

新型光伏电气化公路供电系统的探讨

孙洋锐

石家庄铁道大学 河北石家庄 050043

【摘要】本文基于电气化高速公路的特性，构建以新能源为主体的弹性电气化高速公路系统，探讨打造节能、环保的新型公路交通运输系统方案。通过本文的研究，可利用同相供电技术为行驶在配有双弓集电结构的高速公路的货运汽车提高电能，完善了集接触网、电力汽车、高速公路于一体的智能交通公路运输系统。通过对供电方式、柔性供电设备、能量回收以及分布式能源的能量路由调度等多方面协调控制，可使混合动力货运汽车不仅具有节能减排的优点，而且摆脱了纯电池供电续航能力差和充电不便的问题，能够为新能源接入下电力与公路系统的协调发展寻找一条新的优化路径。

【关键词】交通系统；电气化公路；同相供电；新能源货车

引言

近年来，为实现“节能减排”战略目标、推进新能源的高渗透与高效利用，国内外学者积极探索和实践了多能互补、微电网、能源互联网等新型供电模式^[1]。国家主席习近平在联合国发展峰会的讲话上倡议构建全球能源互联网，推动以清洁、绿色方式满足全球电力需求^[2]。这种集电能生产、输送、存储和消纳等多功能于一身的供电模式，不仅可以降低系统碳排放，还有利于提升系统的能源利用率、稳定性和安全性。这些模式有的已经借鉴并应用于电气化公路，目前国内外的研究现状如下：

架线式电气化高速公路系统最早由德国西门子公司提出，并与多家公司合作进行了试验。2016年，首次在德国电气化高速公路上行驶了配备智能受电弓系统的货车。2017年，西门子公司宣布与德国黑森林州达成合作协议，计划在德国A5联邦公路架设总长达10km的接触网系统。近年来，德国还在希斯威格-霍伊斯坦联邦州和巴登-符腾堡联邦州筹建电气化公路。

我国于2023年3月28日在株洲建设了国内首条电气化公路试验线。虽然我国对电气化高速公路的研究和建设刚刚起步，但是我国拥有建设电气化公路优势，我国不仅拥有科技人才辈出的人才优势，而且还具备集中起来办大事的制度优势。同时我国具有大规模高铁、地铁建设和运营管理经验，这些优秀经验均可以运用于电气化公路的发展。

为解决早期干线铁路的电能质量问题和列车过分相问题，西南交通大学李群湛教授提出了同相供电技术，同相供电技术经过长时期研究和发

展，取得了一系列研究成果，如：陈民武等人^[3]、黄小红等人^[4]、张丽艳等人^[5]均对同相供电技术进行了优化。2018年10月，世界首套单相组合式同相供电装置正式运用于温州轨道交通S1线。

但迄今为止，电气化公路相关的理论和工程经验还都不成熟，我国尚无商业运行的电气化公路系统，为了进一步深化研究，需结合多状况、多场景，研究出适用于我国国情的电气化公路的整体方案。

1 研究内容与研究目标

1.1 研究内容

1.1.1 面向多能互补接入的公路供电系统网架拓扑的研究

研究一种适合分布式发电能源接入的电气化高速公路的交流混合输配电系统，根据拓扑结构搭建仿真模型，设计相应的综合能源管理策略，及储能的优化配置和充放电管理策略，最终更好地实现可再生能源的消纳。

1.1.2 分布式发电系统中对于柔性多状态开关控制策略的优化

直流制式和交流制式有着各自的优缺点，直流制式杂散电流问题较严重，交流制式会造成以负序为主的电能质量问题。针对此问题，本文研究适用于电气化公路牵引供电系统的同相供电技术，将组合式同相供电技术应用于电气化公路供电系统中，由此来去除电分相从而提高电能质量，充分发挥交流供电制式的优点。最后通过仿真手段进一步完善方案，使方案更加安全、经济。

1.2 研究目标

为构建一个具有自愈、坚强、兼容、支持电力市场等特

征的弹性电气化公路供电系统。为未来大规模电气化公路的实践奠定理论方法与技术基础。本项目的研究目标具体包括以下几个方面。

1.2.1针对“源-网-荷-储”互动引起的能源波动与消纳等一系列问题，构建计及新能源、储能装置、大电网等多能互补的同相供电系统网架拓扑分析模型，通过优化拓扑结构，实现“源-网-荷-储”的友好互动，确保同相供电系统经济、安全、稳定运行。

