

工业电机变频调速电路 ——谐波抑制电路设计与验证

彭志

红河广源水电开发有限公司, 云南 元阳 662400

DOI:10.61369/WCEST.2025040023

摘 要： 工业电机变频调速系统在节能降耗与精准控制领域应用广泛，但逆变器输出的非正弦波会产生大量谐波，导致电机损耗增加、电网污染及设备故障。本文针对三相电压型 PWM 逆变器驱动的异步电机调速系统，深入分析谐波产生机理，设计无源滤波（PF）、有源电力滤波器（APF）及混合滤波（HF）三种谐波抑制电路。通过 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型，对比三种电路在不同负载工况下的总谐波畸变率（THD）、功率因数及输出转矩波动特性；制作实验样机，采用 TI TMS320F28335 DSP 实现控制算法，验证滤波电路的实际抑制效果。结果表明：混合滤波电路在 0% ~ 100% 负载范围内，电网侧电流 THD 可降至 3.2% 以下，电机侧电压 THD 控制在 2.8% 以内，较传统无源滤波方案性能提升 40% 以上，且动态响应时间小于 50ms，满足工业电机高精度调速需求。

关 键 词： 工业电机；变频调速；谐波抑制；无源滤波；有源电力滤波器

Industrial Motor Variable Frequency Speed Control Circuit — Harmonic Suppression Circuit Design and Verification

Peng Zhi

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Yuanyang, Yunnan 662400

Abstract： Variable frequency speed control systems for industrial motors are widely used in energy conservation and precision control applications. However, the non-sinusoidal output from inverters generates significant harmonics, leading to increased motor losses, power grid pollution, and equipment failures. This paper investigates the harmonic generation mechanism in three-phase voltage-type PWM inverter-driven asynchronous motor speed control systems, proposing three harmonic suppression circuit designs: passive filter (PF), active power filter (APF), and hybrid filter (HF). A MATLAB/Simulink simulation model was developed to compare total harmonic distortion (THD), power factor, and output torque fluctuation characteristics under different load conditions. An experimental prototype was constructed using TI TMS320F28335 DSP to implement control algorithms, verifying the actual suppression performance of the filter circuits. Results demonstrate that the hybrid filter achieves grid-side current THD below 3.2% across all load ranges from 0% to 100%, while maintaining motor-side voltage THD within 2.8%. Compared with traditional passive filter solutions, the hybrid design shows over 40% performance improvement with dynamic response time under 50ms, meeting high-precision speed control requirements for industrial motors.

Keywords： industrial motor; frequency conversion speed regulation; harmonic suppression; passive filter; active power filter

引言

随着工业自动化水平提升，变频调速技术因具备宽调速范围、高控制精度等优势，已成为风机、水泵、机床等设备的核心驱动方案^[1]。然而，变频调速系统中的 PWM 逆变器通过高频开关实现电压调节时，输出波形存在大量高次谐波（主要为 5 次、7 次、11 次等特征谐波），这些谐波不仅会使电机定子铜损、铁损增加，导致电机温升过高、效率下降，还会注入电网引发电压畸变，干扰周边精密设备正常运行。据工业能效监测数据，未采取谐波抑制措施的变频调速系统，平均谐波损耗占总能耗的 8% ~ 15%，且会缩短电机绝缘寿命 30% 以上。当前谐波抑制技术主要分为无源滤波、有源滤波及混合滤波三类。无源滤波电路结构简单、成本低，但滤波特性固定，难

以适应负载动态变化；有源滤波电路可实时补偿谐波，抑制效果好，但存在功率损耗大、稳定性要求高的问题；混合滤波电路结合两者优势，在兼顾成本与性能方面具有显著潜力。本文针对工业电机变频调速系统的谐波特性，设计基于 LC 无源网络与并联型 APF 的混合滤波电路，通过建立数学模型、仿真分析及实验验证，解决传统滤波方案在动态响应、谐波抑制精度方面的不足，为工业电机调速系统的谐波治理提供可行方案^[2]。

一、工业电机变频调速系统谐波产生机理

（一）逆变器输出谐波特性

工业电机变频调速系统多采用三相电压型 PWM 逆变器，其工作原理是通过 SPWM（正弦脉冲宽度调制）技术，将直流母线电压转换为幅值、频率可调的交流电压。在理想情况下，SPWM 输出电压接近正弦波，但实际开关过程中，由于 IGBT 器件的导通 / 关断延迟、死区时间设置及调制波采样误差，输出电压中会产生两类谐波：由逆变器拓扑结构与调制方式决定，对于三相桥式逆变器，当载波比（载波频率与调制波频率之比）为整数时，特征谐波次数为 $6k \pm 1$ （ $k=1, 2, 3$ ），即 5 次、7 次、11 次、13 次等，其中 5 次、7 次谐波幅值最高，占总谐波含量的 60% ~ 70%；由 IGBT 高频开关产生，谐波频率集中在载波频率整数倍附近，幅值随频率升高而衰减，主要影响电机高频损耗与电磁干扰^[3]。

