

负载系统中异步电机转子过热的故障研究与对策

赵欣欣 王泽健 李佳荫

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

摘要：针对某核电厂汽水分离再热器系统（GSS）380V 三相笼型异步电动机在检修解体中发现转子表面大面积过热（发黑、发蓝、发红）的异常现象，本文对其运行工况进行分析研判，通过理论推导与 MATLAB 仿真模拟，系统探究转子过热的根本原因。研究表明，端环设计厚度不足（实测 15mm，行业同类应为 30mm 以上）是导致过热的本因，鼠笼条截面偏小、硅钢片间涡流效应及频繁启停工况进一步加重了过热程度。本文针对此事件进行综合分析，可为 380V 笼型异步电机转子表面过热故障的分析与处理提供参考。

关键词：笼型电机；转子过热；端环；涡流损耗；故障分析

引言：笼型三相异步电动机主要部件为定子（三相散嵌式分布绕组）、转子（笼式导条）以及轴承。在电机解体检修工作中，检修内容包括测量定子直流电阻和绝缘电阻、测量轴承配合间隙以及转子表面检查等项目。在检查转子时，发现其表面存在大面积发黑、发蓝和发红等过热情况，且呈较为明显的区域分布。本文从实测数据入手，得出笼型电动机转子表面过热的原因，并提出针对性处理措施。

1 问题描述

某核电厂 GSS1101PO 电机进行解体时，发现转子表面大面积存在发黑、发蓝、发红等过热情况。其特点为：（1）靠近转子端环的硅钢片呈现黑蓝色；（2）覆盖在鼠笼条上表面的硅钢片呈现条状发黑；（3）鼠笼条之间的硅钢片呈现不规则的过热痕迹。该电机铭牌参数如表 1 所示。

表 1 电机铭牌

制造厂	WEG
型号	315 S/M
功率（kW）	110
转速（r/min）	985
额定电压（V）	380
额定电流（A）	211
接法	Δ
工作制	S1
绝缘等级	F

查询国标《GB/T 14711-2013 中小型旋转电机通用安全要求》，F 级绝缘最高允许温度不应超过 170℃。若转子处于过热状态，则会通过热传导和热辐射等方式造成周围温度偏高。长期运行不仅会加速绝缘材料的老化，

甚至会发生鼠笼条脱焊、断条等故障，严重影响设备的安全运行^[1]。

2 运行情况

2.1 故障电机运行工况

该设备处于停机检修状态，无法复现故障当时的实时运行工况。通过查阅运行记录，该电机在故障前运行电流处于额定范围以内，未出现明显的过载报警记录。

2.2 同厂同类电机运行对比

对同电站同类型设备的运行电流进行现场实测，结果均为 150A±5A，远低于额定电流 211A，处于正常负载范围内，说明该位置电机并非长期过载运行。

2.3 群厂同类电机故障统计

经查询群厂设备检修记录，累计发现三台同品牌（WEG）、同型号（315 S/M）电机存在类似的转子过热异常，过热区域分布特征与该电机高度一致。表明该过热问题并非个例，而是具有普遍性的设计或制造缺陷。

3 电机转子过热原因分析

查找过热故障的重点在于确定热源，找到根本原因。根据转子表面过热痕迹的区域分布特征，从以下四个方面逐层深入分析。

3.1 端环热源分析

在靠近转子两侧端环的硅钢片呈现较深的黑蓝色，而且呈现出端环向转子中部扩展的迹象，说明端环可能是主要热源。在鼠笼转子中，端环与鼠笼条构成闭环回路（见图 1），电机运行过程中，由于存在转差，电磁感应作用在鼠笼条及其端环中产生电流。端环作为各鼠笼条的汇集点，其中流通的电流极大，因此端环的横截面

积设计至关重要^[2]。

端环横截面积 S 可等效为矩形计算:

$$S = (R_1 - r_1) \times b$$

式中: R_1 为端环大圆半径, r_1 为端环小圆半径, b 为端环厚度。

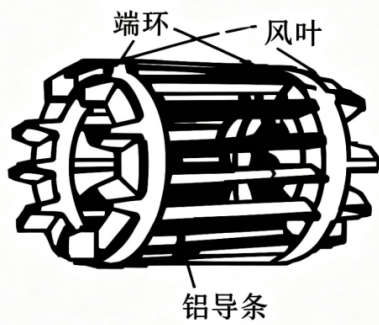


图1 鼠笼条连接图

若某一笼型转子的端环横截面积仍不能满足运行需求,便只能增加其厚度,以保证其载流量。

焦耳定律: $Q = I^2 \cdot R \cdot t$ —公式 1 电阻公式: $R = \rho L / S$ —公式 2

I : 通过导体的电流; R : 导体电阻; t : 电流作用时间; ρ : 电阻率; L : 电阻长度; s : 电阻横截面积;

