

Research on the Mechanism of Motor Insulation Aging and Protection Measures under High Voltage Inverter Power Supply

Xiaobo Liu

Guoneng Chongqing Wanzhou Electric Power Co., Ltd., Chongqing, 404027, China

Abstract

High-voltage frequency converters are extensively utilized in industrial applications. The high-frequency harmonics and voltage distortion generated during power supply can accelerate motor insulation aging, posing risks to equipment safety and stable operation. This study elucidates the core mechanisms of motor insulation aging in such scenarios and proposes targeted prevention technologies along with end-to-end lifecycle protection solutions. By analyzing three primary aging triggers—high-frequency harmonics, voltage distortion, and the synergistic effects of environmental factors and electrical stress—the research details critical mitigation techniques including harmonic suppression, optimization of insulation materials and structural design, and voltage stress buffering. A comprehensive protection framework covering design, operation, and maintenance is established, providing technical support to enhance motor insulation reliability and prolong service life under high-voltage frequency converter power supply.

Keywords

high-voltage inverter; motor insulation aging; aging mechanism; protective measures; full life cycle

高压变频器供电下电机绝缘老化机理与防护措施研究

刘晓波

国能重庆万州电力有限责任公司，中国 · 重庆 404027

摘 要

高压变频器在工业领域应用广泛，供电产生的高频谐波、电压畸变易引发电机绝缘老化，威胁设备安全稳定运行。本文揭示该场景下电机绝缘老化核心机理，提出针对性防控技术与全生命周期防护方案。分析高频谐波、电压畸变及环境与电应力协同作用三大老化诱因，阐述谐波抑制、绝缘材料与结构优化、电压应力缓冲等关键防控技术，构建设计、运行、检修全流程防护体系，为提升高压变频器供电下电机绝缘可靠性、延长使用寿命提供技术支撑。

关键词

高压变频器；电机绝缘老化；老化机理；防护措施；全生命周期

1 引言

工业自动化与节能技术快速发展，高压变频器凭高效调速、能耗优化优势，广泛应用于电力、冶金、化工等领域大型电机驱动系统。其正弦脉冲宽度调制模式（SPWM）产生的高频谐波、电压畸变等特性，加剧电机绝缘老化，成为引发故障、缩短服役寿命的核心隐患，威胁生产连续性与安全性。当前相关防控研究存在针对性不足、全流程防护体系不完善等问题，本文探究该场景下电机绝缘老化机理，提出系统性防控技术与全生命周期防护方案，为电机安全稳定运行提供技术保障。

2 高压变频器原理

高压变频器采用移相级联式，采用多个独立功率单元串联的方式来实现高压输出，输入电压经过二次侧多重化的隔离变压器移相降压后给功率单元供电，功率单元为三相输入、单相输出的交—直—交 SPWM 电压源型逆变器结构（如

图 1、2）。将相邻功率单元的输出端串联起来，形成 Y 联结结构，实现变压变频的高压直接输出，供给高压电动机。

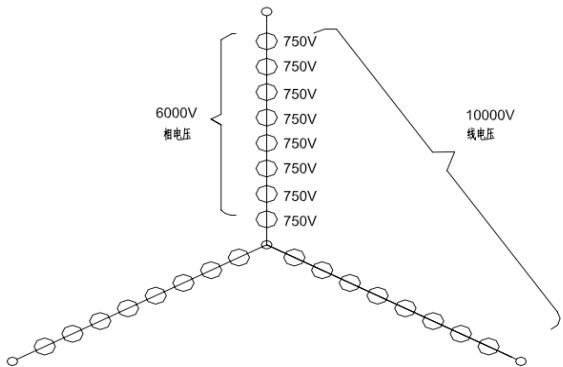


图1 八级功率单元串联叠加

图 1

每个功率单元分别由 移相变压器的一组二次绕组供电，

功率单元之间及变压器二次绕组之间相互绝缘。功率单元主要由三相全桥整流器、滤波电容器组、IGBT 逆变桥构成（如图 2），同时还包括功率器件驱动、保护、信号采集、光纤通讯等功能组成的控制电路。通过控制 IGBT 的工作状态，输出 SPWM 电压波形。当 Q1、Q4 同时闭合时，电机上的电压为 A 点高，B 点低；Q2、Q3 同时闭合时，则电机上的电压为 A 点低 B 点高。这样和连续不断地交替开合，在电机两端就形成了一交变电压，也就是交流电。10kV 高压变频器每相 8 个功率单元经过移相串联而成，电压叠加原理类同于“电池组叠加”技术，以如图 1 所示，每个功率单元输出交流有效值为 750V，相电压即达到 6kV，线电压则为 10kV。

