

电机绝缘系统老化机理及在线监测技术研究进展

段建国

山西焦化股份有限公司 山西 临汾 041600

摘要: 电机绝缘系统是决定电机运行可靠性与使用寿命的关键组成部分。在电、热、机械、环境等多应力联合作用下,绝缘材料性能逐渐劣化,最终导致绝缘失效。本文系统综述了电机绝缘系统的老化机理,包括热老化、电老化、机械老化及环境老化四种基本类型及其协同效应。在此基础上,重点介绍了近年来发展的在线监测技术,涵盖局部放电监测、泄漏电流检测、绝缘电阻与极化指数测量、介质损耗因数监测、回复电压法与极化去极化电流法、频域介电谱技术以及新型智能传感与数据驱动方法。通过对各技术原理、适用范围及优劣的比较分析,本综述旨在为电机绝缘状态评估与预测性维护提供理论参考。

关键词: 电机绝缘;老化机理;在线监测;局部放电;介电响应;状态评估

引言

电机作为工业驱动系统的核心设备,其运行安全直接关系到生产效率与经济效益。绝缘系统是电机结构中最薄弱的环节之一,电机正面临更高的电压等级、更复杂的工况以及更紧凑的结构设计,这对绝缘系统的长期可靠性提出了严峻挑战。传统的绝缘检测多采用离线方式,需要停机并进行耐压试验或介质损耗测试,不仅影响生产连续性,而且无法反映电机在真实运行工况下的绝缘状态演变过程。因此,发展能够在电机运行过程中实时监测绝缘劣化进程的技术手段,成为电气工程领域的研究热点。近五年来,传感器技术、信号处理算法以及人工智能方法的进步,极大地推动了在线监测技术的实用化进程。本文从老化机理出发,系统梳理了电机绝缘系统的主要失效模式,继而综述了当前主流的在线监测技术及其最新进展,旨在为相关研究与应用提供系统的知识框架。

1 电机绝缘系统老化机理

电机绝缘系统通常由电磁线绝缘、槽绝缘、相绝缘、浸渍漆及引接线绝缘等部分组成,其材料多为有机高分子聚合物(如聚酯、聚酰亚胺、聚酰胺酰亚胺等)与无机填料复合体系。在长期运行过程中,绝缘材料承受多种应力耦合作用,发生物理或化学变化,导致绝缘性能不可逆下降。

1.1 热老化机理

热老化是电机绝缘最主要的劣化形式。电机运行中铜耗、铁耗及杂散耗转化为热量,使绕组温度升高。根据阿伦尼乌斯模型,绝缘材料的热寿命与绝对温度的倒数呈指数关系,温度每升高8至10摄氏度,热寿命约缩短一半。热老化的微观机制包括:聚合物分子链的热裂

解、交联及氧化反应。具体表现为:分子量分布变宽,低分子量产物(如水、一氧化碳、二氧化碳及有机酸)逸出;材料内部产生微孔和裂纹;玻璃化转变温度下降;介电常数与介质损耗因数上升。对于变频电机,高频脉冲电压引起的高频介电损耗会加剧局部过热,形成热积累效应。热老化程度的表征参数包括:绝缘电阻的下降、介质损耗角正切值的增大、击穿场强的降低以及拉伸强度的衰减。基于Arrhenius方程的热寿命图仍然是工程上估算绝缘剩余寿命的基本工具,但实际工况中温度波动与温度梯度使得精准预测复杂化。

1.2 电老化机理

电老化主要表现为局部放电、电树枝化和电化学树化三种形式。局部放电是电老化的主要驱动力。在电机绕组内,气隙、杂质或导体尖锐边缘处的电场集中会使局部区域发生气体击穿,产生持续的微放电。每次局部放电事件中,高能电子(能量可达10电子伏特以上)轰击绝缘表面,使聚合物分子链断裂;同时,放电产生的臭氧、氮氧化物等活性物质与材料发生化学反应,加速劣化。局部放电的长期作用会在绝缘表面形成白色粉状或树枝状痕迹,最终导致贯穿性击穿。电树枝化是固体绝缘内部因局部放电而生长出的分形通道。在交流电场下,电树枝从起始点向对电极逐步扩展,其生长速率与电压幅值、频率及环境温度密切相关。变频电机中,电压上升沿陡峭、重复频率高的脉冲电压会在绕组匝间形成过电压分配不均,显著增强电树枝引发的概率^[1]。电化学树化则是在水分、离子污染物和电场共同作用下发生的过程。水分子渗入绝缘微裂纹后,在电场作用下水解产生酸性和碱性物质,侵蚀聚合物基体,形成连通导电路径。这种老化形式在湿热环境运行的电机中尤为突出。

