

高压电机绝缘故障对运行能耗的影响分析及节能性防范措施研究

黄耀辉

贵州西电电力股份有限公司鸭溪发电运营分公司 贵州 563100

摘要：本文系统分析了高压电机绝缘故障与运行能耗的内在关联机制，深入揭示了绝缘劣化通过介质损耗增加、泄漏电流上升等途径对电机效率的影响规律。通过量化评估各类绝缘故障导致的能耗增量特征及其长期累积损失，建立了基于能耗控制的绝缘状态监测系统，提出了包括关键参数在线监测、故障早期预警和能效状态评估在内的诊断方法。在此基础上构建了以节能为导向的绝缘故障综合防护体系，涵盖绝缘系统优化、预防性维护策略和全生命周期成本最小化方案，为实现高压电机高效可靠运行提供了理论依据和实践指导。

关键词：高压电机；绝缘故障；运行能耗；节能措施；状态诊断

引言

高压电机被全面应用在电力、冶金、化工这些高耗能行业当中，它的能效水平会对整个系统的运行经济性以及能耗控制产生很大影响。绝缘系统是高压电机非常关键的一部分，其状态会直接左右电机的运行可靠性及其效率特征。伴随运行时间慢慢增长，绝缘材料在电、热、机械以及环境应力的作用之下逐步出现恶化现象，从而造成各种各样的绝缘故障发生。这些绝缘故障既会造成电机停止运行之类事故，又会使额外损耗增多、效率降低，使得运行能耗大幅上升^[1]。当下，针对高压电机的节能研究大多侧重于设计改良和调速控制方面，但是关于绝缘故障和能耗关联机制的系统剖析却比较少。所以，要深入探究绝缘故障给运行能耗带来的影响的原理，创建依靠能耗控制的绝缘状态检测方法以及节能防护体系，这对于达成高压电机高效又可靠的运行有着重要的理论意义和实际价值。

1 高压电机绝缘故障与能耗关联机理

1.1 绝缘故障的主要类型与特征

高压电机绝缘故障主要包含几种类型，即绝缘局部放电、绝缘老化、绝缘受潮以及绝缘表面污染。局部放电源于绝缘内部电场过于集中而引发的气体电离情况，它不断发展中会渐渐破坏绝缘材料，生成导电路径。绝缘老化指材料长时间处于电热负荷之下时，其化学结构出现改变，这表现在介质强度减弱以及介电系数发生偏移之上。绝缘受潮时，水分子渗进绝缘体系当中，造成绝缘电阻减小、介质损耗变大。

而绝缘表面污染说的是带有导电性质的污染物黏附于绝缘表面之后，创建起一条泄漏电流通道。各类绝缘故障有不同的发展进程和电气特点。局部放电会产生脉冲电流并造成电磁辐射，它的发展具备累加效应。绝缘老化速度较慢，主要体现为介质损耗因数增大和电容发生改变^[2]。当绝缘受潮时，极化特性会有所改变，绝缘电阻也会大幅减小。而且，表面污染会使泄漏电流增多，局部温升现象更为严重。这些故障特征既显示了绝缘状况，又和电机的能量转换过程紧密相连。

1.2 绝缘劣化对电机运行效率的影响路径

绝缘劣化会经由许多途径对电机运行效率施加影响。当绝缘电阻缩减时，泄漏电流便会增多，进而引发额外的导电损耗。介质损耗因数若增大，绝缘材料在交变电场中产生的热量就会变多，这部分能量会直接转为成热能而散发出去。局部放电会消耗电场能量，而且还会生成臭氧、氮氧化物之类的活性物质，这会促使绝缘劣化情况加剧，从而陷入效率不断下降的恶性循环之中。绝缘性能若出现下降，其后果之一便是改变电机电磁场的分布情况，从而影响能量转换的效率。绝缘结构中的电容一旦发生改变，就会造成磁场分布产生畸变，进而加大铁损与杂散损耗^[3]。当绝缘导热性能有所下降时，电机的温升现象会更为严重，而绕组电阻又因之增大，于是铜损便不自觉地增多。由绝缘故障所造成的局部过热，会改变相关材料的电磁特性，使得电机效率进一步下滑。这些影响途径彼此交织在一起，促使电机整体能耗水平得以

提升。

1.3 故障状态下的附加损耗分析

绝缘出现故障时，电机会产生诸多附加损耗。局部放电损耗源自绝缘内部气体的电离过程，属于直接的能量损耗，其大小与放电强度及频率有关。介质极化损耗由于绝缘材料在交变电场下不断极化所致，当介质损耗因数增大时，这种损耗也会变大。泄漏电流损耗源于绝缘电阻的减小，它的数值与运行电压和绝缘状态相关。表面泄漏损耗指的是由于绝缘表面污染而形成电流传导路径时所损失的能量^[4]。局部过热引发的额外铁损和铜损属于绝缘故障的间接能耗体现。这些附加损耗在正常运行期间占比较低，但在出现绝缘故障时却大幅增多，这已成为电机能耗增大的关键因素。

