

DOI: 10.11985/JEE.260398

永磁同步电机谐波注入抑制电磁噪声研究综述*

谷雨茜^{1,2} 曹景运^{1,2} 李小宁³ 祝丽花^{1,2} 王晓远⁴

- (1. 天津理工大学天津市新能源电力变换传输与智能控制重点实验室 天津 300384;
2. 天津理工大学电气工程与自动化学院 天津 300384;
3. 河北工业大学电气工程学院 天津 300401;
4. 天津大学电气自动化与信息工程学院 天津 300072)

摘要: 永磁同步电机(Permanent magnet synchronous machine, PMSM)因其效率高、功率密度高在新能源汽车、精密制造、航天航空等领域具有很高的应用价值。振动噪声问题会影响 PMSM 的动态平衡、性能甚至产生噪声污染,因此抑制 PMSM 的振动噪声是进一步提高永磁同步电机性能的关键挑战之一。谐波注入法因非侵入性、自适应性、不敏感性等优点成为研究热点。本文从抑制 PMSM 电磁噪声的补偿方法入手,总结归纳了国内外学者在谐波注入技术方面所进行的研究工作以及进展,将谐波注入法的优化技术归纳为电流、转矩、转速、电磁力四个补偿源下的控制策略,并详细分析了不同补偿源下的控制策略。根据研究总结出有策略存在的不足之处,提出新的研究思路,推动谐波注入方法的发展及其新趋势,为抑制电磁噪声提供理论基础。

关键词: 永磁同步电机; 电磁噪声; 谐波注入法; 优化技术; 补偿源; 抑制策略

中图分类号: TM351

Review of Research on Harmonic Injection to Suppress Electromagnetic Noise in Permanent Magnet Synchronous Machine

GU Yuxi^{1,2} CAO Jingyun^{1,2} LI Xiaoning³ ZHU Lihua^{1,2} WANG Xiaoyuan⁴

- (1. Tianjin Key Laboratory of New Energy Power Conversion Transmission and Intelligent Control, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384;
3. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401;
4. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: Permanent magnet synchronous machine(PMSM) has high application value in new energy vehicles, precision manufacturing, aerospace, and other fields because of its high efficiency and high power density. The issue of vibration noise will affect the motor in terms of dynamic balance, performance fluctuations, and even noise pollution. Therefore, suppression of motor vibration noise is one of the key challenges to further improving the PMSM performance. The harmonic injection method has become a research hotspot due to its advantages of non-invasiveness, adaptability, and insensitivity. Starting with the compensation method for suppressing the electromagnetic noise of PMSM, the research work and progress of domestic and foreign scholars on the harmonic injection method are summarized. The optimization technology of the harmonic injection method is summarized as the control strategy under the four compensation sources, which are current, torque, speed, and electromagnetic force respectively. The control strategy under different compensation sources is analyzed in detail. The shortcomings of existing strategies based on the research are

* 国家自然科学基金青年(52407016)、河北省博士后科研择优(B2023005006)和河北省青年拔尖人才计划(BJ2026047)资助项目。
20251113 收到初稿, 20260228 收到修改稿

summarized, and new research ideas are proposed, which promotes the development and new trend of harmonic injection methods and provides a theoretical basis for suppressing electromagnetic noise.

Key words: Permanent magnet synchronous machine(PMSM); electromagnetic noise; harmonic injection method; optimization technique; compensate source; inhibition strategy

1 引言

永磁同步电机(Permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有高功率密度、高效率、低维护成本等性能,在航空、汽车、精密制造等领域得到广泛应用^[1-2]。然而,由于非线性、非平衡以及磁饱和和特性等因素,导致 PMSM 在运行中存在电磁噪声问题,不仅影响了电机的平稳性,还降低了电机的性能和寿命,同时也对操作人员的健康和舒适性产生了不利影响^[3-4]。探究一种高效、低成本、通用性强的电磁噪声控制方法,不仅对提高 PMSM 的性能具有深刻的现实意义,更代表着科技发展的必然趋势和未来方向。

电磁力波动和转矩脉动是引起电磁噪声的主要原因,因此当前的电磁噪声优化策略主要集中在抑制电磁力波动或转矩脉动上^[5-6]。为抑制电磁噪声,现有研究主要集中在两种方法上:电机结构优化和控制优化。基于电机本体结构设计优化的方法主要通过定子不对称结构、转子分段错极、非均匀气隙、新型转子隔磁桥以及软磁复合材料等多种电磁噪声抑制优化设计方案^[7-9]。尽管这些方法在一定程度上可以有效减小气隙磁场畸变导致的电磁噪声,但无法消除由驱动控制器谐波引发的电磁力波动和转矩脉动问题^[10]。此外,电机设计受到多方面的制约和限制,考虑的因素过多可能增加电机设计的复杂性。因此,为了更进一步抑制电磁噪声,需要从控制方面展开研究。

相比通过电机结构设计优化,控制层面的方法更易于实现电磁噪声的抑制,且成本更低。其中,在控制策略上采用谐波注入法实现抑制电磁噪声的方法具有优异的性能以及广泛的适应性,得到了广泛关注与研究。该技术通过在电机绕组中注入适当的谐波分量,产生补偿分量以抵消 PMSM 中的电磁力波动或转矩脉动,从而达到抑制电磁噪声的目的。谐波注入技术能够灵活控制任意次谐波,既能解决电机结构优化中的局限性,也能应对控制策略带来的问题,相较于传统的转矩脉动抑制方法,具有以下几个明显的优点。

(1) 非侵入性:无须对电机结构进行任何改动,也不需要添加额外装置,因此不会对电机的物理结构产生影响。

(2) 自适应性:具备自适应能力,能够根据不同工况和需求,实时调整谐波补偿信号的频率、幅值和相位,以实现最佳的电磁噪声抑制效果。

(3) 不敏感性:无须深入分析电磁噪声的具体成因,能够有效抑制由多种因素引起的电磁噪声,具备较强的适应性和抗干扰能力。

这使得谐波注入法在电磁噪声抑制中的应用具有显著优势,尤其适用于现有电机系统的改进和优化。

目前,关于 PMSM 注入谐波以抑制电磁噪声的研究仍处于不断发展阶段。部分学者通过建立注入谐波量与所需补偿量之间的数学模型,设计出两者之间的关系模型以确定注入方案^[11]。另有研究则将谐波注入技术与电机性能的综合优化相结合,在抑制电磁噪声的同时优化电机其他性能参数,通过融合多目标控制策略,对定子铜损^[12]、直流母线电压利用率^[13]和效率等因素进行改善。此外,越来越多的研究引入了智能算法,以降低 PMSM 谐波注入相关算法的计算复杂度。例如,遗传算法^[14]、神经网络控制算法^[15]、模糊控制算法^[16]、自适应控制算法^[17]等智能算法能够对谐波注入量的频率、幅值和相位进行动态调整,从而实现更高效的电磁噪声抑制效果。这些技术的引入不仅提高了控制精度,还为未来 PMSM 系统的优化与智能化控制提供了广阔的前景。

本文提出了一种基于补偿源分类的谐波注入抑制电磁噪声研究综述,首先探讨了 PMSM 电磁噪声的产生机理及相应的抑制方法;其次,对谐波注入法的基本原理及其控制方法进行了深入分析,对现有谐波注入方法特征进行了总结,提出了补偿源概念,并按补偿源分类方式将谐波注入方法分为四类,包括电流补偿法、转矩补偿法、转速补偿法和电磁力补偿法;随后,系统地分析并总结了国内外现有的抑制策略及其控制特点,并对每种补偿源对应的谐波注入策略进行了详细的对比分析;最后,分析了谐波注入法可能的研究方向。

2 PMSM 电磁噪声产生机理及其抑制方法

2.1 电磁噪声产生机理

电机噪声的来源大致可分为三类：机械噪声、空气动力学噪声和电磁噪声。对于 PMSM 而言，电磁噪声是最主要的振动源^[18-19]。与只能被动抑制的机械噪声不同，电磁噪声可以通过有效的主动控制手段来抑制。电磁噪声的主要来源有两个：一方面是由电机本身的结构引发；另一方面则是由逆变过程引入的谐波所导致^[20-21]。

2.1.1 转矩脉动

基于磁共能模型的电磁转矩可以表示为^[22-23]

$$T_e = \frac{3p}{2} \left[\psi_d i_q - \psi_q i_d + L_\Delta i_d i_q + i_d \frac{d\psi_d}{d\theta} + i_q \frac{d\psi_q}{d\theta} \right] + T_{\text{cog}} \quad (1)$$

式中， T_e 为总电磁转矩； p 为电机的极对数； ψ_d 、 ψ_q 分别为 dq 轴转子永磁磁链； i_d 、 i_q 分别为 dq 轴定子电流； L_Δ 为 dq 轴电感之差，即 $L_\Delta = L_d - L_q$ ； θ 为电角度； T_{cog} 为齿槽转矩。

根据式(1)可知，电机的转矩与电流、磁链、电感以及齿槽转矩密切相关。在电机完成电磁设计后，电感和磁链一般不会随着运行产生较大变化。

为了方便分析 PMSM，通常假定转子磁链在电机气隙中呈正弦分布^[24]。然而，实际运行中，由于电机结构方面的问题，如齿槽效应和转子永磁体结构缺陷等非理想因素，导致永磁体的磁链在气隙中分布不均匀。这使得转子永磁体的磁链出现非正弦化，并产生谐波成分。 dq 轴磁链可以表示为

