



DOI: 10.12382/bgxb.2023.0643

坦克装甲车辆电力系统源网荷储协同优化与安全控制:架构设计及前沿思考

岳文斌^{1,2*}, 宁功韬¹, 倪永亮¹, 宋克岭^{1,2}, 黄煜³, 王志远¹, 李艳明¹

(1. 中国北方车辆研究所, 北京 100072; 2. 先进越野系统技术国家重点实验室, 北京 100072;
3. 南京邮电大学 碳中和先进技术研究院, 江苏 南京 210023)

摘要: 为保障坦克装甲车辆电力系统在复杂环境中的安全可靠、优质高效运行,发展以主动弹性、协调优化、灵活互动为主要特征的车载电力系统是未来一代全电战车的重要发展方向。聚焦于以全电化为特征的坦克装甲车辆电力系统源网荷储协同优化与安全控制研究。从内在要求和外在驱动2方面阐述发展坦克装甲车辆电力系统的必要性和挑战;从架构设计的角度介绍车辆电力系统源网荷储协同优化与安全控制的核心内容及关键技术,包括极端环境下的主动弹性安全控制技术、正常环境下的多时间尺度优化调度技术以及大扰动源场景下的灵活动态调控技术。继而结合弹性电力系统的内涵,探讨基于弹性优化控制的坦克装甲车辆电力系统在面对极端或突发事件时的性能特点。为未来我国坦克装甲车辆电力系统的发展提供参考。

关键词: 坦克装甲车辆; 车载电力系统; 源网荷储资源; 协同优化; 安全控制

中图分类号: TJ812 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2024)08-2463-15

Collaborative Optimization and Security Control of Source-grid-load-storage of Tank and Armored Vehicle Power System: Architecture Design and Frontier Thinking

YUE Wenbin^{1,2*}, NING Gongtao¹, NI Yongliang¹, SONG Keling^{1,2}, HUANG Yu³,
WANG Zhiyuan¹, LI Yanming¹

(1. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China;
2. Chinese Scholartree Ridge State Key Laboratory, Beijing 100072, China;
3. Institute of Advanced Technology for Carbon Neutrality, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China)

Abstract: In order to ensure the safety, reliability, high-quality, and efficient operation of tank and armored vehicle power systems in complex environments, the development of on-board power systems characterized by active flexibility, collaborative optimization, and flexible interaction is an important direction for the future generation of fully electric combat vehicles. The source-grid-load-storage collaborative optimization and safety control of tank and armored vehicle power systems with electrification as a characteristic are studied. The necessity and challenges of developing the power systems are elaborated from the aspects of inherent conditions and external driving forces. Then, the core content and

收稿日期: 2023-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(62103200)

* 通信作者邮箱: wenbin_yue@126.com

key technologies of source-grid-load-storage collaborative optimization and safety control for power systems are introduced from the perspective of architectural design. This includes the active flexible safety control technology used in extreme environments, the multi-timescale optimization and scheduling technology used in normal environments, as well as the flexible dynamic control technology used in scenarios with significant disturbances. Furthermore, in conjunction with the concept of a “resilience” power system, the performance characteristics of power systems based on “resilience” optimization and control when facing extreme or unexpected events are discussed, which can provide a reference for the future development of tank and armored vehicle power systems in China.

Keywords: tank; armored vehicle; vehicular electric power system; source-grid-load-storage resource; collaborative optimization; security control

0 引言

坦克装甲车是陆军机械化装备的重要组成部分,也是各个国家战略支援、战略威慑的重要力量。目前,车载电力能源供应主要依赖柴油发电机,随着现代电气技术的发展,车辆内部独立的电力系统逐渐复杂化,需要通过电力转换、传输和存储来为车辆的推进系统、武器系统、防御系统和信息系统提供电能。因此,车载电力系统的供电质量及稳定性是坦克装甲车正常运行的重要保障^[1-3]。

而全电技术的应用^[4-7]可以做到在重量降低的情况下,不仅能提高坦克装甲车的主要战技性能,使车辆具有高效的战场态势感知能力、快速的机动突击能力、精确的火力打击能力,而且在操控性、隐身性人机环等方面有较大提升。除此之外还能完成传统重型车辆难以实现的作战能力,如战略战役机动能力,更便于部署和保障等。

但是随着全电化坦克装甲车辆性能的提高,全电化技术的研究也更为重要。单台车辆将形成一个集成在狭小空间里的含多电压等级的直流微网系统,集成了发电机组、锂电池、超级电容等多种形式的供电电源,以及设备驱动、动力驱动、制冷、制热、照明等多类型的用电负荷。能量管理系统(Energy Management System, EMS)通过信息流调控能量流,是保障电力系统运行更安全、更高效的智慧能源大脑^[8-12]。与传统的直流微电网相比,车辆电力系统运行的安全性和高效性要求更高,并且在运行层面存在如下 3 关键挑战^[13-22]:

1) 在坦克装甲车辆电力系统中,源侧除常规电源外还存在其他新型分布式电源,而荷侧在车辆不同工作状态,尤其是极端环境下用电需求不断变化,即大功率负载能量需求与能量供给之间的矛盾突出,需要在有限能源供给下满足车辆持续工作需求,