1.3 机械老化机理

机械应力来源于电机运行中的多种因素：电磁力引起的绕组振动、转子动平衡不良造成的周期性冲击、热胀冷缩产生的界面应力、以及制造或装配过程中的残余应力。此外，对于大型高压电机，启停过程中的热应力循环也会导致绝缘层与导体之间或不同绝缘层之间的界面剥离。机械老化的宏观表现是绝缘结构的完整性丧失：绕组松动、端部绑扎带断裂、槽口处绝缘磨损、以及导线之间的相互摩擦。这些机械损伤为局部放电和水分侵入提供了通道，形成机械—电—热多因素耦合加速老化的正反馈机制。对于变频电机，高频脉冲电压还引起电致伸缩效应，使绝缘材料产生高频率的微小形变，相当于施加了额外的机械疲劳载荷。

1.4 环境老化机理

环境因素主要包括湿度、盐雾、油污、尘埃以及腐蚀性气体。水分的存在不仅降低绝缘电阻，还会促进电化学树和水树的发展。在海上风电、矿山、化工等特殊环境中，电机绝缘还需耐受盐雾和酸性气体的侵蚀，导致材料水解、填料流失以及介电强度下降。此外，紫外线照射对户外电机的绝缘表面同样有降解作用，使表面出现龟裂和粉化。虽然大多数工业电机带有外壳保护，但在维修或散热设计不当的情况下，环境应力仍不可忽视。

1.5 多应力协同效应

实际运行中，各种老化因素并非独立作用，而是呈现复杂的协同效应。例如，热应力使材料软化，降低其抗机械磨损的能力；机械振动产生的微裂纹成为局部放电的起始点；局部放电产生的热效应又进一步加速热老化。这种协同作用使得绝缘系统的实际寿命远低于单一应力加速寿命试验的预测值。因此，在线监测技术需要能够综合反映多应力耦合下的绝缘状态，而非仅测量单一物理量。

2 电机绝缘在线监测技术研究进展

2.1 局部放电监测

局部放电监测是公认最有效的绝缘在线监测手段。按传感器分为电容耦合式、电感耦合式（高频电流互感器）及超高频天线式。电容耦合传感器嵌入电机引出线或中性点，频带几十kHz至几十MHz，灵敏度高（皮库级）；近年宽频带（100kHz–100MHz）电容传感器提升波形保真度，利于放电类型识别。电感耦合式（罗氏线圈）非侵入、安装方便，适用于中高压电机，对1MHz以上高频分量拾取有效。信号处理方面，传统脉冲相位分辨分析（PRPDA）仍是基准方法^[2]。研究者引入时频分析

（小波变换、S变换）和统计特征，结合支持向量机或随机森林，实现内部放电、表面放电、电晕放电的自动分类。深度学习（如CNN对PRPDA图谱的端到端分类）显著提高识别准确率。当前研究热点聚焦于强电磁干扰环境（尤其是变频器供电电机）下的局部放电信号提取。变频器输出的脉宽调制电压产生宽频噪声，与放电频谱高度重叠。基于独立分量分析、自适应滤波及经验模态分解的干扰抑制方法在实验室效果良好，但工业现场鲁棒性仍需验证。

2.2 泄漏电流与绝缘电阻监测

绝缘电阻的在线测量面临两大挑战：一是电机运行时绕组对地存在工频电压，直接测量困难；二是绝缘电阻的变化相对于泄漏电流的容性分量而言非常微弱。解决方案之一是采用直流叠加法：通过中性点或三相引出线注入低电压直流信号，测量直流泄漏电流，从而计算出绝缘电阻。该方法需要隔离工频交流分量，通常采用滤波电路或数字信号处理实现。近年来，基于宽频带传感器同时采集泄漏电流的阻性分量与容性分量的方法受到关注。阻性泄漏电流的基波分量与绝缘电阻直接相关，而其三次谐波分量的变化可反映非线性劣化特征。研究表明，阻性电流相对于总电流的相位角变化能够敏感地指示绝缘受潮或表面污染。对于变频电机，共模电压产生的共模泄漏电流也包含绝缘状态信息。共模电流的高频成分与绕组分布参数相关，通过分析其频谱特征可评估匝间绝缘的均匀性。这种方法的局限性在于共模电流同时受电缆长度、接地方式等多因素影响，绝缘劣化的特征频率难以唯一确定。

2.3 介质损耗因数及电容监测

介质损耗因数（ $\tan\delta$ ）是反映绝缘介质极化损耗的核心指标。在线监测 $\tan\delta$ 的原理是通过电压互感器获取电压信号，通过电流互感器获取泄漏电流信号，计算两者的相位差。关键难点在于工频下相位差通常为毫弧度级别，对传感器相位误差极为敏感。近年来，基于GPS或IEEE1588同步授时技术的双端同步采集方案，有效消除了异地采集的时间不同步误差。同时，采用高精度模数转换器（24位及以上）和数字锁相放大技术，可将相位测量分辨率提高到0.001度以上。研究表明， $\tan\delta$ 的在线测量值受温度影响显著，因此必须同步测量绕组温度，并将 $\tan\delta$ 折算到标准温度（如20摄氏度）下进行比较。电容量的变化主要反映绝缘几何结构或介电常数的改变，如受潮后水的介电常数（约80）远高于聚合物（2至4），会使电容明显上升。因此，电容和 $\tan\delta$ 的联合监测能够区分热老化（ $\tan\delta$ 上升、电容基本不变）与受潮（两