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Lambda_0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Lambda_{\text{dh}} \\ \Lambda_{\text{qh}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_e = \underbrace{n_p (\Lambda_0 i_{q0} + L_\Delta i_{d0} i_{q0})}_{T_0} + \underbrace{n_p [\Lambda_0 i_{qh} + L_\Delta (i_{d0} i_{qh} + i_{q0} i_{dh})] + n_p \left[i_{q0} \left(\Lambda_{\text{dh}} + \frac{d\Lambda_{\text{qh}}}{d\theta} \right) + i_{d0} \Lambda_{\text{qh}} - \frac{d\Lambda_{\text{dh}}}{d\theta} \right]}_{T_h} + T_{\text{cog}} \quad (6)$$

由式(6)可见，转矩脉动的产生与电流谐波、磁链分量以及齿槽转矩密切相关。当电机的电磁设计方案确定后，依靠本体结构优化无法彻底消除由磁链谐波和齿槽转矩引起的转矩脉动作用在定子上，使定子铁心发生形变从而产生电磁噪声^[26-27]。磁链和齿槽转矩这些影响因素难以有效干预。

2.1.2 电磁力波动

在 PMSM 中，主磁通主要沿着径向方向进入气隙，并在定子和转子上产生径向电磁力波，最终导致电磁噪声的产生。根据 Maxwell 方程，径向

式中， Λ_0 为 d 轴磁链的直流分量； Λ_{dh} 、 Λ_{qh} 分别为 dq 轴磁链的谐波分量。

将式(2)代入式(1)，则电磁转矩可以表示为直流分量 T_0 与谐波分量 T_h 的叠加，具体表达式为

$$T_e = \underbrace{n_p (\Lambda_0 + L_\Delta i_d)}_{T_0} i_q + \underbrace{n_p \left[i_q \left(\Lambda_{\text{dh}} + \frac{d\Lambda_{\text{qh}}}{d\theta} \right) - i_d \left(\Lambda_{\text{qh}} - \frac{d\Lambda_{\text{dh}}}{d\theta} \right) \right]}_{T_h} + T_{\text{cog}} \quad (3)$$

式中， $n_p = 3p/2$ ， T_0 为直流转矩； T_h 为谐波转矩，即转矩脉动。

在电机运行过程中，由于不存在理想器件，逆变电路中会存在死区时间、管压降、导通压降等非理想因素。这些因素导致逆变电路输出的实际电压偏离理想电压，从而产生误差电压。误差电压 U_{err} 的傅里叶分解表达式为^[25]

$$U_{\text{err}} = \frac{4\Delta u}{\pi} \left(\cos \omega t + \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \dots \right) \quad (4)$$

式中， Δu 为一个开关周期时间内的平均误差。由上式可知，逆变电路存在 3 次、5 次、7 次等奇数次谐波成分，使得电机电流产生畸变，这些误差电压会传递至电机系统，以谐波电流形式存在于电机中，电机的电流以下式形式存在

$$\begin{cases} i_d = i_{d0} + i_{\text{dh}} \\ i_q = i_{q0} + i_{\text{qh}} \end{cases} \quad (5)$$

式中， i_{d0} 、 i_{q0} 分别为 dq 轴电流直流分量； i_{dh} 、 i_{qh} 分别为 dq 轴电流谐波分量。

结合式(3)~(5)，可以得出包含电流谐波、磁链谐波和齿槽转矩的转矩模型，如式(6)所示。通过式(6)更清晰地描述电机结构和逆变电路对转矩脉动的影响。

电磁力波的表达式可以表示为单位面积上的径向电磁力波方程^[28]。

$$F_n(\theta, t) = \frac{B^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (7)$$

式中， θ 为空间角度； t 为时间； μ_0 为真空磁导率； B 为气隙中的磁通密度。

在现有研究中，若忽略气隙磁场的饱和情况，气隙磁密 B 可通过气隙磁导 λ 和气隙磁势 f 相乘来表示，即 $B(\theta, t) = \lambda(\theta, t) \cdot f(\theta, t)$ 。此时的径向电磁力波可以重新表达为

$$F_n(\theta, t) = \frac{f^2(\theta, t) \lambda^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (8)$$

由此可见, 电机的电磁噪声的激励电磁力主要由气隙磁导和气隙磁密决定, 这两者与定子和转子的磁场密切相关。由于 PMSM 的转子永磁体磁场在完成电磁设计之后不受控制方式的影响, 其磁场特性基本固定, 因此无法通过常规控制方法来调整转子的磁场分布。

2.2 电磁噪声抑制方法

为了应对电机电磁噪声的问题, 国内外研究学者们提出了多种电磁噪声抑制方法。这些方法主要可以分为电机本体结构优化和控制策略优化。采用控制策略是当前抑制电磁噪声研究的一个新趋势, 该方法不受电机本体设计和加工工艺的限制, 通过采用不同的控制策略, 可以有效地抑制电磁噪声。目前主要的控制策略方法包括软开关技术^[29]、误差电压补偿法^[30-31]、重复控制器^[32-33]、混合随机 PWM 技术^[34]以及谐波注入法等。

谐波注入法是一种基于控制策略的 PMSM 电磁噪声抑制方法。该方法通过在定子电流中注入特定频率、幅值和相位的谐波电流, 使注入的谐波补偿电流所产生的电磁力波动或转矩脉动与电机本身的电磁力波动或转矩脉动相互干涉或抵消。谐波电流的注入可以有效抵消电机本体结构和逆变电路引起的磁链谐波和齿槽转矩的影响, 并改变定子的磁场分布, 调整定子产生的磁势, 从而影响气隙中的磁通密度分布。通过减少转矩脉动和电磁力的波动抑制电磁噪声。国内外的研究方法通常可以总结为以下几个步骤。

(1) 建立数学模型: 确定系统补偿量与注入谐波补偿电流或电压之间的数学关系。通过精确建模, 确保谐波补偿量能够有效干扰电机内部的电磁力波或转矩脉动。

(2) 实时测量物理参数: 根据系统状态和工作条件, 实时测量 PMSM 的电流、转矩、转速等物理参数, 作为控制输入, 保证谐波注入能够及时响应工况变化。

(3) 优化控制算法: 采用合适的控制算法或计算方法, 如自适应控制算法、模糊控制等, 以计算得到最优的谐波补偿量。

(4) 注入补偿信号: 将最优的谐波补偿电流或电压注入电机系统中, 以实现电磁噪声的有效抑制。

通常, 谐波注入法采用闭环控制系统来保证稳定的抑制效果^[35], 如图 1 所示。

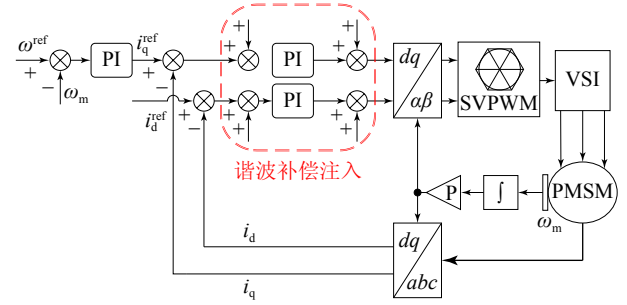


图 1 谐波注入控制系统框图

根据现有对谐波注入法的研究以及分类方法, 从注入方式上主要分为以下三种: 电流注入法^[35-36]、电压注入法^[37-38]和结合注入法^[39-40]。其注入方式各有优劣, 具体注入示意图如图 2 所示。

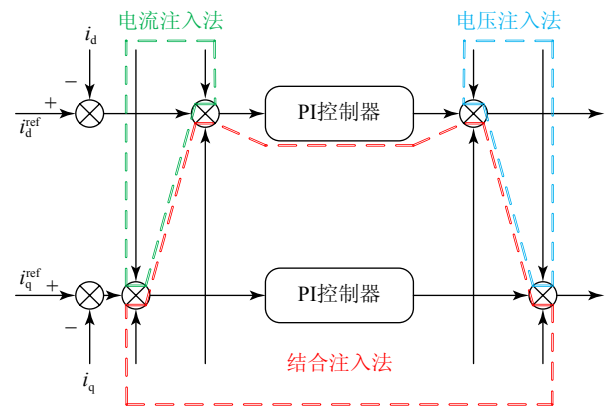


图 2 谐波注入方式示意图

电流注入法是一种通过在电流控制器前注入最佳谐波补偿电流来抑制电磁噪声的方法。该方法的优点在于其通过控制器的作用, 避免了谐波直接注入电机可能引发的不良影响。然而, 电流注入法所面临的主要挑战之一是转速环或转矩环输出的参考电流值与实际所需的参考电流之间可能存在不一致的情况, 导致电机系统振荡或不稳定。

电压注入法是一种通过在电流控制器后注入谐波补偿电压来抑制电磁噪声的方法。该方法利用控制器或稳压公式计算出注入谐波补偿电压, 然后通过空间矢量脉宽调制技术调制出定子电流。电压注入法具有动态响应快、误差小的优点, 但在工作条件发生变化时, 由于缺乏电流控制器的缓冲作用, 可能会对电机的正常运行产生一定影响。

结合注入法是一种通过同时注入谐波补偿电压和谐波补偿电流来抑制电磁噪声的方法。这一方法的独特之处在于, 它不仅确保了注入效果的最优化, 还充分利用了并行注入策略来弥补单一注入策略的不足。然而, 结合注入法在确定附加谐波电流时存在一定的复杂性, 因此其具体实施相对困难。

3 谐波注入法抑制转矩脉动策略

3.1 补偿源分类

为了更系统地分析谐波注入法, 本文将引入“补偿源”这一概念, 将能够降低电磁振动噪声的被控物理量定义为补偿源。本文将国内外对谐波注入法的研究归纳为四类补偿源: 转矩补偿源、电磁力补偿源、电流补偿源和转速补偿源。以不同的状态参数角度对引起电磁噪声的原因进行观测和抑制可以更好地提升电磁噪声抑制效率。