导致安全供电面临挑战^[13]。

一方面,由于系统能量供给与不同运行工况下的电力消耗存在不确定性和不匹配性,时常引发坦克装甲车辆电力系统功率波动,而系统不同电压等级间使用多个 DC/DC 电力电子转换装置,使电力电子化电力系统对功率扰动更加敏感,容易因功率扰动而引发系统电压安全越限问题^[14];另一方面,源网荷储调节资源种类多样、容量配置和连接方式不同,使得车辆电力系统的潮流方向复杂多变,其功率安全越限风险增大,易诱发连锁故障甚至系统崩溃的问题^[15],对系统的风险预警和安全控制等均提出更高的要求。因此,迫切需要探索更加弹性主动的源荷储安全控制策略,保证极端环境下坦克装甲车辆电力系统的安全可靠供电。

2) 坦克装甲车辆电力系统呈现多源、多储、多电压等级网架形态等复杂化特征,目前源网荷储之间缺乏优化互补利用,导致系统高效供电面临挑战,严重影响坦克装甲车辆的作战能力,包括行驶性能、动力性能、射击性能和指挥控制性能等方面^[16]。

分散接入在坦克装甲车辆电力系统不同层级的源网荷储可控资源,其融合形态复杂多样,其中包括多种电源、多类储能装置和负荷。一方面,由于多电压等级耦合的源网荷储数量多,且其发用电峰谷时序特征差异很大,仅依赖现有的大颗粒度的管控机制,难以协调大量的具有不同调节特性、不同响应速度、不同耦合形态的源网荷储可控资源,以适应未来复杂多变的运行场景^[17];另一方面,若对源网荷储可控资源进行协调优化,存在优化过程求解复杂、响应速度较慢等问题,难以满足系统的源网荷储不同时间尺度的调度需求,缺乏系统级智慧化的优化调控技术手段^[18-19]。因此,迫切需要探索源网荷储多时间尺度协调优化策略,保证正常环境下坦克装甲车辆电力系统的高效供电,实现对能源的多元化利

用和高效储存。

3) 由于坦克装甲车辆独立微网系统缺乏大容量的惯性环节,在大容量外部电源接入或可变负荷强冲击下,电力系统的输电功率和节点电压发生波动,甚至可能引发系统的不稳定。目前,源网荷储之间缺乏灵活协同调节机制,导致系统优质供电面临挑战。

当大容量外部电源和负荷接入时,时常引发车辆电力系统的功率和电压波动,由于目前坦克装甲车辆电力系统源网荷储资源之间以及多层级网架之间缺乏灵活互动机制,无法通过这些融合单元之间灵活协同,来快速平抑功率与电压的波动,严重限制了车辆电力系统面向源荷大扰动场景下的灵活互动

与相互支撑能力^[20-22]。因此,迫切需要探索源网荷储灵活协同控制策略,保证大扰动源冲击下坦克装甲车辆电力系统的优质供电。

综上所述,如图 1 所示,发展以“主动弹性、协调优化、灵活互动”为主要特征的坦克装甲车辆电力系统将是未来车载电力系统发展的重要方向。亟需打破现有车载电网的管控模式,建立极端环境下安全供电、保证正常状态情况下高效供电、应对大扰动源场景下的优质供电的多时间尺度精细化智能调控新方法、新技术和新装置,保障坦克装甲车辆电力系统在复杂环境中的安全可靠、优质高效运行,为坦克装甲车辆各种用电负荷提供持续的高质量电力供应,满足各种工作场景需求。

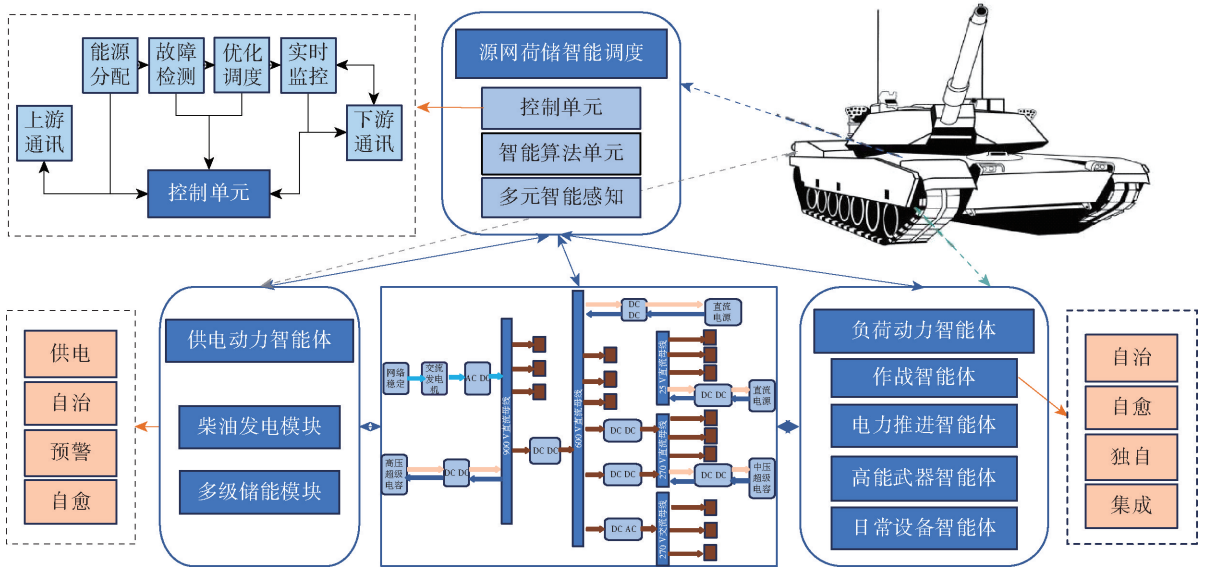


图 1 坦克装甲车辆电力系统源网荷储协同优化与安全控制架构

Fig. 1 Collaborative optimization and safety control architecture of source-grid-load-storage for Tank and armored vehicle power system