（二）电机侧谐波传递路径

逆变器输出的谐波电压施加于电机定子绕组后，会产生谐波电流，其传递过程受电机阻抗特性影响。异步电机的定子阻抗由电阻与漏抗组成，对于低次谐波（5 次、7 次），电机漏抗较小，谐波电流幅值较大，易导致定子铜损增加；对于高次谐波（ ≥ 11 次），漏抗随频率升高而增大，谐波电流幅值衰减明显，但会引发电机铁芯高频振动，产生噪声与附加铁损。此外，谐波电流产生的旋转磁场与转子转速不同步，会在转子中感应出差频电流，导致转子铜损增加，严重时会引起电机转矩脉动，影响调速系统稳定性^[4]。

（三）电网侧谐波反馈影响

若变频调速系统直接从电网取电，逆变器输入侧的整流电路（如二极管不控整流）会产生谐波电流，通过电网阻抗反馈至公共电网，导致电网电压畸变。这类谐波主要为 3 次、5 次、7 次等低次谐波，当多台变频设备并联运行时，会产生谐波叠加效应，使电网总谐波畸变率（THD）超过 GB/T 14549-1993《电能质量公用电网谐波》规定的 5% 限值，干扰其他用电设备正常工作^[5]。

二、谐波抑制电路设计

（一）无源滤波（PF）电路设计

1. 滤波拓扑与参数计算

针对逆变器输出的 5 次、7 次特征谐波，设计 LC 无源滤波电路，采用“单调谐滤波器 + 高通滤波器”的组合拓扑：

单调谐滤波器：分别针对 5 次、7 次谐波设计两个单调谐支路，并联于逆变器输出端与电机之间。单调谐滤波器的谐振频率需精确匹配目标谐波频率，其参数计算公式为：

$$L_n = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot 2\pi f_n}, \quad C_n = \frac{1}{(2\pi f_n)^2 L_n}$$

其中， U_n 为逆变器输出线电压有效值（380V）， I_n 为 n 次谐波电流额定值（取基波电流的 15%），

$$f_n = n \cdot 50\text{Hz} \quad (n=5, 7)$$

（ $n=5, 7$ ）代入参数计算得：5 次谐波滤波支路 $L_5=1.2\text{mH}$ 、 $C_5=176\mu\text{F}$ ；7 次谐波滤波支路 $L_7=0.6\text{mH}$ 、 $C_7=92\mu\text{F}$ 。

高通滤波器：采用 RC 高通拓扑，用于抑制 11 次及以上高次谐波，参数选择为 $R=10\Omega$ 、 $C=0.1\mu\text{F}$ ，截止频率 $f_c=15.9\text{kHz}$ ，确保对高次谐波的衰减率 $\geq 20\text{dB/十倍频}$ 。

2. 滤波特性分析

无源滤波电路的优势在于结构简单、无额外功率损耗，但存在以下不足：①滤波特性受电网频率与负载阻抗影响，当电机负载变化时，滤波支路与电机阻抗可能发生并联谐振，导致谐波放大；②无法抑制开关谐波，对电机高频损耗的改善效果有限。

（二）有源电力滤波器（APF）设计

1. APF 拓扑与控制算法

采用并联型 APF 拓扑，通过 IGBT 全桥逆变器将补偿电流注入电网侧（或电机侧），实时抵消谐波电流。APF 的核心是谐波检测与电流跟踪控制：采用基于瞬时无功功率理论的 i_p-i_q 检测法，通过坐标变换将三相电流分解为有功分量（ i_p ）与无功分量（ i_q ），经低通滤波器（LPF）提取基波有功分量，剩余部分即为谐波分量，检测延迟时间 $\leq 1\text{ms}$ ；采用滞环比较控制策略，将检测到的谐波电流指令与 APF 输出电流进行比较，通过调整 IGBT 开关状态，使实际输出电流跟踪指令电流，电流跟踪误差 $\leq 5\%$ ^[6]。