转矩补偿源和电磁力补偿源是本文总结的第一层次补偿源。第 2.1 节的机理分析指出, 转矩脉动和电磁力波动是电磁噪声的主要成因, 因此, 通过谐波注入补偿量以生成补偿转矩或补偿电磁力, 能够有效抑制电磁噪声。

电流补偿源是本文总结的第二层次补偿源。通过降低电流的谐波含量抑制电磁噪声, 不需要过多考虑第一层次补偿源的具体抑制机理, 便能有效地产生补偿转矩并改善气隙的磁场分布^[17]。基于此, 本文将电流归纳为第二层次补偿源, 通过注入谐波的方法来降低谐波成分, 实现电磁噪声的抑制。

转速补偿源是本文总结的辅助层次的补偿源。当前对电机输出转矩的测量方式主要包括使用转矩传感器、功率分析仪或基于模型的估算方法。然而, 这些方法在实验成本与测量精度之间难以取得一个较好的平衡点。为了解决这一问题, 一些研究尝试基于 PMSM 的动力学方程, 将转矩脉动抑制的研究转化为转速脉动抑制的分析方法, PMSM 动力学方程如式(9)所示。

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (9)$$

式中, T_L 为负载转矩, J 为转动惯量, B 为阻尼系数, ω_m 为转速。根据式(9)可以建立转速脉动与转矩脉动之间的关系。通过抑制转速脉动, 可以间接抑制转矩脉动, 进而实现电磁噪声的抑制。

相比于其他分类方法, 基于补偿源的分类方式在物理层面上具有更强的解释力。该分类方法更具针对性, 优化方向明确, 能够为抑制电磁噪声的控制方法提供更有效的指导。通过提取并优化电机相关的补偿参数, 将适当的补偿量注入 PMSM, 以实现电磁噪声的有效抑制。该方法对电机中的非理想因素具有不敏感性, 其优化对象是包含所有电气非理想化因素的电气参数。因此, 各补偿源之间的电磁耦合作用对抑制效果的影响可以忽略不计。

在建模过程中, 电气参数作为主要变量, 专注于针对电磁噪声的优化。

综上所述, 本文归纳了从不同状态参数角度的补偿源。同时基于上述分析与文献综述, 本文对不同补偿源下谐波注入法的优化策略进行了分类和总结。图 3 展示了不同补偿源下电磁噪声抑制策略及其补偿方法的分类。

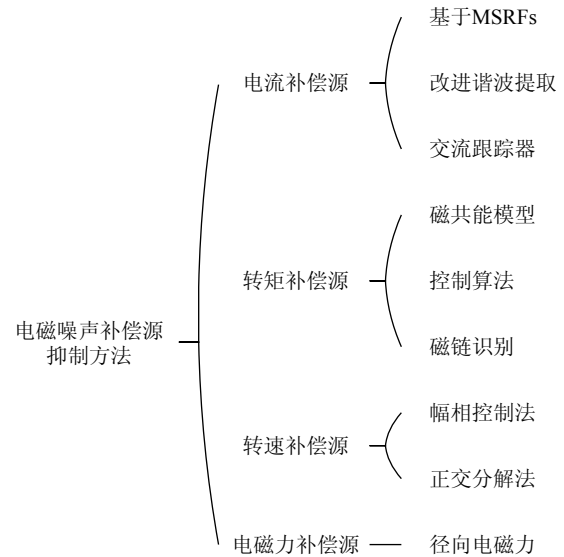


图 3 PMSM 电磁噪声抑制策略分类

3.2 基于补偿源分类的电磁噪声抑制策略

3.2.1 电流补偿法

根据式(6)、(8)的分析, 电流中的谐波含量与电机转矩脉动和电磁力波动密切相关。电流谐波含量的降低能够减小由于电机本体结构非理想因素所引发的转矩脉动和电磁力波动, 可以有效抑制电磁噪声, 是抑制电磁噪声的关键因素。部分学者的研究重点放在减少定子电流中的谐波含量, 以使定子电流更接近理想的正弦波形。通过这种优化策略, 电磁力波动和转矩脉动得以减小, 从而有效地抑制电磁噪声。

电流补偿法以定子电流或交流参考量的跟踪为优化目标, 其主要挑战在于谐波电流的检测、提取及交流参考值的精准跟踪。通常, 电流补偿法有两种实现途径: 一种是基于多同步参考系(Multiple synchronous reference frames, MSRFs)的控制方式进行优化; 另一种是设计能够精准跟踪交流参考值的控制器。

基于 MSRFs 的控制原理, 各阶次的谐波电流在其倍频阶次的旋转坐标系下表现为直流量, 利用这一特性可设计谐波提取环节。具体推导过程如下: 以基波和 5 次谐波电流为例^[41], 假设电机三相电流的表达式为

$$\begin{cases} i_a = I_1 \cos(\omega_e t + \theta_1) + I_5 \cos(-5\omega_e t + \theta_5) \\ i_b = I_1 \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3} + \theta_1\right) + I_5 \cos\left(-5\omega_e t - \frac{2\pi}{3} + \theta_5\right) \\ i_c = I_1 \cos\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3} + \theta_1\right) + I_5 \cos\left(-5\omega_e t + \frac{2\pi}{3} + \theta_5\right) \end{cases} \quad (10)$$

式中, I_1 、 I_5 分别为相电流基波、5次谐波电流的幅值; θ_1 、 θ_5 分别为相电流基波、5次谐波电流的初始相位角。

将式(10)通过 Clark、Park 变换矩阵, 由 abc 自然坐标系转换到 dq 坐标系, 电流在基频下 MSRFs 的 dq 轴电流表达式为

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = I_1 \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) \end{bmatrix} + I_5 \begin{bmatrix} \cos(-6\omega_e t + \theta_5) \\ \sin(-6\omega_e t + \theta_5) \end{bmatrix} \quad (11)$$

通过倍频变换矩阵式(12), 基频 dq 轴下的电流可以变换到 5 倍频的 dq 旋转坐标系中, 此时 5 次谐波电流在 5 倍频下呈现为直流量, 具体如式(13)所示。使用低通滤波器(Low-pass filter, LPF)可以提取该谐波。同理, 可以获取 7 次、11 次、13 次等, 满足形式为 $6k-1$ 次与 $6k+1$ 次的谐波电流。

$$T_{dq}^{dq5} = \begin{bmatrix} \cos(-6\omega_e t) & \sin(-6\omega_e t) \\ -\sin(-6\omega_e t) & \cos(-6\omega_e t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} i_{d5} \\ i_{q5} \end{bmatrix} = I_5 \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) \\ \sin(\theta_5) \end{bmatrix} + I_1 \begin{bmatrix} \cos(6\omega_e t + \theta_1) \\ \sin(6\omega_e t + \theta_1) \end{bmatrix} \quad (13)$$

基于 MSRFs 的谐波提取流程如图 4 所示, 首先将 PMSM 的三相电流变换到 5 次或 7 次倍频旋转坐标系下, 使该 dq 轴电流中相应频次的谐波电流表现为直流量, 然后通过后端的 LPF 提取该直流量, 并利用 PI 控制器进行跟踪给定值。基于 MSRFs 的提取方法原理简单、可行性高, 但谐波电流的抑制效果取决于提取精度。

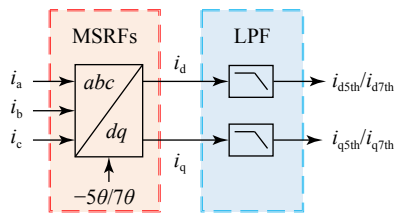


图 4 采用 MSRFs 方法的谐波电流检测图

对于 MSRFs 谐波提取的研究, 早期主要依赖于不同类型的 LPF 来提取谐波电流, 如采用传统的 LPF^[42]和 ii 型切比雪夫 LPF^[43]等, 以最大限度发挥 LPF 的提取性能。这种方式对电机参数的依赖性较低, 但仅通过优化 LPF 的类型来降低提取误差效果有限。

由于传统 LPF 在提取谐波电流时存在误差, 因此对相关环节进行优化是提高谐波提取精度的有

效途径。北京航空航天大学刘刚研究团队结合 LPF 与闭环检测系统(Closed-loop detection system, CDS)展开了相关研究^[44]。基于 CDS 的谐波提取环节不仅能够补偿 LPF 带来的相位延迟, 还能提升系统的截止频率和检测精度。通过频率响应分析, CDS 系统具备较强的抗干扰能力, 其具体结构如图 5 所示。

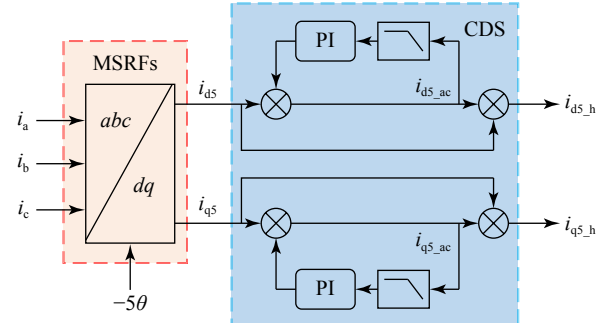


图 5 采用 CDS 方法的 5 次谐波电流提取图

此外, 设计新型的提取环节也是优化 LPF 提取精度的另一途径。中国科学院电工研究所温旭辉研究团队提出了一种如图 6 所示的谐波观测器改进方法^[45]。该方法无须区分谐波电流的次数, 能够实时观测出各次谐波电流的叠加之和。通过与电流环并联设计的谐波电流调节器, 实现了电流基波分量与谐波分量的解耦控制, 有效改善了电流波形, 从而进一步抑制了电磁噪声。

