

基于谐波注入算法的变频器驱动下 PMSM 损耗抑制方法*

刘文彬, 韩雪岩, 朱龙飞

(沈阳工业大学 国家稀土永磁电机工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 永磁同步电机(PMSM)在变频器驱动下运行时,受变频器所产生的含量较高的时间电流谐波影响,电机的损耗会大幅增加,这将严重影响到电机运行的安全性与稳定性,而通过对电机本体结构进行优化的传统方法所带来的损耗抑制效果有限,不足以解决问题。针对此,从电机的控制策略出发,提出了一种基于谐波注入算法的 PMSM 损耗抑制方法,通过对成分含量最高的 5 次、7 次时间电流谐波进行抑制,来降低变频器驱动下电机的损耗。以场路耦合联合仿真模型为计算工具来验证算法的有效性,结果表明在加入谐波注入算法后电机的损耗降低了 24.9%,所达到的效果较好,为电机的损耗抑制提供了一种参考。

关键词: 永磁同步电机; 谐波注入算法; 损耗抑制; 时间电流谐波; 场路耦合联合仿真

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)01-0001-08

doi: 10.12177/emca.2022.145

Loss Suppression Method of PMSM Driven by Inverter Based on Harmonic Injection Algorithm*

LIU Wenbin, HAN Xueyan, ZHU Longfei

(National Engineering Research Center for Rare-Earth Permanent Magnetic Machines, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: When permanent magnet synchronous motor (PMSM) is driven by the inverter, the loss of motor can be greatly increased due to the influence of high content of time current harmonics generated by inverter, which can seriously affect safety and stability of motor operation. However, the loss suppression effect brought by traditional method of optimizing the structure of motor body is limited, which is not enough to solve this problem. For this situation, the control strategy of motor is analyzed, and a loss suppression method for PMSM based on harmonic injection algorithm is proposed. By suppressing 5th and 7th time current harmonics with highest component content, the loss of motor driven by the inverter is reduced. The field-circuit coupling joint simulation model is used as a calculation tool to verify the effectiveness of algorithm. The results show that the loss of motor is reduced by 24.9% after adding harmonic injection algorithm, and the effect of the proposed method is good, which provides a novel method for the loss suppression of motor.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); harmonic injection algorithm; loss suppression; time current harmonic; field-circuit coupling joint simulation

收稿日期: 2022-07-14; 收到修改稿日期: 2022-09-26

* 基金项目: 辽宁省博士科研启动基金项目(2020-BS-143); 辽宁省教育厅青年科技人才育苗项目(LQGD2020006); 辽宁省教育厅基础研究项目(LJGD2020018)

作者简介: 刘文彬(1998—),男,硕士研究生,研究方向为永磁特种电机及控制。

韩雪岩(1978—),女,博士,教授,研究方向为特种电机及其控制应用。

朱龙飞(1988—),男,博士,讲师,研究方向为特种电机及其控制应用。

0 引言

随着变频器越来越广泛地应用于永磁同步电机(PMSM)控制领域,变频器带来了宽调速范围、高调速策略等优点的同时,也深受其运行时所带来的大量时间电流谐波的困扰。在时间电流谐波以及由时间电流谐波所引起的空间电流谐波的影响下,电机的损耗会大幅度增加^[1-3],过大的损耗会引起过高的温升,这会影响到电机在变频器驱动下的运行性能,尤其是在散热条件差的转子部位,高温会导致永磁体发生不可逆退磁,这对于永磁电机来说是十分危险的。因此,有效地降低永磁电机在变频器驱动运行下的损耗具有重要意义。

对于电机损耗的抑制,往往将注意力集中在电机本体结构的优化上,如改善电机绕组分布^[4-5]、调整极槽配合及槽口形状^[6-8]、优化永磁体形状^[9-10]等,其目的均是为了改善气隙磁场分布的正弦度、优化反电动势波形,以实现降低电机的损耗。但通过优化电机结构的方式,只能抑制由时间电流谐波所导致的空间电流谐波,无法对由变频器所产生的时间电流谐波进行有效抑制,因此所能达到的损耗抑制效果有限,并且还需同时兼顾电机的电磁性能,需要调整的电机参数过多,过程较为复杂。因此,本文从电机的外控制电路入手,提出了一种基于谐波注入算法的变频器供电下永磁电机损耗的抑制方法,此种方法易于实现可调节性强^[11-12],只需在电机的控制电路搭建一个谐波注入电流环来补偿系统中所携带的成分含量较高的特定次数时间电流谐波,且可以达到较好的损耗抑制效果。目前此种方法尚未应用于PMSM的损耗抑制上,因此本文将详细研究此种方法对于PMSM损耗的抑制效果。