因此,本文立足于未来一代全电化坦克装甲车辆电力系统源网荷储的协同优化与安全控制研究。首先,从内在现状和外驱动两方面论述了当前发展坦克装甲车辆电力系统的必要性和研究目标;其次,重点介绍了坦克装甲车辆电力系统源网荷储协同优化与安全控制的架构内容和关键技术,包括极端环境下的主动弹性安全控制技术、正常环境下的多时间尺度优化调度技术以及大扰动源场景下的灵活动态调控技术,并开发相应的 EMS 和样机进行数字化仿真和实体验证;然后,结合系统弹性优化控制的内涵,分析了弹性坦克装甲车辆电力系统在极端或突发事件下的性能特点。最后,总结归纳并对未来的研究重点进行展望。

1 坦克装甲车辆电力系统研究现状与发展趋势

1.1 国内外研究现状

全电化坦克装甲车辆核心能源动力系统为孤岛运行的小型直流微网,以电能为初始能源,武器、装甲以及推进系统的主要部件均采用电能驱动,其核心“电部件”主要包括电传动装置、电磁炮和电磁装甲,集成了发电机组、锂电池、超级电容、设备驱动、动力驱动、制冷、制热、照明等多类型的供电电源和用电负荷^[10]。能量管理是保障小型直流微网安全经济可靠运行的智慧大脑。当前专门针对全电化坦克装甲车辆的能量管理研究还较少,而在电力系统

和直流微网方面的研究已较为成熟^[23-26]。

目前,美欧等发达国家正在底盘集成微电网构建方面投入大量的人力和资金,并取得了众多技术突破,构建了多个实验论证平台。车载微电网最初应用于特种军用车辆,如 Buffalo 排雷车,其采用 Buffalo 公司的特种机电单元通过取力发电的方式,为车载 2.5 ~ 30 kW 交流微网或 3.0 ~ 4.5 kW 直流微网供电;“斯特瑞克”装甲车等多用途轮式车辆也都采用取力发电的方式,并结合锂电池构成车载微电网为负载供电。美国“布雷德利”战车、M113 装甲车、“悍马”高机动多用途轮式车等演示车辆、先进混合电驱动项目、未来战斗系统项目、地面战车项目、联合轻型战术车、静默行驶增程车、超轻型车等项目,普遍采用了永磁发电机、锂离子电池组的底盘集成微电网形式,并积极在储能技术、能量管理技术和发电机技术展开研究。英国 BAE 系统公司的未来技术演示样车采用了两台 MTU 公司 6R890 发动机和车载电池联合供电,输出功率达 1 400 kW。法国雷诺卡车防务公司将单一的蓄电池储能系统改为由动力电池和超级电容组成的混合储能系统,并提出了并联混合电能集成方案,使得车辆在崎岖地形油耗降低 20% ~ 30%,并且能以静默方式运行,以便于执行静谧行驶任务。德国 mbriid 混合动力底盘集成微电网由发动机、启动发电机、牵引电池、变流器等组成,有柴油机-机械模式、电力推进模式和对外供电模式等多种工作模式^[27]。

作为车载电力系统研究领域的关键问题之一,能量管理策略的优劣会直接影响到坦克装甲车辆的可靠性、经济性、机动性等重要性能,国外学者对此开展了一系列前沿探索性的研究。文献[28]以系统功率平衡方程为基础建立控制规则,以确保电池荷电状态(State of Charge, SOC)维持在合理范围,并使发电机在不频繁启停的前提下工作于高效区域,能够有效降低燃油消耗率;文献[29]针对整车动力系统采用分层结构,提出模糊策略控制发动机输出转矩,在提升发动机运行效率的同时,进一步提高了燃油经济性;由于上述基于规则的能量管理策略主要依赖于学者的工程经验,通常难以实现系统的最优控制,因此,大量研究开始关注优化控制理论与智能优化算法,以实现最优的控制结果。文献[30]采用随机动态规划(Stochastic Dynamic Programming, SDP)算法对车载电力系统进行全局优化,建立包含对油耗、排放、电池电量取不同权重值的成本函数,经过多次迭代求得成本函数的最优解集;文献[31]

依据 GPS 和 GIS 提供的道路信息建立预测模型,以整车油耗最小为优化目标, SOC 和功率分别为状态变量和控制变量,基于预测的未来行驶工况信息,采用 SDP 优化系统的能量分配。近年来,随着智能优化算法的快速发展,不少学者将遗传算法^[32]、粒子群优化算法^[33]、进化算法^[34]、博弈算法^[35]以及神经网络^[36-38]等智能优化算法应用于车载电力系统能量管理策略的多目标优化中,实现了系统的全局最优。但受限于智能优化算法固有的计算量大、耗时长、耗时的缺点,此类方法在实车中的应用尚不成熟,目前主要作为测试其他调控策略性能的评价方法。

鉴于坦克装甲车辆经常面临高度紧张和变化多端的战场环境,其电力系统不仅要满足常规的能耗需求,还需要在应急情况下确保稳定的电力供应。特别是在故障模式、极端场景中,车载电力系统的调控策略和稳定性分析显得尤为重要。文献[39]提出了基于模糊逻辑的多种应急调控策略,包括优化储能设备的使用、调整负荷的优先级和采用辅助电源等,以保证关键负荷的稳定供电。文献[40]对特种车辆的电池管理系统进行了故障模式和效果分析,可以实时检测和识别系统故障,并揭示了不同故障模式对车载电力系统性能的潜在影响;文献[41]详细研究了外部扰动,如电磁干扰或温度变化对车载电力系统稳定性的影响,并提出了相应的稳定性保障策略;文献[42]进一步考虑了各种极端环境,如极低或极高温度、高海拔、高湿度等对车载电池组的性能和寿命影响,通过实时监测环境参数,自适应调整系统的运行状态。

