

金属矿山变频器谐波治理技术对电网稳定性的影响研究

李伟明

焦家金矿 山东 烟台 261441

【摘要】：针对金属矿山大量使用变频设备导致的谐波污染问题，本研究重点探讨了有源电力滤波器（APF）、无源滤波器（PPF）及混合滤波等主流治理技术的原理、配置策略与适用场景，并通过仿真与现场测试评估了不同治理方案对电压波动、谐波畸变率及系统谐振的抑制效果。结果表明，合理选择与优化谐波治理技术能显著改善电能质量，降低设备故障率，有效提升矿山电网的运行稳定性与供电可靠性，为矿山电网的智能化改造与安全经济运行提供了理论依据。

【关键词】：金属矿山；变频器；谐波治理；电网稳定性；电能质量

DOI:10.12417/2811-0536.26.08.046

引言

金属矿山其生产过程具有高耗能、高负荷、连续化运行的特点，对供电系统的稳定性与可靠性要求极高。随着矿山智能化、自动化改造的深入推进，变频器作为调速节能、精准控制的核心设备，被广泛应用于提升机、通风机、水泵、破碎机等各类生产机械中。变频器通过改变输出电压的频率与幅值实现电机调速，大幅降低了矿山生产能耗，提升了生产效率与控制精度。然而，变频器属于非线性电力电子设备，其内部整流、逆变环节会产生大量谐波电流，这些谐波注入矿山电网后，会引发一系列电能质量问题，严重威胁电网及用电设备的安全稳定运行。

相较于常规工业电网，金属矿山电网具有结构复杂、负荷波动大、供电半径长、环境恶劣等特殊特性。井下供电系统空间受限，电缆线路密集，谐波在传输过程中易产生放大效应；同时，矿山负荷多为冲击性、非线性负荷，多种负荷叠加后会导致谐波成分更加复杂。因此，深入研究金属矿山变频器谐波治理技术，分析其对电网稳定性的影响，优化治理方案，对保障矿山电网安全经济运行具有重要的现实意义。

1 金属矿山主流谐波治理技术及对比分析

1.1 无源滤波器（PPF）

无源滤波器由电容、电感、电阻等无源元件按一定拓扑结构组成，通过串联或并联在电网中，利用 LC 谐振原理，对特定频率的谐波形成低阻抗通路，使谐波电流被滤波器吸收或旁路，从而减少谐波向电网的注入。PPF 可分为单调谐滤波器、双调谐滤波器与高通滤波器。单调谐滤波器针对单一频率谐波（如 5 次、

7 次）设计，在谐振频率下阻抗最小，滤波效果好；双调谐滤波器可同时抑制两种频率的谐波，结构相对紧凑；高通滤波器主要用于抑制 11 次及以上高次谐波。

1.2 有源电力滤波器（APF）

有源电力滤波器基于电力电子技术，通过检测电网中的谐波电流，利用功率变换器产生与谐波电流大小相等、方向相反的补偿电流，注入电网中抵消谐波电流，从而实现谐波抑制。APF 可分为并联型、串联型及串并联混合型。并联型 APF 通过并联在电网中，主要用于抑制电流谐波，应用最为广泛；串联型 APF 通过串联在电网中，主要用于抑制电压谐波与电压波动；串并联混合型 APF 结合了两者的优势，可同时抑制电流、电压谐波，适用于复杂电能质量问题场景。

1.3 混合滤波技术（PPF+APF）

混合滤波技术结合了 PPF 与 APF 的优势，通过 PPF 抑制含量较高的低次谐波，降低 APF 的容量需求；通过 APF 抑制高次谐波、动态波动谐波及 PPF 无法消除的谐波，同时抑制系统谐振，提升整体滤波效果。混合滤波系统的核心在于协同控制策略，需确保 PPF 与 APF 工作协调一致，避免相互干扰。

2 谐波治理技术仿真分析与参数优化

2.1 仿真模型搭建

仿真软件与参数设置：本研究采用 MATLAB/Simulink 仿真软件，搭建金属矿山电网谐波治理仿真模型，模拟不同治理方案下的谐波抑制效果。仿真模型以焦家金矿主井提升机变频器系统为原型，结合矿山电网实

际参数设置模型参数。电网参数：三相交流电源电压为 10kV，频率为 50Hz，电网阻抗为 $0.1\Omega+j0.5\Omega$ ；变频器参数：额定功率 1000kW，输入电压 10kV，输出电压 0~10kV，开关频率 5kHz，采用 SPWM 调制方式；负载参数：异步电机额定功率 1000kW，额定转速 1480r/min，额定电流 60A；滤波设备参数：PPF 由单调谐滤波器（针对 5 次、7 次谐波）与高通滤波器组成，APF 额定容量 300kVar，混合滤波系统由 PPF（700kVar）与 APF（300kVar）组成。