综上,本文将基于场路耦合联合仿真模型来验证谐波注入算法的有效性,场路耦合联合仿真模型是一种通过将多个软件联合到一起进行数据间的传输,以达到将电机的电磁场和电机的控制电路进行“场”和“路”的耦合运算的目的。此种仿真模型多应用于模拟电机在变频器驱动下运行的状况,该模型的有效性也已被充分证明^[13-15]。

1 场路耦合联合仿真模型

本文以一台 6.5 kW、3 000 r/min 的表贴式

PMSM 为研究对象,使用变频器对其进行驱动,电机的主要参数和变频器的相关参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 电机主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	6.5	定子外径/mm	174
额定频率/Hz	200	硅钢片	DW270-35
极数	8	d 轴电感/mH	0.702
定子内径/mm	104	q 轴电感/mH	0.727
气隙长度/mm	2	永磁体磁链/Wb	0.185
轴向长度/mm	160	额定负载转矩/(N·m)	20.7

表 2 变频器相关参数

参数名称	参数值
直流母线电压/V	400
IGBT 管压降/V	1.5
二极管管压降/V	2
PWM 开关周期/ μ s	100
IGBT 导通时间/ μ s	1
IGBT 关断时间/ μ s	2
死区时间/ μ s	6

本文将基于 Simulink、Simplorer 和 Maxwell 3 个软件进行场路耦合联合仿真来精确模拟 PMSM 在变频器驱动下的实际运行状况。首先利用 Simulink 搭建变频器的 $i_d = 0$ 控制电路,如图 1(a)所示;再利用 Simplorer 搭建逆变回路作为连接控制电路及电机本体的桥梁,如图 1(b)所示;最后利用 Maxwell 对电机本体进行精确建模,其 2D 和 3D 有限元模型如图 1(c)所示。

在进行场路耦合联合仿真模型计算时,控制电路部分将满足以下计算条件:

$$\begin{cases} [(L_d i_d + \psi_f)^2 + (L_q i_q)^2] \omega^2 \leq u_{\max}^2 \\ i_d^2 + i_q^2 \leq i_{\max}^2 \\ T_e = 1.5 p i_q [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{\max} 为逆变器能输出的最大定子电压; i_{\max} 为一定容量的逆变器所能输出的电流最大值; i_d 和 i_q 分别为 d 、 q 轴电流; L_d 和 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; ψ_f 为永磁体磁链; T_e 为电机电磁转矩; ω 为电机角速度; p 为电机极对数。

此外电机本体内的电磁场计算条件需要满足

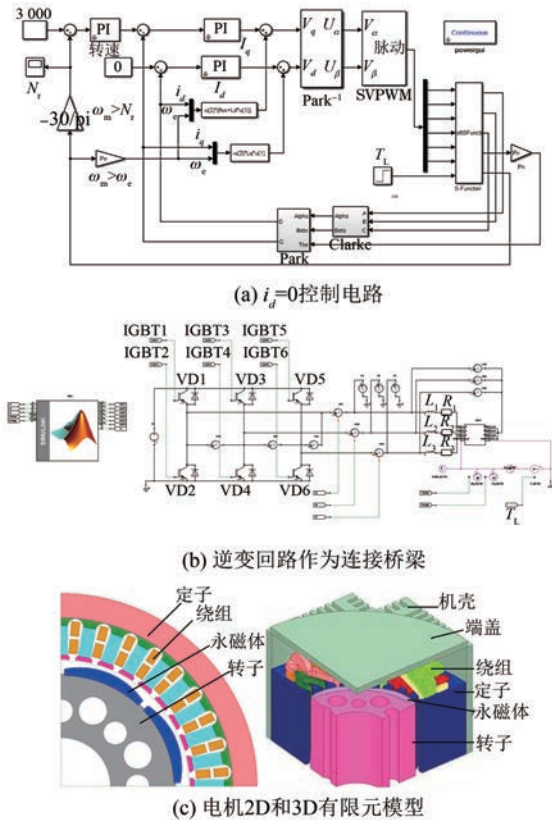


图1 场路耦合联合仿真模型

麦克斯韦方程组。电机 2D 和 3D 有限元模型均是部分模型,因此均对模型边界处设定狄利克雷边界条件,设其值为 0;对径向分断处设定主从边界条件,并有 $B_s = B_m$ 。