相较于国外,国内在电力系统、直流微网方面的研究较为成熟,部分技术处于国际领先状态,但在全电化坦克装甲车辆能量管理方面的研究还鲜有报道^[43-46]。由东风汽车公司和武汉理工大学依托国家科技部专项等项目在研多款混合动力车型,朝着“超机动高效能强防护战术突击车”方向发展,其航特取力电机产品可以为车载交流、直流微网供电的同时提高系统的稳定裕度和负荷供电稳定性^[47]。胡源等^[48]在车载直流微网的供电方式方面进行控制优化,其主要通过联合控制异步发电机和电压源型脉宽调制(Pulse-Width Modulation, PWM)整流器来提升车载直流网的供电可靠性和电能品质^[48]。黄辉先等^[49]针对军用通信车和指挥车的电源系统,设计了车载电源控制系统,并分别用 STM32 和 DSP 搭建了相应的硬件系统,使工作人员能够清晰地了解车辆各个电源部件的工作状态,有效防止

了车辆故障的发生。在车载微电网能量综合利用方面,曾繁琦等^[50]设计了一种基于启动/发电一体化技术的军用混合动力总成方案,通过有限状态机理论实现了车辆工作模式之间的转换以及动力源负荷率的合理分配,最终达到提高车辆动力性和燃油经济性的目的。曾繁琦等^[51]提出基于SOC惩罚函数的等效能量最小策略,对动力电池的能量管理策略进行优化,并在模拟越野工况下对优化方法进行仿真验证。除了追求更高的经济效益,如何保证车载微网在任何工况下的稳定性也是EMS需要攻关的重点^[52]。谈学超等^[53]通过负荷频率调控,提出一种基于自适应动态编程和干扰观测器的最佳负载频率调控方法,设计了一种非线性干扰器来估计未知干扰,保证了车载微电网电力系统的稳定运行,并基于李雅普诺夫理论,验证了所提控制方法的有效性。为了解决转速大范围变化时的电能稳定性问题和提升车载电源的输出功率,文献^[54]提出了永磁同步电机级联整流器的系统及弱磁控制和占空比预测控制,不仅实现了单位功率因数整流,同时提高了车载供电系统的稳定性。

综上所述,目前国内在全电车辆方面的研究尚处于起步阶段,已有的成果还主要借鉴常规电网和直流微网系统,通过将电网优化控制方面的理论和方法移植嵌套,结合坦克装甲车辆电力系统特定的运行工况和场景,再利用仿真平台进行测试验证。但由于全电车辆的供电系统具有特殊性,尤其是考虑到作战车辆的特殊电力负荷类型、能源供给限制和环境因素,尚存在以下问题未得到解决,亟需开展针对性的研究工作。

1)传统的能量管理方法基本只考虑车载电力系统单一的经济性、动力性或稳定性,以其中某个指标为目标进行协调优化,缺乏能够精准描述和刻画坦克装甲车辆在不同战场环境和运行工况下的综合性指标体系,如战时或战前准备态下的系安全裕度、抗打击能力以及遭受攻击或故障状态下的恢复速度等^[55]。

2)与民用车辆动力系统不同,坦克装甲车辆电力系统中存在大功率、强波动性用电负载、多电压体制网架、新型电源及储能部件(如超级电容),源网荷储之间动态交互特性复杂^[56]。仅靠改善优化控制算法难以进一步提升系统综合性能,需要强化数学建模,精准刻画源网荷储各环节变化规律及耦合特性。

1.2 发展趋势

从3个方面对坦克装甲车辆能量管理系统发展趋势进行分析:

1)信息化、数字化是实现全电化坦克装甲车辆能量管理系统的重要基础,随着能源互联网技术的发展,车辆EMS需要进一步提高智能化水平,从电池组管理向源网荷储分布式资源协同管理转变,同时需要抵御强信息干扰的影响,满足更多高强度电力负荷的使用,在复杂多变的信息环境中提高全电化坦克装甲车辆的作战能力和可持续水平^[57-58]。

2)随着电力电子和电机驱动技术的迅猛发展,车载电力系统产业发展逐渐成熟。从未来战争需求的角度出发,车载微电网系统负载的总体特征为小功率向大功率、低电压向高低压、单一供电体制向复合供电体制、模拟/继电控制向数字化/网络化控制、单一耗电向多元耗电发展。在源网荷储资源发展日趋完善的同时,车载电力系统的优化调度与动态控制朝着更加合理,性能更加优越的目标迈进。

3)对车载电力系统不同环境不同状态下的复杂需求需要全面考虑,除正常环境下车载电力系统源网荷储多时间尺度优化调度的问题外,由于坦克装甲车应用场景差异性较大,尤其是极端环境下的电力供应更为复杂,大扰动源场景下的电力消耗更加灵活。因此,在车载电力系统孤岛供应与消耗的情况下,实现多场景的源网荷储优化调度与动态控制成为了未来坦克装甲车辆电力系统的优先发展方向。