1.2.2针对未来电动汽车、可中断负荷、需求侧主动响应等负荷不确定性问题，构建多场景下计及不确定性的负荷预测模型，揭示不确定性负荷与同相供电系统友好互动规律，研究同相供电系统多场景下自适应寻优控制策略，并研制基于第三代半导体的新型电力电子装置，进而提升同相供电装置的可靠性。

2 拟采取的研究方案及可行性分析

2.1 面向多能互补接入的公路供电系统网架拓扑的研究

该多能互补接入的公路供电系统主要由“源-网-荷-储”这四部分组成，“源”可指火力、水力、光伏等多元能源发电系统；“网”指新型灵活控制的供电网络，本文研究的对象是单相交流牵引同相供电系统；“荷”是指电力重卡等交通负荷，既可以消耗电能，又可以通过制动产生电能；“储”指蓄电池等储能装置和措施。

本方案从可再生间歇性能源、储能装置、大电网接入下同相供电系统安全稳定运行的广域态势感知理论与应用技术展开研究。为了实现“源-网-荷-储”这四个部分在纵向上的配合协调，保证同相供电系统的安全稳定运行，需要研究同相供电系统的广域态势感知理论与应用技术。一方

面，需要确保“源-网”之间的协调，以保证交通的供电系统具有充足的消纳能力。同时，还需要保证“源-荷-储”之间的协同协作，我们可以将发电系统看作供应源，将负荷与储能等用电设备看作需求源。其中在体系的调控中，需求源与供应源应被看作同等重要的角色。通过调制，使需求源主动向供应源发出响应，并协调储能电源的充放电，进一步提高系统的能源利用率。

如图1所示，经过研究同相交流牵引供电系统中分布式发电能源和储能的接入拓扑结构，本文提出了一种适合分布式发电能源接入的电气化高速公路的混合交直流输配电系统。根据拓扑结构搭建仿真模型，设计相应的综合能源管理策略，及储能的优化配置和充放电管理策略，最终更好地实现可再生能源的消纳。各变电所、牵引/制动电动重卡和储能系统通过牵引网实现实时能量交互，形成了一个复杂的多能源耦合系统。这种组合增加了系统的潮流可控性和供电可靠性，使得系统运行更加灵活。

2.2 分布式发电系统中对于柔性多状态开关控制策略的优化

牵引负荷随机波动大、有冲击性，未来电动汽车、可中断负荷、需求侧主动响应等在增加供电系统活力的同时增加了系统的不确定性，基于此开展针对负荷不确定性进行多场景的有效模拟，构建多场景下计及不确定性的负荷预测模型，揭示不确定性负荷与同相供电系统友好互动规律，研究同相供电系统多场景下自适应寻优控制策略。在基于物理失效机理的可靠性评估方法的基础上，依据可靠性分析过程，研究可靠性影响机理，确定以开关频率为同相供电装置可靠性优化控制量研究同相供电装置动态变频控制方法。

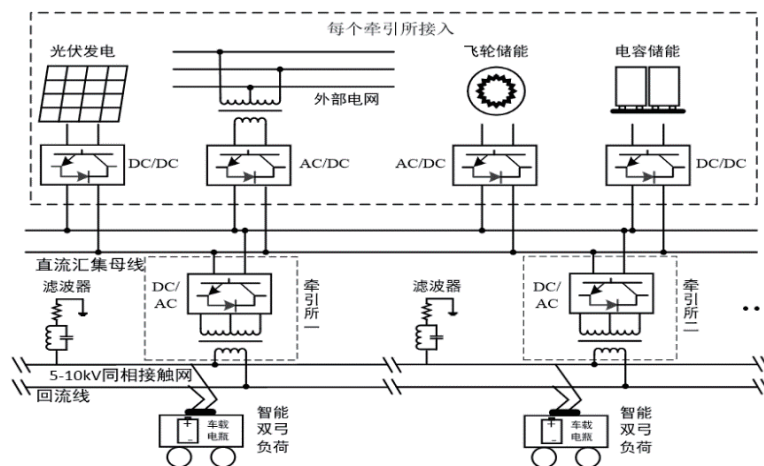


图1 电气化高速公路拓扑结构图

针对传统半导体研制的电力电子装置存在耐压低，体积大，损耗大等问题，研制基于第三代半导体的新型DC/DC，DC/AC等电力电子装置。同时针对在实际生产现场中，由于受到参数整定方法繁杂的困扰，常规的PID控制器参数整定会现整定不良，控制范围不广，对运行工况的适应性差等问题，将分数阶控制理论和PID控制器整定理论相结合，研究适用于基于第三代半导体的新型电力电子装置的分数阶闭环控制方法。并结合智能算法，对分数阶控制器参数进行优化，实现灵活定制优化目标的控制器参数设计，进一步提高电力电子变换装置的性能。