此仿真模型在具体运行时的原理如图 2 所示,本文将基于此模型来验证谐波注入算法对电机损耗的抑制作用。

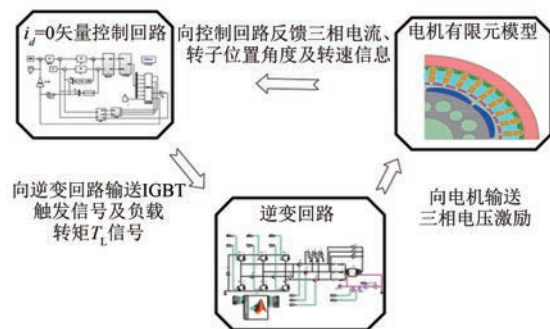


图2 运行原理图

2 谐波注入算法

时间电流谐波是造成电机变频器驱动时损耗

大幅增加的主要原因,可以分为两类:(1) PWM 开关频率附近的时间谐波;(2) 由死区时间及管压降造成的 $6k \pm 1$ 次时间谐波。为了分析两类时间谐波的含量关系,取逆变器输出电压一个周期内的波形,对该波形进行 FFT 分析,得到其频谱图,如图 3 所示,可以看出逆变器输出电压波形中的时间谐波含量基本还是以死区时间和管压降所造成的 $6k \pm 1$ 次时间谐波为主,开关频率附近的时间谐波含量相对较小。 $6k \pm 1$ 次时间谐波中又以 5 次、7 次时间谐波占据主要部分。因此,本节主要针对 5 次、7 次时间电流谐波的抑制来构建谐波注入算法,从而抑制 PMSM 在变频器驱动时的时间电流谐波。当时间电流谐波被有效抑制时,电机的损耗将从源头上被有效抑制。

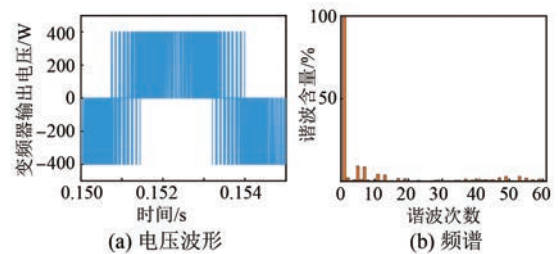


图3 变频器输出电压波形及其频谱

5 次谐波电压相量的旋转速度为 -5ω ,其旋转方向与电机旋转方向相反。7 次谐波电压相量的旋转速度为 7ω ,其旋转方向与电机旋转方向相同。因此其表达式可以写为

$$\begin{cases} u_a = u_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + u_5 \sin(-5\omega t + \varphi_5) + u_7 \sin(7\omega t + \varphi_7) + \dots \\ u_b = u_1 \sin(\omega t + \varphi_1 - 2\pi/3) + u_5 \sin(-5\omega t + \varphi_5 - 2\pi/3) + u_7 \sin(7\omega t + \varphi_7 - 2\pi/3) + \dots \\ u_c = u_1 \sin(\omega t + \varphi_1 + 2\pi/3) + u_5 \sin(-5\omega t + \varphi_5 + 2\pi/3) + u_7 \sin(7\omega t + \varphi_7 + 2\pi/3) + \dots \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_1 、 u_5 和 u_7 分别为基波、5 次谐波和 7 次谐波电压幅值; φ_1 、 φ_5 和 φ_7 分别为基波、5 次谐波和 7 次谐波电压初始相位角。

谐波电压的存在会导致相对应的同旋转速度、同旋转方向的谐波电流产生。因此, PMSM 的三相电流表达式可以写为

$$\begin{cases} i_a = i_1 \sin(\omega t + \varphi_{i1}) + i_5 \sin(-5\omega t + \varphi_{i5}) + \\ i_7 \sin(7\omega t + \varphi_{i7}) + \dots \\ i_b = i_1 \sin(\omega t + \varphi_{i1} - 2\pi/3) + \\ i_5 \sin(-5\omega t + \varphi_{i5} - 2\pi/3) + \\ i_7 \sin(7\omega t + \varphi_{i7} - 2\pi/3) + \dots \\ i_c = i_1 \sin(\omega t + \varphi_{i1} + 2\pi/3) + \\ i_5 \sin(-5\omega t + \varphi_{i5} + 2\pi/3) + \\ i_7 \sin(7\omega t + \varphi_{i7} + 2\pi/3) + \dots \end{cases} \quad (3)$$

式中： i_1 、 i_5 和 i_7 分别为基波、5 次谐波和 7 次谐波电流幅值； φ_{i1} 、 φ_{i5} 和 φ_{i7} 分别为基波、5 次谐波和 7 次谐波电流初始相位角。