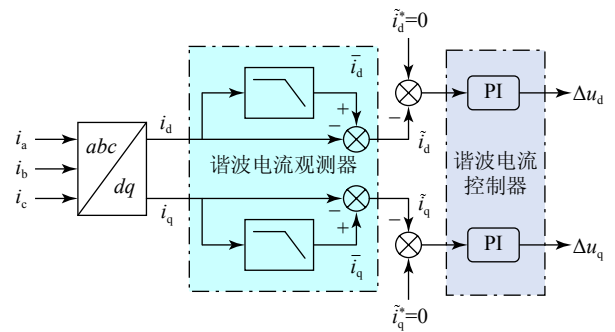


图 6 谐波观测器原理图

文献[46]提出了一种基于闭环电流平均值的谐波提取方法, 通过积分模块、延迟模块和除法模块构建电流平均值提取环节。这一方法有效解决了传统 LPF 的动态响应时间长、稳态误差大的问题。

英国谢菲尔德大学诸自强研究团队提出了一种利用虚拟三相系统提取谐波电流的方法^[47]。该方法通过将参考系延迟一定角度构建虚拟三相系统, 再通过虚拟系统和原始物理三相系统相结合来提取谐波电流。在图 7a 中, 通过将 abc 坐标系移动适当角度构建虚拟 xyz 坐标系, 虚拟电流可以作为辅助电流来消除基波分量, 并利用式(14)将特定谐波电

流从相电流中分解出来。这种方法通过简单的向量加减运算大大减少了谐波提取误差。

$$\begin{cases} I_{\alpha\beta}^l = \frac{I_{\alpha\beta} + I_{\alpha\beta v}}{2} \\ I_{\alpha\beta}^h = \frac{I_{\alpha\beta} - I_{\alpha\beta v}}{2} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $I_{\alpha\beta}^l$ 、 $I_{\alpha\beta}^h$ 分别为静止坐标系下基波电流、 h 次谐波电流; $I_{\alpha\beta}$ 、 $I_{\alpha\beta v}$ 分别为静止坐标系下的实际电流、虚拟电流。

结合 LPF 和智能控制算法也是当前研究的一个热点。文献[48]通过在谐波提取环节引入自适应控制算法, 结合智能控制策略消除 LPF 提取误差和相位延迟。这种方法不仅提高了谐波提取的精度, 还提升了谐波提取的快速性。

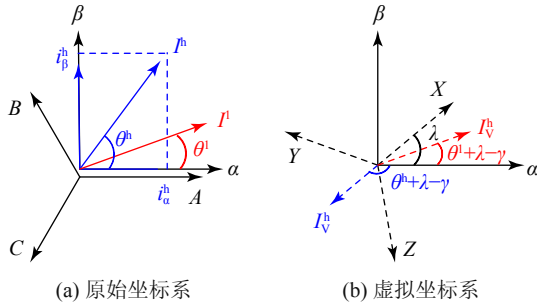


图 7 基于虚拟坐标系提取谐波电流

虽然上述研究大大改进了谐波电流的提取方式, 但传统的 PI 控制器无法无误差跟踪交流量。为解决这一问题, 部分研究者对 PI 控制器进行改进, 或将其与其他控制器结合。比例谐振控制器是为解决 PI 控制器对交流量跟踪性能不佳而设计的, 然而多个谐振控制器并联可能会影响系统的稳定性^[49-50]。丹麦奥尔堡大学 BLAABJERG 教授团队对多重二阶广义积分器进行了深入研究^[51]。该积分器能够选择性提取谐波电流, 使基波电流控制器和谐波电流控制器相互独立工作, 并通过谐波电流调节器控制检测到的谐波。文献[52]还通过分别分析正序和负序谐波, 设计了新型的谐波电流检测机构, 用于提高谐波提取的精度。

综上所述, 基于定子电流的谐波注入方法, 前提是准确地获取各阶次谐波量, 基于 MSRFs 的控制是一种有效且实用的方法, 但是滤波阶段由于谐波成分的复杂性以及检测器件的非理想化, 总会使得系统存在相位延迟以及提取误差。因此, 对基于 MSRFs 控制中的提取环节设计新型谐波电流提取方法是一个值得深入研究的课题。

3.2.2 转矩补偿法

研究表明, 即使将电流优化为近似正弦波形,

电机内部仍然会存在一定的转矩脉动^[53]。作为电磁噪声的主要影响因素之一, 转矩脉动是噪声产生的深层次原因。优化电流形状并不足以彻底消除电磁噪声。通过向调制器中注入适当的补偿电压或电流来抵消转矩脉动。根据式(6)的分析, 谐波补偿电流的注入能够显著减少转矩脉动, 从而有效降低电磁噪声。然而, 如何确定可以抑制转矩脉动最佳的谐波注入电流需要进一步研究。为此, 学者们致力于建立更为精确的转矩脉动模型, 深入分析转矩脉动与谐波注入电流之间的关系, 并提出优化的控制策略。通过对模型的精细化研究, 不仅可以更好地理解转矩脉动的产生机制, 还能够设计出更高效的补偿方法, 进一步减少电磁噪声的产生, 提升 PMSM 的运行性能。

转矩脉动的主要原因之一是齿槽转矩。然而, 仅依靠主动控制来抑制齿槽转矩的效果有限。为了获得更好的优化效果, 需要构建更详细的转矩脉动模型, 包括电机内部各种转矩脉动的具体成分。建立更为精确的转矩脉动模型是抑制电磁噪声的关键。现有研究大多基于磁共能模型来分析并建立转矩脉动模型。转矩补偿法则是通过将转矩脉动最小化作为优化目标, 建立转矩脉动与注入谐波补偿电流之间的关系模型, 进而获取最优的注入谐波补偿电流。这一方法能够有效降低电机的转矩脉动, 提升系统的运行稳定性。

转矩脉动的研究首先从齿槽转矩与 q 轴电流之间的关系模型展开。文献[54]在采用 $i_d=0$ 的控制方式下, 通过建立齿槽转矩与 q 轴电流的相关模型, 得出注入谐波补偿电流。然而, 仅对 q 轴注入谐波补偿电流, 可能对电机的整体性能不利, 甚至影响电机的安全运行。文献[55]则通过约束直流母线电压的利用率, 对 d 轴电流进行控制, 并结合 q 轴注入谐波补偿电流, 采用 dq 轴联合注入的方式来提升电机整体性能。然而, 上述研究均未对转矩脉动与 dq 轴电流之间的关系建立模型。只有通过建立这一模型, 才能更精确地获取注入谐波补偿电流。文献[36]通过构建 $6k$ 次转矩脉动与 $6k-1$ 次、 $6k+1$ 次 dq 轴电流之间的关系模型, 辨识各阶次 dq 轴电流系数, 并基于梯度下降法得出最佳的注入谐波补偿电流, 成功实现了对 PMSM 转矩脉动的有效抑制。

基于气隙磁场理论, 东南大学程明教授团队提出了一种基于磁共能变化率的新型转矩脉动模型^[56]。由于磁共能成分的复杂性, 当前研究中尚未对其进行精确的建模, 通常采用理想化的模型进行

分析^[57]。该研究提出的新型转矩脉动模型表明,除了齿槽转矩,调制环节产生的转矩脉动也是关键因素之一。为此,本文提出了一种复合控制方法,根据不同转矩脉动成分的来源,采取针对性地抑制与补偿策略。针对常规的转矩脉动成分采用 5 次和 7 次谐波电流注入策略。通过在定子电流中注入特定频率的谐波电流,干扰或抵消齿槽转矩及其他因素引起的转矩脉动;针对调制环节产生的转矩脉动采用电流前馈控制策略,优化调制信号以减少调制过程中引入的转矩脉动。这一策略在高速运行条件下展现出较好的电磁噪声抑制效果。该复合控制方法通过结合多种控制策略,能够更加全面地抑制转矩脉动,特别是在高速工况下,电磁噪声抑制效果尤为显著。具体示意图如图 8 所示。

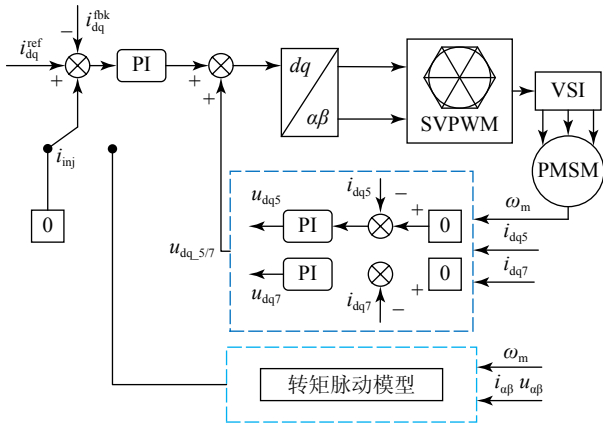


图 8 基于磁共能模型复合控制系统框图

加拿大温莎大学冯国栋团队构建了一个包含电流谐波、磁链谐波和齿槽转矩的傅里叶级数形式转矩脉动模型^[39],具体转矩脉动模型如式(15)所示。

$$T_e = n_p \left[(\mathbf{L}_{dq} \mathbf{i}_{dq} + \boldsymbol{\psi}_{dq})^T \times \mathbf{i}_{dq} + \mathbf{i}_{dq}^T \frac{d\boldsymbol{\psi}_{dq}}{dt} \right] + T_{cog} \quad (15)$$

式中, $\mathbf{L}_{dq}$ 、 $\boldsymbol{\psi}_{dq}$ 、 $\mathbf{i}_{dq}$ 分别是 dq 轴电感矩阵、磁链矢量矩阵和电流矢量矩阵,其中 $\mathbf{L}_{dq} = \text{diag}\{L_d, L_q\}$, $\boldsymbol{\psi}_{dq} = [\psi_d \ \psi_q]^T$ 、 $\mathbf{i}_{dq} = [i_d \ i_q]^T$;“ $\times$ ”为叉乘运算。