2 坦克装甲车辆电力系统的研究目标

2.1 实现坦克装甲车辆作战能力的提升

针对坦克装甲车辆电力系统缺乏大容量的惯性环节,在负荷强冲击下系统安全稳定运行问题突出的难题,开展大扰动源场景下车辆电力系统源网荷储灵活协同动态控制,增强系统的抗干扰和容错能力,提高坦克装甲车辆的作战能力,包括行驶性能、动力性能、射击性能和指挥控制性能等方面,提高车辆的综合战斗力和作战效率,保障作战任务的完成。

2.2 保证坦克装甲车辆电力系统运行可靠性

针对现有坦克装甲车辆电力系统大功率负载能量需求与能量供给之间的矛盾问题,在空间环境受限,车辆运行安全裕度普遍较低的情形下,开展极端环境下坦克装甲车辆电力系统源网荷储主动弹性安

全控制技术,突破传统的设备单一控制模式,实现电力稳定性最优控制以及电力资源整体性最优供给,避免单一元件故障或负荷冲击所诱发的连锁故障甚至系统崩溃事故,支撑车辆电力系统的安全和可靠运行。

2.3 提高坦克装甲车辆电力系统能量利用效率

针对有限能源供给下难以满足坦克装甲车辆持续工作和高强度作战训需求的问题,在车辆孤立微网中,开展正常环境下车辆电力系统源网荷储多时间尺度优化调度技术,突破传统的能量管理模式,通过在日前、日内、实时等多个时间尺度,优化电池充放电、备用发电机组使用、负荷侧控制等有限资源,

在满足用电负荷的前提下提高系统经济性,提升车辆持续行驶和工作能力,最大程度地促进能源的有效利用和智慧化管理^[59]。

3 坦克装甲车辆电力系统源网荷储协同优化与安全控制的研究思路

首先介绍坦克装甲车辆电力系统源网荷储协同优化与安全控制的研究架构和主要内容思路,然后分别提炼其中蕴含的相关关键技术。下面将从极端环境、正常环境和大扰动这 3 种坦克装甲车辆最为常见的场景描述电力系统的研究思路,具体技术路线如图 2 所示。

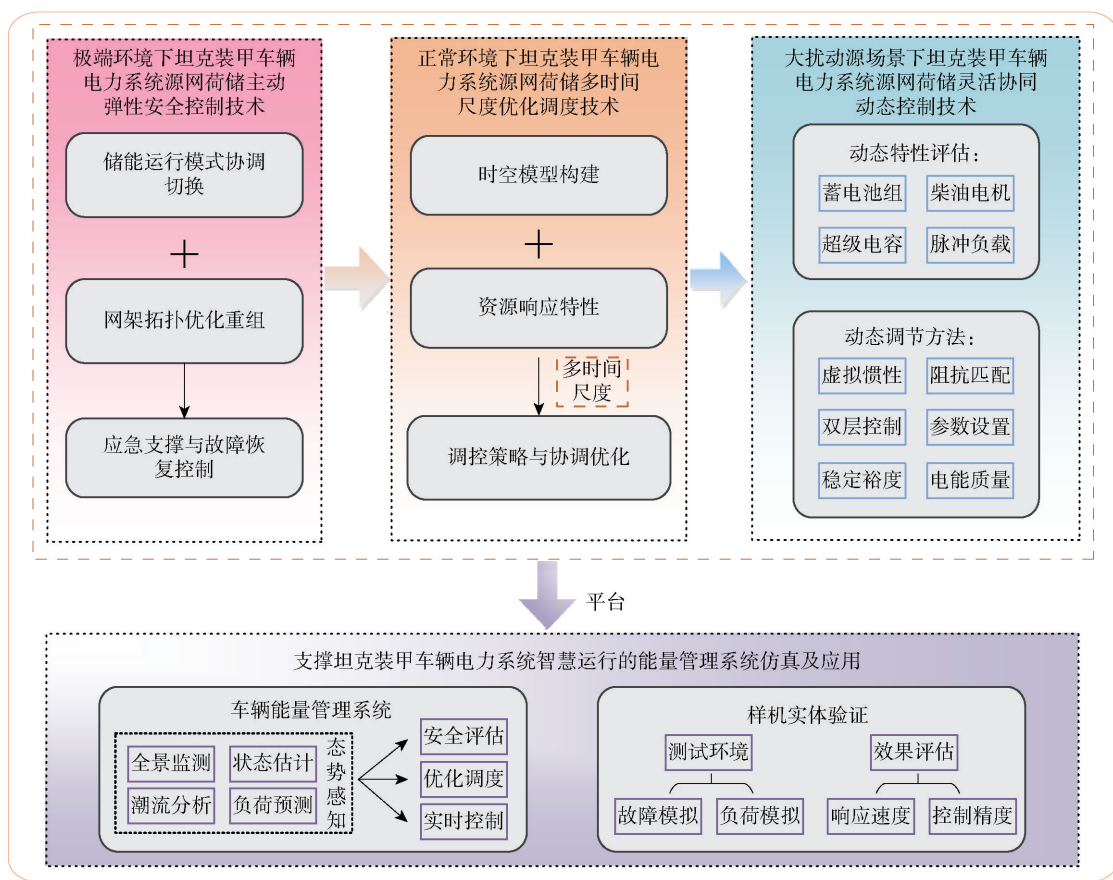


图 2 技术路线图

Fig. 2 Technology roadmap

3.1 极端环境下坦克装甲车辆电力系统源网荷储主动弹性安全控制技术

3.1.1 坦克装甲车辆电力系统储能运行模式协调切换控制方法

首先,需要深入分析各类可调资源(如发电机组、储能装置等)的调节速度、可用容量、响应灵敏度等关键特性,评估不同资源组合下的调控潜力和稳定性,构建坦克装甲车辆电力系统多源、多储能可