2.2 无谐波治理场景仿真结果

在无谐波治理场景下，启动仿真模型，运行变频器带动异步电机负载，采集电网侧电流、电压信号，分析谐波特征与电能质量指标。

电流波形分析：电网侧电流波形严重畸变，呈现脉冲状，偏离正弦波，表明变频器产生的谐波对电流波形影响显著。谐波含量分析：通过 FFT 分析，电网侧电流总谐波畸变率（THD）为 18.2%，其中 5 次谐波含量为 8.5%，7 次谐波含量为 6.3%，11 次谐波含量为 2.1%，13 次谐波含量为 1.3%，低次谐波（5 次、7 次）为主要谐波成分，远超国家标准限值。电压质量分析：电网侧电压波形发生畸变，电压总谐波畸变率（THDv）为 5.8%，电压波动值为 $\pm 3.2\%$ ，均超出国家标准规定的 $THDv \leq 5\%$ 、电压波动 $\leq \pm 2\%$ 的限值，表明谐波对电网电压质量造成了严重影响。

2.3 单一滤波技术治理场景仿真结果

（1）PPF 治理场景。接入 PPF 滤波系统后，重新启动仿真模型，采集相关数据并分析。电网侧电流波形畸变程度明显减轻，接近正弦波；谐波含量分析：电流 THD 降至 8.3%，其中 5 次谐波含量降至 2.1%，7 次谐波含量降至 1.8%，低次谐波得到有效抑制，但高次谐波（11 次、13 次）含量变化较小，仍存在一定畸变；电压质量分析：电压 THDv 降至 3.5%，电压波动值降至 $\pm 1.8\%$ ，均满足标准限值。（2）APF 治理场景。接入 APF 滤波系统后，电流波形分析：电网侧电流波形基本恢复为正弦波，畸变程度显著降低；谐波含量分析：电流 THD 降至 2.8%，5 次、7 次、11 次、13 次谐波含量分别降至 0.5%、0.4%、0.3%、0.2%，各次谐波含量均满足国家标准限值；电压质量分析：电压 THDv 降至 1.2%，电压波动值降至 $\pm 0.8\%$ ，电压质量得到大幅改善。

此外，APF 能快速跟踪负荷波动产生的谐波变化，在启动、制动等动态工况下，仍能保持较好的滤波效果有效抑制了系统谐振风险，提升了电网稳定性，APF

滤波精度高、响应速度快，谐波治理效果优异。

2.4 混合滤波技术治理场景仿真结果

接入混合滤波系统（PPF+APF）后，电流波形分析：电网侧电流波形接近正弦波，畸变程度低；谐波含量分析：电流 THD 降至 3.1%，5 次、7 次谐波主要由 PPF 吸收，含量分别降至 0.6%、0.5%，高次谐波由 APF 补偿，含量均低于 0.3%，满足国家标准限值；电压质量分析：电压 THDv 降至 1.5%，电压波动值降至 $\pm 1.0\%$ ，电压质量良好。混合滤波系统在保证滤波效果的同时，降低了 APF 的容量需求，相较于单一 APF，投资成本降低约 30%，运行损耗减少约 15%，性价比显著提升。同时，在动态负荷工况下，混合滤波系统能稳定运行，APF 有效抑制了 PPF 可能引发的谐振风险，系统稳定性良好。

3 谐波治理技术现场测试与效果评估

3.1 现场测试方案设计

（1）测试地点与对象。现场测试选取焦家金矿主井提升机系统与副井水泵房系统，这两个环节均大量使用变频器，谐波污染问题突出，具有典型代表性。测试对象包括变频器输入端、输出端及电网侧的电流、电压信号，同时监测变压器、电机等设备的运行参数，评估谐波治理技术对设备运行及电网稳定性的影响。

（2）测试仪器与参数。测试采用 FLUKE 435 II 电能质量分析仪，该仪器可实时采集电流、电压、谐波畸变率、功率因数等电能质量指标，测量精度高、响应速度快，满足现场测试需求。测试参数设置：采样频率为 10kHz，采样时间为 10min，测量范围为电流 0~1000A，电压 0~15kV，谐波分析次数为 1~50 次。