将式(3)进行等幅值基波 Park 变换 ($abc \rightarrow dq$)，变换后的表达式为

$$\begin{cases} i_d = i_{d1} + i_5 \cos(-6\omega t + \varphi_{i5}) + i_7 \cos(6\omega t + \varphi_{i7}) \\ i_q = i_{q1} + i_5 \sin(-6\omega t + \varphi_{i5}) + i_7 \sin(6\omega t + \varphi_{i7}) \end{cases} \quad (4)$$

式中： i_d 和 i_q 分别为 d 、 q 轴电流， $i_{d1} = i_1 \cos(\varphi_{i1})$ ， $i_{q1} = i_1 \sin(\varphi_{i1})$ 。

忽略因气隙磁场畸变而引起的永磁体磁链谐波，PMSM 在 dq 同步旋转坐标系下的电压方程如下所示：

$$\begin{cases} u_d = -\omega L_q i_q + R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} \\ u_q = \omega L_d i_d + \omega \psi_{f1} + R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

式中： u_d 和 u_q 分别为 d 、 q 轴电压； L_d 和 L_q 分别为 d 、 q 轴电感； R_s 为定子绕组电阻； ψ_{f1} 为永磁体基波磁链。

将式(4)代入到式(5)，可以得到在 5 次、7 次时间电流谐波影响下的 PMSM 电压方程，如下所示：

$$\begin{cases} u_d = -\omega L_q i_{q1} + R_s i_{d1} + 5\omega L_q i_5 \sin(-6\omega t + \varphi_{i5}) + \\ R_s i_5 \cos(-6\omega t + \varphi_{i5}) - 7\omega L_q i_7 \sin(6\omega t + \varphi_{i7}) + \\ R_s i_7 \cos(6\omega t + \varphi_{i7}) + \dots \\ u_q = \omega L_d i_{d1} + R_s i_{q1} - 5\omega L_d i_5 \cos(-6\omega t + \varphi_{i5}) + \\ R_s i_5 \sin(-6\omega t + \varphi_{i5}) + 7\omega L_d i_7 \cos(6\omega t + \varphi_{i7}) + \\ R_s i_7 \sin(6\omega t + \varphi_{i7}) + \omega \psi_{f1} + \dots \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)可以看出，5 次、7 次时间电流谐

波会给 PMSM 的电压方程带来较大的谐波扰动影响，而矢量控制系统的 PI 控制器只能够有效地消除稳态误差，不能够有效地抑制这些谐波时变扰动分量。因此，通过引入谐波注入算法，来抑制 5 次、7 次时间电流谐波。下面介绍谐波注入算法的具体实现方法。

根据三相电流各次数的谐波在与之对应的同等次数 dq 同步旋转坐标系下为直流分量，其他次数的谐波在该坐标系下为交流量的特征，构建 5 次、7 次谐波 dq 同步旋转坐标系如图 4 所示。将电机三相电流进行 5/7 次谐波 Park 变换 ($abc \rightarrow d_{5th}q_{5th}/abc \rightarrow d_{7th}q_{7th}$)，再通过低通滤波器，就可以提取到 5/7 次电流谐波在与之对应的 5/7 次谐波 dq 同步旋转坐标系下的直流分量 i_{d5th} 、 i_{q5th} 、 i_{d7th} 、 i_{q7th} 。其示意图如图 5 所示。

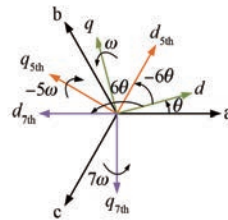


图 4 各次坐标系示意图

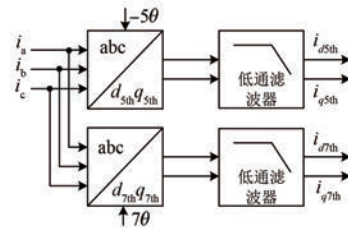


图 5 谐波电流提取模块

变换矩阵式如下：

$$C_{d_{5th}q_{5th}}^{dq} = \begin{bmatrix} \cos(-6\theta) & \sin(-6\theta) & 0 \\ -\sin(-6\theta) & \cos(-6\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C_{d_{7th}q_{7th}}^{dq} = \begin{bmatrix} \cos(6\theta) & \sin(6\theta) & 0 \\ -\sin(6\theta) & \cos(6\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

利用变换矩阵式(7)和式(8)，将式(6)变换到 5 次、7 次谐波 dq 同步旋转坐标系下，滤除掉交流分量后，可以得到 5 次、7 次谐波 dq 同步旋转坐标系下 PMSM 的谐波稳态电压方程如下所示：