2.3 技术路线及关键技术

针对光伏发电系统接入方案及系统适应性展开研究，如图2所示。首先，针对光伏发电的特性，提出适合光伏发电的系统拓扑，对系统运行特点进行理论分析，并改善其系统能源分配法，以及协调多变流器控制方法；然后，深入研究新型拓扑型结构，使之形成横向多源互补和纵向“源-网-荷-储”协调的结构。随后，利用半实物仿真平台搭建该光伏供电系统联合仿真模型，并验证接入方案及模型的有效性；最后，利用仿真平台仿真出的牵引侧与光伏侧数据进行大规模长时间尺度的算例分析，对比各种接入方案，深入探讨系统适应性问题，尤其是光伏接入后的电压等电能质量、牵引网电压的波动性、光伏电能消纳能力以及储能设备的优化配置，进行理论及仿真分析，为方案的合理性与可行性提供数据支撑。

合，比如牛顿-拉夫逊法、Zbus 高斯法、MPPT最大功率追踪法、前推回推法和回路阻抗法等。通过潮流分析，可以确定最佳的电压等级和供电容量。基于这一点，可以设计出适应光伏等分布式能源与牵引供电系统的拓扑结构，并为电气化公路牵引供电系统设计适用的交流同相供电系统，将组合技术应用于电气化公路的供电中。

在确定接入方案和供电制式后，提出一种综合能源管理控制系统，综合考虑了电能质量、储能优化配置、储能充放电管理以及不同工况下能量路由的优化调度，以解决光伏接入过程中可能遇到的适应性问题。首先，基于综合补偿机理和系统运行特性建立了控制系统结构；其次，逐一建立光伏发电系统的综合能源分配策略，包括电能质量指标参数约束的变流器优化补偿数学模型，同时与电气化公路牵引供电系统相协调，形成复合优化控制方法；最后，利用预设场景及不同工况下的实测数据，对功率潮流分配、电能质量改善效果等方面进行仿真验证及分析。以上研究成果有望优化光伏储能发电系统的运行状态，进一步确保系统的安全、可靠和高效运行。

结束语

随着京津冀一体化的深入推进，交通能源在经济发展中显得尤为重要。本项目基于电气化高速公路的特性，构建以新能源为主体的弹性电气化高速公路系统，为新能源接入下电力与公路系统的协调发展寻找一条新的优化途径，为未来大规模电气化公路的实践，开展新技术、新设备与系统集成特性奠定坚实基础，同时也有助于我国加快实现“碳达峰”、“碳中和”的美好愿景。电力和交通的协同发展必将更好地促进京津冀地区的协同发展。

参考文献：

- [1] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-124.
- [2] 陈氏武, 许臣友, 黄文勋, 等. 基于改进粒子群算法的牵引供电系统多目标优化设计[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(1): 85-92.
- [3] 黄小红, 李群湛. 基于模块化多电平换流器和组合式变压器的高速铁路同相牵引供电系统[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 97-104.
- [4] 张丽艳, 李群湛, 易东. 同相供电系统同相供电装置容量的优化配置[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 59-64.

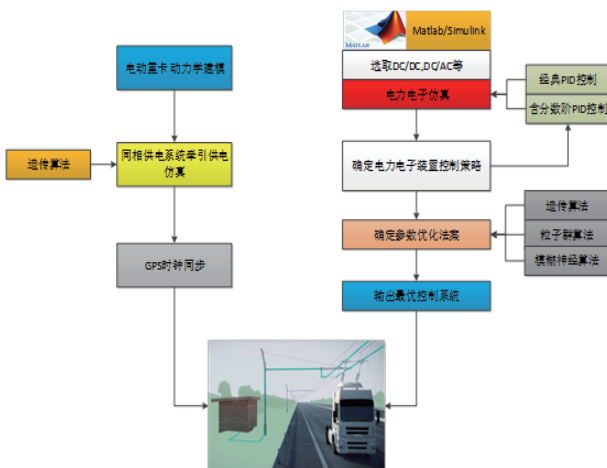


图2 供电方案研究方法

交直流混合配电网的规划和安全经济运行需要潮流计算做为前提。在交直流混合配电网的潮流计算中，需要考虑交直流混合输电系统的潮流计算方法，如统一求解法和交替迭代法。这需要与传统交流配电网潮流计算方法相结