2 绝缘故障对运行能耗的量化影响分析

2.1 绝缘故障与电机效率特性变化关系

绝缘故障会导致电机效率特性发生系统性改变。在轻载区域，介质损耗和局部放电损耗所占比重较高，使得效率大幅下降。接近额定负载时，附加铜损和铁损的影响变大，效率曲线整体呈下行趋势。效率下降的程度同绝缘故障的种类及严重程度紧密相连，局部放电和绝缘受潮对效率的影响比较突出。电机效率特性出现变化，其表现形式包含最佳效率点发生偏移以及高效区变得狭小两种情况。当存在绝缘故障时，电机在更为狭窄的负载区间维持较高的效率，从而引发实际运行过程中能量损耗增多^[5]。各类绝缘故障相互之间存在协同效应，使得效率下降幅度大于各个故障单独起作用时的累加值。效率特性变化规律给绝缘状况评定赋予了关键依据。

2.2 不同故障类型的能耗增量评估

各类绝缘故障所造成的能耗增量有着各自的特点。局部放电故障的能耗增量同放电量的平方成正比，随着故障的发展呈指数级增长。由于绝缘老化而产生的能耗增量比较缓慢，不过其与运行时间之间存在非线性关系。由绝缘受潮引发的能耗增量会受到环境湿度的大幅影响，具备突出的时变性质。表面污染故障的能耗增量与污染程度、成分有关，在潮湿环境下会快速增多。复合绝缘故障的能耗增量一般要比各个单一故障增量之和大，其显示出较为突出的耦合效应。考量能耗增量时要考虑到电机的运行工况，处于不同的负载条件下，同样的绝缘故障其能耗表现会有所区别。创建精确的能耗增量模型乃是制订节能措施的根基所在。

2.3 长期运行下的累积能耗损失计算

绝缘故障引发的能耗损失会随运行时间持续累加。故障早期时，能耗提升速度较慢，不过随着故障程度加重，增速变快。累计的能耗损失和绝缘恶化速度紧密相关，而且受运行环境及工况的影响很大。长时间运行的情况下，即便只是微小的效率下滑，也会造成不小的额外能耗。计算累积能耗损失时要考量绝缘故障的发展进程与时间要素。故障发展快慢会决定能耗损失的汇集速度，运行时间长短也会影响总体损失数量。针对间歇运行的电动机而言，其累积能耗损失还会受到启停次数的影响。精准地计算长时间以来逐渐累积起来的能耗损失，可以给绝缘保养决策赋予有关经济性方面的分析参考。

3 基于能耗控制的绝缘状态监测与诊断方法

3.1 关键绝缘参数在线监测技术

在线监测关键绝缘参数，这是做到能耗控制的根基所在。局部放电监测经由考量放电脉冲来评定绝缘内部状况，从而体现能量损失的程度。介质损耗因数监测与绝缘材料的能量损耗特性存在直接联系，其属于效率评价的关键参数。而绝缘电阻监测则显示泄漏电流路径的发展情形，也同导电损耗有着直接相关性^[6]。电容检测能够考量绝缘结构改变给电磁场分布造成的影响。表面泄漏电流检测可以体现污染级别以及这种污染对能耗产生的影响。温度检测则从侧面评定由绝缘故障引发的额外损耗。而多参数联合检测则能全方位了解绝缘状况及其对能耗的影响，进而为能效评定给予数据支持。

3.2 故障早期预警与能效状态评估

经由监测数据创建起绝缘故障早期警报系统，该系统可在能耗大幅上升之前察觉到绝缘恶化的情况。警报阈值按照能耗的敏感性来设定，着重关注那些对效率影响较大的参数变动。能效状态评定会把绝缘参数和运行数据融合起来，用以衡量当下能效水平同理想状况之间的差别。能效状态评定要考量不同负载情况下的表现，创建全工况能效图谱。按照能效下降的速度与程度来划分警示级别，以此引导确定守护的优先顺序。早期发出的警示可防止绝缘故障演变成严重故障，缩减不必要的能耗损耗。能效状态的动态评定给预防性守护赋予决策参考。

