

# Experimental Study on Performance Optimization of Permanent Magnet Synchronous Generators for New Energy Vehicles under High-Speed Operating Conditions

Jian Yang

BorgWarner Power Drive Systems Tianjin Co., Ltd., Tianjin, 300000, China

## Abstract

This paper conducts relevant research on the performance optimization of permanent magnet synchronous generators for new energy vehicles under high-speed conditions. This article analyzes the challenges faced by the motor under high-speed operating conditions, such as increased electromagnetic loss, intensified vibration and noise, and difficult heat dissipation. It proposes performance optimization strategies from multiple dimensions, including electromagnetic design optimization, structural design improvement, cooling system optimization, and control strategy adjustment. That is, by adopting new electromagnetic materials and optimizing the magnetic circuit structure to reduce electromagnetic loss; Improving the rotor structure and enhancing mechanical strength aim to reduce vibration and noise. Redesign an efficient cooling system to solve the heat dissipation problem; And combine advanced control algorithms to enhance the efficiency and stability of power generation. This research achievement aims to enhance the performance of permanent magnet synchronous generators under high-speed conditions, which can provide technical support and theoretical references for the optimization and upgrading of the power system of new energy vehicles, and thereby contribute to the sustainable development of the new energy vehicle industry.

## Keywords

New energy vehicles Permanent magnet synchronous generator Electromagnetic design Structural improvement Cooling system

## 新能源汽车用永磁同步发电机高转速工况下的性能优化试验研究

杨健

博格华纳动力驱动系统天津有限公司, 中国·天津 300000

## 摘要

本论文针对新能源汽车用永磁同步发电机在高转速工况下的性能优化问题展开相关的研究。文章通过分析高转速工况下发电机面临的电磁损耗增加、振动与噪声加剧、散热困难等挑战,从电磁设计优化、结构设计改进、冷却系统优化、控制策略调整等多个维度提出了性能优化策略。即采用新型电磁材料、优化磁路结构降低电磁损耗;改进转子结构、增强机械强度旨在减少振动与噪声;再设计高效冷却系统来解决散热难题;并结合先进控制算法提升发电的效率与稳定性。此次研究成果旨在提高永磁同步发电机在高转速工况下的性能表现,可以为新能源汽车动力系统的优化升级提供技术支持与理论参考,进而助力新能源汽车行业的可持续发展。

## 关键词

新能源汽车; 永磁同步发电机; 电磁设计; 结构改进; 冷却系统

## 1 引言

现阶段,随着全球对于环境保护和能源可持续发展的关注度不断提高,新能源汽车凭借其清洁、高效的优点,逐渐地成为了汽车产业发展的重要方向。而永磁同步发电机以其功率密度高、效率高、响应速度快等优点,在新能源汽车动力系统中得到广泛的应用。可在新能源汽车的实际运行过

程中,尤其是在高速行驶、急加速等工况下,永磁同步发电机常常需要工作在高转速状态。而高转速工况会给永磁同步发电机带来一系列的问题,如电磁损耗显著增加、振动与噪声加剧、散热难度加大等,并且这些问题严重地影响着发电机的性能和可靠性,制约了新能源汽车的动力性、经济性和舒适性。为此,本文将系统地分析高转速工况对永磁同步发电机性能的影响,并提出针对性的优化策略,以期能够为提升新能源汽车动力系统性能提供有益的参考。

【作者简介】杨健(1993-),男,中国河北涉县人,本科,从事工程技术研究。

## 2 高转速工况对永磁同步发电机性能的影响

### 2.1 电磁损耗增加

在高转速工况之下，永磁同步发电机的电磁损耗得以显著地增加，当中主要包括了铜损耗、铁损耗和永磁体涡流损耗。其中随着转速升高，电机的电流频率增大，使得绕组的交流电阻增加，从而导致铜损耗上升。同时，高频率的磁场变化使得铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗大幅增加，因此铁损耗也会随之升高。此外，高转速下永磁体表面会产生较强的涡流，进而引起永磁体涡流损耗，不仅降低了发电机的效率，还可能会导致永磁体温度升高，影响到其磁性能，甚至是出现不可逆退磁现象。

### 2.2 振动与噪声加剧

永磁同步发电机的振动与噪声问题在高转速运行时会变得更为突出。一方面，由于转子的不平衡、气隙磁场的分布不均匀以及电磁力的波动等因素，将会产生较大的振动。而振动不但会影响发电机的机械结构稳定性，而且还可能导致零部件松动、磨损，此时发电机的使用寿命会缩短<sup>[1]</sup>。另一方面，振动会引发电机部件的振动噪声，同时高转速下空气动力噪声也会显著地增加，噪声将会对车内驾乘人员的舒适性产生不良的影响，甚至可能会干扰驾驶员的正常操作。

### 2.3 散热困难

高转速工况下的永磁同步发电机，由于电磁损耗和机械损耗的增加，使得发电机内部的温度急剧升高。然而电机内部空间有限，并且散热面积相对较小，加之高转速下电机内部的空气流动复杂，所以不利于热量的有效散发。此时如果不能及时地将热量散发出去，就会导致电机绕组绝缘老化、永磁体性能下降，严重时甚至可能会引发电机故障，进而影响到新能源汽车的正常运行。