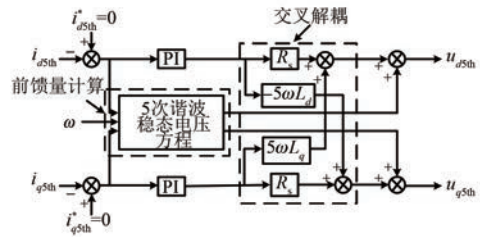
$$\begin{cases} u_{d5th} = 5\omega L_q i_{q5th} + R_s i_{d5th} \\ u_{q5th} = -5\omega L_d i_{d5th} + R_s i_{q5th} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} u_{d7th} = -7\omega L_q i_{q7th} + R_s i_{d7th} \\ u_{q7th} = 7\omega L_d i_{d7th} + R_s i_{q7th} \end{cases} \quad (10)$$

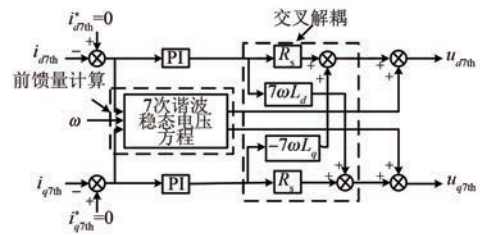
计算5次、7次谐波电流对应的谐波注入电压的基本思路是,利用PI控制器,搭建谐波注入电流环,即可将上面所提取出的谐波电流量 i_{d5th} 、 i_{q5th} 、 i_{d7th} 、 i_{q7th} 转换为对应的谐波注入电压量。由于不希望电流中有5次、7次谐波分量的存在,将PI控制器的输入参考值 i_{d5th}^* 、 i_{q5th}^* 、 i_{d7th}^* 、 i_{q7th}^* 全设定为0。但是通过式(9)、式(10)可以看出,在谐波稳态电压方程中含有交叉耦合成分,这会影响到求解谐波注入电压的准确性,因此需对谐波稳态电压方程中的交叉耦合项进行交叉解耦。此外,利用5次、7次谐波稳态电压方程计算得到前馈量,并将其加入系统中,能省去很多调节时间,这可以实现系统动态响应能力的提高。综上所述,5次、7次谐波注入电压的计算模块如图6所示。

最后需要把计算所得到的谐波注入电压变换到与基波电流环相同的 $\alpha\beta$ 坐标系下,再注入到基波电流环中,如图7所示。以上即为谐波注入算法的全部流程。

综上所述,通过谐波注入算法可以对系统中的5次、7次时间电流谐波进行有效地抑制,加入



(a) 5次谐波注入电压计算模块



(b) 7次谐波注入电压计算模块

图6 谐波注入电压计算模块

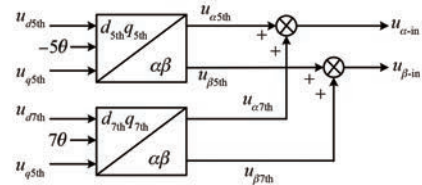


图7 谐波注入电压坐标系变换模块

谐波注入算法后的 PMSM 驱动系统的结构框图如图8所示。

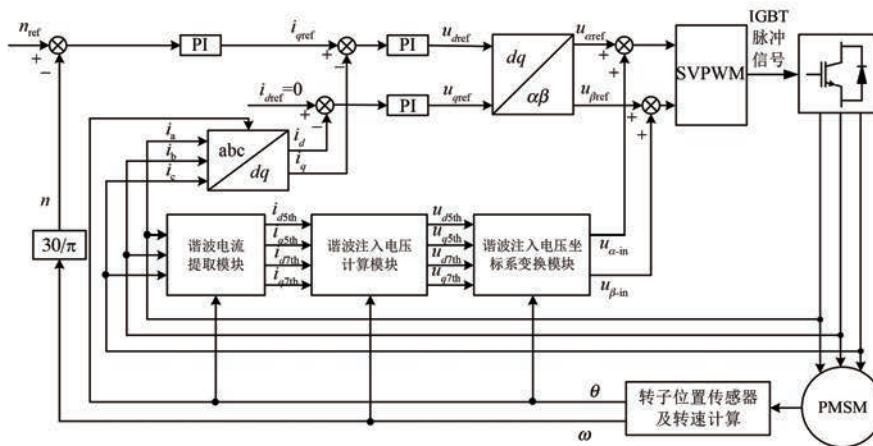


图8 加入谐波注入算法后 PMSM 驱动系统结构框图

可以看出,谐波注入算法不需要增加任何硬件和离线测量,算法逻辑通俗易懂,实现起来简单,具有较强的灵活性和工程实践意义。但由于

需要增加2个谐波注入环至控制系统中,会增加控制系统的复杂度,影响系统的稳定性,同时也给参数整定带来一定困难。

3 谐波注入算法对电机损耗的抑制效果分析

将所设计的谐波注入算法应用于电机的控制电路中,由于电机经常工作在额定运行状况下,选定在额定转速和额定负载点下,对比加入谐波注入算法前后电机的损耗变化情况。由于电机的损耗主要集中在定子绕组、定子铁心和永磁体这3个部位上,将损耗研究工作再细分至这3个部位。

