

风力发电机组发电机轴电流抑制技术优化与工程应用研究

蒋艳敏

大唐(内蒙古)能源开发有限公司赤峰新能源事业部

DOI:10.32629/etd.v6i11.17527

[摘要] 轴电流的产生包括差模和共模两种机制,传播特性可通过建模分析。抑制技术分被动、主动和混合三类,各有优化策略。工程应用中,抑制技术需评估实施可行性,考虑成本、空间和维护因素;要适应多工况,针对变速、电网波动、温度变化优化;还要量化评估抑制效果,通过在线监测、轴承损伤评估和可靠性验证。本文围绕轴电流的产生机理、传播特性、抑制技术及工程应用关键问题展开研究,提供系统解决方案。

[关键词] 风力发电机组发电机轴; 轴电流抑制技术; 工程应用

中图分类号: TM315 文献标识码: A

Research on the Optimization of Shaft Current Suppression Technology and Its Engineering Application for Wind Turbine Generators

Yanmin Jiang

Chifeng New Energy Business Unit, Datang (Inner Mongolia) Energy Development Co., Ltd.

[Abstract] The generation of shaft current includes two mechanisms, differential mode and common mode, and its propagation characteristics can be analyzed through modeling. Suppression technologies are categorized into passive, active, and hybrid types, each with its own optimization strategies. In engineering applications, the feasibility of implementing suppression technologies must be evaluated, considering factors such as cost, space, and maintenance. They must adapt to multiple operating conditions and be optimized for scenarios like variable speed, grid fluctuations, and temperature variations. Additionally, the effectiveness of suppression needs to be quantitatively assessed through methods such as online monitoring, bearing damage evaluation, and reliability verification. This paper focuses on the generation mechanism, propagation characteristics, suppression technologies, and key issues in the engineering application of shaft current, providing systematic solutions.

[Key words] Wind Turbine Generator Shaft; Shaft Current Suppression Technology; Engineering Application

引言

在电机运行过程中,轴电流问题严重影响系统稳定性与可靠性,其产生机理复杂,传播特性多样,涵盖差模与共模轴电流。为应对这一挑战,轴电流抑制技术不断发展,包含被动、主动及混合抑制技术。这些技术从理论走向工程应用时,面临成本控制、空间限制、多工况适配等诸多难题。本文将深入剖析轴电流产生机理与传播特性,探讨各类抑制技术及其优化策略,并针对工程应用关键问题提出解决方案。

1 轴电流产生机理与传播特性分析

1.1 差模轴电流形成机制

差模轴电流的形成核心在于电机内部磁通不平衡,这种不平衡会直接导致轴与机壳之间形成差模电压,为电流流通提供必要条件。磁通不平衡的主要诱因包括定子铁心磁化特性的天

然差异,以及电机装配或运行过程中出现的气隙不均匀性,这两类因素共同作用引发磁链不对称,打破电机内部电磁平衡状态。差模电流的流通遵循特定闭合回路,电流从轴出发,流经前轴承后传导至机壳,再通过后轴承重新回流至轴,形成完整的电流环路,该过程中电流的流动会受到轴承结构、机壳导电性能等因素的影响。

1.2 共模轴电流形成机制

共模轴电流的产生与变频器的调制方式密切相关,变频器采用的PWM调制技术会产生高频共模电压,这种电压通过电磁耦合作用影响电机内部的电位分布。转子绕组与地之间会因这种耦合作用形成共模电压,而电机内部存在的杂散电容网络为共模电流提供了传导通道,杂散电容的分布与容量大小会直接影响电流的传导效率^[1]。共模电流的流电路径呈现特定环路特征,