### 2.4 控制难度加大

高转速工况下的永磁同步发电机，其控制难度会显著地增加。因为高转速带来的快速变化的电磁参数和动态特性，对于控制系统的响应速度、精度和稳定性提出了更高的要求。而传统的控制策略将无法适应高转速工况下的控制需求，进而容易出现电流失控、转矩脉动增大等问题，最终影响到发电机的发电性能和新能源汽车的动力输出稳定性。

## 3 电磁设计优化策略

### 3.1 采用新型电磁材料

在提升新能源汽车永磁同步发电机的性能时，选用高性能永磁材料是最为关键一环。此时，钕铁硼永磁体凭借其高剩磁密度与高矫顽力的特性，成为了最为理想的选择。原因在于，新型高性能钕铁硼永磁体不仅磁性能卓越，能够在相同体积下产生更强的磁场，以显著地提高了发电机的功率密度，而且其良好的热稳定性和抗退磁能力，可以有效地减少高转速工况下永磁体的涡流损耗，直接地降低了不可逆退磁风险。与此同时，铁芯材料的选择同样重要，一般建议采

用低损耗的硅钢片，如高牌号冷轧取向硅钢片，即可大幅度地降低铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗，进而减少高转速下的铁损耗。

### 3.2 优化磁路结构

通过采用偏心磁极、不等厚磁极等特殊结构优化磁极形状，就能够有效地改善气隙磁场分布，进而降低气隙磁场的谐波含量，并减少电磁力的波动，使得降低电磁损耗和振动噪声的目标得以实现。因此，对于新能源汽车永磁同步发电机的磁路结构优化而言，磁极形状优化与磁障设计均发挥着不可或缺的作用<sup>[2]</sup>。

以偏心磁极结构为例，其能使气隙磁场更加正弦化，有效地抑制了齿槽转矩，从而显著地提高了发电机的运行平稳性。而在转子结构中引入磁障设计，合理地布置磁障的数量、形状和位置，则可以调节磁路磁阻、优化磁场分布，进而提高发电机的功率因数和发电效率。不仅如此，磁障还具备一定的隔磁作用，它能够减少永磁体的漏磁，进一步地降低永磁体涡流损耗。但磁极形状的优化应当侧重于改善磁场分布状态，磁障的设计需着重于调节磁路特性。只有二者相互配合，从不同的角度优化磁路结构，才能提升发电机的性能。

### 3.3 绕组设计改进

在新能源汽车永磁同步发电机的绕组设计改进方面，绕组型式选择与绕组匝数线径的优化紧密相关且各有侧重。具体而言：绕组型式的合理选择是首要环节，即根据发电机的具体参数和工况需求，在分布式绕组和分数槽集中绕组中进行抉择。其中分布式绕组凭借较好的散热性能和较低的谐波含量，在对散热要求较高的高转速工况下表现较为出色；分数槽集中绕组则以绕组端部短、用铜量少、功率密度高的优势，可以有效地降低铜损耗。

## 4 结构设计改进策略

### 4.1 转子结构优化

转子结构优化一方面要采用高强度的转子材料和结构设计，以此有效地提高转子的机械强度和临界转速，使其能够适应高转速运行需求。另一方面，转子的动平衡处理同样不可或缺。即对转子进行高精度的动平衡检测和校正，从而显著地减少转子的不平衡量，使得转子在高转速下得以稳定的运行，并且还能有效地降低振动和噪声。

### 4.2 轴承系统改进

轴承系统作为保障永磁同步发电机正常运转的关键部分，其高转速工况下的改进是至关重要的。首先需选用适合高转速工况的陶瓷轴承、角接触球轴承等高性能轴承，并确保其能够充分地发挥自己的独特优势。其次应该采用合适的润滑脂和润滑方式，使得轴承可以在高转速下获得良好的润滑，从而减少磨损。同时通过优化轴承的密封结构，如采用双唇密封结构或迷宫密封结构，可有效地防止润滑油泄漏

以及外界灰尘、杂质进入轴承内部,此时能够避免这些因素影响轴承的性能和使用寿命。

### 4.3 机座与外壳设计

机座刚性的增强为发电机的稳定运行提供了保障,外壳散热结构的优化则解决了高转速下的散热难题,若二者协同作用,即可共同提升发电机在高转速工况下的性能表现<sup>[1]</sup>。

为了增强发电机的整体机械稳定性,首要任务便是增强机座的刚性。一般情况下,通过设计具有足够刚性的机座结构,如增加机座的壁厚、合理布置加强筋等措施,就能够显著地增强机座的抗振能力,进而有效地减少振动的传递。但优化外壳的散热结构也非常关键。即在发电机外壳上设计散热筋、散热片等结构,从而大幅度地增加散热面积,以此提高散热的效率。或者是采用铝合金等导热性能良好的材料制造外壳,这样有助于热量的快速传导和散发。

