同步磁阻电机节能改造技术及工业应用实践

王 伟

（江苏上上电缆集团有限公司，江苏 常州 213300）

摘 要 永磁辅助式同步磁阻电机以磁阻转矩为主、永磁转矩为辅，转子无鼠笼、无稀土磁体，整体损耗较异步电机降低 20% ~ 30%，达 IE5 能效等级。通过能效、温升及全生命周期成本的多维度对比可见，该类电机宽负载区间效率表现更优，转子运行温升显著降低，可有效延长轴承理论服役寿命。目前已有离心风机、水泵机组的实际改造案例，分别验证了其稳定的节电效果与良好的经济效益，旨在为工业电机存量改造提供可复制的技术路径。

关键词 同步磁阻电机；磁阻转矩；节能改造；节电率

中图分类号：TM352 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.023

0 引言

工业电机能耗在全国用电总量中占比颇高，提升存量电机能效是推进工业领域节能降碳的核心关键。永磁辅助式同步磁阻电机采用磁阻转矩主导、铁氧体永磁辅助的驱动结构，既摆脱了对稀土资源的依赖，又省去了异步电机必备的鼠笼转子结构，在能效等级、运行稳定性与维护成本上形成了区别于传统电机的独特技术优势 [1]。因此，梳理同步磁阻电机节能改造效果与规模化工业应用路径，具备重要的行业参考价值。

1 同步磁阻电机节能改造技术特征

1.1 磁阻转矩与永磁转矩协同驱动结构

永磁辅助式同步磁阻电机依据磁阻最小路径闭合原理来运行，其转子铁芯按照不同角度设置多层非对称磁障通道，形成各向异性磁路结构。转子磁障结构是决定电机转矩性能的主要因素 [2]，气隙磁阻随着转子位置周期性变化从而产生磁阻转矩，以此驱动转子沿着磁阻最小路径方向进行旋转。磁障通道内嵌入铁氧体永磁体，提供辅助永磁转矩，与磁阻转矩叠加形成合成电磁转矩：

$$T_{em}=\frac{3p}{4}\left[\left(L_d-L_q\right)i_d i_q+\psi_f i_q\right] \quad (1)$$

式（1）中，T_{em} 为合成电磁转矩；p 为极对数；L_d、L_q 分别为直轴、交轴电感；i_d、i_q 分别为直轴、交轴电流分量；ψ_f 为永磁体直轴磁链。第一项对应磁阻转矩，取决于直轴与交轴电感差；第二项对应永磁转矩，由铁氧体永磁体提供，且该类铁氧体辅助同步磁阻电机中磁阻转矩占比通常在三分之二以上，永磁转矩仅承担辅助部分 [3]。转矩密度较纯磁阻结构电机提升，配合专用驱动器实现同步运行，不存在异步电机转差损耗。驱动器采用计及铁心损耗的最小损耗控制策略，通过合理分配定子电流使运行损耗保持在较低水平，相较传统最大转矩电流比控制，实验验证可节约约 9.79% 的运行损耗 [4]，进一步提升驱动系统整体效率。

转子不设置鼠笼绕组，和三相异步电机依靠转子导条感应电流产生转矩的方式有着本质不同——转子没有电流通过，这样就消除了铜耗与涡流损耗，电机整体损耗降低了 20%～30%，为能效等级提高提供了结构基础。

1.2 免稀土转子设计与宽负载高效区间

转子磁障通道采用多层非对称结构的设计方式，通过增大直轴磁路与交轴磁路的磁阻差值，让磁阻转矩贡献占比超过总输出转矩的 80%，永磁体仅负责承担辅助转矩部分，这样转矩产生机制对于磁体剩磁性能的依赖程度就降低了，为转子选用低剩磁密度的铁氧体材料替代高剩磁密度的稀土材料在设计方面提供了可行性。铁氧体耐温强度能够达到 350 ℃，矫顽力受温度的影响比较小，可以避免稀土永磁体在高温、振动、过载或者强电流冲击的情况下出现退磁现象。磁阻转矩主导的转矩合成方式让电机在 20% ～ 120% 负载区间内都保持着较高的效率，三相异步电机仅仅在 80% ～ 100% 额定负载区间内接近高效区，在轻载工况下效率衰减比较明显。

2 同步磁阻电机节能改造效果对比分析

2.1 与 YE3 系列异步电机能效对比

同步磁阻电机高效区间覆盖 20% ～ 120% 负载，宽于三相异步电机 80% ～ 100% 的高效区；7.5 kW 效率对比曲线显示，25% ～ 100% 负载区间内效率均高于 YE3 系列异

作者简介：王伟（1984-），男，本科，工程师，研究方向：电缆厂压缩空气系统。

步电机，且随负载率降低差值扩大。电机在《电动机能效限定值及能效等级》（GB 18613-2020）及IEC60034-30-2:2016标准体系下达到国家一级能效及IE5能效等级，较YE3所处的三级能效（IE3）跨越两个等级。效率提升的实质在于转子损耗结构的改变：

