

永磁同步电机在高效能驱动系统中的应用研究

顾华杰¹, 朱吉安², 徐 旌¹

(1. 绍兴市上虞区中小企业服务中心, 浙江 绍兴 312300;

2. 卧龙电器南阳防爆集团工业驱动有限公司, 河南 南阳 473000)

摘 要 永磁同步电机具有高效率、低能耗以及良好的动态性能等特点, 在高效能驱动系统当中获得了广泛的应用。本文对永磁同步电机的基本原理和特性展开了分析, 探讨了高效能驱动系统对于电机的要求, 结合轨道交通、电动汽车、工业自动化以及特种领域的应用情况, 对永磁同步电机在不同环境下的优化设计以及技术优势进行了研究。研究表明, 永磁同步电机可切实提高驱动系统的整体性能, 为未来高效能驱动系统的发展提供支持。

关键词 永磁同步电机; 高效能驱动系统; 动态性能; 电磁兼容性; 工业应用

中图分类号: TM341

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.15.005

0 引言

随着能源短缺状况日益凸显以及环保需求不断提高, 高效能驱动系统在工业和交通领域获得了广泛的关注。永磁同步电机依靠高效率、高密度以及优越的性能, 逐渐成为核心驱动方式^[1]。相较于传统感应电机, 永磁同步电机无需额外的励磁电流, 损耗更低, 并且有更为精准的速度和转矩控制能力, 可适应复杂的工况条件。本文围绕永磁同步电机在高效能系统中的应用展开研究工作, 从电磁结构、力矩特性以及特性特点入手, 对其核心工作原理进行分析, 同时结合高效能系统对效率、电磁兼容性、稳定性以及轻量化设计等要求展开探讨, 结合电动汽车、工业自动化等领域的实际应用情况, 为永磁同步电机在高效能系统中的推广以及优化提供相应的参考。

1 永磁同步电机的基本原理与特性

1.1 电磁结构与工作原理

永磁同步电机的基础电磁结构是由定子、转子以及它们之间的气隙共同构成的, 其中定子作为电机的静止部分, 含有多组绕组。当有交流电流通过时, 定子便会产生旋转磁场。转子一般是由永磁体组成的, 依靠与定子产生的旋转磁场相互作用, 产生力矩驱动电机进行旋转, 其工作原理是依据法拉第电磁感应定律, 当定子电流经过绕组时, 定子所产生的旋转磁场会和转子上的永磁体相互作用, 形成转矩, 促使转子转动起来。电机的转速和电网的频率有直接的关联, 通过对输入电流的频率以及幅值进行控制, 可调节电机的运行状态, 电磁学的基本公式可表示为:

$$T = \frac{P_e}{\omega} \quad (1)$$

式中: T 为电机产生的转矩, $N \cdot m$; P_e 为电机的电能输出, W ; ω 为电机的角速度, rad/s 。

1.2 永磁同步电机的特性

永磁同步电机凭借其出色性能以及较高效率, 在各类应用中受到广泛关注。在对动力密度要求较高且需精确控制的系统中, 电机自身的特性决定它在不同领域的适配情况以及应用产生的效果。

1.2.1 转子磁场特性

转子由永磁体构成, 在电机运行期间产生恒定磁场, 该磁场在和定子产生的旋转磁场相互作用时发挥重要作用。永磁同步电机的转子磁场和定子磁场的相对位置以及它们之间的变化关系, 会对电机的转速与效率产生影响, 电机运转时, 转子的永磁体借助感应和定子磁场相互作用, 驱动电机转动。在整个工作过程中, 转子磁场保持相对稳定, 电机能在不同负载状况下维持稳定的运行状态, 永磁同步电机的转子无需外部激励电源, 在节能以及系统简化方面具有优势。和传统感应电机比较, 永磁同步电机的转子磁场更为稳定, 可提高电机的功率输出以及运行效率。转子磁场的稳定性对电机的动态响应特性与转矩输出具有关键作用, 在高负载以及复杂工况下, 可有效提高电机的可靠性与耐久性。

1.2.2 力矩特性

电机的力矩输出取决于转子和定子之间磁场的相互作用, 在永磁同步电机中, 力矩的产生和转子磁场与定子磁场的角度紧密相关。负载发生变化时, 电机转矩会相应调整维持恒定输出, 负载变化对电机转矩输出影响较大, 合理设计与优化对保证电机在不同负载条件下稳定运行非常关键。电机设计时要注意转子

和定子间磁场分布以及它们的相对运动,保证能实现高效力矩输出。力矩特性的优化设计可提高电机运行稳定性,减少因负载波动产生的不稳定因素。和传统感应电机相比,永磁同步电机力矩特性更平稳,使其在快速响应和高负载条件下有更好的可靠性与稳定性。采用合理控制策略,电机能在不同工况下提供精准力矩输出,满足不同应用场景需求^[2]。