如果端环厚度设计不够,即截面积 s 偏小,根据公式 2 可知,端环的电阻 R 会反比例增大。在一定电流和时间的作用下,产生的热量也会偏大(公式 1),长期运行会造成端环过热。

测量 ABB 等 6 种其他型号电机的端环尺寸,一般情况下该类型(380V, 110kW, 3 对极)的电机转子端环厚度应达到 30mm 以上。经实际测量, F1GSS1101MO 电机转子的端环厚度为 15mm,因此可确认端环厚度不够为转子发热的一个重要原因。

3.2 鼠笼条热源分析

覆盖在鼠笼条上表面的硅钢片呈现条状发黑迹象,说明鼠笼条也可能是 1 个热源。

由于笼型电机正常工作时存在转差,根据电磁感应可知,鼠笼条中存在感应电动势

$$E_2 = BLV \sin \theta$$

B : 磁感应强度; L : 导体长度; V : 线速度; θ : B 、 L 、 V 三者之间通过互相转化两两垂直所得的夹角。

经过端环连接后,鼠笼条之间形成回路,即形成感

应电流。若鼠笼条的设计截面不够,同样会造成鼠笼条过热(参见公式 1、2)。

另外,根据第一条的分析,由于电机端环的设计厚度不足,会产生大量焦耳热。这些热量以热传导的方式转移到转子表面。所以,覆盖在鼠笼条上表面的硅钢片呈现条状发黑现象是鼠笼条自身发热以及受端环温度传热综合作用的结果。

3.3 铁芯涡流损耗分析

鼠笼条之间的硅钢片呈现不规则的过热发黑痕迹。电机的核心部件之一是铁芯,即由薄的硅钢片(例如 0.35mm、0.5mm 等厚度)叠压而成。铁芯损耗 P_{fe} 为磁滞损耗 P_{cz} 和涡流损耗 P_{wl} 的合成。实验表明, $P_{fe} \propto B^2 f^{1.3}$ 。 P_{cz} 和 P_{wl} 的引起介绍如下。

磁滞损耗 P_{cz} : 在外磁场的作用下,铁磁物质内部磁畴将翻转,使磁畴的方向趋于外磁场。实验表明, $P_{cz} \propto B^2 f$ 。

涡流损耗 P_{wl} : 当铁芯的磁通交变时,铁芯内也会感应电势和电流,这些电流在铁芯内部围绕磁通形成涡状流动,成为涡流。在钢材中加入少量的硅即增加其电阻率可减少 P_{wl} 。不采用整块铁芯,而采用互相绝缘的由许多薄硅钢片叠起来的铁芯,截断涡流路径。从而大大减少 P_{wl} 。实验表明, $P_{wl} \propto B^2 f^2$ 。

由此可知,当硅钢片之间的绝缘较差时,涡流效应将会显著增加。因此,分析认为鼠笼条之间的硅钢片呈现不规则的过热发黑痕迹是由于鼠笼条热量扩展和不均匀的涡流效应造成的。

3.4 频繁启停对转子温升的影响

铁芯上存在没有过热痕迹的区域,分析以上所有发热均与电流有关,但该电机为 S1 型工作制,表示其可以在恒定负载下,长期运行并达到热稳定,而且非 315 S/M 型电机 L2GSS210MO 也存在转子过热的现象。因此,说明该功能位置的电机转子发热可能有频繁启停的工况。

在电机刚刚启动时,转子转速 $n = 0$,此时转差率 $s = 1$, n_0 : 同步转速

经查询,异步电机转子绕组的电流有效值:

$$I_2 = \frac{SE_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2}}$$

s : 转差率; E_2 : 转子每相绕组内的感应电势;

R_2 : 转子绕组每相电阻; $X_{2\sigma}$: 转子堵转时转子每相绕组漏电抗。

上式表明,转子电流 I_2 随转差率 s 而变化。由于一

般电机的 $X_{2\sigma}$ R_2 , 因此可赋值如下: $E_2 = 1$, $R_2 = 1$, $X_{2\sigma} = 10$, 进行 MATLAB 运算 (见图 2)。

