

基于随机零矢量 SVPWM 控制策略的内置式 永磁同步电机电磁振动抑制

王 涵, 王玉彬*

[中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580]

Electromagnetic Vibration Suppression in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Random Zero-Vector SVPWM Control Strategy

Wang Han, Wang Yubin*

[College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China]

Abstract: [**Objective**] In inverter-fed interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM), harmonic currents and the associated radial electromagnetic forces are primary sources of electromagnetic vibration and noise. Conventional control strategies usually target either low frequency or high frequency vibration suppression, resulting in limited effectiveness over a wide frequency range. This paper proposes an improved control strategy for coordinated suppression of low- and high-frequency electromagnetic vibration. [**Methods**] A random zero-vector SVPWM strategy based on Logistic mapping and Markov chains was first employed to generate uniformly distributed random zero-vector sequences, which dynamically adjust inverter switching instants to suppress high-frequency harmonics around the switching frequency. Meanwhile, a virtual sinusoidal signal injection method was incorporated into the maximum torque per ampere control scheme to optimize the current vector angle at the current control level, thereby reducing low-order harmonic currents and mitigating low-frequency electromagnetic vibration. [**Results**] The results indicated that, compared to the traditional control strategy, the proposed control strategy had reduced the harmonic distortion rate of A-phase current to 5.53% and achieved a maximum vibration acceleration reduction of 65.96%, significantly improving the electromagnetic vibration performance of the

motor. [**Conclusion**] The proposed control strategy effectively suppresses both low-frequency and high-frequency harmonic currents and weakens the corresponding radial electromagnetic force components, enabling coordinated suppression of low-frequency and high-frequency electromagnetic vibration in IPMSM. The results confirm its practical potential for electromagnetic vibration and noise reduction in electric drive systems.

Key words: interior permanent magnet synchronous motor; random zero-vector space vector pulse width modulation; virtual injection; modal analysis; harmonic current; vibration acceleration

摘 要: [**目的**] 逆变器驱动的内置式永磁同步电机在运行过程中,谐波电流及其激励的径向电磁力易导致明显的电磁振动与噪声。而现有控制策略多侧重于抑制低频或高频单一方面的电磁振动,难以实现全频段电磁振动的有效抑制。因此,本文旨在提出一种兼顾低频与高频电磁振动抑制的改进控制方法。[**方法**] 首先,利用 Logistic 映射与 Markov 链生成随机零矢量序列,用于改进随机零矢量 SVPWM 调制,实现动态调整逆变器开关脉冲导通时刻以抑制开关频率附近高频谐波,降低高频电磁振动;同时在最大转矩电流比控制中引入虚拟正弦波注入,从电流控制层面选择精确的电流矢量角,削弱低次谐波电流分量,降低低频电磁振动。[**结果**] 结果表明,与传统控制策略相比,所提出的控制策略使 A 相电流谐波畸变率降至 5.53%,振动加速度最大降幅达到 65.96%,显著改善了电机电磁振动性能。[**结论**] 本文提出的改进控制策略,可有效减小低频和高频谐波电流,削弱低频和高频径向电磁力,从而实现对电机低频与高频电磁振动的协同抑制,对电机电磁振动和噪声优化具有一定的工程应

基金项目: 国家自然科学基金(52477070); 山东省自然科学基金(ZR2025MS782)

National Natural Science Foundation of China (52477070);
Natural Science Foundation of Shandong Province, China
(ZR2025MS782)

用价值。

关键词: 内置式永磁同步电机; 随机零矢量空间脉宽调制; 虚拟注入; 模态分析; 谐波电流; 振动加速度

0 引言

内置式永磁同步电机 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM) 因具有高效率和高转矩密度的优点, 广泛应用于工业驱动领域。在逆变器驱动的 IPMSM 控制系统中, 逆变器非线性特性、转子位置误差以及空间脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 技术等因素会引入大量低频和开关频率附近的高频谐波电流^[1]。这些谐波电流通过电枢反应产生相应电磁力, 作用于电机本体结构, 导致电机产生低频和高频电磁振动, 并增加电磁转矩脉动^[2]。

为此, 国内外诸多学者从优化电机本体设计和改进控制策略两个方面来抑制电机的低频和高频电磁振动^[3]。在电机本体方面, 通过改变定/转子结构^[4]、气隙偏心度^[5]、极槽配比^[6]等来抑制气隙磁场畸变和径向电磁力, 实现对电机电磁振动的优化。对于已完成设计制造的电机而言, 则多采用抑制谐波电流的方法, 从驱动和控制策略方面来削弱电磁力以减小振动噪声。

针对低阶谐波电流引起的低阶振动噪声, 通常采用谐波注入法^[7]、死区补偿^[8]、虚拟信号注入的最大转矩电流比 (Maximum Torque Per Ampere, MTPA) 控制^[9]等方法来抑制低频谐波电流, 进而减小低频电磁力和结构共振。文献^[10]通过分析 0 阶电磁力波产生机理, 在定子绕组注入特定 13 次谐波电流来削弱 0 阶 12 倍频电磁力波对振噪的贡献。在抑制特定谐波基础上, 考虑低频谐波引起共振的问题, 有学者通过抑制 $d-q$ 坐标系下的 6 次谐波来降低谐波含量和固定频率处的振动功率^[11]。为进一步扩大低阶次谐波抑制范围, 多采用 MTPA 控制策略选取电流矢量角来实现多低频阶次谐波电流的抑制^[12-13]。但由于电机电感等参数变化、逆变器非线性特性等因素影响, 电流矢量角和转子位置的实时跟踪^[14]效果不理想, 需优化传统 MTPA 控制。为此, 文献^[15]基于注入虚拟信号 MTPA 控制, 采用功率计算降低对电机参数的依赖程度, 实现了

电流矢量角和转子位置的准确估计, 优化了电机工作电流, 可同时抑制多低阶次谐波电流。以上方法均从电流层面优化低频谐波电流, 但并未考虑从脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 层面对高频开关频率附近谐波进行抑制。

为削弱逆变器开关频率处高次谐波引起的高频振动噪声, 多采用随机载波频率^[16]、随机零矢量^[17-18]、载波移相^[19]等调制方式来改变开关频率、脉冲宽度或位置, 以降低开关频率及其倍频处的谐波电流, 分散谐波能量频段, 从而抑制高频电磁振动噪声。文献^[20]提出了一种改进 PWM 的混合随机载波脉宽调制方法, 并验证了该方法在消除噪声方面的效果较传统 PWM 更好。然而, 随机 SVPWM 的基础是随机数的生成, 线性同余法等传统方法生成的伪随机数重复性较高、分布不均匀, 易导致电机不稳定异动, 不仅影响随机 SVPWM 对高频谐波电流和电磁振动的抑制效果, 还会降低相应高频电流信号的信噪比, 导致转子位置角估计不准确。因此, 有学者采用改进梅森旋转算法生成更均匀的随机数, 增强随机序列随机性, 提高高频谐波和电磁振动的抑制效果^[21]。