1.2.3 效率特性

永磁同步电机采用高性能永磁材料,定子和转子间能量损耗极少。相较于传统电机,此设计提高了电机效率,运行时,电机能量转换损耗源于铜损、铁损与机械损耗,永磁同步电机经优化电磁设计与选用优质材料,可极大地减少这些损耗。在实际应用中,电机效率受负载条件、工作环境及设计参数等多种因素影响。合理优化电机绕组与磁路设计,能降低损耗并提升效率,在高效能驱动系统中,永磁同步电机的高效率特性降低能量消耗,提高系统整体运行效能。随着技术发展,永磁同步电机效率不断提升,新型材料应用与精细化设计使电机在不同工况下效率表现更优。电机高效率利于节省能源,还可以减少热量产生,降低系统散热需求,延长电机使用寿命,在工业、交通等领域应用中发挥着重要作用。

2 高效能驱动系统对永磁同步电机的要求

为了实现系统的高效运作、稳定状态以及长时间持续运行,电机需拥有出色的运行效率、较低的能量消耗以及良好的电磁兼容性等特质,只有符合这些条件,永磁同步电机方可在高效能驱动系统中发挥出最大功效。

2.1 运行效率与能量损耗分析

运行效率以及能量损耗属于高效能驱动系统中的关键指标。电机的效率一般是由能量转换过程中的损耗所决定,损耗包括了铜损、铁损以及机械损失,为了保证高效运行,需要对电机设计进行优化,以此减少各类损耗。通过合理设计绕组和磁路,可降低损失并提高效率,运用先进材料比如高性能磁钢,也可提升电机的运行效率。在实际应用当中,电机的能量损耗分析以及优化设计非常关键,表1呈现了不同电机运行条件下的效率与能量损耗数据。

表1 不同运行条件下的效率与能量损耗分析

运行条件	效率 (%)	能量损耗 (W)
低负载	85	150
中负载	90	120
高负载	93	100

2.2 电磁兼容性要求

为了防止电机运行时所产生的电磁干扰对其他设备的正常工作造成影响,电机设计需要保证其拥有良好的电磁兼容性。通过采取有效的屏蔽、滤波以及接地措施,可有效降低电磁波辐射以及传导干扰,保障系统的稳定运行。电磁兼容性和电机性能相关,而且还涉及系统的安全性与可靠性,表2为不同电磁兼容设计方案下电机的电磁辐射水平以及干扰值。

表2 电磁兼容性设计方案对电机性能的影响

设计方案	电磁辐射 (dB μ V/m)	干扰电平 (dBm)
标准设计	50	-20
屏蔽设计	30	-30
高性能设计	20	-40

2.3 动态稳定性要求

永磁同步电机对高效能驱动系统中的动态稳定性具有重要意义,在实际运用中,电机需要在不同负载以及运行条件下保持稳定的工作情形。为实现该目的,电机的转子与定子设计必须要保证在高速运转时不会出现共振或者不稳定振动,并且运用高质量的控制算法在系统负载产生波动时,快速调节电机的运行状态,保证稳定性。电机的动态响应能力会对系统的稳定性以及可靠性产生影响,在设计时要充分考量动态稳定性要求^[3]。

2.4 高动态响应特性要求

在高效能驱动系统中,永磁同步电机的一个要求是要有高动态响应能力,电机需要能快速应对负载变化,以此处理频繁出现的负载波动以及急剧改变的工作条件。电机的控制系统要在极短时间内调整电流与电压,实现精准的转矩输出。为保证高动态响应特性,电机的驱动系统要有高频率且高精度的控制能力,保证其在高速运行以及负载变化时仍可维持稳定的动态性能。

2.5 结构紧凑化要求

随着高效能驱动系统对电机性能要求日益提升,电机的结构也需持续优化,以符合小型化、紧凑化的设计要求。通过采用高密度材料以及精细化设计,有效减小电机体积,且能保证其性能不受影响,电机的紧凑化设计可降低系统的整体重量与体积,在空间有限的应用场景中,提高系统的适应性及灵活性。结构紧凑的电机不仅在性能方面得到优化,还可以有效降低生产及维护成本。

2.6 轻量化设计要求

电机通过运用轻质材料以及实施优化设计,减轻电机的重量,降低系统能耗并提高其效率。在电动交

通工具应用场景中,电机的轻量化会对整体能效和续航能力产生直接影响,为了实现轻量化的目标,设计师要综合考量材料的选择、结构的优化以及制造工艺等诸多因素,保证电机既能保持轻便,又能维持较高的运行效率。