验证谐波注入算法对于电机时间电流谐波的抑制作用。根据图9可以看出,在未加入谐波注入算法前,受时间电流谐波的影响,电机在变频器供电时的三相电流波形正弦度较差,出现较严重的畸变现象,总谐波失真率(THD)为22.28%。分析A相电流的频谱,发现电流谐波的主要成分分别为5次、7次、11次、13次时间电流谐波。其中5次、7次时间电流谐波又占据绝大部分,其含量

分别为13.07%、12.85%。5次、7次时间电流谐波在与之对应的5次、7次谐波dq同步旋转坐标系下的直流分量 i_{d5th} 、 i_{q5th} 、 i_{d7th} 、 i_{q7th} 的幅值均较高。在加入谐波注入算法后,电机的三相电流波形正弦度变得较好,波形畸变现象得到抑制,THD降至10.77%,5次、7次时间电流谐波含量分别降至2.57%、2.06%。 i_{d5th} 、 i_{q5th} 、 i_{d7th} 、 i_{q7th} 也得到了较好的抑制,基本上接近给定参考值0。由此可见,在加入了谐波注入算法后,电机的三相电流波形得到了较好的改善,5次、7次时间电流谐波得到了较好的抑制。

接下来分析加入谐波注入算法前后定子绕组损耗的变化情况。分别求解加入算法前后定子绕组的阻值和电流有效值,再根据铜耗计算公式,计算出定子绕组损耗,将结果记录于表3中。可以看出,在加入谐波注入算法后,定子绕组的阻值有所降低,而电流有效值因时间电流谐波得到了有效地抑制,使得定子绕组损耗由91.81 W降至80.92 W,降低了11.9%,抑制效果显著。

表3 加入算法前后定子绕组相关参数

定子绕组	加入算法前	加入算法后
电阻/ Ω	0.181	0.178
电流有效值/A	18.39	17.41
损耗/W	91.81	80.92

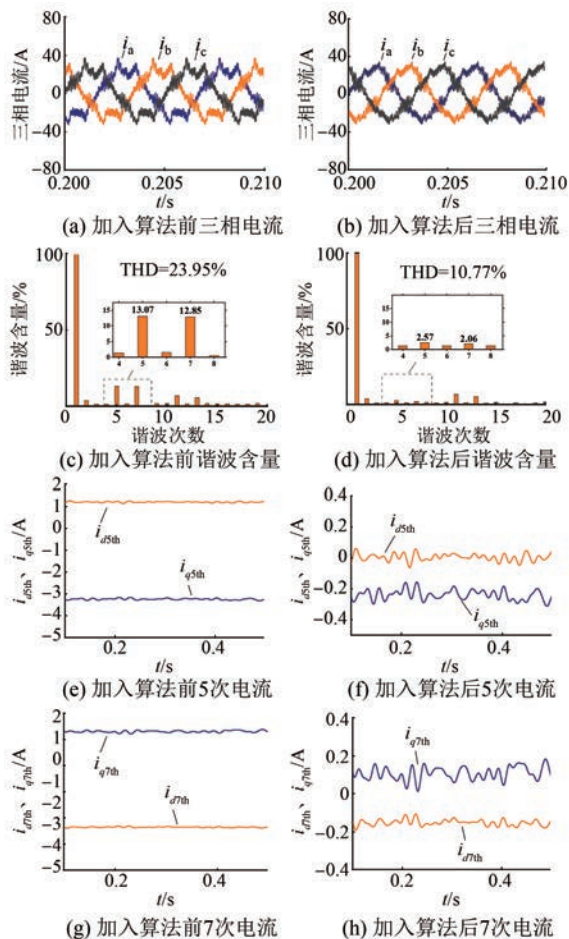


图9 加入谐波注入算法前后三相电流波形、A相电流频谱、5次和7次电流

分析加入谐波注入算法前后定子铁心损耗的变化情况。由于定子铁心上的损耗与定子铁心上磁场的变化密不可分,对定子铁心上的磁密轨迹进行分析。将电机定子铁心划分为4个部分:A为轭部部分,B为齿根部分,C为齿身部分,D为齿顶部分,并在4个部分中选取5个代表点a、b、c、d、e,如图10所示,分析这5个点在加入算法前后磁密轨迹的变换情况,将磁密轨迹波形绘制于图11中。