上述研究主要针对低频或高频谐波电流和电磁振动优化, 对于构建低频和高频谐波协同抑制的分析还较少。因此, 为同时抑制逆变器供电系统下低频和高频谐波电流引发的内置式永磁同步电机电磁振动, 本文采用随机零矢量 SVPWM 控制来分散开关频率处的谐波电流, 抑制高频电磁振动。其中, 随机且均匀的零矢量采用 Logistic 映射与 Markov 链结合的改进方式生成, 以减少谐波电流相位叠加, 进一步提高扩频效果。同时, 在 MTPA 控制策略基础上运用虚拟正弦波注入优化电流矢量角来减小低频谐波电流和电磁振动。最后, 基于 dSPACE 平台搭建电机模态和振动试验平台, 验证了所提控制方式能有效抑制全频段电磁振动。

1 改进控制策略

1.1 随机零矢量调制策略

随机零矢量调制策略是对 PWM 开关周期内部的零矢量进行随机化, 同时保持载波频率恒定, 避免直接改变载波频率导致电压电流畸变和转矩

脉动^[22],实现在不改变输出电压幅值的情况下,优化高频电流谐波频谱扩散效果从而抑制高频电磁振动。

图1为基本电压矢量空间分布图,如图1所示,三相桥式逆变器六个开关产生八种开关状态并对应八个电压矢量状态,分别为6个有效空间电压矢量 $U_1(100)$, $U_2(110)$, $U_3(010)$, $U_4(011)$, $U_5(001)$, $U_6(101)$ 和2个零矢量 $U_0(000)$, $U_7(111)$ 。

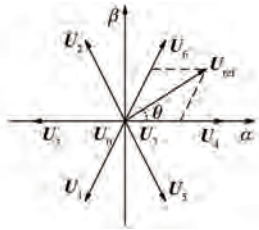


图1 基本电压矢量空间分布

Fig. 1 Basic voltage vector spatial distribution

根据“伏秒平衡”及平均值等效原则可知:

$$U_{ref} = \frac{T_4}{T_s} U_4 + \frac{T_6}{T_s} U_6 + \frac{T_0}{T_s} U_{0(7)} \quad (1)$$

式中: U_{ref} 为逆变器输出电压; T_4 、 T_6 、 T_0 分别为各开关状态作用时间; T_s 为载波周期,且 $T_4 + T_6 + T_0 = T_s$ 。

由式(1)可知,输出电压 U_{ref} 仅与6个有效空间电压矢量相关,与零矢量作用时间无关。然而,零矢量作用时间会改变开关管脉冲的导通时刻,引起谐波电流相位叠加变化,从而改变输出电流的频谱分布,并最终影响电机电磁振动。鉴于零矢量的作用时间 T_0 与 PWM 周期 T_s 以及特定扇区内电压矢量作用时间 T_4 、 T_6 有关,且零矢量的作用时间 T_0 由两个零矢量时间 T_{000} 和 T_{111} 共同构成,故将零矢量随机化时,不改变两个零矢量的总作用时间 T_0 ,仅随机分配两个零矢量 U_{000} 和 U_{111} 的作用时间用来改变脉冲导通时刻,即:

$$T_0 = T_{000} + T_{111} \quad (2)$$

$$T_{000} = \alpha T_0, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (3)$$

$$T_{111} = (1 - \alpha) T_0, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (4)$$

式中: T_{000} 对应零矢量 U_0 ; T_{111} 对应零矢量 U_7 ; α 为随机数, $\alpha \in (0, 1)$ 。

图2为随机零矢量 SVPWM 开关脉冲生成框图。通过将两个零矢量的作用时间进行随机分配,得到要执行的开关信号,并输出 PWM 信号。

其中,零矢量的随机分配依靠随机数 α 来实现。

零矢量 U_0 和 U_7 的作用时间主要影响脉冲导通时刻,重新分配经随机数 α 随机化后的零矢量,则可以在输出电压幅值不变的情况下优化谐波电流的频谱,从而减小开关频率及其倍频处的谐波电流幅值。其中,分布均匀的随机数 α 通过改变零矢量作用时间来改善高频谐波电流的扩散效果。

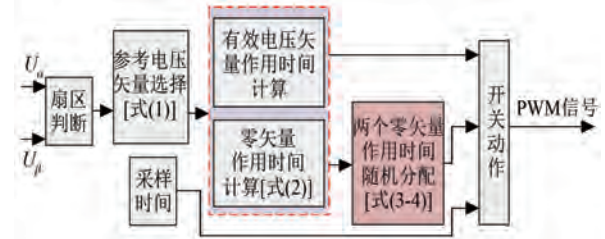


图2 随机零矢量 SVPWM 开关脉冲生成框图

Fig. 2 Block diagram of switching pulse generation of random zero-vector SVPWM

1.2 Logistic 函数与 Markov 链结合生成随机数

随机零矢量调制依赖于 SVPWM 中自由度(脉冲位置)的随机化,随机数 α 的随机性会改变零矢量的作用时间,高频谐波电流的扩散效果与随机数分布均匀程度、周期长度相关。当随机数在某个区间的概率较大时,特定频段谐波电流出现的概率大。由扩频原理可知,谐波能量将在该区间集聚,会降低高频段的谐波频谱扩展效果。

理想的随机数生成算法应具备均匀分布、不可预测性、较长周期等特性。传统线性同余法、移位法、查表法等方式生成的随机数周期较短,当观测时间大于一个周期时,随机性消失,导致重复率高、易预测^[23]。相比之下,Logistic 映射函数生成的随机数分布均匀、周期长、不可预测性和随机性强,更接近真实随机序列的要求。Logistic 映射函数是一种典型非线性映射,可生成初始随机数离散序列,表达式为

$$X_{n+1} = \lambda X_n (1 - X_n) \quad (5)$$

式中: X_n 为系统状态, $X_n \in [0, 1]$; λ 为可调参数, $\lambda \in [0, 4]$ 。

λ 的取值可将 Logistic 函数生成的随机序列划分为3个区间:

(1) 当 $0 \leq \lambda \leq 3$ 时,随机序列在 $(0, 1)$ 区间内呈稳定状态,序列趋于一个稳定值,最终收敛而无随机性;

(2) 当 $3 < \lambda \leq 3.6$ 时, 随机序列在 $(0, 1)$ 区间内呈周期性序列, 序列周期性振荡, 周期与 λ 成正比;

(3) 当 $3.6 < \lambda \leq 4$ 时, 随机序列在 $(0, 1)$ 区间内呈混沌性序列, 周期消失, 序列表现出空间遍历性。

当随机序列存在周期性时, 生成的随机数是重复序列, 不满足随机序列对于随机性和不可预测性的要求。因此, 需在 $3.6 < \lambda \leq 4$ 范围内选取能生成分布均匀且随机性强的随机数。 λ 取值增大, 对应随机数取值在 $(0, 1)$ 内的覆盖范围越来越广, 实现初始序列的空间遍历性。当 λ 取值趋于 4 时, 所生成的 X_n 初始序列取值均匀且丰富。因此, 本文选择 λ 为 3.99 的 Logistic 映射函数生成初始随机数序列。

但上述随机数分布仍存在连续多个随机数大于或小于数学期望 0.5 的情况, 导致谐波能量聚集, 影响谐波电流的抑制效果。因此, 为避免生成初始随机数序列连续大于或小于期望导致的谐波能量集聚, 进一步采用 Markov 链来改善随机数的局部分布特性。

设一类随机过程为 $\{X(t), t \in T\}$, 已知 $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_{n+1} \in T$, 随机过程 $X(t)$ 对应 X_1, X_2, \dots, X_{n+1} , 则有:

$$P\{X_{n+1} = x_{n+1} \mid X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n\} = P\{X_{n+1} = x_{n+1} \mid X_n = x_n\} \quad (6)$$

则 $\{X(t), t \in T\}$ 为 Markov 过程, 且具有后无效性。 t_{n+1} 时刻的随机数由 t_{n-1} 和 t_n 决定, 有效减少随机数列出现连续大于或小于期望的情况, 使得产生的随机数分布更均匀。

设条件转移概率为 $P_{ij}(m, n)$, 则有:

$$P_{ij}(m, n) = P\{X_n = a_j \mid X_m = a_i\} \quad (7)$$

式中: 转移概率 $P_{ij}(m, n)$ 表示 m 时刻系统处于状态 a_i , 经 $(n-m)$ 时刻后转移到状态 a_j 的条件概率。

设转移概率为 P_i , 对应转换关系如图 3 所示。

图 4 所示为本文提出的随机数生成流程图。



图 3 两状态 Markov 链原理图

Fig. 3 Schematic diagram of two-state Markov chains

运用 Logistic 映射函数生成初始随机序列, λ 取值为 3.99, 使随机序列在 $(0, 1)$ 区间内呈现混沌性。为防止数据分布过于平滑连续, 采用两状态 Markov 链将随机系数变化区间 $(0, 1)$ 分为 $(0, 0.5)$ 和 $(0.5, 1)$ 两部分, 从而将生成的随机数均匀地分布在期望两侧。上述措施可改变随机零矢量的作用时间, 优化谐波电流相位分布, 使电流谐波频谱分散更均匀, 进而抑制高频谐波电流幅值。为表述简便, 将该方法命名为逻辑 Markov 随机 SVPWM 控制 (Logistic Markov Random SVPWM, LM-RSVPWM)。



图 4 LM 随机数生成流程图

Fig. 4 Flowchart of logistic Markov random number generation

图 5 为两种方法的随机数生成对比。由图 5 (a) 和图 5 (b) 可知, 与传统随机数生成算法相比, LM 随机数算法有效减少了随机数列出现连续多个取值大于或小于数学期望的情况。由图 5 (c) 可知, 将区间 $(0, 1)$ 等分为 10 部分, LM 随机数算法生成的 5 000 个随机数落在各区间上的个数更接近 500 个, 表明其具有更好的均匀分布特性。

1.3 改进控制策略

IPMSM 的永磁体置于转子内部, 其交/直轴磁阻不相等, 通常采用 MTPA 控制策略以充分利用磁阻转矩, 其核心是优化电流矢量角, 输出恒定转矩对应最小定子电流幅值^[24]。在实际工作场景下, 电机参数因温度、磁路饱和等因素改变, 使电机难以运行于最佳工作点, 导致转矩波动和控制精度下降, 进而影响定子电流的幅值和波形特

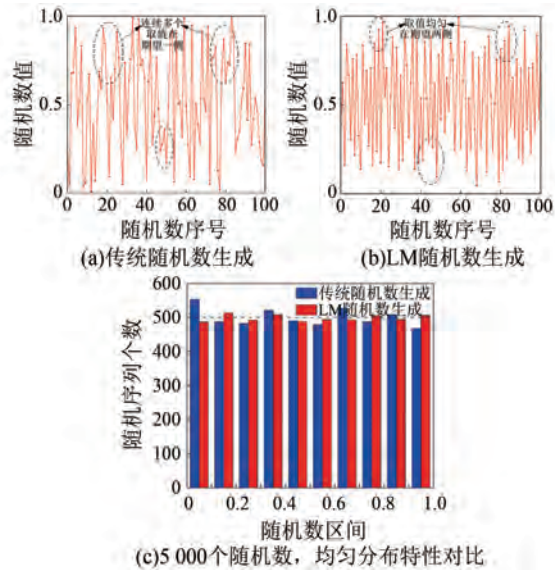


图5 随机数生成对比

Fig. 5 Comparison of Random Number Generation

性^[25]。为提高控制精度、优化输出定子电流、减少谐波含量,在抑制电机低频电磁振动方面,采用虚拟正弦波注入的 MTPA 控制策略抑制低频谐波电流,进而抑制低频电磁振动。图 6 为本文所提出的虚拟正弦波注入 MTPA 与 LM-RSVPWM 相结合的控制策略框图。

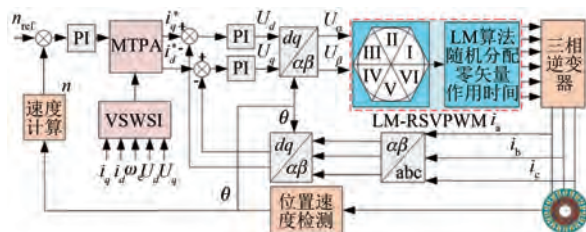


图6 虚拟正弦波注入 MTPA 与 LM-RSVPWM 结合的控制策略框图

Fig. 6 Block diagram of the control strategy combined virtual sine wave signal injection MTPA and LM-RSVPWM