电流从转子绕组流出, 经过轴承传导至机壳, 再通过变流器的地线完成回路闭合, 高频特性使得这类电流在传播过程中容易受到寄生参数的干扰。

1. 3轴电流传播特性建模

轴电流传播特性的研究需要借助建模分析方法, 等效电路模型是常用的核心工具, 通过构建包含差模与共模分量的等效电路, 能够实现对两种电流分量的分离分析, 明确各自的传播规律。寄生电容作为关键参数, 其数值变化会对轴电流的幅值与频率特性产生显著影响, 需要通过理论分析与实验测试相结合的方式确定其影响规律。由于轴电流的传播涉及电磁、结构等多个物理场的相互作用, 多物理场耦合仿真成为验证传播路径的重要手段, 通过仿真能够模拟复杂工况下电流的传播过程, 验证理论分析结果的准确性, 为后续的抑制措施设计提供可靠依据。

2 轴电流抑制技术分类与优化策略

2.1 被动抑制技术优化

被动抑制技术以阻断轴电流通路、削弱传播条件为核心, 通过结构优化、部件升级与辅助装置配置, 提升系统自身抗干扰能力, 无需额外主动控制逻辑即可发挥作用。绝缘轴承优化的关键在于实现陶瓷材料绝缘特性与机械性能的精准平衡, 陶瓷材料具备优异的电气绝缘性能, 可有效切断电流通过轴承的传导路径, 同时需通过材料配方调整与结构设计, 确保其具备足够的机械强度、耐磨性能与运转适配性, 满足电机高速旋转、负载波动等复杂工况下的使用要求, 避免因机械性能不足导致的轴承损坏或运行异常。接地系统改进聚焦于降低电流传导阻抗, 通过优化碳刷的接触形态与面积分布, 提升碳刷与转轴的接触稳定性, 减少接触电阻带来的电位偏移与电流损耗, 同时配置低阻抗接地电阻, 构建高效的电流泄放通道, 加速轴电流向地传导, 避免电荷积累引发的轴电压升高与电流击穿风险。屏蔽电缆应用针对高频共模电流的传播特性, 采用多层屏蔽结构设计, 通过合理选择屏蔽层材质、优化层间间距与缠绕方式, 强化对高频电磁信号的隔离与衰减作用, 减少共模电流通过电缆的耦合传导, 降低外部电磁干扰对电机系统的影响, 同时提升系统自身的电磁兼容性, 阻断高频共模电流的传播路径。

2.2 主动抑制技术优化

主动抑制技术通过主动干预轴电流产生的源头环节, 利用控制策略调整、专用装置设计与参数优化, 从根本上降低轴电流的幅值与产生概率, 抑制效果更具针对性与可控性。变流器控制策略优化的核心是通过多电平PWM调制技术改进, 调整开关器件的导通时序与关断逻辑, 合理分配电压输出波形的电平等级, 从而降低共模电压的峰值与变化速率, 减少因电压突变引发的电磁耦合效应, 从源头抑制共模轴电流的产生, 该优化需兼顾调制效率与抑制效果, 确保电机输出性能不受显著影响。共模滤波器设计的关键在于材料选型与阻抗特性匹配, 纳米晶磁环材料因具备优异的高频磁导率与阻抗特性, 成为滤波器核心部件的优选, 通过优化磁环的尺寸参数、绕线匝数与绕制方式, 使滤波器在高频段形成高阻抗特性, 与系统阻抗实现精准匹配, 增强对高

频共模电流的吸收与衰减能力, 高效阻断共模电流的传播路径, 同时减少对正常工作信号的影响^[2]。杂散电容参数调整聚焦于削弱电流传导通道, 通过在转子绕组与铁心间增设静电屏蔽结构, 优化屏蔽层的材质选择、厚度设计与布置方式, 调整转子绕组与铁心间的杂散电容数值与分布状态, 降低共模电压通过杂散电容网络的传导效率, 从传播路径上抑制轴电流的形成, 该优化需结合电机内部结构空间, 避免影响其他部件的装配与运行。