3.3 诊断数据与能耗关联分析模型

创建诊断数据和能耗的关联分析模型，以此来量化绝

缘参数变化给能耗造成的影响。统计模型会分析历史数据当中的相关规律，找出对能耗有影响的主要绝缘参数。机理模型按照电磁理论以及绝缘物理，推导出参数变化和能耗之间的定量关系。关联分析模型会把运行工况的影响纳入考量范围，从而改善其在不同条件下的适应能力^[7]。该模型经由持续利用实际运行数据来做验证，逐步改良预测的准确性。关联分析能够达成从绝缘状态向能耗影响的转换，给节能控制供应一种理论手段。而且，模型所给出的内容会指引人们去选定监测参数并设置警报阈值。

4 节能导向的绝缘故障防范措施体系

4.1 绝缘系统优化与低损耗材料选用

绝缘系统改良着眼于提升能效。选用介质损耗因数较低的绝缘材料来缩减极化损耗，运用耐电晕材料控制局部放电并减小放电能量损失。改良绝缘结构设计以改善电场分布状况，从而减轻因局部场强大于限度而产生的额外损耗。选取高导热绝缘材料来减小运行温度，缩减由于绕组电阻提升而产生的铜损。运用防污闪绝缘结构以控制表面泄漏电流。从电气、热学以及力学性能方面综合考量绝缘系统的整体情况，在确保可靠性的情况下尽可能减小运行能耗。

4.2 预防性维护策略与能效管理融合

把能效指标归入绝缘预防性维护体系当中，按照能效状态来制订守护期限，也就是在能耗大幅上升之前就实施干预。守护举措着重解决那些对能耗影响很大的绝缘问题，从而提升守护资源的利用率。创建起绝缘守护能效评价的流程，把守护举措的节能成果予以量化。能效管理和绝缘守护方案配合制订，做到资源共用与信息共享^[8]。把维护记录同能效数据联系起来展开分析，改良守护策略。预防性守护既要顾及设备的可靠性，也要重视运行的经济性，达成安全和节能的兼顾。

4.3 全生命周期成本最小的综合防护方案

综合防护方案需兼顾初期投资及长期运行能耗成本，应选取全生命时段成本较低的绝缘系统与检测方案。不可仅着眼于低初始投资而漠视运行能效。要考量绝缘材料性能下降和能耗升高的时变特点，动态改良守护和更新策略。综合方案要协调设计、制造、运行以及守护各个阶段的绝缘经营措施，从而形成起一个完整的技术体系^[9]。成本分析包含直接能耗损失以及间接效率下降所带来的经济损失，要全方

位考量防护措施的经济性。通过技术经济对比，来确定在不同应用场景下最为理想的防护方案。

结语

高压电机绝缘故障与运行能耗密切相关。研究表明，绝缘劣化通过介质损耗增加、泄漏电流上升等途径显著影响电机能效，各类故障导致的能耗增量特征各异，长期运行将产生可观的累积能耗损失。基于能耗控制的绝缘状态监测方法可实现在线监测关键参数和故障早期预警，实现绝缘状态与能效状态协同评估^[10]。提出的节能导向防护体系包括优化绝缘系统、预防性维护策略和全生命周期成本最小化方案，建立了完整的绝缘故障防护与能耗控制技术路线，为提升高压电机运行经济性提供理论依据和实施指导。

参考文献：

- [1] 王浩洁. 高压电机绝缘故障处理与分析 [J]. 中国设备工程, 2023,(S2):26–28.
- [2] 刘立灿. 高压电机绕组常见绝缘故障及处理 [J]. 冶金动力, 2023,(01):1–3+34.
- [3] 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.
- [4] 甄永在. 厂用高压电机定子绝缘故障原因分析及预防措施 [J]. 电机技术, 2021,(03):49–51.
- [5] 赵健民. 火电厂高压电机绝缘故障原因分析与对策 [J]. 设备管理与维修, 2018,(21):50–51.
- [6] 樊高义. 高压电机绝缘离线测试轻便式装置研制 [D]. 上海电机学院, 2024.
- [7] 王浩洁. 高压电机绝缘故障处理与分析 [J]. 中国设备工程, 2023,(S2):26–28.
- [8] 赵帅帅. 大型电机绝缘性能直流参数智能测试装置研制 [D]. 上海电机学院, 2022.
- [9] 敬果. 高压电机隐患治理的研究和应用 [C]// 中国机电一体化技术应用协会. 第五届全国石油和化工电气设计与应用论文大赛论文集. 中国石油四川石化有限责任公司; 2021:106–111.
- [10] 刘进, 罗仁江, 杨勇. 电机绝缘在线监测技术的应用实践 [J]. 化工管理, 2020,(35):137–138.

作者简介：黄耀辉，1997年7月，男，土家族，贵州省铜仁市，大学本科，助理工程师，研究方向：电气工程