2 整机约束条件下 IPMSM 模态分析

电磁振动本质上是电流激励的电磁力作用于电机结构所致,当电磁力及电流谐波频谱构成中的部分谐波频率与电机结构的固有频率相接近时,易引起电机共振,导致在共振频率附近产生较大振动加速度^[26-27]。因此,电机振动加速度的频谱分布不仅与谐波电流有关,还与电机结构的各阶模态频率有关。为分析低频及高频谐波电流激励的电磁力对电机振动加速度的影响规律,应首

先对所研究 IPMSM 的固有频率进行分析测试,得到其各阶模态固有频率。鉴于电机实际运行时已组装完毕,并与测试台刚性连接,因此需要进一步分析测试底角约束条件下的整机各阶模态频率。

根据电机实际运行环境,考虑电机底角固定约束,搭建如图 7 所示的整机模态测试平台。将电机置于橡胶垫面为底座支撑的平台上,不与地面直接接触,减小地面刚度对电机的影响。采用力锤作为激振设备激励电机各阶模态使其产生振动信号,通过加速度传感器采集振动时域信号,并输入到振动信号分析仪中进行分析,最后经过上位机模态软件频响函数等计算,得到电机模态振型和固有频率,如图 8 所示。为后续振动加速度频谱分析中,主要振动峰值频段与对应模态阶次和频率之间的耦合关系提供物理依据。

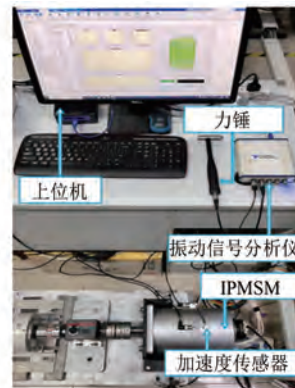


图7 整机模态测试平台

Fig. 7 Whole machine modal test platform

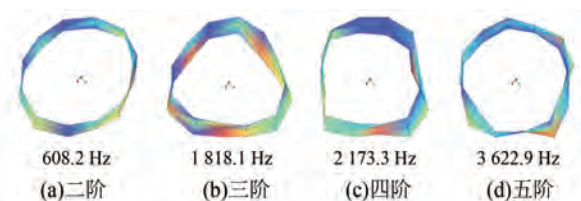


图8 模态试验结果

Fig. 8 Results of modal test

3 仿真分析

3.1 仿真条件设置

为验证所提出控制策略的有效性,基于 Matlab/Simulink 搭建了 MTPA 与 SVPWM 结合控制(控制策略 I)、虚拟正弦波注入 MTPA 与传统随机 SVPWM 结合控制(控制策略 II)、虚拟正弦波注入 MTPA 与 LM-RSVPWM 结合控制(控制策

略Ⅲ)等三种 IPMSM 控制策略仿真模型,并对比分析不同控制策略下的电流谐波频谱分布。其中,控制策略Ⅲ为本文所提出的改进控制策略。

三种控制策略采用相同的电机和控制模型,开关频率均设定为 10 kHz,逆变器、PI 等控制参数均相同。随机 SVPWM 与 LM-RSVPWM 的随机系数更新周期相同,取值范围均为(0,1),仅改变随机序列的生成方式。设置电机运行速度为 400 r/min,负载转矩为 5 N·m,与之对应的基频 $f_c = 26.67$ Hz。IPMSM 关键参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

Tab. 1 Motor parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
极对数 P	4	d 轴电感 L_d/mH	10.77
槽数 S	18	q 轴电感 L_q/mH	16.225
定子电阻 R/Ω	0.59	转动惯量/ $(kg \cdot m^2)$	0.009 38
永磁磁链 Ψ_f/Wb	0.22	开关频率 f_s/kHz	10

3.2 仿真结果分析

基于所搭建仿真模型,在三相对称系统中,三相电流对称且仅在相位上相差 120° ,因此,本文仅以 A 相电流为代表进行分析,其结论对 B、C 相电流同样适用。IPMSM 电枢绕组 A 相电流波形如图 9 所示,图 10 所示为电流谐波频谱分析,图中 h 为正整数。

对比图 9 的电流波形,由于逆变器死区时间

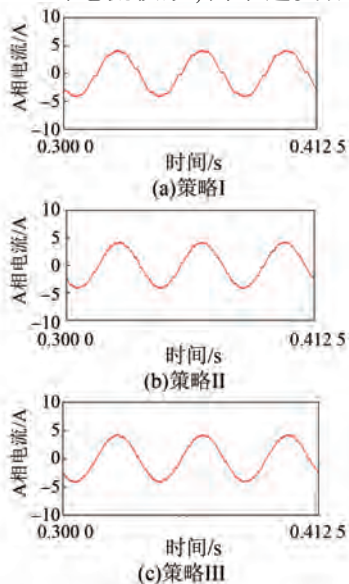


图 9 三种控制策略下的电流波形

Fig. 9 Current waveforms under three control strategies

等非线性因素以及 MTPA 控制策略运行过程对电机参数变化的敏感,导致控制策略 I 得到的电流波形存在谐波且正弦度较差;而采用控制策略Ⅲ得到的电流波形正弦度较高,谐波含量得到抑制。

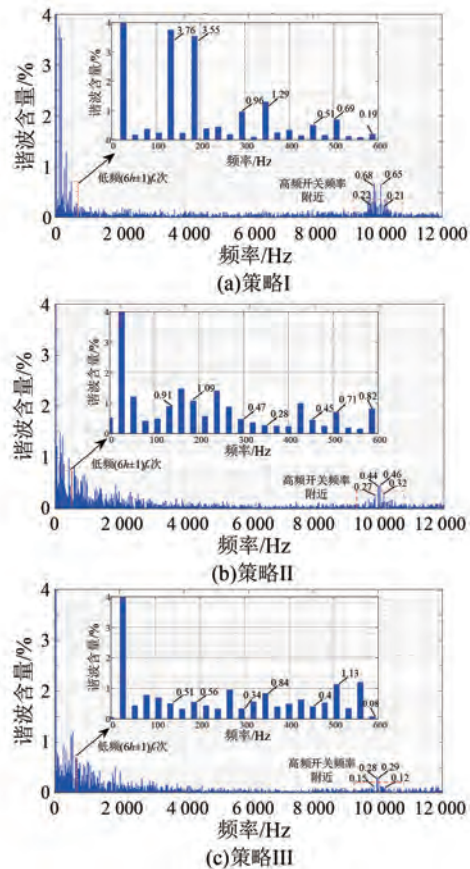


图 10 不同控制策略下电流谐波频谱分布

Fig. 10 Distribution of current harmonic spectrum under different control strategies