为了建立更加准确的模型,电流^[58]、磁链^[59]、齿槽转矩^[60]采用下面傅里叶级数形式表示

$$\begin{cases} \mathbf{i}_{dq} = \begin{bmatrix} I_{d0} \\ I_{q0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_k I_{dk} \cos(k\theta - \phi_{ik}) \\ \sum_k I_{qk} \sin(k\theta - \phi_{ik}) \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\psi}_{dq} = \begin{bmatrix} \Lambda_0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_k \Lambda_{dk} \cos(k\theta - \phi_{\lambda k}) \\ \sum_k \Lambda_{qk} \sin(k\theta - \phi_{\lambda k}) \end{bmatrix} \\ T_{cog} = \sum_k T_{ck} \cos(k\theta - \phi_{ck}) \end{cases} \quad (16)$$

式中, k 为谐波阶次; I_{d0} 、 I_{q0} 分别为 dq 轴电流平均值; I_{dk} 、 I_{qk} 分别为 dq 轴电流 k 次谐波分量的幅值;

Λ_0 表示为磁链平均值; Λ_{dk} 、 Λ_{qk} 分别为 dq 轴磁链 k 次谐波分量的幅值; T_{ck} 为齿槽转矩谐波 k 次幅值; $\phi_{\lambda k}$ 、 ϕ_{ik} 、 ϕ_{ck} 分别为磁链、电流、齿槽转矩谐波分量相位角。

将式(16)代入式(15)并分离出转矩脉动项,可得

$$\begin{aligned} T_h = n_p \sum_k \{ & (L_d - L_q) I_{q0} I_{dk} \cos(k\theta - \phi_{ik}) + \\ & [(L_d - L_q) I_{d0} + \Lambda_0] I_{qk} \sin(k\theta - \phi_{ik}) \} + \\ & n_p \sum_k \{ I_{q0} (\Lambda_{dk} + k \Lambda_{qk}) \cos(k\theta - \phi_{\lambda k}) - \\ & I_{d0} (k \Lambda_{dk} + \Lambda_{qk}) \sin(k\theta - \phi_{\lambda k}) \} + \sum_k T_{ck} \cos(k\theta - \phi_{ck}) \quad (17) \end{aligned}$$

在式(17)所表示的转矩脉动模型中,等式右侧第一项表示电流谐波产生的转矩脉动,第二项为磁链谐波引发的转矩脉动,第三项为齿槽转矩。由于电流谐波产生的转矩脉动是可控的,通过调整电流谐波可以抵消由不可控因素产生的转矩脉动,从而实现转矩脉动的最小化,进而抑制电磁噪声。

由于转矩脉动成分的含量难以完全降低至 0,所以通过模型计算所获取的最佳注入谐波补偿电流与实际所需电流存在一定的误差,部分学者通过加入智能控制算法来实现动态调节该部分误差,现有研究为实现转矩脉动最小化,采用了迭代学习控制算法^[61-62]、遗传算法^[23]、神经网络算法^[63]等,通过加入智能控制算法可以根据 PMSM 输出的转矩来对谐波电流的幅值、相位进行动态调整优化以实现最佳抑制效果。

综上所述,基于转矩模型的谐波注入法可以有效对转矩脉动进行抑制。现有策略多是以常规转矩脉动成分进行抑制,如齿槽转矩、电磁转矩谐波、逆变电路调制环节产生的转矩等,其理想化建模导致转矩脉动多种成分没有考虑,因此建立更为准确的转矩脉动模型、寻求更佳的控制方式对电磁噪声抑制效果的提升具有重要意义。

3.2.3 转速补偿法

通过研究转矩脉动来抑制电磁噪声是目前的主要研究方向之一。然而,由于转矩脉动成分复杂且测量难度较大^[64],使得具体实施较为困难。因此,一些研究者通过推导转矩与转速之间的动力学方程,建立转速脉动幅值、相位与转矩脉动幅值、相位的关系,从而以间接观测转矩脉动的方式进行抑制。虽然转速中谐波的抑制可以间接表明转矩脉动得到了有效抑制,但转速可能受到其他外部因素的影响,从而导致抑制目标出现一定偏差。不过,这种影响通常较小,因此不会显著影响最终的抑制效果。对于转速脉动的抑制,关键在于直接对转速谐波进行

控制,而无须对其具体成分或成因进行详细区分。这种直接抑制转速谐波的方式能够有效降低转速脉动,从而间接抑制电磁噪声的产生。

在不考虑负载含有谐波成分时,PMSM的 k 阶谐波动力学模型表达式如下^[65]

$$T_{ek} \cos(k\theta - \phi_{tk}) = B\omega_{mk} \cos(k\theta - \phi_{ok}) - kpJ\omega_{m0}\omega_{mk} \sin(k\theta - \phi_{ok}) \quad (18)$$

式中, T_{ek} 、 ω_{mk} 分别为 k 阶转矩谐波、转速谐波幅值; ϕ_{tk} 、 ϕ_{ok} 分别为转矩谐波、转速谐波相位角; ω_{m0} 为转速直流分量; B 、 J 分别为阻尼系数、转动惯量。

由式(18)可知, k 阶转矩脉动和 k 阶转速脉动之间构成矢量三角形,因此可以通过优化转速脉动来实现对转矩脉动的优化,从而达到抑制电磁噪声的目的。

转速脉动的提取较为简单,只需通过相应的计算即可获取 k 阶转速脉动的幅值和相位^[66],具体的计算方法如式(19)所示

$$\begin{cases} \omega_m \times \sin k\theta = \omega_{m0} \sin k\theta + 0.5\omega_{mk} \sin(2k\theta - \phi_{ok}) + \sum_{i \neq k} \omega_{mi} \cos(i\theta - \phi_{oi}) \sin k\theta + 0.5\omega_{mk} \sin \phi_{ok} \\ \omega_m \times \cos k\theta = \omega_{m0} \cos k\theta + 0.5\omega_{mk} \cos(2k\theta - \phi_{ok}) + \sum_{i \neq k} \omega_{mi} \cos(i\theta - \phi_{oi}) \cos k\theta + 0.5\omega_{mk} \cos \phi_{ok} \end{cases} \quad (19)$$

在式(19)中,等式右侧仅最后一项为直流分量,该分量可通过LPF提取出来,且包含了转速脉动的幅值和相位信息。对这两个直流分量进行数学变换后,便能获取具体的参数。基于此原理,转速谐波的提取方式得以设计。具体提取流程图如图9所示:首先将转速分别与 $\sin(k\theta)$ 和 $\cos(k\theta)$ 进行乘法运算,经过LPF提取,再通过分离便能获得谐波转速的相关参数。此方法主要依赖于数学运算,具有较高的精确度。

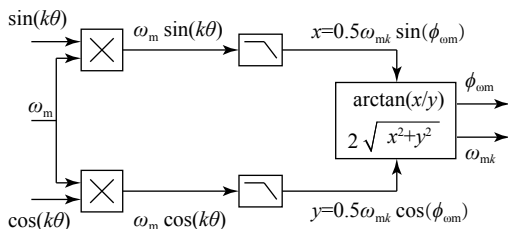


图9 转速谐波幅值、相位提取模块

转速补偿法的抑制思路是通过将转矩脉动与谐波电流的关系模型转化为转速脉动与谐波电流的关系模型。具体来说,注入的谐波补偿电流为 i_h ,其产生的转速脉动为 ω_{comk} 。当补偿量 ω_{comk} 与转速脉动 ω_{mk} 的幅值相等且相位相反时,系统处于最佳补

偿状态。如图10所示,通过动态调整 i_h 的幅值和相位,使补偿量与转速谐波互相抵消,即可减少转速脉动,进而有效抑制电磁噪声。

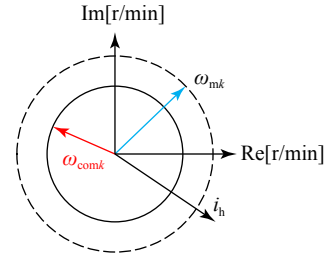


图10 补偿转速谐波原理图

关于抑制转速脉动,文献^[67]研究通过建立 q 轴注入谐波补偿电压与转速谐波之间的关系,提出了一种快速且准确的谐波转速补偿方法。然而,单独使用 q 轴注入模型可能会导致一定误差。要全面获取最佳的谐波补偿量,需要建立 dq 轴电流与谐波转速的关系模型。因此,如何从转速谐波中提取最佳的谐波补偿量成为当前的研究热点。针对这一问题,美国北卡罗莱纳州立大学BHATTACHARYA教授团队提出了一种通过转速获取磁链,再由磁链获取 dq 轴谐波补偿电压的方法^[68]。该方法包含离线和在线识别,即使识别不准确,也不会影响补偿跟踪效果。另外一种方式是将电机谐波转速分解为傅里叶级数的形式,无须考虑其具体产生因素,便可通过公式计算出注入谐波补偿电压。由于傅里叶级数中的交变量较为复杂,现有研究对交变量进行了解耦分析和控制,具体研究方向分为两类:幅值相位控制法^[35, 69-70]和正交分解控制法^[71-73]。

基于幅值相位的研究思路如下:注入的谐波补偿量所产生的谐波转速必须与电机原有的谐波转速在幅值上相等、相位上相反,并且引入约束条件,如最小导通损耗^[35, 69]或多重PI控制^[70]。

正交分解的研究思路是将交流信号正交分解为 $\cos$ 、 $\sin$ 两个直流分量或实、虚部分,分别对其进行控制^[71-72]。这种方法利用PI控制器对直流量的优异跟踪性能,并对提取方式进行了优化,通过误差较小的提取方式,避免了传统方法中相位延迟和频率失真的问题^[73]。