## 5 冷却系统优化策略

### 5.1 风冷系统优化

在新能源汽车永磁同步发电机的风冷系统优化过程中,通风结构与风扇性能的优化是相辅相成的,二者共同致力于提升散热的效果。第一点,相关人员需合理地设计发电机内部的通风路径和通风口布局,以此奠定提高空气流通效率的基础。通常工程师们会依据发电机的结构特点与散热需求,灵活地采用轴向通风、径向通风或混合通风方式。对于轴向长度较长的发电机,轴向通风方式能够沿着其轴向方向高效地带走热量;而对于径向尺寸较大的发电机,径向通风或者混合通风方式才能够更好地覆盖散热区域,使得热量的有效散发得以实现。然而,仅有良好的通风结构还不够,风扇的性能也同样关键。实践中应该选用高性能的风扇,并对其叶片形状、尺寸和转速进行优化,此举是强化散热能力的重要举措。一般情况下,采用宽叶片、大直径的风扇就能够显著地增加风量,进而提升散热效果。但合理地调整风扇转速,便可在满足散热需求的前提下,尽量地降低噪声干扰。此外在风扇上设置导流罩或导流板,还能够进一步引导空气流动,让空气更加精准地作用于发热部位,从而大幅度地提高散热的效率。

### 5.2 液冷系统设计

就液冷系统的设计而言,冷却液的选择与冷却通道的设计是紧密关联,双方一齐保障着发电机在高转速工况下的散热需求。

在冷却液选择方面,工程师们会优先挑选导热性能好、比热容大且化学稳定性高的冷却液,当前水-乙二醇混合液是最为常见的优质选择。基于此,根据发电机实际的工作温度范围,还需精确地调整冷却液的浓度,这样才能确保冷却液在高转速工况下既不会因高温沸腾,也不会因低温环境下冻结。同时考虑到冷却液的腐蚀性,还必须选用具有良好防腐性能的冷却液,以此保护冷却系统的各个部件,进而延长系统的使用寿命。

不过冷却通道的设计同样不容忽视,建议在发电机的定子铁芯、转子铁芯或机座中科学开设冷却水道,此举是实现有效散热的关键<sup>[4]</sup>。究其原因,通过优化冷却通道的形状、尺寸和布局,便保证了冷却液均匀地流经各个发热部位,其能够充分地带走热量。而采用螺旋式、蛇形等特殊的冷却通道结构,则可以有效地增加冷却液的流动路径和换热面积,以此显著地提高了散热的效率。

### 5.3 相变冷却技术应用

相变冷却技术应用于新能源汽车永磁同步发电机散热时,热管冷却技术和相变材料冷却技术即可各展所长,合力为解决高转速工况下的散热难题提供创新方案。具体而言:热管冷却技术凭借其独特的传热优势,成为了高效散热的有力手段。该技术旨在将热管应用于发电机的冷却系统,再利用其高效传热特性,达到快速把热量从发热部件传递到散热部件的效果。而由于热管具有传热效率高、结构简单、可靠性强等显著优点,因此在高转速工况下,它能够迅速地降低发电机的温度。例如,在永磁体表面或绕组端部安装热管,便可将这些关键部位产生的热量迅速地传导到机座或外壳的散热部位,进而实现了热量的高效转移。相变材料冷却技术则是从另一个角度发挥作用,此技术需要在发电机内部合适位置填充石蜡、脂肪酸等相变材料。当发电机温度升高时,相变材料就能吸收大量的热量发生相变,使其从固态转变为液态,接着利用相变过程吸收的潜热来降低发电机温度。随后当温度降低时,相变材料又能从液态转变为固态,此时它会释放热量。

## 6 结语

结合上述所有内容可知,新能源汽车用永磁同步发电机在高转速工况下的性能优化是一项系统且复杂的工程,当中涉及了电磁设计、结构改进、冷却系统优化以及控制策略调整等多个关键的领域。通过本研究提出的优化策略,从材料选择、结构设计到控制算法的改进,以层层递进的方式,针对性地解决了高转速工况下发电机面临的电磁损耗、振动噪声、散热及控制等难题。而这些优化策略具备一定的有效性与可行性,可以显著地提升发电机在高转速工况下的运行性能,不仅为新能源汽车动力系统的优化升级提供了坚实的技术支撑与理论依据,也为新能源汽车行业的可持续发展注入新动力。

### 参考文献

- [1] 唐小春,于冰,许时杰,等.新能源汽车用永磁辅助同步磁阻电机噪声及续航优化研究[J].电机与控制应用,2020,47(01):91-96.
- [2] 范文超.新能源汽车用永磁辅助同步磁阻电机设计[D].山东省:曲阜师范大学,2023.
- [3] 祁理想.新能源汽车用永磁同步电机耦合偏心下振动噪声研究[D].安徽省:安徽大学,2024.
- [4] 罗润谦.新能源汽车用永磁同步电机的研究现状[J].兵器材料科学与工程,2023,46(05):154-158.