由于逆变器死区时间等逆变器非线性因素,采用控制策略 I 时,低频 5、7、11、13 等奇数次电流谐波和高频开关频率 10 kHz 附近的电流谐波含量较高,总谐波失真 (Total Harmonic Distortion, THD) 的含量为 5.97%,如图 10(a) 所示。

对比图 10(b) 和图 10(c),开关频率附近谐波含量幅值从 0.46% 降至 0.29%,降幅为 36.96%。这表明,相比于传统随机数生成方式,改进的 LM 随机数生成方式优化了零矢量作用时间,提高了对高频谐波电流的抑制效果。

分析图 10(a) 和图 10(c),A 相电枢电流的低频 5、7 次谐波含量分别从 3.76% 和 3.55% 降低到 0.51% 和 0.56%,11、13 次谐波含量分别从 0.96% 和 1.29% 降低到 0.34% 和 0.84%。同时,高

频段谐波电流抑制效果也很明显。

由图 10 可知,本文所提出的控制策略Ⅲ既能降低低频谐波电流分量幅值,又能有效抑制开关频率附近的高频谐波分量,可减小电机激发径向电磁力引起的低频和高频电磁振动,进而抑制电机振动噪声。

4 试验验证

4.1 试验平台搭建

为验证理论分析的正确性,搭建了如图 11 所示的 IPMSM 控制与振动试验测试平台。该平台主要包括基于 dSPACE 的逆变器控制系统和振动加速度测试系统两大部分。图 11 中,加速度传感器测量点 1、2、3 在 1/2 圆周内沿周向均匀排布。试验条件与仿真条件一致,保持不变。

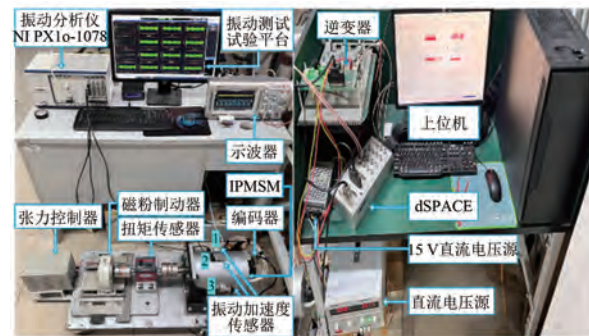


图 11 电机控制与振动试验平台

Fig. 11 Motor control and vibration test platform

4.2 电枢相电流谐波分析

在电机运行速度为 400 r/min、负载转矩为 5 N·m 的条件下,采用上述三种控制策略时的 A 相电枢电流波形如图 12 所示。对比控制策略 I、II、III 的 A 相谐波电流波形可以发现,采用虚拟正弦波注入 MTPA 与 LM-RSVPWM 结合的控制策略Ⅲ可有效降低谐波电流幅值,正弦度较高。为定量分析谐波电流含量,进一步展开谐波频谱分析,得到 A 相电枢电流谐波频谱分布,如图 13 所示。

由图 13 可知,在 400 r/min、5 N·m 的实际工况下,相比于控制策略 I,采用虚拟正弦波注入 MTPA 与 LM-RSVPWM 结合的控制策略Ⅲ能使 5、7 次谐波分别从 2.23% 和 1.07% 降至 1.61% 和 0.52%,11、13 次谐波分别从 0.54%、0.59% 降至 0.45%、0.47%;高频开关频率附近 9 893.32 Hz

($f_s - 4f_c$) 处谐波含量从 0.37% 减小到 0.25%, 9 786.64 Hz ($f_s - 8f_c$) 处谐波含量从 0.26% 减小到 0.21%, 10 053.34 Hz ($f_s + 2f_c$) 处谐波含量从 0.58% 减小到 0.38%。THD 也从 6.11% 降至 5.53%,整体谐波含量和畸变率得到抑制。

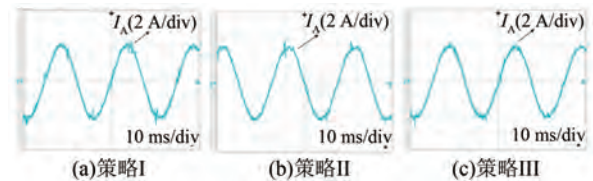


图 12 三种控制策略下电流波形

Fig. 12 Current waveforms under three control strategies

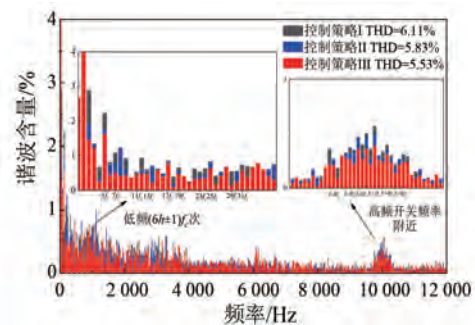


图 13 三种控制策略下 A 相电流谐波频谱分布

Fig. 13 Harmonic spectrum distribution of phase A current under three control strategies

试验结果与仿真结果均表明本文所提控制策略Ⅲ能抑制低频与高频的谐波电流,减小电流频谱整体的谐波含量,从而减少电流波形中的微小尖峰,提高电流正弦度,改善电流频谱分布。同时,三、五阶模态固有频率 1 788、3 564 Hz 附近的谐波含量也得到抑制,进而减小电机发生共振的可能,提高了电机运行稳定性。

4.3 振动加速度测试

为分析三种控制策略对电机振动加速度的影响,分别在空载和负载条件下,对电机机壳周向三个测量点处的振动加速度进行分析测试。根据振动周期时域与频域之间的关系,将时域振动信号进行快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 得到频域下振动加速度的变化。在电机空载运行下,分析三种控制策略在不同频率、不同转速下的振动加速度变化,结果如图 14 所示。