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P_{in}} \tag{2}$$

式（2）中，η为电机效率；P_{in}为电机输入电功率；ΔP为电机总损耗，由定子铜耗、转子损耗、铁耗及机械损耗构成。YE3系列转子导条中的感应电流产生持续转子铜耗，构成ΔP的组成部分；磁阻转矩驱动结构转子无电流通过，该损耗项被消除，η相应提升，直接体现为效率曲线整体上移。

2.2 运行温升变化及轴承寿命影响

运行时的温度和温升分布对电机性能有显著影响，因此，发热和冷却一直是电机的重点研究领域[5]。转子无感应电流通过，运行过程中不产生转子铜耗与涡流发热，电机整体温升低于同容量三相异步电机。例如：某水泵现场轴承端盖温度对比可知，异步电机运行时的温度是81.7 ℃，同型号的同步磁阻电机运行温度为56.1 ℃，两者之间的温差达到了25.6 ℃，如表1所示。轴承润滑脂性能与绕组绝缘材料老化速率均随运行温度升高而加速衰减，遵循如下经验规律：

$$L = L_0 \cdot 2^{\frac{T - T_0}{10}} \tag{3}$$

式（3）中，L为运行温度T下轴承润滑脂或绝缘材料的理论寿命；L_0为基准温度T_0下的对应寿命；T-T_0为实际运行温度与基准温度的差值，以摄氏度计。把25.6 ℃温差代入指数项之后，理论寿命能够延长大约5.9倍。

表1 异步电机与同步磁阻电机轴承端盖温度及理论寿命对比

电机类型	轴承端盖温度（℃）	温差（℃）	理论寿命倍数
三相异步电机	81.7	0（基准）	1（基准）
同步磁阻电机	56.1	25.6	约5.9

2.3 变负载工况下节电率变化规律

节电率并非固定数值，随负载率变化呈现规律性波动。7.5 kW效率对比曲线表明，负载率处于25%～50%区间时，同步磁阻电机相对YE3系列异步电机的节电率达到约10%的峰值区间；负载率升至80%～100%额定区间时，两者效率差值收窄，节电率相应降低。这是由于异步电机轻载时转差、励磁损耗占比上升导致效率下降明显，磁阻转矩驱动结构无转差损耗，效率曲线相对平坦。工业现场电机选型通常留有容量裕量，实际负载率长期低于额定值，轻载区间的节电优势因此更具现实适配价值。

2.4 全生命周期成本构成占比

电机全生命周期成本包括购置成本、维护成本、能源消耗成本，这三者所占比例大致为3%、1%、96%，其中能源消耗成本占据主体地位。在购置阶段，同步磁阻电机由于需要配套专用驱动器，其初始投入成本高于同容量的三相异步电机。然而，在能源成本占绝对主导的成本结构中，效率提高所带来的电费节省幅度超过购置差价，使得投资回收周期相应缩短。在维护环节，定子线圈结构和异步电机相同，维修方式、难度及成本也一致，无需返厂维修，轴承因温升降低、故障率下降，所以维护频次和费用同步减少。

3 同步磁阻电机工业应用实践

3.1 离心风机改造应用及节电成效

某废气处理系统的离心风机改造中，原先配置的是YE3-225M-4型号的三相异步电机，其额定功率是45 kW，能效等级为IE3，运行时采用变频驱动方式，改用与原容量相同的同步磁阻电机系统，能效等级提高到IE5，同样配合变频驱动来运行。改造前后运行参数、节电效果如表2所示。在相同的运行转速1 120 r/min工况下，异步电机每小时用电量为25.62 kW·h，同步磁阻电机系统降至21.4 kW·h，节电率达到16.4%。这个数值高于常规负载工况下的通常节电水平，原因是风机类负载运行转速相对固定、负载波动较小，磁阻转矩驱动结构在稳定工况下的损耗优势得以充分展现，没有受到轻载、重载交替运行造成的效率波动影响。

表2 离心风机改造前后运行参数及节电效果对比

项目	三相异步电机（YE3-225M-4）	同步磁阻电机系统
额定功率（kW）	45	45
能效等级	IE3	IE5
运行转速（r/min）	1120	1120
每小时用电量（kW·h）	25.62	21.4
每小时节电量（kW·h）	—	4.22
节电率	—	16.4%

3.2 水泵机组改造应用及经济效益

某132 kW水泵机组改造案例中，阀门保持全开、出水压力表读数维持0.45 MPa工况不变条件下，改造前后运行参数及效益核算如表3所示：异步电机运行时电流为186.8 A，表面温度是64.2 ℃，单位小时耗电量是112.7 kW·h。而改造之后同步磁阻电机运行电流降低至143.4 A，表面温度下降到55.3 ℃，单位小时耗电

表 3 水泵机组改造前后运行参数及效益对比

项目	三相异步电机	同步磁阻电机
额定功率（kW）	132	132
出水压力（MPa）	0.45（阀门全开）	0.45（阀门全开）
运行电流（A）	186.8	143.4
表面温度（℃）	64.2	55.3
单位小时耗电量（kW·h）	112.7	87.9
单位小时节电量（kW·h）	0（基准）	24.8
年节电量（万 kW·h）	—	19.6
年节能效益（万元）	—	15.3
年节约标准煤（吨）	—	58
年减排 CO_2（吨）	—	156.6

