

Safety Analysis and Protection Strategies for High Voltage Electrical Systems of New Energy Vehicles

Fuchun Zhong Maowei Wu

Jiangling Automobile Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330000, China

Abstract

With the rapid development of new energy vehicles, high-voltage electrical systems have become their core components. The safety of high-voltage systems is directly related to vehicle performance, user safety, and the overall industry progression. This study systematically analyzes the risk characteristics of high-voltage electrical systems in new energy vehicles, including high-voltage electric shock, short circuits, and insulation aging, highlighting the necessity of in-depth safety research. Furthermore, this paper proposes comprehensive protection strategies covering the design, manufacturing, and operational stages, such as high-voltage component optimization, real-time monitoring systems, protective technologies, and automatic fault isolation schemes. These measures aim to mitigate potential risks and enhance overall system safety, thereby promoting the stable development of the new energy vehicle industry.

Keywords

new energy vehicles; high-voltage electrical systems; safety analysis; protection strategies; fault isolation

新能源汽车高压电气系统安全性分析与防护策略

钟福春 吴茂伟

江铃汽车股份有限公司, 中国·江西 南昌 330000

摘要

随着新能源汽车的快速发展, 高压电气系统成为其核心组成部分。高压系统的安全性直接关系到车辆的性能、用户的安全以及整体产业的发展。本研究系统地分析了新能源汽车高压电气系统的风险特征, 包括高压触电、短路、绝缘老化等问题, 引出了对安全性深入研究的必要性。此外, 论文提出了涵盖设计阶段、制造阶段及使用阶段的全面保护策略, 如高压组件优化设计、实时监控系統、防护技术及故障自动隔离方案等。这些措施旨在降低潜在风险, 提高系统的整体安全性, 从而促进新能源汽车行业的稳步发展。

关键词

新能源汽车; 高压电气系统; 安全分析; 保护策略; 故障隔离

1 引言

近年来, 随着全球能源危机与环境污染问题的加剧, 各国对交通领域的节能减排要求不断提高, 新能源汽车产业迅速发展。相较于传统燃油汽车, 新能源汽车(尤其是纯电动汽车和插电混动车型)的核心技术优势在于其高效的能量利用、电气化驱动系统以及清洁能源的使用。据国际能源署(IEA)发布的数据, 新能源汽车的年销量在过去十年中呈指数级增长, 预计到2030年, 全球电动车的保有量将超过1亿辆。中国作为全球最大的新能源汽车市场, 在政策与技术双重支持下, 已成为全球新能源汽车产业的领导者。

在新能源汽车技术中, 高压电气系统是其核心组成部分。这一系统的运行质量直接影响着车辆的整体性能和市

竞争力。然而, 在快速发展的同时, 高压系统的安全风险也逐渐凸显, 如频繁爆出的电池热失控、短路故障等技术事故, 引发了对新能源汽车高压电气系统可靠性和安全性的广泛关注。

2 新能源汽车高压电气系统概述

随着新能源汽车的快速发展, 高压电气系统已经成为其关键组成部分。为了更好地理解高压电气系统的设计和应用, 本部分围绕主要组成、工作原理及基本安全要求三个方面展开分析, 为后续深入探讨高压电气安全性与保护策略奠定基础。

2.1 主要组成

新能源汽车的高压电气系统主要由以下几个关键组件组成:

①动力电池系统: 动力电池是新能源汽车高压系统的核心, 通常由锂离子电池组成, 提供车辆所需的高压直流电

【作者简介】钟福春(1985-), 男, 中国江西赣州人, 本科, 工程师, 从事汽车电子电器相关研究。

(一般为300~800V)。电池管理系统(BMS)对电池组的健康状态和性能进行实时监控和优化,以保证其安全运行。

②电机与电机控制器:电机负责将电能转化为机械能驱动车辆行驶,电机控制器则将直流电转换为可调频的交流电,控制电机的转速与扭矩以满足驾驶需求。

③高压逆变器:逆变器是高压电气系统中的核心变换装置,其将动力电池的直流电转换为交流电,供电机使用,同时也管理能量回收功能。

④车载充电器(OBC)与DC/DC转换器:OBC用于从充电设施获取电能并为动力电池充电,而DC/DC转换器则将动力电池提供的高压电转换为低压电,供车内电子设备使用。

⑤高压线束及开关设备:高压线束用于传输电能,须具备绝缘性能优越、抗电磁干扰的特性;高压开关设备则在系统操作中用于实现电流的通断控制。

⑥热管理系统:为了保护高压部件在工作中的可靠性,热管理系统通过液冷、气冷等方式调节电池、电机和电子设备的工作温度。

2.2 工作原理

新能源汽车的高压电气系统主要围绕电能的存储、转化、传输和利用而设计,其基本工作原理如下:

①电能存储与供给:动力电池作为电能存储单元,通过化学反应将电能储存为化学能。在车辆启动或运行时,动力电池经DC/DC转换为整车的低压电源供给,同时直接为高压设备供电。