由图 14 可知,电机的振动加速度会随着转速的增加而增大,且试验所用电机在 592、1 788、3 564、6 092 Hz 附近产生了较大的振动加速度,

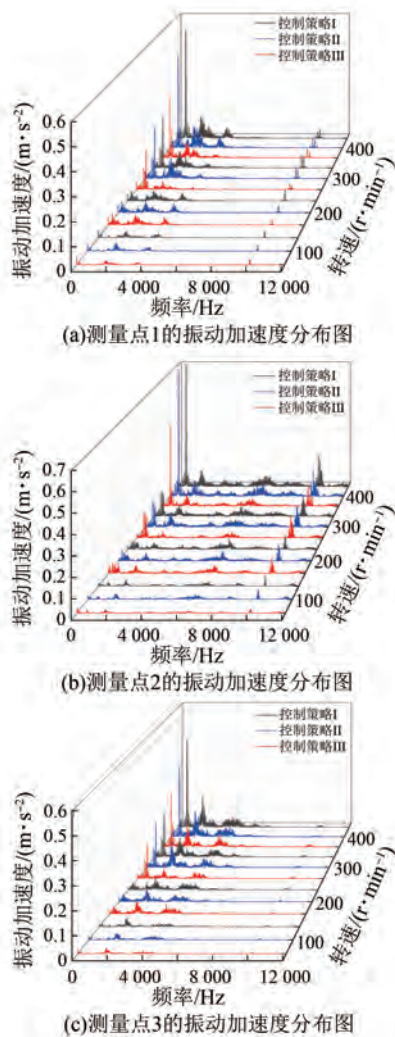


图 14 不同策略下各测量点的振动加速度分布图

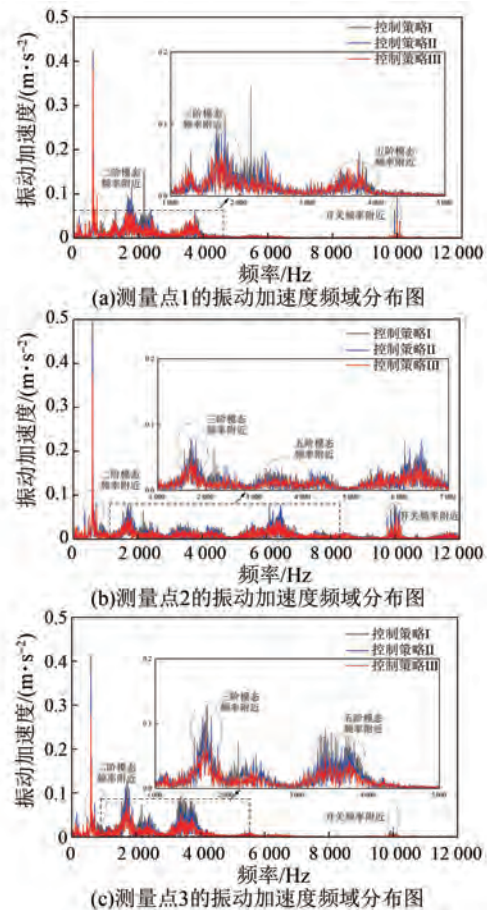
Fig. 14 Distribution of vibration acceleration at various measurement points under different strategies

其中 592、1 788、3 564 Hz 分别位于电机的二、三、五阶模态固有频率附近,这几个位置因为产生了共振导致振动加速度较大。由图 14(b) 可知,高频段 10 kHz 附近有较大的振动加速度,这是由于电机控制系统的逆变器开关频率设置为 10 kHz,在开关频率处会产生较大的谐波电流并引起电磁振动。

空载时,在 300 r/min 和 400 r/min 转速下,电机周向测量点 2 处,采用改进后的控制策略 III 时,低频段振动加速度幅值从 0.136 m/s^2 和 0.692 m/s^2 分别降至 0.095 m/s^2 和 0.428 m/s^2 ,高频段幅值从 0.115 m/s^2 和 0.173 m/s^2 分别降至 0.093 m/s^2 和 0.106 m/s^2 。在 400 r/min 转速下,电机周向测量点 3 处,592、1 788、3 564 Hz 时对应

振动加速度分别从 0.432、0.106、0.035 m/s^2 降至 0.256、0.078、0.015 m/s^2 。结果表明,虚拟正弦波注入 MTPA 与 LM-RSVPWM 结合的控制策略 III,不仅可以降低电机低频和高频振动加速度,还可以抑制电机模态固有频率附近的振动幅值。

在负载情况下,设置电机转速 400 r/min 、负载转矩 5 $\text{N}\cdot\text{m}$ 的工况,根据测量的振动加速度时域分布图,分析电机三个测量点处三种策略的振动加速度频谱分布,结果如图 15 所示。此外,对比三个测量点处的振动加速度,得到如表 2 所示的部分频率对应的振动数据。

图 15 不同策略下各测量点的振动加速度频域分布图(400 r/min , 5 $\text{N}\cdot\text{m}$)Fig. 15 Frequency-domain distribution of vibration acceleration at various measurement points under different strategies(400 r/min , 5 $\text{N}\cdot\text{m}$)

由图 15 和表 2 可知,在相同运行条件下,所提出的改进控制策略 III,可减小电机基频倍频、开关频率附近以及二、三、五阶模态固有频率附近的振动加速度。以表 2 的测量点 2 数据为例,低频

段峰值从 0.496 m/s^2 降低为 0.379 m/s^2 , 降幅为 23.59%; 高频段峰值从 0.078 m/s^2 降低为 0.034 m/s^2 , 降幅为 56.41%。