控资源运行模式逻辑切换特性与连续动态调节模型;其次,针对复杂多变的作战环境,根据不同用电负荷需求和能源供给情况,评估各类源储可控资源不同运行模式下的实时供电能力、快速调节能力与实时功率支撑能力,确定每种资源在不同工况下的调控优先级;最后,需要构建基于工作场景需求和电能储存状况的多源储可控资源运行模式切换策略,根据实时监测的车辆工作状态和储能设备的电量信

息,自动切换不同的储能设备运行模式,实现车载电力系统的高效稳定运行。

3.1.2 坦克装甲车辆电力系统多层级网架拓扑优化重组控制方法

首先,需要分析坦克装甲车辆电力系统多电压等级之间网架拓扑重构逻辑切换特性以及功率转供能力,研究不同电压、功率越限下多电压等级网架拓扑优化重组与潮流控制技术;其次,考虑坦克装甲车辆电力系统在极端工作场景下,负载特征和储能设备状况等多种因素,提出多层级网架拓扑结构的优化设计方法,以提高车载电力系统的负载均衡和能量利用效率;最后,研究极端环境下车载电力系统自适应网架拓扑优化重组控制策略,通过重新调整电网拓扑结构,使车载电力系统能够以最小的代价维持运行,满足不同故障和失效情况下的拓扑结构需求。

3.1.3 坦克装甲车辆电力系统应急支撑与恢复控制方法

首先,根据坦克装甲车辆电力系统源网荷储不同融合形态下的实时供电能力、快速可控能力与紧急功率支撑能力,研究不同电压、功率越限下源网荷储运行模式优化匹配与协调切换技术;其次,基于车载电力系统源网荷储可调资源的响应机制和灵活性,考虑设备响应时间、负载实时状态、目标任务紧迫性等,提出综合寻优精度和寻优时间的源网荷储应急协同控制策略,实现系统在应对突发事件时的最优响应;最后,研究故障发生后综合考虑储能供应能力和负荷优先级的重要设备保电措施,优先保证车辆完成作战任务或安全返回,研究故障解除后按照优先级顺序依次恢复用电的方法,保障车辆有序安全启动。

3.2 正常环境下坦克装甲车辆电力系统源网荷储多时间尺度优化调度技术

为了提升车辆电力系统的持续工作能力和能源利用效率,并使各负荷运行在最优状态,正常环境下坦克装甲车辆电力系统源网荷储多尺度协同优化技术是需要研究的核心,充分利用特性各异资源的时空调节能力,支撑车辆电力系统的经济高效运行。

3.2.1 源网荷储可控资源多时间尺度优化调控模型构建

首先,基于机理模型和数据挖掘方法,研究稳态运行下坦克装甲车辆电力系统源网荷储各可控资源在时间维度和空间维度上的波动特性和互补特性;

其次,研究车载电力系统源网荷储各设备之间复杂的耦合机理与耦合特性,分析不同时间尺度上系统多能源之间的互济能力,建立坦克装甲车辆电力系统源网荷储各元件的调控数学模型;然后,研究数据-机理联合驱动的源网荷储可控资源性能辨识与运行状态拟合方法,辨识坦克装甲车辆电力系统关键薄弱环节;最后,分析辐射、分段、环状、多级母线、多端口电能路由等不同车辆网络拓扑的安全性,建立包含可靠性指标的车辆电力系统网络结构优化模型。

3.2.2 支持多场景车辆运行模式的源网荷储多时间尺度调控策略

首先,从源荷双向调控角度出发,计及负载调节特性,考虑线路传输功率和节点电压约束,建立车辆电力系统源网荷储多时间尺度优化调度模型;其次,充分利用特性各异资源的时空调节能力,研究支持多场景车辆运行模式的源网荷储多时间尺度递阶协同优化技术,支撑车辆电力系统的安全高效运行;然后,考虑用电设备的动态特性,研究基于模型预测控制方法的源网荷储实时滚动优化调度技术,通过构建完善的多时间尺度源网荷储协同机制,保证不同时间尺度调度计划的有效衔接和顺利执行,实现电力稳定性的最优控制以及电力资源整体性的最优供给;最后,基于实时调度阶段可调资源的裕量,研究基于启发式优化算法的多时间尺度协同趋优快速求解方法,实现对供电系统兼顾稳定性和可靠性的稳态工作点自动寻优。

3.3 大扰动源场景下坦克装甲车辆电力系统源网荷储灵活协同动态控制技术

全电化坦克装甲车辆电力系统意味着电力电子装备所占比重增加,导致系统惯性降低,其稳定机理发生变化。需要建立车辆电力系统的动态机理特性和稳定控制方法,形成面向大扰动源场景下的坦克装甲车辆电力系统稳定评估和稳定增强方法体系。

3.3.1 异质化源网荷储可控资源耦合建模与交互影响机理

首先,建立兼顾模型精度与计算速度且适用于车载电力系统动态特性分析与阻抗匹配研究的多尺度仿真模型,用于分析蓄电池组、柴油发电机、伺服系统和大功率脉冲负载之间的动态响应特性及车辆电力系统对各类负荷的供电稳定性。其次,建立面向坦克装甲车辆电力系统中蓄电池、超级电容和大功率脉冲负载的高、低频特性小信号模型,模拟恒功