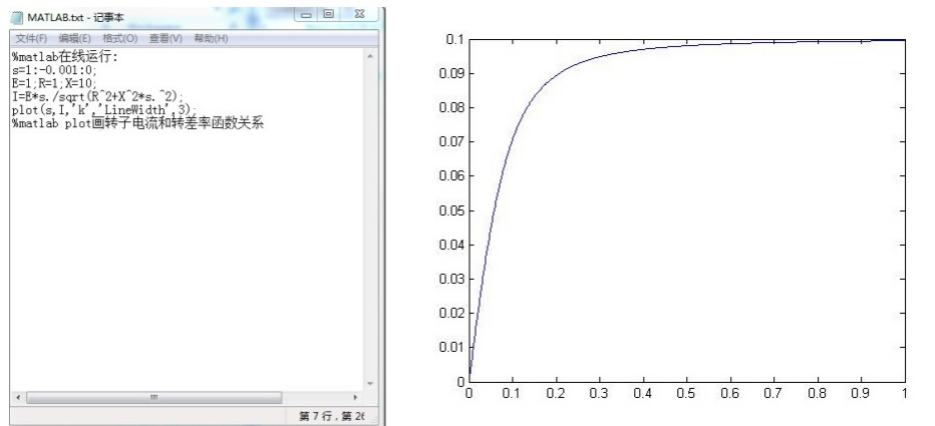


图 2 仿真曲线图

由此可见, I_2 是一个在 $s \in [0,1]$ 区间上的单调递增函数。其中, $s = 1$ 即电机刚刚启动时, 转子电流 I_2 最大, 此时的发热也最为严重。由于异步电机工作在正常运行范围时, s 一般在 0.015~0.06 之间, 此时的转子电流远小于启动电流。

转子的表面热量 $Q_{zz} = Q_{dh} + Q_{dt} + Q_{fe} - Q_{fs}$

Q_{dh} : 端环传导的热量; Q_{dt} : 鼠笼条产生的焦耳热;

Q_{fe} : 铁芯损耗产生的热量; Q_{fs} : 风扇散热。

从电机启动到稳定运行 (转差率 $s \approx 0$), Q_{dh} 、 Q_{dt} 和 Q_{fe} 均减小, 而 Q_{fs} 增大, 所以电机运行温度有所降低, 使得转子铁芯存在没有过热痕迹的区域。

4 结论

通过上述多维度分析, 可得出以下结论: (1) 端环设计厚度不足是根本原因: 实测端环厚度 15mm, 不足同类电机设计值 30mm 的一半, 导致端环电阻偏大、焦耳热严重超标。(2) 鼠笼条截面偏小是重要叠加因素: 鼠笼条自身电阻偏大, 运行中产生额外焦耳热, 与端环热传导叠加, 形成条状过热痕迹。(3) 涡流损耗加重了铁芯发热: 硅钢片间绝缘性能下降导致涡流损耗增大, 表现为鼠笼条间不规则过热^[3]。(4) 频繁启停加剧热累积效应: 启动瞬间转子电流远大于额定电流, 频繁启停导致热量逐次累积, 加重过热程度。综上, 焦耳热和热传导共同造成了该电机转子铁芯表面大面积过热^[4]。端环厚度不足为根本原因, 鼠笼条截面偏小、涡流损耗及频繁启停为加重因素。

5 处理措施与改进建议

(1) 物项替代。WEG 同型号电机在群厂已发现 3 台转子过热故障, 建议后续采购优先考虑物项替代。替代选型应满足 380V、110kW、985r/min 等核心参数, 技术规范书中明确端环最小厚度 (不低于 30mm)、鼠笼条材质与截面积、绝缘等级 (F 级及以上) 等指标, 确保热容量和散热性能满足运行要求。

(2) 运行程序优化。建议升版再鉴定程序, 对电机启动频次量化限制, 规定两次启动最小间隔不少于 30 分钟, 确保转子充分散热, 避免热量逐次累积。

结束语

通过以上分析, 发现该电机转子表面过热由端环设计厚度不足、鼠笼条截面偏小、涡流损耗及频繁启停多重因素共同导致。建议后续从设备选型替代和运行程序优化两个层面推进改进, 同时升版再鉴定及相关试验程序, 对操作频率做出明确要求, 从根本上避免热量的累积效应, 保障核电厂电气设备的安全可靠运行。

参考文献

- [1] 饶双全, 李建富, 周光厚, 等. 基于改进转子端环参数计算的深槽笼型异步电动机启动特性仿真分析 [J]. 大电机技术, 2023(2):35-41,46.
- [2] 张建军, 岳啸鸣. 基于电流频谱分析的高压电机笼条断裂在线诊断及处理 [J]. 大电机技术, 2022(2):45-48,62.
- [3] 王晓俊, 曲振业, 蔡合超, 等. 不同转子通风结构对高压异步电机传热特性的影响 [J]. 电机与控制应用, 2022,49(4):77-82.
- [4] 李云鹏. 兆瓦级高压感应电机转子发热问题研究 [J]. 防爆电机, 2023, 58(3): 25-32.