2.3 混合抑制技术集成

混合抑制技术整合被动抑制与主动抑制的优势特性, 通过多技术协同、多频段覆盖与系统级优化, 构建全方位、深层次的轴电流抑制体系, 适用于复杂工况下多类型、多频率轴电流的综合抑制。被动-主动技术协同作用机制的核心是实现不同技术的优势互补, 绝缘轴承从物理路径上阻断电流通过轴承的传导, 共模滤波器从源头降低共模电压的幅值, 两者联合应用时, 既切断已有轴电流的流通通道, 又抑制新的轴电流产生, 形成“源头抑制+路径阻断”的双重防护, 显著提升整体抑制效果, 协同过程中需确保各技术参数匹配, 避免相互干扰。多频段抑制策略针对轴电流在不同频段的传播特性差异, 进行精准的频段划分与技术适配, 低频段轴电流以差模分量为主, 采用接地电阻实现电荷的有效泄放, 避免差模电流积累引发的设备损伤; 高频段轴电流以共模分量为主, 利用磁环滤波的高频高阻抗特性衰减共模电流, 通过明确频段划分与技术分工, 确保在全频率范围内都能实现高效抑制, 覆盖电机运行过程中不同工况下的轴电流特性。系统级优化强调整体角度出发, 开展发电机-变流器-轴承系统的整体阻抗匹配设计, 综合考虑各部件的电气参数、结构特性与相互作用关系, 通过调整系统阻抗分布状态, 使发电机、变流器、轴承及辅助装置形成协调统一的抑制体系, 避免单一部件优化引发的系统阻抗不匹配问题, 同时兼顾抑制效果与系统运行效率, 实现对轴电流的全方位、深层次抑制, 保障整个电机系统的稳定运行。

3 工程应用关键技术问题与解决方案

轴电流抑制技术的工程落地, 不仅需要突破技术本身的性能瓶颈, 更要应对成本控制、空间限制、维护需求等现实挑战, 同时需适配复杂多变的运行工况, 建立科学有效的效果评估体系。从实施可行性、多工况适配到效果量化, 三个维度相互关联、层层递进, 构成完整的工程应用技术体系。通过针对性解决各环节关键问题, 可实现抑制技术从理论设计到实际应用的高效转化, 既保障技术性能的充分发挥, 又兼顾工程应用的经济性与便利性, 为电机系统的长期稳定运行提供可靠保障。

3.1 抑制技术实施可行性评估

抑制技术的工程可行性评估需综合权衡成本、空间与维护三大核心要素, 构建兼顾技术效果与实际应用条件的方案。成本效益分析需突破单一采购成本对比的局限, 聚焦绝缘轴承与普通轴承的全寿命周期成本核算, 不仅涵盖初始购置费用的差异, 还需系统纳入运行阶段的维护频次、更换成本、停机损失, 以及因轴电流损伤导致的间接损耗等隐性支出。通过全周期成本的

精细化核算, 清晰呈现绝缘轴承在延长设备寿命、减少故障停机等方面的长期经济性, 为技术选型提供全面的数据支撑。空间布局约束是工程实施的核心难点, 滤波器抑制装置的安装位置直接影响机组整体结构的合理性与运行安全性, 需结合电机、变频器的现有结构尺寸与装配空间, 开展装置的小型化、集成化设计, 在确保抑制性能不受影响的前提下, 最大限度压缩安装空间占用, 避免对机组原有结构进行大规模改动, 降低装配难度与结构干涉风险, 保障装置与机组的高度适配^[3]。维护便利性设计聚焦于降低后期运维强度与成本, 可拆卸式磁环滤波器的快速更换设计是关键优化方向, 通过采用模块化拆分结构、标准化连接接口与便捷锁紧机制, 简化滤波器的拆卸、更换与重装流程, 减少维护过程中对机组正常运行的干扰, 缩短停机维护时间, 提升运维效率, 同时降低对运维人员专业技能的要求, 减少人工成本投入。