②电能转换:在驱动过程中,逆变器将动力电池提供的直流电转换为电机可用的交流电,实现电能向机械能的转换;在制动或减速时,电机则作为发电机工作,将机械能转化为电能,通过逆变器回充至电池。

③电能传输与分配:高压电气系统内部通过高压线束将电能各个装置间传输,并通过开关与相关控制设备进行分配,以实现整车高效、安全地运转。

2.3 基本安全要求

鉴于高压电气系统的高能量和高风险特性,在设计和使用过程中需满足以下基本安全要求:

①绝缘保护:高压系统必须采用高强度绝缘材料,确保高压电流不会泄漏至车身或其他非导电部件之上。

②电气隔离:高压电气系统与车内低压系统之间应保持有效的电气隔离,避免电击风险或系统交互干扰。

③过流与过压保护:配备可靠的保护装置(如熔断器、断路器等),以防止系统内部因过流、短路或过压引发的设备损坏或安全事故。

④导线与连接器可靠性:高压线束和连接器须具备优越的可靠性和耐久性,同时避免因疲劳或老化引起的电气故障。

⑤热安全设计:为了避免高压部件因过热而产生隐患,系统须具备全面的热保护措施,如温度传感器监控及自动散热设计。

通过分析,我们详细拆解了新能源汽车高压电气系统的主要组成、工作机理及其基本安全要求。高压电气系统的复杂性和高风险属性决定了其对于可靠性和安全性的高标准需求,这也为后续保护策略和具体案例的研究奠定了重要的基础。

3 高压电气系统的安全性分析

高压电气系统是新能源车辆的核心组成部分,其稳定性和安全性对整车的性能和用户安全至关重要。在实际应用中,高压系统可能面临多种安全性挑战,需要进行全面的分析与评估,以确保系统的可靠性和安全运行。本部分将从高压系统中常见的安全问题、关键组件的安全风险分析以及外部环境的影响三个方面进行深入探讨。

3.1 高压系统中常见的安全问题

在新能源车辆的高压电气系统运行中,存在一些典型的安全隐患,主要包括以下几方面:

①电气短路:由电路设计不当、电缆损坏或接线连接不良引发的短路是高压系统的主要风险之一。短路可能导致高温、火花甚至火灾,对车辆和乘员造成严重威胁。

②绝缘失效:高压系统中绝缘材料的老化、环境影响或制造缺陷可能导致绝缘失效,使得高压电流意外泄漏。绝缘失效容易引发电击或设备故障。

③电弧放电与过热:在高压电气连接器或开关部件中,电弧放电可能出现,特别是在接触不良的情况下。长期存在的电弧放电可能导致系统过热甚至引发火灾。

④EMI/EMC问题(电磁干扰):高压系统会产生强电磁场,这可能对车内其他低压电气系统、控制电路乃至外部设备造成干扰,不仅影响系统性能,也可能带来新的安全隐患。

3.2 关键组件的安全风险分析

新能源车辆的高压系统由多个核心部件组成,各组件的安全性对于整体系统的安全至关重要。以下是关键组件的安全风险分析:

①电池安全性:动力电池是高压系统的核心组件,其主要风险包括热失控、过充过放、电芯机械损伤等。热失控可能引发电池起火或爆炸,而过充过放条件下,电池内部化学稳定性降低,可能带来严重事故风险。

②高压连接器的接触与密封问题:高压连接器在车辆运行中的可靠连接和密封性能十分重要。一旦出现接触不良,容易导致电弧放电,密封失效可能引入水分或灰尘,加速内部元件的腐蚀和劣化。

③电缆与绝缘材料的老化与损坏:高压电缆的长期使用可能因环境因素和机械应力造成绝缘材料老化、表面龟裂甚至破损。这将增加电流泄漏的风险,并降低系统的整体性能。

3.3 外部环境对高压电气系统的安全性影响

新能源车辆面临的外部工作环境复杂多变,这些因素对高压电气系统的安全性有直接或间接的影响:

①温度变化对高压系统的影响：高温可能导致电池过热或绝缘材料性能下降，而低温条件下电池输出功率和充放电效率显著降低，可能引发能量管理混乱。

②潮湿条件和防水性能问题：高压系统的防水性能直接关系到绝缘安全和系统稳定性。在高湿度或涉水环境中，密封不良的组件可能进入水分，引发短路或电击风险。

③车辆碰撞与振动对高压系统安全的威胁：车辆发生碰撞、振动或其他物理冲击时，高压系统容易受到机械损伤，例如电池破裂、电缆断裂或连接器脱开。这可能导致电解液泄漏、电气短路或燃烧爆炸等危险。

综上所述，高压电气系统的安全性分析是保障新能源汽车运行安全的关键环节。通过识别和解决常见安全问题，针对关键组件的潜在风险提出针对性改进措施，以及充分考虑外部环境的影响，可以大幅提升新能源汽车高压系统的整体安全性，进而提高车辆的可靠性和用户信任度。