率负荷的实际动态响应过程,研究多变换器间电压振荡控制和系统欠阻尼特性机理;最后,考虑各类源荷可控资源动态控制特性及暂态调节过程的影响,研究适用于分布式可控资源的降阶暂态聚类模型,为后续源网荷储自主协同动态调节控制策略与方法提供相应的模型支撑。

3.3.2 面向车载独立微网的源网荷储自主协同动态调节控制方法

首先,采用虚拟直流发电机控制策略以提升供电系统的运行性能,通过将直流型发电机算法融入储能装置的接口变换器控制器中,使储能装置接口变换器具备虚拟直流机的特性;其次,考虑系统中设备的高度兼容性和可扩展性的需求,分析各设备存在的关联特性,在系统层研究不同功率缺额下坦克装甲车辆电力系统的自适应双层运行控制策略。最后,计及瞬时负荷冲击、单源模块故障和系统短路故障等大扰动因素,在设备层研究蓄电池/超级电容的协同虚拟阻抗/虚拟电池控制策略,解决级联系统阻抗不匹配问题,提高供电系统的稳定裕度和电能质量。

3.4 支撑坦克装甲车辆电力系统智慧运行的 EMS 仿真及应用

综合上述 3 个研究内容,构建适用于坦克装甲车辆电力系统的综合 EMS 架构体系,研制首套坦克装甲车辆 EMS,并分别通过数字化仿真和车辆样机实体验证两种方法,对理论方法和 EMS 进行验证。具体包括:

3.4.1 坦克装甲车辆综合 EMS 研制

首先,通过深入实地考察调研,了解车辆电力系统能够提供的资源以及实际需求,包括开发技术选择、软件体系架构、功能架构、可视化形式等。设计适用于坦克装甲车辆电力系统的综合 EMS 架构体系;其次,研制坦克装甲车辆 EMS,包括态势感知(全景监测、状态估计、潮流分析、负荷预测)、安全评估、优化调度、实时控制等关键功能模块,性能满足特征车辆作战要求;最后,对各模块接口进行标准化,定义统一的数据格式、确定各模块间的通信协议、制定标准的错误代码和错误消息处理机制以及设定清晰的 API 接口规范,确保数据在各个模块之间无缝传输,为后期系统升级、模块替换或功能扩展提供便利。

具体坦克装甲车辆 EMS 的主要功能架构如图 3 所示。其中,态势感知包括全景监测、状态估计、潮流分析、负荷预测等功能,基于实时量测和历史数据对当前和未来车辆电力系统的状态进行分析,并能够模拟分析不同场景、操作下系统的运行状态。安全评估能够发现车辆电力系统的薄弱环节,及时给出告警信息。优化调度能够在分钟级到小时级尺度进行优化决策,提升车辆电力系统的持续工作能力,并使各负荷运行在最优状态。实时控制能够对实时故障、安全问题等进行快速响应和控制,保障系统运行的安全性。

3.4.2 坦克装甲车辆 EMS 数字化仿真测试

首先,基于计算机技术、RTDS 等先进软硬件系

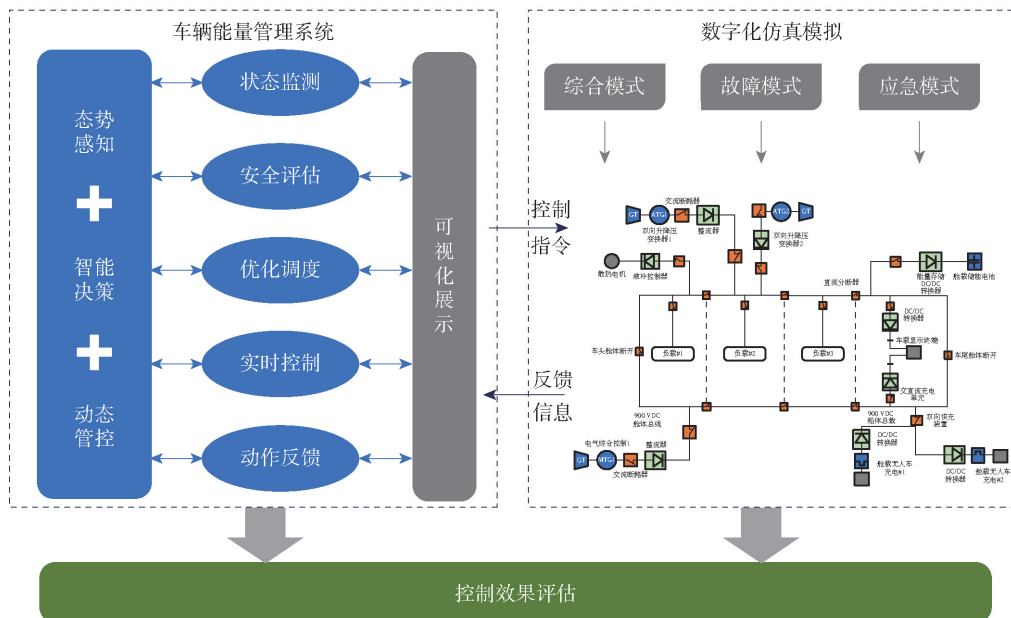


图 3 坦克装甲车辆 EMS 仿真示意图

Fig. 3 Simulation diagram of tank and armored vehicle EMS optimization

统,构建全电化坦克装甲车辆的直流微网模拟环境,包括发电机组、锂电池、超级电容等多种形式的供电电源,以及设备驱动、动力驱动、制冷、制热、照明等多类型的用电负荷。在此基础上集成坦克装甲车辆 EMS,模拟实际运行中可能出现的传感器失效或信息