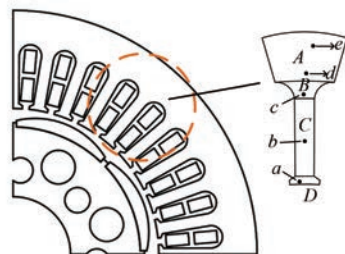


图10 定子铁心区域划分及代表点选取

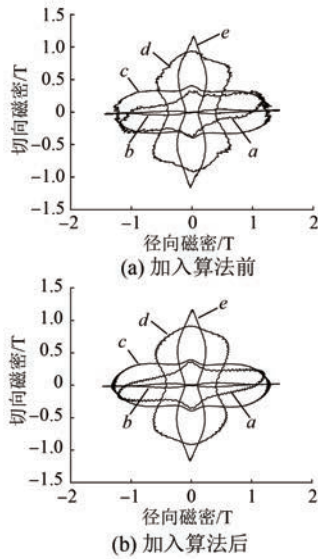


图 11 加入算法前后磁密轨迹图

根据图 11 可以看出,在加入谐波注入算法前,定子铁心的磁密轨迹波形上带有很多“毛刺”,磁密变化混乱,这是因为受大量时间电流谐波的影响,电机中会产生很多相对于定子旋转的谐波磁动势,谐波磁动势引起定子铁心磁密轨迹发生变化,而这增大了磁畴间的摩擦,导致定子铁心损耗增加。在加入谐波注入算法后,由于时间电流谐波得到了较好的抑制,磁密轨迹波形变得平滑,波形上的“毛刺”大大减少,这也意味着定子铁心的损耗会跟着降低。

观察定子铁心损耗密度和损耗曲线的变化情况,如图 12、图 13 所示,可以看出在加入谐波注入算法后,定子铁心各区域的损耗密度均得到了明显降低,定子铁心的损耗曲线下落明显,损耗平均值由 187.95 W 降至 155.29 W,降幅 17.4%,抑制效果亦十分显著。

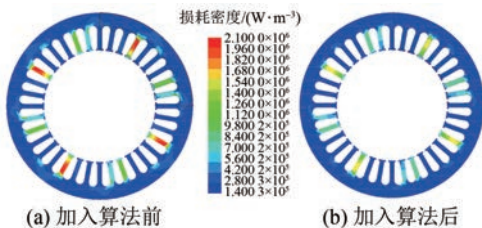


图 12 加入算法前后定子铁心损耗密度分布图

永磁体上的涡流损耗不沿电机的轴向均匀分布,因此将基于 3D 时步有限元联合仿真来进行研究。观察永磁体损耗密度和损耗曲线的变化情况

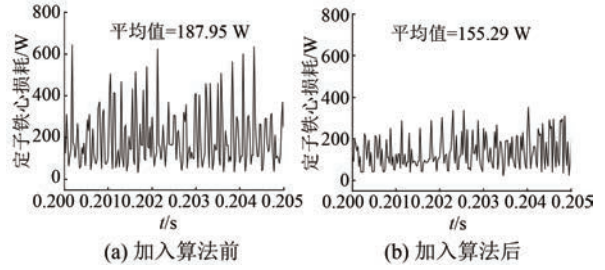


图 13 加入算法前后定子铁心损耗曲线

况,如图 14、图 15 所示,在加入算法前由于受含量较高的 5 次、7 次时间电流谐波(其频率不高所以透入深度大)的影响,永磁体的涡流损耗主要集中在永磁体的内表面,而内表面散热又较为困难,这将进一步增大永磁体高温退磁的风险。在加入谐波注入算法后,由于 5 次、7 次时间电流谐波被较好抑制,永磁体涡流密度得到了明显降低尤其是内表面,永磁体涡流损耗从 184.30 W 降至 112.28 W,降幅 39.1%,抑制效果最为显著,而对永磁体损耗的有效抑制也正是永磁电机最为需要的。