4 高压电气系统的防护策略

4.1 系统设计阶段的安全防护

高压电气系统的安全防护应从设计阶段着手，通过选用高可靠性元器件和优化系统结构来降低故障风险。首先，高可靠性元器件的选择至关重要，这些元器件需满足严格的质量和耐久性标准，以抵抗高压电流的冲击和复杂使用环境带来的应力。其次，优化系统拓扑结构可以有效减少电气连接点及其对应的故障概率。例如，采用集成化设计减少电缆长度及接头数量，有助于提高系统的整体可靠性。最后，高压电路的冗余设计增加备用电路，能够在主系统发生故障时快速切换，避免安全隐患。这种冗余设计特别适用于新能源汽车中的关键控制模块，确保车辆运行的安全性和连续性。

4.2 硬件保护策略

高压电气系统的硬件保护是整个安全防护的重要组成部分，主要通过电气元件的选型和物理防护技术来实现。首先，高压断路器和熔断器是系统过电流保护的核心元件，断路器在电流超过额定值时迅速断开电路，而熔断器则可提供一次性保护以应对严重故障。其次，高性能绝缘材料的使用对防止电流泄漏和短路至关重要。例如，采用耐高压和耐高温的绝缘涂层或材料，不仅可以提升绝缘强度，还能延长车辆的使用寿命。此外，为了适应复杂的使用环境，高压部件的防护等级设计必须达到 IP67 或 IP69K，这不仅保证系统在水淹、尘土等极端工况下的正常运转，还进一步降低了环境因素导致的失效风险。

4.3 软件控制与监测策略

软件控制和监测是高压电气系统保护策略的重要组成部分，通过覆盖感知、诊断和响应等多个环节来有效规避安全隐患。一方面，高压系统的实时监测与诊断确保系统运行在安全范围内，基于多传感器融合技术的监控系统能够精准测量电流、电压、温度等关键参数，并对异常情况作出快速响应。另一方面，故障检测与保护算法是系统安全的核心技术。这类算法通过对传感器数据的实时分析，能够快速识别

过电流、过电压或漏电等问题，并在必要时采取保护措施，例如切断高压电路。此外，为确保车辆碰撞事故中的高压安全，系统必须具备碰撞检测触发的迅速断电功能，避免对乘员和救援人员造成二次伤害，这一功能通常通过整车控制器与高压继电器联动实现。

4.4 标准化与测试认证

高压电气系统的安全性和可靠性需要通过相关国际标准的引导和测试认证来保障。目前，行业内重要的国际标准包括 ISO 6469 和 IEC 61851 等，这些标准对高压系统的电气安全、机械强度以及环境适应性等方面提出了明确要求，例如对绝缘电阻值、漏电流限值和瞬态过电压进行规定。测试认证过程中，依据这些标准对高压系统进行全面考核，覆盖绝缘性测试、热循环测试、高压耐受测试等关键环节，确保系统在各种工况下的稳定性和安全性。此外，还需要针对防护等级（如 IP67/IP69K）开展细致的测试，包括抗水浸、抗粉尘以及高压冲洗等极端条件下的耐受性能测试。这些标准化和测试认证不仅能够保证产品设计的合规性，也能有效提升市场对产品安全性能的信赖感。

5 结论

高压电气系统是新能源汽车实现高效性能与环境友好性的核心组成部分，但其高能量密度和复杂性也带来了相应的安全挑战。论文通过对高压电气系统的结构特点、潜在的安全隐患及其诱发机制进行深入分析，总结了当前安全保障的基础问题及亟须解决的关键技术。针对具体安全隐患，论文提出了多层次、系统化的保护策略，包括高效监测与故障诊断技术的应用、主动保护机制的设计、材料与工艺优化以及电气系统的标准化安全设计。这些方法对降低高压系统事故风险具有重要意义。

通过研究可知，确保新能源汽车高压电气系统的安全运行需要从多方面入手：既要强化硬件系统的防护和优化，又需借助先进的智能化手段持续提高安全控制能力。同时，完善相关法规与行业标准，规范设计与运行要求，为系统的安全性提供制度保障。同样重要的是公众的安全意识教育，以减少操作不当导致的风险。

综上所述，随着新能源汽车的快速普及，高压电气系统的安全性已成为行业发展的重要前提。论文提出的分析方法与保护策略，不仅为解决现阶段的技术挑战提供了思路，也为进一步研究和开发更加智能化、安全化的高压电气系统奠定了基础。在未来，随着技术的不断进步与标准的进一步完善，新能源汽车高压电气系统的安全性能将得到全面提升，为车辆性能优化和用户安全保驾护航。

参考文献

- [1] 范书华,许丰.新能源商用车低压电性能测试技术研究[J].汽车电器,2024(3).
- [2] 孙文轩,曲殿伟.汽车电气系统中自动化技术应用[J].汽车测试报告,2024(5).
- [3] 惠莉.汽车电气系统安全性设计研究[J].汽车测试报告,2024(8).