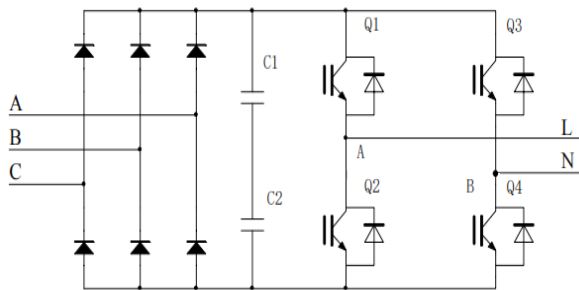


图2 功率单元主电路结构

图 2

3 高压变频器供电下电机绝缘老化的核心诱因

高压变频器供电下电机绝缘老化的核心诱因主要包括三方面协同作用的因素。高频谐波源于变频器开关动作，其频率远高于电源基波，与基波叠加形成复杂电场，加剧电机绝缘介质内部电场畸变，局部场强超标引发初始电击穿通道，同时增强极化滞后效应导致介质损耗升温，通过“电场畸变-温升加速-性能衰减”连锁反应扩大缺陷，最终造成整体性电击穿^[1]。高压变频器 SPWM 调制带来的电压畸变，会引发过电压与电压陡度增大，使绝缘层天然存在的微小缺陷处局部电场反复突破临界值，触发局部放电，电子撞击与腐蚀性物质生成持续侵蚀绝缘，长期累积导致绝缘层减薄失效。此外，高温、湿度、粉尘等环境因素与电应力形成协同作用，高温加剧介质损耗与温升，受潮易诱发局部放电，粉尘放大电场畸变，三者叠加显著加速绝缘性能退化，大幅缩短绝缘寿命^[2]。

4 高压变频器供电下电机绝缘老化的关键防控技术

4.1 谐波抑制与供电波形优化技术

高压变频器的 10kV 移相变压器的 24 个二次绕组，采用延边三角形联结。分为 8 个不同相位，互差 7.5° 电角度，

形成 48 脉波的二极管整流电路结构，所以理论上 47 次以下的谐波都可以消除，输入电流波形接近正弦波，总的谐波电流失真低于 1%，电压失真率低于 3%。此项设计主要优化了电源侧的输入电流波形，输出波形非常接近正弦波。

4.2 供电频率自适应调节与波形畸变校正算法优化

供电频率自适应调节技术借内置传感器实时采集电源基波频率信号，结合电机负载变化动态调整变频器载波频率与输出频率，确保供电频率与电机额定频率一致^[3]。波形畸变校正算法依托模型预测控制或自适应 PID 策略，分析电压畸变程度（如 THD），优化 PWM 触发脉冲序列，修正电压过冲、陡度及相位偏差。该技术实时补偿开关动作与负载波动引发的畸变，让输出电压趋近理想正弦波，减少局部放电对电机绝缘的刺激，提升供电稳定性与电机效率，与滤波技术形成协同优化效果。

4.3 绝缘材料升级与结构强化技术

4.3.1 耐高频电应力改性绝缘材料如纳米复合环氧树脂筛选

耐高频电应力改性绝缘材料筛选以高压变频器高频工况为核心场景，重点针对纳米复合环氧树脂等改性材料开展系统性测试。筛选过程聚焦击穿强度、介质损耗因数及耐局部放电性能三大关键指标，调整纳米粒子种类、粒径与掺杂比例，优化材料内部微观结构，降低高频电应力下的极化损耗。需验证材料在长期高温与高频交替环境中的老化抵抗能力，确保抵御谐波引发的电场畸变与温升影响，避免分子链断裂或性能衰减，最终筛选出兼具高电气强度、低损耗与优良热稳定性的材料，为电机绝缘系统提供可靠基础保障。

4.3.2 电机绕组主绝缘+辅助绝缘多层结构设计

电机绕组主绝缘与辅助绝缘多层结构设计需兼顾电气隔离与缺陷抑制功能，主绝缘层选用耐电应力性能优异的改性材料，主要承担高压隔离任务，厚度需根据电机额定电压与运行电应力计算，确保突破临界场强。辅助绝缘层采用柔韧性强、贴合性好的薄层材料，紧密包裹主绝缘层表面及绕组间隙，填补主绝缘可能存在的微小孔隙与缺陷。两层结构通过协同设计形成互补，主绝缘提供核心防护，辅助绝缘抑制局部放电产生，同时优化层间界面结合状态，减少电场集中现象，提升整体绝缘结构的抗老化能力与可靠性。

4.3.3 绝缘层均匀涂覆与高温固化工艺优化

绝缘层均匀涂覆与高温固化工艺优化从涂覆方式与固化参数两方面入手。涂覆阶段用高精度浸涂或喷涂技术，控制涂覆速度与压力，让绝缘材料均匀覆盖绕组表面，避免厚度不均、气泡或流挂现象，保障绝缘层致密性^[4]。高温固化过程调控升温速率、固化温度与保温时间，依绝缘材料特性设定梯度升温程序，避免温度骤变产生内应力或裂纹。优化固化工艺可促进材料分子充分交联，提高绝缘层与绕组附着力，降低内部残余应力，增强绝缘层机械强度与电气性能，