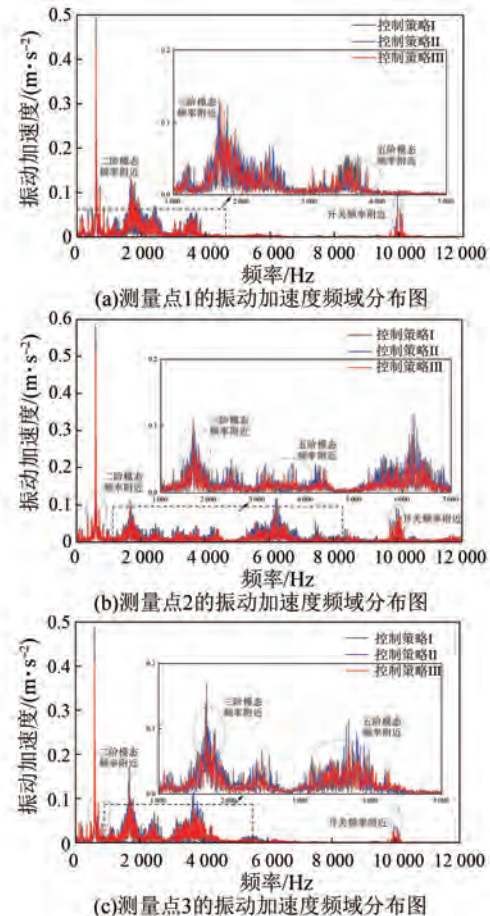
表 2 部分频率对应的振动数据

Tab. 2 Vibration data corresponding to partial frequencies

频率/Hz	振动加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)			策略 III 相对于策略 I 的降幅/%
	控制策略 I	控制策略 II	控制策略 III	
592	0.424	0.409	0.381	10.14
1 788	0.113	0.094	0.053	53.10
3 564	0.033	0.031	0.017	48.49
6 092	0.005 4	0.004 3	0.002 4	55.56
9 896	0.004 7	0.003 6	0.002 6	44.68
10 000	0.092	0.081	0.041	55.43
10 080	0.038	0.034	0.028	26.32
592	0.496	0.452	0.379	23.59
1 788	0.076	0.065	0.036	52.63
3 564	0.035	0.023	0.016	54.29
6 092	0.075	0.039	0.030	60.00
9 896	0.039	0.031	0.029	25.64
10 000	0.078	0.044	0.034	56.41
10 080	0.058	0.050	0.044	24.14
592	0.419	0.369	0.279	33.41
1 788	0.109	0.102	0.069	36.69
3 564	0.076	0.048	0.039	48.68
6 092	0.004 7	0.002	0.0016	65.96
9 896	0.006 7	0.005 2	0.005 1	23.88
10 000	0.021	0.019	0.015	38.09
10 080	0.008 1	0.007 5	0.007 1	12.35

为进一步验证电机控制策略对高频和低频振动加速度的抑制,仅改变转速和负载,保持其他条件不变,进行电机转速为 600 r/min 、负载转矩 $7 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时的稳况分析,结果如图 16 所示。

由图 16 可知,对比传统和改进后的控制策略振动加速度变化,电机周向测量点 1 处的低频段振动加速度峰值从 0.494 m/s^2 降至 0.431 m/s^2 , 降幅为 12.75%; 高频段开关频率附近振动加速度峰值从 0.099 m/s^2 降至 0.061 m/s^2 , 降幅为 38.38%。电机周向测量点 2 处的低频段振动加速度峰值从 0.589 m/s^2 降至 0.515 m/s^2 , 降幅为

图 16 不同策略下各测量点的振动加速度频域分布图 (600 r/min , $7 \text{ N}\cdot\text{m}$)Fig. 16 Frequency-domain distribution of vibration acceleration at various measurement points under different strategies (600 r/min , $7 \text{ N}\cdot\text{m}$)

12.56%; 高频段开关频率附近振动加速度峰值从 0.093 m/s^2 降至 0.065 m/s^2 , 降幅为 30.11%。电机周向测量点 2 处的低频段振动加速度峰值从 0.488 m/s^2 降至 0.408 m/s^2 , 降幅为 16.39%; 高频段开关频率附近振动加速度峰值从 0.039 m/s^2 降至 0.030 m/s^2 , 降幅为 23.08%。

对比上述不同转速和负载工况下三个测量点处的振动加速度变化可知,控制策略 I 振动频谱分布的主导频率分量比较集中,采用改进后的控制策略 III 时,主导频率分量的振动得到削弱,并减弱了振动时域的周期性,增强了随机性。改进后的控制策略 III 实现上述振动优化效果的原因是,虚拟正弦波注入 MTPA 控制方式抑制了低次谐波电流,减弱了相应低阶径向电磁力,并抑制了低频振动加速度; LM-RSVPWM 调制降低了开关频率

附近的高次谐波电流,减弱了相应高阶的径向电磁力,抑制了高频振动加速度,从而优化了电机电磁振动特性,有利于电机的稳定运行。

5 结语

针对 IPMSM 在逆变器供电方式下会产生低频和高频谐波电流并引起电磁振动这一问题,本文提出了一种改进随机数生成方式的 LM-RSVPWM 控制策略来抑制高频谐波,并结合虚拟正弦波注入 MTPA 控制策略来抑制低频谐波电流,从而实现低频和高频电磁振动的协同抑制。通过仿真和样机试验进行验证,得到了以下结论:

(1) 采用 Logistic 映射函数与 Markov 链结合的方式替代传统随机数生成方式,在相同样本规模下,生成的随机数在各区间内更接近平均值,能输出分布更均匀的零矢量。

(2) 电机运行过程中存在低频和高频谐波电流并引起电磁振动。相较于传统控制策略,采用虚拟正弦波注入 MTPA 与 LM-RSVPWM 结合的控制策略可以使主要低频谐波最低降至 0.45%,高频开关频率附近谐波最低降至 0.21%,整体 THD 降至 5.53%;振动加速度最高降幅达 65.96%。样机试验结果验证了本文所提的控制策略 III 可同时抑制低频和高频谐波电流及电磁振动,对 IPMSM 在实际工作场景中的减振运行具有一定工程应用价值。

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

王涵进行了方案设计、内容总结、论文撰写与试验研究,王玉彬、王涵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, content summary, paper writing and experimental research were carried out by Wang Han. The manuscript was revised by Wang Yubin and Wang Han. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献

- [1] Zhang P R, Wang S M, Li Y T. Performance and analysis of N -state random pulse position SVPWM with constant sampling frequency [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(11): 13606-13625.
- [2] 王立新, 王晓远, 高鹏, 等. 电动汽车用内置式永磁同步电机转矩脉动分析及抑制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(20): 6386-6396.
Wang L X, Wang X Y, Gao P, et al. Torque ripple reduction analysis of IPMSM for Electric Vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(20): 6386-6396.
- [3] 毛彦欣, 赵文祥. 径向磁通永磁同步电机电磁噪声综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(9): 3667-3685.
Mao Y X, Zhao W X. Overview of electro-magnetic vibration and noise in radial-flux PMSM [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(9): 3667-3685.
- [4] Wang S M, Hong J F, Sun Y G, et al. Effect comparison of zigzag skew PM pole and straight skew slot for vibration mitigation of PM brush DC motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 4752-4761.
- [5] 赵哲, 林浩然, 熊端锋, 等. 气隙偏心对车用永磁同步电机噪声特性的影响分析[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(12): 32-41.
Zhao Z, Lin H R, Xiong D F, et al. Influence analysis of air-gap eccentricity on noise characteristics of automotive PMSM [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(12): 32-41.
- [6] Lin F, Zuo S G, Wu X D. Electromagnetic vibration and noise analysis of PMSM with different slot-pole combinations[J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(9): 900-908.
- [7] 王康. 车用永磁同步电机建模与振动噪声抑制策略研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
Wang K. Research on modeling and vibration and noise suppression strategies of PMSM for Vehicles [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.
- [8] 刘和平, 路莹超, 王华斌, 等. 电压型逆变器分段死区补偿调制策略[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(3): 25-32.
Liu H P, Lu Y C, Wang H B, et al. Segmented