3 永磁同步电机在高效能驱动系统中的应用

永磁同步电机依靠其有高效能、高功率密度以及优异的动态响应能力等特点,在多个不同的系统当中获得了应用,如轨道交通、电动汽车、工业自动化以及特种领域等众多行业,都将永磁同步电机用作核心驱动装置,以此来满足高性能、高可靠性以及低能耗等方面的需求^[4]。

3.1 轨道交通驱动系统应用

轨道交通系统对于驱动电机有着多方面要求,比如高效率、高功率密度、低噪声以及良好的电磁兼容性等。永磁同步电机因拥有较高的功率因数以及良好的能量转换效率,在轨道交通系统里得到广泛运用,牵引系统经常采用矢量控制技术,利用优化磁链调节和转矩控制,实现电机在不同工况下的高效运行。高转矩密度的设计可以降低电机的体积与重量,提升列车的载客能力,采用先进冷却技术可有效把控电机温升,提升系统的稳定性。为了降低谐波干扰和噪声水平,定子绕组的优化设计以及合理的 PWM 调制策略被应用于驱动系统中,让列车在运行过程中有更好的舒适性与安全性。

3.2 电动汽车驱动系统应用

电动汽车对于驱动电机的要求包括高功率密度、高效率、宽调速范围以及优良的响应特性。永磁同步电机在电动汽车系统中应用十分广泛,在直驱和增程式驱动方案当中,经过优化电磁结构设计,在较低电流状况下实现更高的转矩输出,同时运用高性能磁性材料减少铁损与涡流损耗,提高整体能效。控制策略采用基于预测控制的方法,让电机快速响应加速和减速需求,符合复杂驾驶工况的要求。为提升续航能力,散热系统采用液冷或者油冷方案,提高电机的热稳定性,并降低运行时的能量损耗^[5]。

3.3 工业自动化驱动系统应用

工业自动化领域当中的驱动系统对电机有着特殊要求,要求其有高精度以及高稳定性,并且还要有较长的运行寿命,永磁同步电机采用无刷设计,该设计减少了机械方面的磨损。永磁同步电机在工业机器人、数控机床以及自动化流水线等方面都得到了广泛应用,高精度位置控制系统与高分辨率编码器以及伺服控制算法相结合,电机可在微米级精度的情况下进行位置

调整,以此来满足高端制造的相关需求。采用直驱技术可以省去传统的减速器,这样不仅可以提高系统刚性,还可以减少传动损耗,提升能效。针对不同负载特性,控制系统采用智能自适应调节策略,在保证动态性能的同时还可以降低系统能耗,为智能制造提供高效可靠的动力支持。

3.4 特种领域应用

特种领域针对驱动电机的要求一般涉及极端环境适应能力、高可靠性以及高功率密度等多个方面。航空航天系统中的电驱动装置需要在低温、低压环境下运转,永磁同步电机凭借优化冷却方案以及选用绝缘材料,提高了系统的耐久性与安全性。深海作业设备要求电机有良好的密封性以及抗压能力,借助特殊涂层和耐腐蚀材料来提升防护等级。军用装备和无人系统重点强调电机的高功率密度以及低噪声特性,凭借优化磁路结构和减振设计,实现高效可靠的动力输出。在特殊应用场景当中,永磁同步电机的先进设计和高效控制策略为关键设备提供了稳定的驱动力保障^[6]。

4 结束语

本文主要围绕永磁同步电机的基本原理、特性以及其于高效能系统中的应用展开,研究结果表明,永磁同步电机有高效率、良好的响应能力以及较低的能耗,可满足轨道交通、电动汽车以及工业自动化等领域对系统的高性能需求。优化电磁兼容性、提升稳定性以及实现轻量化设计是未来永磁同步电机技术发展的要点。

参考文献:

- [1] 郑长明,阳佳峰,高昂,等.永磁同步电机长线变频驱动系统定频滑模预测电流控制[J].电工技术学报,2023,38(04):915-924.
- [2] 陈东东,王晋,李子博,等.考虑谐振抑制的永磁同步电机长线缆驱动系统转子初始位置辨识技术[J].电工技术学报,2022,37(19):4938-4946.
- [3] 刘凯,张阔,花为,等.基于变载波频率的永磁同步电机驱动系统效率优化控制[J].东南大学学报(自然科学版),2024,54(03):724-729.
- [4] 王俭朴,赵裔海,李瑞.永磁同步电机转子拓扑结构优化与电磁性能分析[J].兰州交通大学学报,2024,43(06):115-121.
- [5] 王孝洪,梁或,潘志锋,等.永磁同步电机无电解电容驱动技术综述[J].华南理工大学学报(自然科学版),2024,52(12):93-108.
- [6] 张承宁,孙永禄,张硕.基于预测控制的永磁同步电机驱动系统转矩脉动抑制方法[J].新能源航空,2023,01(01):57-69.