7):108.
- [11] LEE G H, CHOL W C, KIM S I, et al. Torque ripple minimization control of permanent magnet synchronous motors for EPS applications [J]. International Journal of Automotive Technology,2011,12(2):291-294.
- [12] 王兆安. 谐波抑制与无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2016:168-192.
- [13] 任先进,余继良,王峰,等. 永磁同步电机空间矢量脉宽调制系统仿真[J]. 电机与控制应用,2014,41(9):29-32.