3.2 多工况适应性优化

电机系统的运行工况受负载、电网、环境等多种因素影响, 轴电流的幅值、频率等特性会随工况动态变化, 因此抑制技术需具备强适应性, 通过动态优化策略应对复杂工况挑战。针对变速运行工况, 轴电流幅值会随转速升高或降低呈现显著波动, 传统固定参数的抑制方案难以兼顾全转速区间的抑制效果, 需建立转速与轴电流特性的关联模型, 开发动态抑制策略, 通过实时监测转速信号, 精准识别轴电流的变化趋势, 动态调整抑制装置的关键参数或变频器的控制逻辑, 确保在低速、额定转速、高速等不同区间都能实现对轴电流的精准抑制, 避免因转速变化导致抑制效果衰减或失效。电网电压波动会通过变频器耦合引发共模电压不稳定, 进而加剧轴电流产生, 需强化共模电压抑制技术对电网谐波的抗干扰能力, 通过优化共模滤波器的频率响应带宽与阻抗匹配特性, 提升对不同频次谐波的衰减能力, 同时改进控制算法的鲁棒性, 增强算法对电压波动的自适应调节能力, 减少电网电压畸变对抑制效果的影响, 确保在电网电压偏高、偏低或谐波含量超标的工况下, 抑制技术仍能稳定发挥作用^[4]。环境温度变化会直接影响轴承润滑油膜的厚度与绝缘性能, 导致油膜击穿电压发生波动, 改变轴电流的导通条件, 需建立温度补偿机制, 通过温度传感器实时监测环境温度与轴承温度, 结合润滑油膜击穿电压的温度特性曲线, 动态调整相关抑制参数, 或选用低温稳定性好、击穿电压温度系数低的润滑材料, 确保润滑油膜

的绝缘性能在高温、低温等极端环境下保持稳定, 避免因温度变化引发轴电流抑制失效。

3.3 抑制效果量化评估方法

抑制技术的应用效果需要通过科学、精准的量化评估方法进行验证, 为技术优化、方案调整与工程决策提供可靠依据, 评估体系需覆盖电流状态监测、部件损伤评估与长期可靠性验证三个核心层面。轴电压与电流的在线监测系统是评估的基础支撑, 采用高频采样技术可实现对轴电压、电流信号的高分辨率采集, 捕捉高频分量与瞬时波动特征, 结合实时分析技术快速处理采集到的海量数据, 提取电流幅值、频率、峰值因子等关键特征参数, 实时判断抑制技术的运行状态与抑制效果, 及时发现抑制失效、效果衰减等异常情况, 为运维人员提供预警信息。轴承作为轴电流损伤的主要部件, 其损伤程度直接反映抑制技术的保护效果, 需建立标准化的轴承损伤评估指标体系, 以电蚀坑深度、分布密度作为核心量化参数, 通过超声波检测、表面形貌扫描等专业检测技术, 精准获取轴承滚道、滚动体表面的损伤数据, 构建量化评估模型, 将损伤参数与抑制效果直接关联, 直观反映抑制技术对轴承的保护作用, 为技术优化提供靶向依据。

4 结束语

轴电流产生机理复杂, 传播特性多样, 抑制技术需多维度优化。被动、主动及混合抑制技术各有优势, 工程应用中要综合评估实施可行性, 兼顾成本、空间与维护; 优化多工况适应性, 应对复杂运行条件; 建立量化评估方法, 准确验证抑制效果。只有全方位解决这些问题, 才能实现轴电流抑制技术从理论到实际的高效转化, 保障电机系统长期稳定运行, 推动相关领域技术发展与应用。

[参考文献]

- [1] 李志刚. 风力发电机轴电流抑制探讨[J]. 机电工程技术, 2020, 49(01): 200-202.
- [2] 李静航. 风力发电机轴电流抑制探讨[J]. 电力设备, 2020(3): 2.
- [3] 秦生升. 控制技术在风力发电系统中的应用[J]. 集成电路应用, 2022, 39(01): 98-99.
- [4] 关宝峰. 轴电流对风力发电机危害及预防措施[J]. 时代农机, 2017, 44(09): 48+50.