2. 主电路参数设计

APF 主电路包括直流侧电容、IGBT 模块及输出滤波器：①直流侧电容 C_{dc} 需维持直流电压稳定，根据能量平衡原理计算得 $C_{dc}=2200\mu\text{F}$ （直流电压 800V，电压波动 $\leq 5\%$ ）；② IGBT 选用英飞凌 FF300R12KE4，额定电流 300A、耐压 1200V，满足工业电机额定功率 37kW 的需求；③输出滤波器采用 LCL 拓扑，抑制 APF 开关谐波，参数为 $L_1=0.3\text{mH}$ 、 $L_2=0.1\text{mH}$ 、 $C=20\mu\text{F}$ ，确保 APF 输出电流 $\text{THD} \leq 3\%$ ^[7]。

（三）混合滤波（HF）电路设计

混合滤波电路结合无源滤波的低成本与有源滤波的高精度优势，将 LC 无源滤波电路并联于逆变器输出端，用于抑制 5 次、7 次等低次特征谐波；并联型 APF 并联于电网侧与逆变器输入侧之间，一方面补偿无源滤波未抑制的高次谐波，另一方面抵消整流电路产生的电网侧谐波。混合滤波电路的优势在于：①无源滤波承担主要低次谐波抑制任务，降低 APF 的容量需求（APF 容量仅需系统额定功率的 15% ~ 20%，较纯 APF 方案成本降低 40%）；②APF 实时补偿剩余谐波与动态负载变化产生的谐波，提升滤波精度与动态响应速度。从电路协同工作机制来看，LC 无源滤波支路与并联型 APF 并非独立运行，而是通过 DSP 控制单元实现动态联动。当系统检测到逆变器输出低次谐波（5 次、7 次）含量超过阈值时，无源滤波支路优先启动，利用 LC 谐振特性快速吸收低次谐波，避免大量低次谐波进入 APF 导致其过载；而当负载突变引发高次谐波激增或整流电路产生电网侧谐波时，APF 通过 i_p-i_q 检测算法实时捕捉谐波变化，在 1ms 内调整补偿电流幅值与相位，精准抵消高次谐波与电网侧谐波，形成“低次无源主导、高次有源精准补偿”的分层治理模式^[8]。

在工业场景适配性上，该混合滤波电路可通过调整 LC 无源滤波支路的电容、电感参数，适配不同功率等级（15kW~110kW）的工业电机。例如，针对 55kW 电机调速系统，仅需将 5 次谐波滤波支路参数调整为 $L_5=0.8\text{mH}$ 、 $C_5=264\mu\text{F}$ ，即可保持低次谐波抑制效果，无需重构整体电路拓扑，大幅降低了不同工况下的改造成本。同时，电路中增设的过流保护模块与谐波放大抑制算法，可有效避免负载阻抗变化引发的并联谐振问题——当电机负载从 30% 降至 10% 时，保护模块能在 $20\mu\text{s}$ 内调整无源滤波支路的阻尼电阻接入状态，将谐波放大风险控制 5% 以内，确保系统稳定运行。此外，相较于纯有源滤波电路，混合滤波方案的功率损耗降低 15% ~ 20%，在连续 24 小时运行的工业水泵系统中，单日可节省电能消耗约 2.3kWh，长期应用能显著降低工业用户的能耗成本，进一步契合当前工业领域“节能降本”的发展需求^[9]。

三、仿真分析与实验验证

（一）仿真模型搭建

基于 MATLAB/Simulink 搭建工业电机变频调速系统仿真模型，参数设置如下：异步电机额定功率 37kW、额定电压 380V、额定转速 1480r/min；逆变器载波频率 10kHz、调制方式为 SPWM；负载模拟工业风机特性，转矩随转速平方变化（ $T=k\omega^2, k=0.015\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$ ）。分别搭建无滤波、无源滤波、有源滤波及混合滤波四种方案的仿真模型，对比分析电网侧电流

THD、电机侧电压 THD、电机效率及转矩脉动特性^[10]。

（二）仿真结果分析

1. 稳态性能对比

在额定负载（37kW）工况下，四种方案的性能指标如表 1 所示：

表 1 四种方案的性能指标				
滤波方案	电网侧电流 THD (%)	电机侧电压 THD (%)	电机效率 (%)	转矩脉动率 (%)
无滤波	18.7	15.2	88.3	12.5
无源滤波	8.5	7.3	91.5	8.2
有源滤波	3.8	3.1	94.2	4.5
混合滤波	3.2	2.8	94.5	4.1

由表 1 可知混合滤波方案的电网侧电流 THD 与电机侧电压 THD 最低，较无滤波方案分别降低 82.9%、81.6%；电机效率提升 6.2 个百分点，转矩脉动率降低 67.2%，说明混合滤波在稳态谐波抑制与电机性能改善方面效果最优。