（3）测试步骤。①在无滤波设备接入情况下，启动变频器带动负载运行，通过电能质量分析仪采集电网侧电流、电压信号，记录谐波畸变率、电压波动等指标，同时记录设备运行参数；②分别接入 PPF、APF 及优化后的混合滤波系统，重复上述测试过程，采集并记录相关数据；③对比不同测试场景下的数据，评估各治理方案的谐波抑制效果及对设备运行、电网稳定性的影响。

3.2 现场测试结果与分析

3.2.1 电能质量指标测试结果

不同治理方案下的电能质量指标测试结果如下表所示，测试数据为多次测量的平均值。

表 1 电能质量指标测试结果

治理方案	电流	电压	电压波动	功率因
------	----	----	------	-----

	THD(%)	THDv(%)	(±%)	数
无治理	17.8	5.6	3.0	0.82
PPF 单一治理	8.1	3.4	1.7	0.92
APF 单一治理	2.7	1.1	0.7	0.98
优化后混合治理	2.8	1.2	0.8	0.97

由测试结果可知，三种治理方案均能不同程度改善电能质量：无治理时，电流 THD 与电压 THDv 均远超国家标准限值，功率因数较低；PPF 单一治理能有效降低低次谐波含量，提升功率因数，但高次谐波抑制效果有限；APF 单一治理谐波抑制效果最佳，功率因数接近 1.0；优化后混合治理的滤波效果与 APF 接近，功率因数较高，能满足矿山电网电能质量要求。

3.2.2 设备运行参数测试结果

不同治理方案下，电机与变压器的运行参数测试结果如下表所示。

表 2 电机与变压器的运行参数测试结果

治理方案	电机绕组 温度(℃)	电机振动速 度(mm/s)	变压器 油温(℃)	设备故 障率(‰)
无治理	85	4.2	78	8.5
PPF 单一治理	72	3.1	68	4.2
APF 单一治理	65	2.3	62	1.8
优化后混合治理	66	2.4	63	2.0

由测试结果可知，谐波治理技术能有效改善设备运行状态，APF 单一治理与优化后混合治理的效果接近，均能有效提升设备运行稳定性，延长设备使用寿命。

参考文献：

[1] 赖昭琦.变频器在金属非金属矿山机电设备中的应用探讨[J].中国设备工程,2020,(14):208-209.

[2] 师进昌.非防爆矿用变频器在有色金属矿山的应用[J].中国金属通报,2020,(03):234-235.

[3] 肖慧儒,施海斌,张贵福,何方金,刘海峰,李树青.金属矿山主要装备节能降耗途径研究与应用(4)[J].设备管理与维修,2016,(10):59-62.

[4] 变频器、冶金矿山机械、电力电子及机床供应商[J].机电产品市场,2007,(05):83-89.

[5] 秦立峰.基于 6se70 变频器的控制系统在金属冶炼中的应用[J].世界有色金属,2020,(12):17-18.

[6] 刘东.变频器在冶金轧制行业中的应用研究[J].世界有色金属,2019,(12):18-19.

[7] 陈红晓.变频器大容量滤波电容器的研制[D].电子科技大学,2010.

3.2.3 电网稳定性测试结果

通过连续 72 小时试运行测试，优化后混合滤波系统运行稳定，无故障发生，能实时跟踪负荷变化，快速补偿谐波电流，确保电网电能质量与稳定性始终满足要求。

3.3 测试结果与仿真结果对比验证

将现场测试结果与仿真结果进行对比，验证仿真模型的可靠性与准确性，具体对比指标如下表所示。

指标	仿真结果	现场测试结果	误差(%)
电流 THD(%)	2.9	2.8	3.4
电压 THDv(%)	1.3	1.2	8.3
电压波动(±%)	0.9	0.8	12.5

4 结论

本研究围绕金属矿山变频器谐波治理技术对电网稳定性的影响展开，通过理论分析、仿真模拟与现场测试，得出以下主要结论：金属矿山变频器在整流、逆变环节产生大量高次谐波，具有成分复杂、动态波动、易放大等特征，主要以 5 次、7 次低次谐波为主，谐波注入电网后会导致电压畸变、设备损耗增加、保护装置误动作，甚至引发系统谐振，严重降低电网稳定性与经济性。

三种主流谐波治理技术各有优劣：PPF 成本低、可靠性高，但滤波效果有限，易与电网谐振；APF 滤波精度高、响应速度快，能抑制系统谐振，但成本较高；混合滤波技术结合两者优势，通过 PPF 抑制低次谐波，APF 补偿高次谐波与动态谐波，兼顾滤波效果与经济性，是金属矿山谐波治理的理想选择。