美国哥伦比亚大学JATSKEVICH教授团队提出了一种基于正交分解的控制策略^[71-72]。在文献^[72]中,该团队通过自适应控制算法提取转速谐波,并对正交分解量进行独立控制。其谐波电流的参考值由转速谐波控制器生成。图11展示了控制器的框图,其中输入为测得的转速谐波的正交幅值和参考值,输出为谐波电流参考值的正交幅值。计算出

正交幅值后, 谐波电流控制模块直接控制该正交幅值, 从而实现谐波抑制。

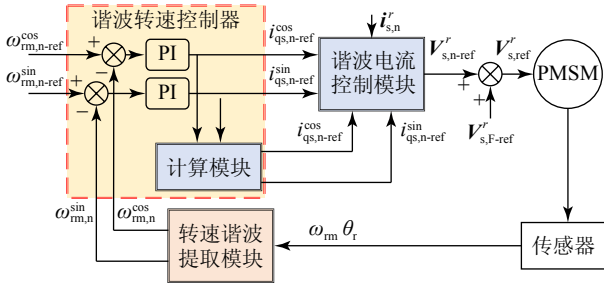


图 11 基于正交幅值控制抑制转速谐波框图

文献[37]对转速补偿法进行了改进, 采用模糊控制算法, 通过模糊规则确定谐波补偿量的幅值和相位, 从而构建注入的补偿量。该研究针对某特定电机的 12 次转速脉动, 提出的方法可以推广至其他阶次的转速脉动抑制中。

综上所述, 基于转速的补偿方法应用广泛, 且相较于转矩脉动, 转速谐波的获取方式更为简单。其关键在于精准提取转速谐波并对其进行有效控制。加装传感器或使用观测器可以获取转速信号, PI 控制器则用于控制该信号。然而, 目前的谐波分离方法多依赖低通滤波器(LPF)提取直流分量, 但在交直混合量中, LPF 的提取存在一定误差。未来, 通过数字分析技术进行谐波提取与分析, 有望提高精度, 并成为新的研究方向。此外, PMSM 在不同转速下运行时, 忽略阻尼系数和负载转矩中的谐波分量可能会影响模型精度。因此, 针对模型中多种影响因素建立更加详细、全面的模型, 也将成为未来的研究重点。

3.2.4 电磁力补偿法

电磁力波动是电机电磁噪声的根本来源之一, 由电机内部电流和磁场的周期性变化产生。这种波动对定子和转子造成周期性的拉伸与压缩, 进而引发振动和噪声[38, 74]。现有的优化控制策略, 主要通过调整电流、转矩和转速间接抑制电磁力波动, 但并未将电磁力波动对电磁噪声的影响作为研究重点。

因此, 深入探讨电磁力波与电磁噪声的关联机

理, 将有助于更有效地抑制电磁噪声。据式(8)的分析, 谐波补偿电流的注入能够有效改善气隙磁场的分布。当电机本体的结构导致非理想的气隙磁场变化时, 径向电磁力波动便会增加, 进而引发电磁噪声。然而, 通过合理的谐波补偿电流注入, 可以产生与这些非理想因素相抵消的电磁力波动, 从而抑制电磁力波动的产生。该方法的核心在于优化定子电流的谐波分量, 使其在气隙中形成有利的磁场分布, 降低电机径向电磁力波的波动。

电磁力的波动可以分为径向电磁力波动和切向电磁力波动。通常情况下, 由于空气磁导率较低, 气隙中的磁感线几乎垂直于定子和转子表面进入, 因此径向电磁力远大于切向电磁力, 成为导致定子与转子相对位移和振动的主要原因[75-77]。现有的研究多集中于径向电磁力, 往往忽视了切向电磁力的影响。

文献[78-79]提出了通过注入谐波补偿电流来抑制径向振动的方案, 但尚未明确建立谐波电流与径向振动之间的具体关系。针对这一不足, 沈阳工业大学夏加宽研究团队推导了径向电磁力振动模型, 并设计了相应算法用于抑制径向振动[17, 40, 80]。例如, 文献[40]中采用了一种基于多目标均方根传播(Root mean square propagation, RMSProp)优化算法的电磁力波补偿方法。该方法利用 RMSProp 的自适应学习率特性, 简化了算法流程, 降低了计算量, 能够有效找到单目标函数的最小值; 而文献[80]则提出了一种基于自适应线性神经网络的振动成分提取方法, 该方法可通过自动调整神经网络的权重和偏置, 适应不同的工作条件和负载变化。这两种方法均能有效抑制由径向电磁力波引起的电磁噪声。

在文献[80]中, 通过麦克斯韦磁力方程和电磁噪声补偿原理进行了分析和建模, 推导出了系统中需要补偿的径向力波, 如式(20)所示。该模型考虑了多个影响因素, 并进一步揭示了径向振动与谐波电流之间的关系。在综合这些因素的基础上, 通过调节谐波电流的频率、幅值和相位, 可以有效抑制径向电磁力。

$$F_{com}(\theta, t) = \frac{1}{4\mu_0} \lambda^2(\theta) \cdot \left\{ \begin{aligned} &2 \sum_{\mu} \sum_w F_{\mu} F_w \{ \cos[(\mu \pm 1)\omega_1 t - (\mu \pm iw)p\theta - (\pm i)90^\circ] \} + \\ &2 \sum_v \sum_w F_v F_w \{ \cos[(1 \pm i)\omega_1 t - (v \pm iw)p\theta - (1 \pm i)90^\circ] \} + \\ &\sum_{w_1} \sum_{w_2} F_{w_1} F_{w_2} \{ \cos[2i\omega_1 t - (w_1 + w_2)p\theta - 180^\circ i] \} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中, F_{com} 为补偿电磁力; μ_0 为空气磁导率; F_{μ} 、 F_w 、 F_v 为三个系数。

文献[17]提出了一种基于多频次谐波补偿电流注入的电磁力波补偿方法。该方法依次推导出单频

(续)

补偿源	补偿方法	示意图	优点	缺点
幅相控制法			① 适用于变速工况 ② 参数变化影响小	① 相位信息复杂 ② 响应性较差
转速				
正交分解法			① 瞬、稳态跟踪效果好 ② 参数调节较容易	高速下适用性差
总体评价		转化转矩脉动测量方式，结构简单，成本低；提取结构存在低通滤波环节，引入误差		
电磁力	径向电磁力模型	$F_r(\theta, t) = \frac{b_r^2(\theta, t)}{2\mu_0}$	抑制效果好	① 补偿模型复杂 ② 忽略切向电磁力
总体评价		针对电磁力波动抑制，准确性高，抑制效果好；模型复杂，分析难度大		

4 总结与展望

本文综述了用于抑制 PMSM 电磁噪声的谐波注入技术，重点分析了不同补偿源的噪声抑制原理及相应的抑制策略。尽管谐波注入法已被证明是一种高效的抑制方法，但在其全面应用和综合优化方面，仍存在诸多尚未解决的难点。未来，谐波注入法在 PMSM 电磁噪声抑制中的发展可集中于以下关键问题。

(1) 损耗与温升问题。谐波注入法与传统优化方法相比具有显著差异，因其在 PMSM 绕组中引入了新的谐波电流。此谐波电流是否会在特定应用中导致额外的损耗或温升，仍需深入探讨。PMSM 的铜损、铁损模型已较为精确，但其温升问题仍有待进一步分析。此外，尚未被准确建模的杂散损耗对系统的影响仍不明确，这是谐波注入法实际应用中的关键挑战之一。

(2) 电机建模问题。现有的 PMSM 模型大多基于理想条件，而这些模型中的偏差会限制电磁噪声的抑制精度，尤其是在转矩脉动和电磁力波动的建模中，仍有部分因素未被充分考虑，更加全面的模型建构将显著提升噪声抑制效果。智能算法(如深度学习和强化学习)的应用，虽然能够减少谐波注入法对模型精度的依赖，但由于 PMSM 参数的复杂耦合性，智能算法的参数数量庞大，调参难度也随之增加。因此，如何在模型精确度和计算复杂度之间进行合理取舍，仍是值得深入探讨的方向。

(3) 控制侧和结构侧整体兼容设计问题。目前的研究多集中于单一优化方法的深化，而较少涉及控制策略与电机结构之间的兼容设计。未来需要探索如何通过优化电机本体的电磁参数，并结合谐波注入法的控制策略，进一步抑制电机的残余电磁噪声。这种控制侧与结构侧的整体优化设计，是未来研究的重要方向。

(4) 多目标优化问题。目前针对谐波注入法对 PMSM 效率、输出转矩特性及运行稳定性的整体研究尚不充分。如何在多个目标之间寻求最佳平衡点，将有助于提高 PMSM 的综合性能。根据不同应用场合的需求进行多目标优化设计，将有效提升 PMSM 的输出特性和运行表现。

PMSM 的电磁噪声是衡量其性能的重要指标之一。近年来，针对谐波注入法抑制电磁噪声的理论和方法得到了不断的发展与完善。本文通过分析电磁噪声的产生机理，从补偿源的角度对现有的研究成果进行了梳理与总结，并阐述了当前阶段关于谐波注入法可能的研究方向。

参 考 文 献

- [1] BOLDEA I, TUTELEA L N, PARSA L, et al. Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: An overview[J]. [IEEE Transactions on Industrial Electronics](#), 2014, 61(10): 5696-5711.
- [2] 张慧柔, 李好文, 郑岗. 引入扰动补偿的 PMSM 混合非奇异终端滑模控制[J]. [电力电子技术](#), 2019, 53(10):