2. 动态性能分析

设置负载从 50% 突增至 100%（突变时间 0.5s），分析四种方案的动态响应特性。结果显示：混合滤波电路的电流 THD 恢复时间为 42ms，较无源滤波（120ms）与有源滤波（55ms）更短；电机转速波动幅度 $\leq 2\%$ ，恢复时间 $\leq 80\text{ms}$ ，满足工业电机动态调速需求。这是因为无源滤波电路响应速度慢，无法适应负载突变；有源滤波虽动态响应较快，但受限于容量，补偿速度略低于混合滤波；而混合滤波中，无源滤波承担静态谐波抑制，APF 快速补偿动态谐波，两者协同实现快速响应。

（三）实验验证

1. 实验平台搭建

制作实验样机，核心硬件包括：TI TMS320F28335 DSP（实现 SPWM 与 APF 控制算法）、英飞凌 IGBT 模块（逆变器与 APF）、三相异步电机（37kW）、功率分析仪（横河 WT3000，用于测量 THD 与功率参数）。实验平台接线与仿真模型拓扑一致，负载采用磁粉制动器模拟风机负载。

2. 实验结果分析

在额定负载下，测得混合滤波电路的电网侧电流 THD 为 3.1%，电机侧电压 THD 为 2.7%，与仿真结果（3.2%、2.8%）误差 $\leq 3\%$ ，验证了仿真模型的准确性；电机输入功率为 38.5kW，输出功率为 36.4kW，效率 94.5%，与仿真值一致。负载从 50% 突增至 100% 时，功率分析仪记录的电流 THD 变化曲线显示，THD 峰值为 5.8%，恢复时间 45ms，与仿真结果（42ms）接近，说明混合滤波电路具有良好的动态谐波抑制能力。连续运行 72 小时，监测电机绕组温度与绝缘电阻，结果显示电机定子温度稳定在 75℃（环境温度 25℃），较无滤波方案降低 12℃；绝缘电阻维持在 $500\text{M}\Omega$ 以上，无明显衰减，验证了混合滤波电路对电机寿命的改善效果。

四、结论

本文针对工业电机变频调速系统谐波问题，深入分析机理后设计无源、有源及混合三种谐波抑制电路，经仿真与实验验证得出：混合滤波电路结合 LC 无源网络与并联型 APF 优势，稳态下电网侧电流 THD 可降至 3.2% 以下、电机侧电压 THD 控制在 2.8%

以内，动态响应时间 $\leq 50\text{ms}$ ；相较传统无源滤波，其电机效率提升 3 个百分点、转矩脉动率降低 50% 以上，对比纯有源滤波，成本降低 40%、功率损耗减少 20%，且实验与仿真结果误差 $\leq 3\%$ 。未来可从优化 APF 控制策略、设计宽频带混合滤波电路、开发模块化滤波装置展开研究。

参考文献

[1] 滕萃, 文湘霖. 变频调速技术在电机拖动中的应用研究 [J]. 模具制造, 2024, 24 (06): 142-144.

[2] 朱英斌, 杨明阳, 刘欣朋, 任景伟, 姜海礁. 石油化工装置隔膜计量泵变频调速控制的研究与设计 [J]. 石油和化工设备, 2022, 25 (02): 76-79.

[3] 张景生, 靳宏, 毛丽凤. 基于 PLC 与工业机器人的电机变频调速系统 [J]. 科技创新与应用, 2021, 11 (19): 26-28.

[4] 尚鹏. 通风机风量调节系统的设计与应用 [J]. 机械管理开发, 2020, 35 (07): 242-243+253.

[5] 姜宝. 矿用带式输送机传输控制系统的优化研究 [J]. 机械管理开发, 2020, 35 (05): 245-246.

[6] 周艳. 变频调速技术在工业电气自动化控制中的应用 [J]. 科技风, 2020, (03): 29.

[7] 曹策, 解仑, 李连鹏, 王志良. 变频矢量控制系统入侵检测技术 [J]. 工程科学学报, 2019, 41 (08): 1074-1084.

[8] 郭浩, 王哲. 变频调速节能技术在石油化工工业的应用 [J]. 化工设计通讯, 2019, 45 (03): 56.

[9] 曾雁鸿. 中电协《核电站主氮风机用高压立式变频调速三相异步电动机技术条件》等 6 项团体标准入选工业和信息化部 2018 年团体标准应用示范项目 [J]. 电器工业, 2019, (03): 58-60.

[10] 石浪浪. 电气自动化控制中变频调速技术的运用 [J]. 科技风, 2019, (06): 57.