（注：年运行时长按 330 天 ×24h/ 天计算，共 7 920 小时；电价按 0.784 元 /kW·h 计算。）

电量变为 87.9 kW·h，单位小时节电达到 24.8 kW·h。按照每年运行 7 920 小时来计算，年节电量为 19.6 万 kW·h，年节能经济效益大约是 15.3 万元。在环境效益方面，每年节约标准煤 58 吨，每年减排二氧化碳 156.6 吨。电流与温升的同步下降，体现了转子损耗降低对电机运行状态的改善，兼具经济与环境效益。

3.3 规模化改造实施流程与推广路径

规模化改造实施遵循节能诊断、试机验证、批量改造三阶段推进路径，如图 1 所示。在节能诊断阶段，完成现场用电设备的排查工作，编制初步节能方案并进行收益测算，以此明确改造对象与预期效果。在试机验证阶段，选取具有代表性的设备签订试机合同，实施小规模改造并且进行节能验收，进而形成全厂适用的改造方案。在批量改造阶段，依据验证结果签订商务合同，分批完成设备更换并且组织节能验收。按照节电率 10% ～ 30% 这个区间进行测算，规模化改造年节电量能够达到 100.8 万 kW·h ～ 302.4 万 kW·h，当节

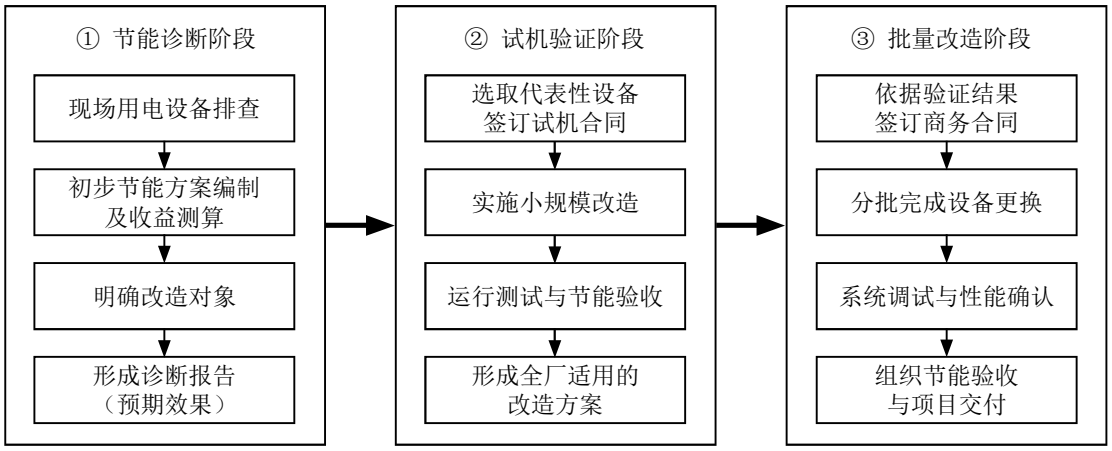


图 1 同步磁阻电机规模化改造三阶段实施流程

电率达到 10% 以上时，年节约标准煤大约为 298 吨，形成了涵盖方案设计、工程实施与运维服务的完整实施闭环，为不同行业电机存量改造提供了可复制的路径。

4 结束语

电机采用磁阻转矩与永磁转矩协同驱动结构，在完全不依赖稀土材料、转子无附加损耗的前提下实现了能效等级的显著跃升，实测温升、全生命周期成本数据，充分验证了其在运行可靠性与投入经济性上的双重优势。离心风机、水泵机组的多场景改造实践表明，同步磁阻电机节能改造技术在宽幅负载波动工况下均能输出稳定的节电效果，整套改造工艺流程成熟、落地风险可控。而通过“前期节能诊断、单机试机验证、分批次批量改造”的三阶段推进模式，更为国内同类工业电机存量能效升级的规模化推广提供了可直接复用的标准化参考路径。

参考文献：

[1] 陈彬,杨向宇,史进飞,等.永磁辅助同步磁阻电机转矩脉动抑制研究 [J].微特电机,2024,52(02):26-31.
[2] 王子贺,李存贺,焦提操,等.基于机器学习的同步磁阻电机转子结构优化研究 [J].电子测量与仪器学报,2024,38(09):116-126.
[3] 徐潇钦,胡岩,刘泽宇,等.基于参数灵敏度的永磁辅助同步磁阻电机优化设计 [J].微特电机,2022,50(03):16-20.
[4] 赵子安,王一帆,李凤姣,等.考虑铁损的同步磁阻电机最小损耗控制策略 [J].电机与控制学报,2023,27(11):1-9.
[5] 曹恒佩,艾萌萌,王延波.永磁辅助同步磁阻电机研究现状及发展趋势 [J].电工技术学报,2022,37(18):4575-4592.