- 12-14.
- ZHANG Huirou, LI Haowen, ZHENG Gang. Hybrid nonsingular terminal sliding mode control for PMSM with disturbance compensation[J]. *Power Electronics*, 2019, 53(10): 12-14.
- [3] 张炳义, 贾宇琪, 李凯, 等. 一种表贴式永磁电机磁极结构优化研究[J]. *电机与控制学报*, 2014, 18(5): 43-48.
- ZHANG Bingyi, JIA Yuqi, LI Kai, et al. Study on magnetic pole structure of surface mounted PMSM[J]. *Electric Machines and Control*, 2014, 18(5): 43-48.
- [4] 李晓华, 刘成健, 梅柏杉, 等. 电动汽车 IPMSM 宽范围调速振动噪声源分析[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(17): 5219-5227.
- LI Xiaohua, LIU Chengjian, MEI Boshan, et al. Vibration and noise sources analysis of IPMSM for electric vehicles in a wide-speed range[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(17): 5219-5227.
- [5] 陈永校. 电机噪声的分析和控制[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987.
- CHEN Yongxiao. Analysis and control of motor noise[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1987.
- [6] ISLAM M S, ISLAM R, SEBASTIAN T. Noise and vibration characteristics of permanent-magnet synchronous motors using electromagnetic and structural analyses[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, 50(5): 3214-3222.
- [7] YU Tian, WANG Xiaoyuan, XU Yuhao. Research on electromagnetic vibration and noise of PMSM with unconventional stator[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2024, 34(8): 5205205.
- [8] 王晓远, 贺晓钰, 高鹏. 电动汽车用 V 型磁钢转子永磁电机的电磁振动噪声削弱方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(16): 4919-4926.
- WANG Xiaoyuan, HE Xiaoyu, GAO Peng. Research on electromagnetic vibration and noise reduction method of V type magnet rotor permanent magnet motor electric vehicles[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(16): 4919-4926.
- [9] WANG Xiaoyuan, SUN Xibin, GAO Peng. Study on the effects of rotor-step skewing on the vibration and noise of a PMSM for electric vehicles[J]. *IET Electric Power Applications*, 2020, 14(1): 131-138.
- [10] 杨淑英, 储昭晗, 房佳禹, 等. 直接基于谐波电动势定向的 PMSM 转矩脉动抑制方案研究[J]. *电机与控制学报*, 2022, 26(7): 68-80.
- YANG Shuying, CHU Zhaoan, FANG Jiayu, et al. Suppression strategy of PMSM torque ripples directly based on harmonic EMF orientation[J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(7): 68-80.
- [11] ZHANG Y, CHEN J, HU K. Current harmonic suppression and simulation analysis of PMSM based on TSD-DPCC[C]//The Proceedings of 2024 International Conference of Electrical, Electronic and Networked Energy Systems. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024: 329-336.
- [12] 艾星全, 肖岚, 伍群芳. 基于谐波注入的双三相 PMSM 全转矩范围最小铜耗缺相容错控制策略[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(10): 3157-3169.
- AI Xingquan, XIAO Lan, WU Qunfang. Harmonic injection-based minimum copper loss open-phase fault-tolerant control strategy for dual three-phase PMSM over full torque range[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(10): 3157-3169.
- [13] JIANG C, ZHANG H, LIU H, et al. Harmonic current suppression for open-ending winding PMSM based on voltage injection[J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 37762-37770.
- [14] LEE D H, LIANG Jianing, LEE Zhenguo, et al. A simple nonlinear logical torque sharing function for low-torque ripple SR drive[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(8): 3021-3028.
- [15] 王师凯, 许家群. 永磁同步电机神经网络谐波注入转矩脉动抑制方法[J]. *数字海洋与水下攻防*, 2023, 6(1): 81-88.
- WANG Shikai, XU Jiaqun. Torque ripple suppression method for permanent magnet synchronous motor based on neural network harmonic injection[J]. *Digital Ocean & Underwater Warfare*, 2023, 6(1): 81-88.
- [16] LI T, LI A, HOU L. Improved GOA-based fuzzy PI speed control of PMSM with predictive current regulation[J]. *PLoS One*, 2025, 20(1): e0318094.
- [17] 夏加宽, 康乐, 詹宇声, 等. 表贴式三相永磁同步电机极槽径向力波补偿模型及参数辨识[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(8): 1596-1606.
- XIA Jiakuan, KANG Le, ZHAN Yusheng, et al. The model of pole slot radial force wave compensation for surface-mounted three-phase permanent magnet synchronous motor and parameter identification[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021,

- 36(8): 1596-1606.
- [18] 舒波夫. 电机的噪声和振动[M]. 沈官秋, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- SHUBOV. Noise and vibration of motors[M]. Translated by SHEN Guanqiu, et al. Beijing: China Machine Press, 1980.
- [19] ISLAM R, HUSAIN I. Analytical model for predicting noise and vibration in permanent-magnet synchronous motors[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, 46(6): 2346-2354.
- [20] YU Shenbo, TANG Renyuan. Electromagnetic and mechanical characterizations of noise and vibration in permanent magnet synchronous machines[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(4): 1335-1338.
- [21] 韩锐, 唐友义, 徐熊明, 等. 电动汽车异步电动机电磁噪声分析与仿真[J]. *电气工程学报*, 2019, 14(3): 74-80.
- HAN Rui, TANG Youyi, XU Xiongming, et al. Analysis and simulation of electromagnetic noise of induction motors for electric vehicles[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2019, 14(3): 74-80.
- [22] 丁俊杰, 陈天宁, 方江龙, 等. 谐波注入在电动汽车动力总成电磁振动抑制中的应用[J]. *振动工程学报*, 2022, 35(6): 1453-1460.
- DING Junjie, CHEN Tianning, FANG Jianglong, et al. Electromagnetic vibration suppression of electric vehicle powertrain using harmonic injection[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2022, 35(6): 1453-1460.
- [23] LAI Chunyan, FENG Guodong, IYER K L V, et al. Genetic algorithm-based current optimization for torque ripple reduction of interior PMSMs[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 53(5): 4493-4503.
- [24] 郭鸿浩, 曹睿, 林欣欣, 等. 非理想磁链永磁同步电机转矩脉动抑制[J]. *电机与控制学报*, 2022, 26(2): 63-71.
- GUO Honghao, CAO Rui, LIN Xinxin, et al. Torque ripple minimization of non-ideal magnet flux permanent magnet synchronous motors[J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(2): 63-71.
- [25] 何正义, 季学武, 瞿文龙. 一种新颖的基于死区时间在
线调整的 SVPWM 补偿算法[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(6): 42-47.
- HE Zhengyi, JI Xuewu, QU Wenlong. A novel SVPWM compensation strategy based on regulating dead time on-line[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(6): 42-47.
- [26] 吴茂刚, 赵荣祥. 矢量控制永磁同步电动机的转矩脉动分析[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(2): 9-14.
- WU Maogang, ZHAO Rongxiang. Analysis of torque ripples of vector-controlled permanent magnet synchronous motors[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007, 22(2): 9-14.
- [27] 周子莘, 王心坚, 王颖飞. 一种抑制三次谐波转矩脉动的双绕组电机结构[J]. *微特电机*, 2019, 47(12): 13-15, 19.
- ZHOU Zishen, WANG Xinjian, WANG Yingfei. Dual-winding motor structure for suppressing triple harmonic torque ripple[J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2019, 47(12): 13-15, 19.
- [28] 王群京, 郑耀达, 刘先增. 基于结构参数优化的电机振动噪声的抑制研究[J]. *电气工程学报*, 2023, 18(2): 16-25.
- WANG Qunjing, ZHENG Yaoda, LIU Xianzeng. Research on suppression of motor vibration and noise based on structural parameter optimization[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2023, 18(2): 16-25.
- [29] BEN-BRAHIM L. On the compensation of dead time and zero-current crossing for a PWM-inverter-controlled AC servo drive[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, 51(5): 1113-1118.
- [30] LIN Y, LAI Y S. Dead-time elimination of PWM-controlled inverter/converter without separate power sources for current polarity detection circuit[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(6): 2121-2127.
- [31] LIAO Yong, LI Fu, LIN Hao, et al. Discrete current control with improved disturbance rejection for surface-mounted permanent magnet synchronous machine at high speed[J]. *IET Electric Power Applications*, 2017, 11(7): 1333-1340.
- [32] HE Liqun, ZHANG Kai, XIONG Jian, et al. A repetitive control scheme for harmonic suppression of circulating current in modular multilevel converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(1): 471-481.
- [33] TANG Zhuangyao, AKIN B. Suppression of dead-time distortion through revised repetitive controller in PMSM drives[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(3): 918-930.
- [34] WANG Yu, LIU Jian, LU Binglin, et al. A novel