- dead-time compensation modulation strategy for voltage source inverter [J]. *Electric Machines and Control*, 2018, 22(3): 25-32.
- [9] 孙天夫, 杨日阳, 梁嘉宁, 等. 考虑电机参数偏导项的同步磁阻电机虚拟信号注入 MTPA 控制[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(24): 8326-8334.
Sun T F, Yang R Y, Liang J N, et al. Virtual signal injection MTPA control of SRM considering the partial derivative term of motor parameters [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(24): 8326-8334.
- [10] 钱喆, 刘同鑫, 邓文哲, 等. 电流谐波注入的车用永磁同步驱动电机振动噪声抑制[J]. *电机与控制学报*, 2022, 26(7): 115-124.
Qian Z, Liu T X, Deng W Z, et al. Vibration and noise suppression of automotive PMSM based on current harmonic injection [J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(7): 115-124.
- [11] 冯婉, 张文娟, 苗轶如, 等. 基于 dq 坐标系下 6 次谐波抑制的车用感应电机低频共振削弱方法 [J]. *电工技术学报*, 2023, 38(24): 6632-6645.
Feng W, Zhang W J, Miao Y R, et al. Low-frequency resonance weakening method for automotive induction motors based on 6th harmonic suppression in dq coordinate system [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(24): 6632-6645.
- [12] 陈智渊. 基于虚拟信号注入的直流偏置型混合励磁电机 MTPA 控制 [D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
Chen Z Y. MTPA control of DC-biased hybrid excitation machine based on virtual signal injection [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023.
- [13] 严晶铖. 基于虚拟信号注入的车用永磁同步电机 MTPA 控制及谐波抑制策略研究 [D]. 成都: 四川大学, 2023.
Yan J C. Study on MTPA control and nonlinear compensation strategy of PMSM for vehicle [D]. Chengdu: Sichuan University, 2023.
- [14] Wu Z P, Zuo S G, Huang Z Y, et al. Effect of hall errors on electromagnetic vibration and noise of integer-slot inset PMSM [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 9(1): 522-533.
- [15] 赵文祥, 刘桓, 陶涛, 等. 基于虚拟信号和高频脉振信号注入的无位置传感器内置式永磁同步电机 MTPA 控制 [J]. *电工技术学报*, 2021, 36(24): 5092-5100.
- [16] Ruan Z H, Song W X, Zhao L Y, et al. A variable switching frequency space vector pulse width modulation control strategy of induction motor drive system with torque ripple prediction [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2023, 38(2): 993-1003.
- [17] Deng W Z, Huang J, Qian Z, et al. A random pulse position-based selective noise cancellation modulation method for SVPWM driven PMSMs [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2022, 37(3): 2190-2198.
- [18] 刘和平, 刘庆, 张威, 等. 电动汽车用感应电机削弱振动和噪声的随机 PWM 控制策略 [J]. *电工技术学报*, 2019, 34(7): 1488-1495.
Liu H P, Liu Q, Zhang W, et al. Random PWM control strategy for reducing vibration and noise of induction motors in electric vehicles [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(7): 1488-1495.
- [19] Ji Z K, Cheng S W, Ren Q, et al. The effects and mechanisms of periodic-carrier-frequency PWM on vibrations of multiphase PMSM [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(7): 8696-8706.
- [20] Huang Y L, Xu Y X, Zhang W T, et al. Hybrid RPWM technique based on modified SVPWM to reduce the PWM acoustic noise [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(6): 5667-5674.
- [21] 陈滇斐, 万向民, 陈书桐, 等. 基于改进梅森旋转算法的永磁同步电机双随机 SVPWM 高频电磁振动抑制 [J]. *电工技术学报*, 2025, 40(8): 2504-2517.
Chen Z F, Wan X M, Chen S T, et al. High-frequency electromagnetic vibration suppression of dual random SVPWM for PMSM based on the improved mason rotation algorithm [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(8): 2504-2517.
- [22] 刘伽, 张志锋, 孙全增. 基于混合式脉宽调制的双

- 三相电机谐波抑制技术[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(10): 10-19.
- Liu J, Zhang Z F, Sun Q F. Harmonic suppression technology of dual three-phase motor based on hybrid PWM [J]. Electric Machines and Control Application, 2022, 49(10): 10-19.
- [23] 刘剑, 王玉, 鲁炳林, 等. 离散均匀分布随机 SVPWM 中伪随机数序列的表征与选择[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3586-3599.
- Liu J, Wang Y, Lu B L, et al. Characterization and selection of pseudo-random number sequences in discrete uniformly distributed random SVPWM [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3586-3599.
- [24] 王玉彬, 刘瀚文. 改进虚拟方波信号注入的内置式永磁同步电机 MTPA 控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2025, 40(20): 6474-6486.
- Wang Y B, Liu H W. Research on MTPA control strategy of IPMSM with improved virtual square wave signal injection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(20): 6474-6486.
- [25] 刘锟, 高剑, 刘晨旭, 等. 基于 MOGA 优化注入谐波电流的永磁同步电机振动抑制策略[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(10): 1039-1049.
- Liu K, Gao J, Liu C X, et al. Vibration suppression strategy for PMSM based on MOGA optimized harmonic current injection [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(10): 1039-1049.
- [26] 赵希栋, 王玉彬. 气隙偏心分数槽嵌入式永磁同步电机的电磁振动分析[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(7): 732-742.
- Zhao X D, Wang Y B. Electromagnetic vibration analysis of fractional-slot interior PMSM with air-gap eccentricity [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(7): 732-742.
- [27] 杜锌成, 宋春同, 王玉彬. 静态密封双定子高温超导电机电磁噪声预测研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(5): 26-38.
- Du X C, Song C T, Wang Y B. Vibroacoustic prediction of high temperature superconducting dual-stator generator with stationary seal [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(5): 26-38.

收稿日期:2026-01-12

收到修改稿日期:2026-02-08

作者简介:

王 涵(2001—),男,硕士研究生,研究方向为特种电机的电磁噪声分析,18954018620@163.com;

*通信作者:王玉彬(1974—),男,博士,教授,研究方向为特种电机设计及其控制,wangyubin@upc.edu.cn。