者均上升)两种不同失效模式。

2.4 回复电压法与极化去极化电流法

回复电压法(RVM)和极化去极化电流法(PDC)属于时域介电响应技术,原本主要用于离线测试。近年来通过优化测量电路和信号处理,逐步实现了在线或准在线应用。RVM的基本原理是:对绝缘施加直流电压后短接放电,测量在断路条件下绝缘两端逐步恢复的电压。回复电压的峰值、初始斜率以及中心时间常数反映了绝缘中不同弛豫过程的分布。对于电机绝缘,RVM可有效检测多层复合绝缘(如主绝缘与防晕层之间)的界面极化行为。在线实现方案是将测量装置并联在电机绕组与地之间,利用电机停运间隙或电压过零点瞬间完成测量。PDC方法测量极化电流(施加直流电压时的吸收电流)和去极化电流(短路放电后的释放电流)。通过扩展德拜模型拟合电流曲线,可以获得绝缘的等效电路参数。研究表明,去极化电流在数百秒时间尺度上的积分与绝缘受潮程度高度相关。便携式PDC测试仪已可实现不停机但需要短暂断开电源的“热备用”状态测量,对于连续生产要求不高的场合具有实用价值。

2.5 频域介电谱技术

频域介电谱(FDS)在宽频率范围(1毫赫兹至10千赫兹)内测量介电常数和介质损耗因数的频谱。不同老化机制在频域上有不同的特征指纹:低频段(1毫赫兹以下)反映电荷输运和界面极化,对受潮和导电杂质敏感;中频段(1毫赫兹至1赫兹)反映偶极子取向极化,与热老化的分子链断裂有关;高频段(1赫兹以上)反映快速极化过程,受温度影响较大^[3]。在线FDS的实现需要解决变频电源注入与强工频干扰抑制两大问题。最新方案采用宽频带任意波形发生器通过电压互感器注入扫频信号,在电流回路中使用陷波滤波器滤除工频分量,再通过锁相放大器提取各频率点的响应幅值与相位。虽然硬件成本较高,但实验室验证表明该方法能够清晰区分热老化与电老化试样。

2.6 基于智能传感与数据驱动的新方法

近年随着物联网与人工智能技术的渗透,电机绝缘

在线监测呈现如下新趋势:(1)分布式无线传感:在电机绕组关键位置(端部、槽口、接线盒)嵌入微型无线局部放电传感器或温湿度传感器,通过ZigBee或LoRa组网传输数据。这种方案克服了传统有线传感器布线困难的问题,但传感器耐温与供电续航仍需改进。(2)多参量融合监测:将局部放电、泄漏电流、振动、温度、湿度等多种传感器信息融合,采用主成分分析或自编码器进行降维,再利用长短期记忆网络或门控循环单元建立绝缘状态演化模型^[4]。研究表明,多参量融合的预测精度比单一参量提高20%以上。(3)数字孪生技术:建立电机绝缘系统的多物理场仿真模型,以在线监测数据作为边界条件和校核依据,实时更新模型参数,实现绝缘状态的数字镜像与剩余寿命动态预测。这一方向代表了未来的主流发展趋势,但计算实时性与模型精度之间的平衡仍是挑战。

3 结语

电机绝缘系统的老化是热、电、机械与环境多应力协同作用的复杂过程。准确理解各类老化的微观机制及其宏观电学表征,是发展在线监测技术的理论基础。当前,局部放电监测已较为成熟并得到工程应用;时域与频域介电响应技术在灵敏度和信息丰富度上具有优势,但离纯在线运行尚有距离;以深度学习为代表的驱动方法为多参量融合评估提供了新途径。展望未来,更高集成度的智能传感器与更精准的物理-数据融合模型,将推动电机绝缘在线监测从“状态感知”迈向“预测性维护”,为电机全生命周期管理提供坚实支撑。

参考文献

- [1]王凯,刘志刚,李鹏.变频电机绝缘老化机理与评估方法研究综述[J].电工技术学报,2021,36(12):2521-2533.
- [2]张强,陈昊,孙丽丽.电机主绝缘局部放电在线监测技术现状与展望[J].高电压技术,2022,48(5):1789-1801.
- [3]李建明,赵宇,周涛.基于频域介谱的电机绝缘状态评估研究进展[J].绝缘材料,2023,56(2):1-10.
- [4]刘卫东,王晓东,郑伟.多应力条件下电机绝缘老化协同效应研究[J].中国电机工程学报,2020,40(24):8120-8129.