- discrete hybrid dual random SVPWM scheme for reducing PMSM harmonic intensity[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2023, 28(3): 1425-1435.
- [35] FENG Guodong, LAI Chunyan, TIAN Jiangbo, et al. Multiple reference frame based torque ripple minimization for PMSM drive under both steady-state and transient conditions[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(7): 6685-6696.
- [36] YAN Luocheng, LIAO Yong, LIN Hao, et al. Torque ripple suppression of permanent magnet synchronous machines by minimal harmonic current injection[J]. *IET Power Electronics*, 2019, 12(6): 1368-1375.
- [37] FENG Guodong, LAI Chunyan, KAR N C. A closed-loop fuzzy-logic-based current controller for PMSM torque ripple minimization using the magnitude of speed harmonic as the feedback control signal[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(4): 2642-2653.
- [38] 陈少先, 丁树业, 申淑锋, 等. 船舶用表贴式永磁同步电机的电磁振动分析与抑制[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(5): 1275-1286, 1298.
- CHEN Shaoxian, DING Shuye, SHEN Shufeng, et al. Analysis and suppression of electromagnetic vibration of surface mounted permanent magnet synchronous motor for ships[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(5): 1275-1286, 1298.
- [39] FENG Guodong, LAI Chunyan, KAR N C. An analytical solution to optimal stator current design for PMSM torque ripple minimization with minimal machine losses[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(10): 7655-7665.
- [40] 康乐, 夏加宽, 苏航, 等. 表贴式永磁电机各次电流引起径向振动的机理分析及综合抑制策略[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(18): 4638-4650.
- KANG Le, XIA Jiakuan, SU Hang, et al. Mechanism analysis and comprehensive suppression strategy of radial vibration induced by each current of surface magnet motor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(18): 4638-4650.
- [41] GU Xin, LI Yiyang, CHEN Wei, et al. Improved deadbeat predictive control based current harmonic suppression strategy for IPMSM[J]. *Energies*, 2022, 15(11): 3943.
- [42] 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): 119-127.
- LIAO Yong, ZHEN Shuai, LIU Ren, et al. Torque ripple suppression of permanent magnet synchronous motor by the harmonic injection[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(21): 119-127.
- [43] WANG Wusen, LIU Chunhua, LIU Senyi, et al. Current harmonic suppression for permanent-magnet synchronous motor based on Chebyshev filter and PI controller[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, 57(2): 8201406.
- [44] LIU Gang, CHEN Baodong, WANG Kun, et al. Selective current harmonic suppression for high-speed PMSM based on high-precision harmonic detection method[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(6): 3457-3468.
- [45] 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): 3336-3350.
- ZHANG Jian, WEN Xuhui, LI Wenshan, et al. Research on harmonic current suppression strategies of permanent magnet synchronous motor systems based on harmonic observers[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(10): 3336-3350.
- [46] 李生民, 肖亚敏, 梁吉宁, 等. 基于闭环电流平均值法的永磁同步电机谐波抑制方法[J]. *电机与控制应用*, 2019, 46(5): 51-57.
- LI Shengmin, XIAO Yamin, LIANG Jining, et al. Harmonic current suppression of permanent magnet synchronous motor based on closed-loop current average method[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(5): 51-57.
- [47] YAN Luocheng, ZHU Ziqiang, SHAO Bo, et al. Arbitrary current harmonic decomposition and regulation for permanent magnet synchronous machines[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(5): 4392-4404.
- [48] YANG Jian, ZHOU Jingyang, ZHOU Hanbin, et al. High-precision harmonic current extraction for PMSM based on multiple reference frames considering speed harmonics[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(10): 9764-9776.
- [49] 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): 2526-2538.
- WEI Yihan, LUO Xiang, ZHU Li, et al. Research on

- current harmonic suppression strategy of high saliency ratio permanent magnet synchronous motor based on proportional resonance controller[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(7): 2526-2538.
- [50] 夏薇, 王凯, 张建亚, 等. 基于谐振控制器的谐波削极型永磁同步电机转矩脉动抑制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(18): 5499-5508.
- XIA Wei, WANG Kai, ZHANG Jianya, et al. Torque ripple suppression of permanent magnet synchronous motor with harmonic shaped rotors based on resonance controllers[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(18): 5499-5508.
- [51] RODRÍGUEZ P, LUNA A, CANDELA I, et al. Multiresonant frequency-locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(1): 127-138.
- [52] 金石, 朱熙, 金无痕, 等. 基于谐波提取器的永磁同步电机谐波抑制方法[J]. *电气工程学报*, 2021, 16(1): 9-15.
- JIN Shi, ZHU Xi, JIN Wuhen, et al. Harmonic suppression method of permanent magnet synchronous motor based on harmonic extractor[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2021, 16(1): 9-15.
- [53] 夏加宽, 韩行一, 王成元. 非理想反电动势的无刷直流电机的转矩脉动抑制策略研究[J]. *电气技术*, 2009, 10(9): 14-16.
- XIA Jiakuan, HAN Xingyi, WANG Chengyuan. Study of restraint method for torque ripple of brushless DC motors with non-ideal back-EMF[J]. *Electrical Engineering*, 2009, 10(9): 14-16.
- [54] GIRGIN M T, GUVEN M K, AYDIN M. A new harmonic current injection technique to reduce cogging torque in axial flux permanent magnet motors[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2022, 58(2): 8201304.
- [55] WU Lijian, LYU Zekai. Harmonic injection-based torque ripple reduction of PMSM with improved DC-link voltage utilization[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(7): 7976-7981.
- [56] ZHOU Jiawei, CHENG Ming, WEN Honghui, et al. Modeling and suppression of torque ripple in PMSM based on the general airgap field modulation theory[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(10): 12502-12512.
- [57] NAKAO N, AKATSU K. Suppressing pulsating torques: Torque ripple control for synchronous motors[J]. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2014, 20(6): 33-44.
- [58] LAI Chunyan, FENG Guodong, MUKHERJEE K, et al. Torque ripple minimization for interior PMSM with consideration of magnetic saturation incorporating online parameter identification[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, 53(6): 8105904.
- [59] CHAPMAN P L, SUDHOFF S D, WHITCOMB C A. Optimal current control strategies for surface-mounted permanent-magnet synchronous machine drives[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1999, 14(4): 1043-1050.
- [60] BEHBAHANIFARD H, SADOUGHI A. Cogging torque reduction in line start permanent magnet synchronous motor[J]. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2016, 11(4): 878-888.
- [61] MATTAVELLI P, TUBIANA L, ZIGLIOTTO M. Torque-ripple reduction in PM synchronous motor drives using repetitive current control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2005, 20(6): 1423-1431.
- [62] QIAN Weizhe, PANDA S K, XU Jianxin. Torque ripple minimization in PM synchronous motors using iterative learning control[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, 19(2): 272-279.
- [63] FLIELLER D, NGUYEN N K, WIRA P, et al. A self-learning solution for torque ripple reduction for nonsinusoidal permanent-magnet motor drives based on artificial neural networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(2): 655-666.
- [64] WANG Lixin, WANG Xiaoyuan. Torque ripple analysis and reduction of interior permanent magnet synchronous motors[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2024, 34(8): 5206705.
- [65] FENG Guodong, LAI Chunyan, MUKHERJEE K, et al. Online PMSM magnet flux-linkage estimation for rotor magnet condition monitoring using measured speed harmonics[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 53(3): 2786-2794.
- [66] FENG Guodong, LAI Chunyan, KAR N C. Practical testing solutions to optimal stator harmonic current design for PMSM torque ripple minimization using speed harmonics[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(6): 5181-5191.
- [67] WU Zhaoqian, LIANG Qin, ZHANG Shaohui, et al. Amplitude-phase based optimal voltage harmonic

- injection for speed harmonic minimization in SPMSM[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(6): 7494-7503.
- [68] KIM H, HAN Yongsu, LEE K, et al. A sinusoidal current control strategy based on harmonic voltage injection for harmonic loss reduction of PMSMs with non-sinusoidal back-EMF[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(6): 7032-7043.
- [69] FENG Guodong, LAI Chunyan, KAR N C. Particle-filter-based magnet flux linkage estimation for PMSM magnet condition monitoring using harmonics in machine speed[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(3): 1280-1290.
- [70] FENG Guodong, LAI Chunyan, KAR N C. Speed harmonic based decoupled torque ripple minimization control for permanent magnet synchronous machine with minimized loss[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, 35(4): 1796-1805.
- [71] QU Jianzhen, JATSKEVICH J, ZHANG Chengning, et al. Torque ripple reduction method for permanent magnet synchronous machine drives with novel harmonic current control[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(3): 2502-2513.
- [72] QU Jianzhen, ZHANG Pinjia, JATSKEVICH J, et al. Torque-ripple reduction of permanent magnet synchronous machine drives based on novel speed harmonic control at low-speed operation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(8): 7683-7694.
- [73] WU Zhaoqian, YANG Zhijian, DING Kang, et al. Order-domain-based harmonic injection method for multiple speed harmonics suppression of PMSM[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(4): 4478-4487.
- [74] 边旭, 纪毅, 梁艳萍. 外转子永磁同步电机径向电磁力分析与抑制[J]. *电机与控制学报*, 2022, 26(10): 74-80.
- BIAN Xu, JI Yi, LIANG Yanping. Analysis and suppression of radial electromagnetic force of external rotor permanent magnet synchronous motor[J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(10): 74-80.
- [75] SU Wu, GUO Yunjun, WANG Dong, et al. Semi-analytical calculation of no-load radial and tangential electromagnetic force waves of a non-salient pole synchronous generator[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(4): 2956-2966.
- [76] 李岩, 刘佳男, 夏加宽. 三相异步电机电磁振动有限元计算分析[J]. *电气工程学报*, 2015, 10(9): 30-34.
- LI Yan, LIU Jianan, XIA Jiakuan. Electromagnetically excited vibration calculation and analysis for a three-phase asynchronous motor with finite element method[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2015, 10(9): 30-34.
- [77] 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 Zhe, LIU Tongxin, DENG Wenzhe, et al. Vibration and noise suppression of permanent magnet synchronous drive motor with harmonic current injection[J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(7): 115-124.
- [78] PRAMANICK S, KARTHIK R S, AZEEZ N A, et al. A harmonic suppression scheme for full speed range of a two-level inverter fed induction motor drive using switched capacitive filter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(3): 2064-2071.
- [79] LI Lei, LEE K M, BAI Kun, et al. Inverse models and harmonics compensation for suppressing torque ripples of multiphase permanent magnet motor[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(11): 8730-8739.
- [80] KANG Le, XIA Jiakuan, SU Han, et al. Online control strategy for radial vibration suppression of PMSM by multiharmonic current injection method[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(9): 8692-8704.
-
- 作者简介: 谷雨茜, 女, 1995 年生, 博士, 讲师。主要研究方向为高速永磁同步电机的设计与多物理场耦合分析。
E-mail: gyx277@126.com
曹景运(通信作者), 男, 1999 年生, 硕士研究生。主要研究方向为电机系统及其驱动控制。
E-mail: cjy19991006@163.com