减少工艺缺陷对绝缘老化的影响。

4.4 电压应力缓冲与局部放电抑制技术

4.4.1 尖峰电压吸收器与 RC 缓冲电路拓扑设计

尖峰电压吸收器与 RC 缓冲电路拓扑设计针对高压变频器输出的电压陡度与过冲特性，优化电路元件布局与参数配比。拓扑结构中，吸收器选用响应速度快的金属氧化物压敏电阻或碳化硅器件，RC 缓冲电路合理匹配电阻与电容值，确保尖峰电压产生时快速导通泄放能量。电路并联在变频器输出端与电机绕组之间，抑制电压上升沿陡度、吸收过冲电压，降低局部电场强度突变，避免绝缘介质因瞬时高压引发的电击穿风险，减少电路寄生参数对缓冲效果的影响，保障电压应力稳定在绝缘耐受范围内。

4.4.2 局部放电超高频在线监测与阈值预警系统搭建

局部放电超高频在线监测与阈值预警系统以超高频传感器为核心，传感器贴近电机绕组端部与绝缘薄弱部位布置，捕捉局部放电产生的超高频电磁信号。系统经信号放大、滤波与数字化处理，提取放电脉冲的幅值、频次等特征参数，结合绝缘老化规律设定分级预警阈值。监测数据超出阈值时，系统实时触发预警，同步记录放电位置与强度信息，为评估绝缘状态提供数据支撑，实现对局部放电累积损伤的早期干预，避免绝缘缺陷进一步扩大引发故障。

4.4.3 绕组电场畸变优化与屏蔽层布置

绕组槽内和出槽口端部电场畸变优化借仿真分析明确电场集中区域，用弧形过渡设计优化绕组端部形状，减少棱角与间隙，让电场分布更均匀。高压电机绕组在定子槽内绝缘层表面刷中电阻半导体绝缘漆，在定子绕组出槽口端部刷高电阻半导体绝缘漆漆，形成防晕层，防晕层需与绝缘层紧密结合，电机定子绕组与定子槽紧密贴合且电气隔离，避免形成新的电场畸变点，凭结构优化与屏蔽防护的协同，降低电场畸变对绝缘的局部放电刺激，提升整体绝缘抗老化能力。

5 高压变频器供电下电机绝缘老化的全生命周期防护方案

电机绝缘全生命周期防护需贯穿设计、运行、检修三个阶段。设计阶段结合高压变频器供电特性，按额定电压精准匹配绝缘参数，10kV 电机采用优化纯环氧体系，单边主绝

缘 1.8mm、匝间绝缘 0.40mm，通过 1.7 倍额定电压起晕测试，选用电击穿强度 8-38kV/mm 的耐高温材料，符合行业标准并预留绝缘裕度。运行阶段搭建多维度监测体系，重点监测局部放电，设定 -50dBm 的 UHF 信号预警阈值，同步采集超声波、地电波数据，动态调整变频器载波频率与电机运行温度，Nomex®材料可耐受 220℃长期运行，实现预测性维护。检修阶段按量化标准评估，500V 以下电机修复后冷态绝缘电阻不低于 0.5MΩ，高压电机需大于 10MΩ，采用 2500V 兆欧表测量，通过 VPI 工艺与击穿强度 30kV/mm 的 MPI 树脂修复，验证介电强度确保绝缘性能达标。

表 1 10kV 电机设计阶段绝缘适配与冗余设计关键参数表

参数类别	具体参数指标
单边主绝缘厚度	1.8 mm
匝间绝缘厚度	0.40 mm
起晕电压测试标准	1.7 倍额定电压
电老化寿命	350 小时以上
绝缘材料电击穿强度	8-38 kV/mm

6 结语

高压变频器供电下电机绝缘老化因高频谐波、电压畸变与环境因素协同作用导致，制约工业设备安全运行。本文剖析核心诱因，提出谐波抑制、绝缘优化、电压应力缓冲等防控技术，构建设计 - 运行 - 检修全生命周期防护体系，形成“机理 - 技术 - 方案”完整解决方案。研究为该场景绝缘老化难题提供技术支撑，助力降低故障、延长设备寿命，保障相关行业生产连续性与经济性，未来可结合智能化监测提升防护效能。

参考文献

[1] 廖俊捷.高压电机端部绕组相间放电缺陷分析与处理[J].电工技术,2024,(17):159-162.

[2] 张晨.高压电机绝缘故障的原因与对策分析[J].电子技术,2022,51(11):270-271.

[3] 李政达,张旭浩,江周余,等.基于开关振荡电流的交流电机主绝缘在线监测[J].机车电传动,2024,(02):126-131.

[4] 尚尔发.高压电机绝缘浸渍漆热老化绝缘性能及提升方法研究[J].合成材料老化与应用,2021,50(04):47-49.