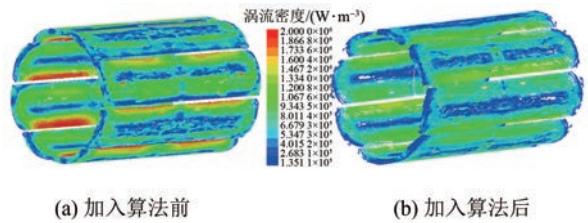


图 14 加入算法前后永磁体涡流密度分布

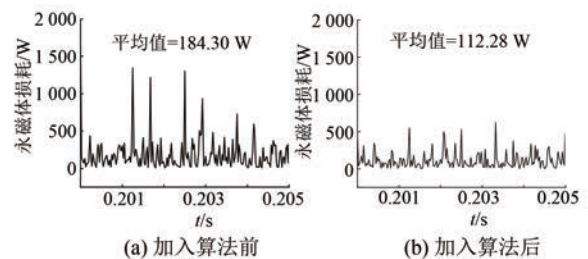


图 15 加入算法前后永磁体损耗曲线

为直观起见,将上述结果绘制于图 16 中,可以看出在加入谐波注入算法后,电机在变频器驱动运行时各部位的损耗均得到了有效抑制,电机总损耗降低了 24.9% 实现了从控制策略上有效地抑制电机的损耗。

4 结 语

本文从电机的控制策略入手,通过相应的理

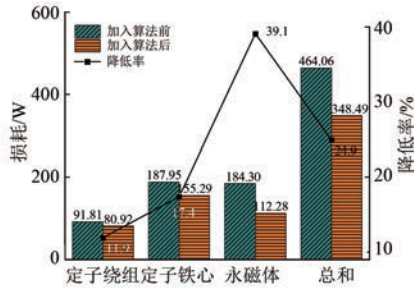


图 16 加入谐波注入算法前后损耗对比

论推导和分析,设计一种适用于抑制 5 次、7 次时间电流谐波的谐波注入算法,来解决变频器驱动下 PMSM 损耗过大的问题。基于场路耦合联合仿真模型,验证了所提算法的有效性,并得到如下结论:

(1) 加入谐波注入算法后,电机的电流波形正弦度改善明显,电流波形 THD 从 22.28% 降至 10.77%,其 5 次、7 次时间电流谐波的含量分别从 13.07%、12.85% 降低至 2.57%、2.06%,抑制效果显著。

(2) 加入谐波注入算法后,电机的损耗得到了有效的抑制,电机的总损耗降低了 24.9%,其中定子绕组损耗降低了 11.9%,定子铁心损耗降低了 17.4%,永磁体损耗降低了 39.1%。

【参考文献】

- [1] 佟文明,朱晓峰,贾建国,等. 时间谐波对永磁同步电机损耗的影响规律[J]. 电工技术学报,2015,30(6): 60.
- [2] 张越雷,高剑,黄守道,等. SVPWM 调制策略下永磁同步发电机损耗分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2016,43(10): 87.
- [3] 沈启平,韩雪岩. 变频器供电下定子磁动势引起的永磁同步电机转子损耗分析[J]. 电工技术学报,2016,31(4): 51.
- [4] 陈东锁,陈彬,肖勇,等. 电流谐波对不同绕组形式永磁同步电机损耗研究[J]. 微特电机,2021,49(8): 12.
- [5] 王晓远,楼斐,李春鹏. PCB 盘式永磁同步电机螺旋形绕组优化[J]. 中国电机工程学报,2017,37(20): 6092.
- [6] ABBASZADEH K, ALAM F R, TESHNEHLAB M. Slot opening optimization of surface mounted permanent magnet motor for cogging torque reduction [J]. Energy Conversion and Management,2012,55: 108.
- [7] 魏士文,张洪信,赵清海. 定子槽口宽度对同步电机转子涡流损耗的影响研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版),2021,36(2): 60.
- [8] 曹翼,李光耀. 不同极槽配合永磁伺服电机的电磁性能分析和比较[J]. 电机与控制应用,2015,42(11): 21.
- [9] 佟文明,王云学,贾建国,等. 变频器供电内置式永磁同步电机转子损耗计算与试验[J]. 电工技术学报,2018,33(24): 5811.
- [10] OH S, MIN S, HONG J. Air gap flux density waveform design of surface-mounted permanent magnet motor considering magnet shape and magnetization direction [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2013,49(5): 2393.
- [11] 刘刚,张强,毛琨. 基于电压注入的高速永磁电机谐波电流抑制方法[J]. 电机与控制学报,2016,20(7): 8.
- [12] 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.
- [13] PENG J, LI Y, LI W. Calculate for inverter supplied permanent magnet synchronous motor losses [C] // 2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC),2020.
- [14] LIAN G, LI H, CHEN B, et al. Characteristic analysis and temperature rise calculation of PMSM under different power supply modes [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 18391099.
- [15] 祝天利,韩雪岩,朱龙飞. 基于场路耦合的机器人永磁电动机损耗及其温升分析[J]. 电气技术,2020,21(6): 7.