传输错误、各类元件故障、车辆行驶等各种常规和极端场景,为后续验证工作提供实验基础;最后,通过数字仿真验证上述场景下所提技术和车辆 EMS 的效果,检验是否能够达到预期的试验指标。图 4 给出了全电化坦克装甲车辆直流微网系统仿真示意图。

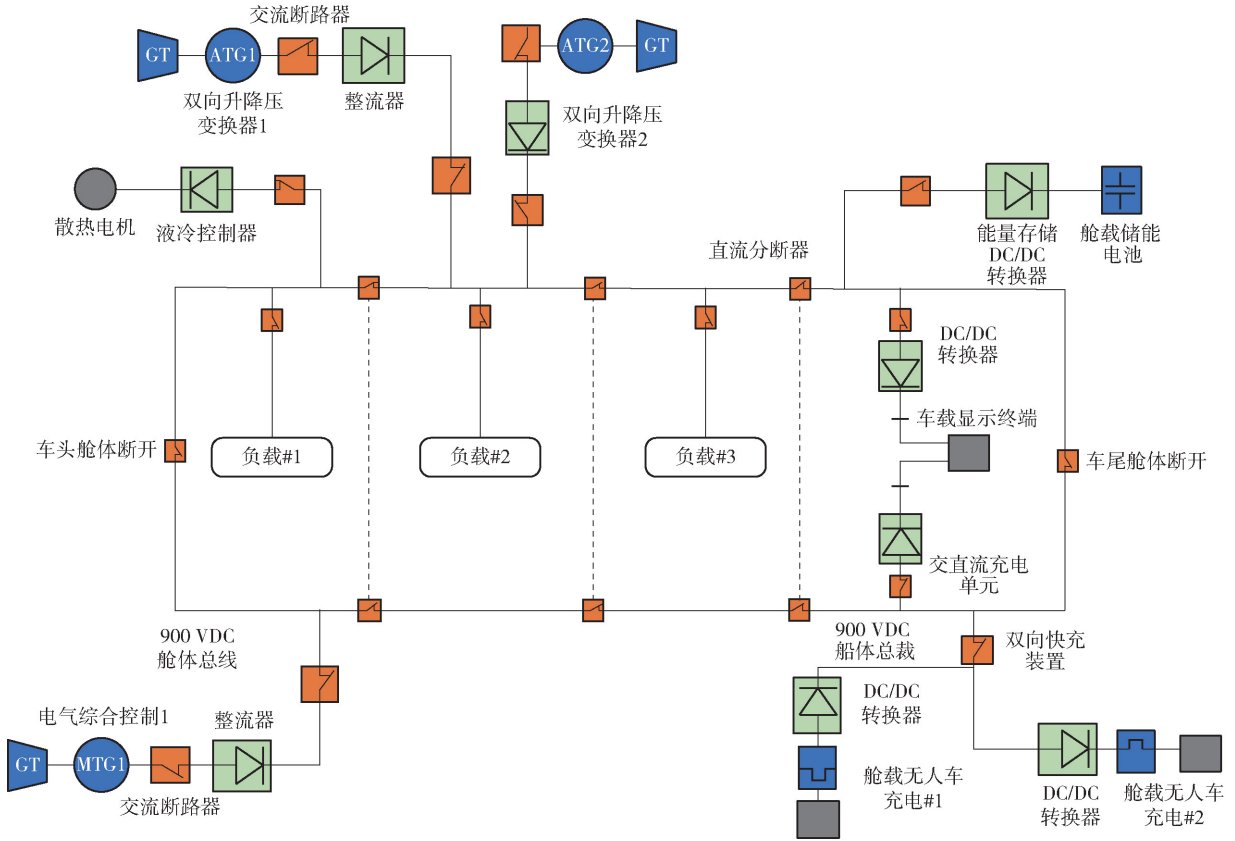


图 4 坦克装甲车辆直流微网系统仿真示意图

Fig. 4 Simulation diagram of DC microgrid for tank and armored vehicle

3.4.3 坦克装甲车辆样机实体验证

在实际车辆(样机)上部署坦克装甲车辆 EMS,检查硬件的物理配置和相互连接,以及软件的初始设置和参数配置;在测试场中对特种车辆的可能运行场景进行长时间的测试,验证是否能够达到主要战技指标,各负荷是否能够正常工作。在条件允许下,尽量持续跟踪坦克装甲车辆正常工作时的运行情况,通过持续的数据收集和分析,了解系统的实际表现,发现和预防长期运行过程中可能出现的问题,确保系统的持续稳定和可靠运行。

4 坦克装甲车辆电力系统源网荷储协同优化与安全控制的关键技术

4.1 计及车辆运行场景不确定性的源网荷储多时间尺度递阶协同优化技术

在分钟级基于模型预测控制方法,进行多电

源-多储能协同滚动优化调度,在秒级基于鲁棒区间,进行多目标自适应实时调度,在百毫秒级实现可调资源的自动控制和快速响应,通过建立完善的多时间尺度源网荷储协同调度机制,保证不同时间尺度调度计划的有效衔接和顺利执行(见图 5)。充分利用特性各异资源的时空调节能力,实现电力稳定性最优控制以及电力资源整体性最优供给。

4.2 适应极端场景下稳定运行的系统级自适应稳定优化控制

针对电气化战斗车辆行驶和运行环境非常复杂的特征,考虑车辆经常起动、转向、爬坡和大范围调速以及武器发射等工况,从整体系统的稳定控制技术角度出发分析,提出满足各种工况稳定运行的系统级自适应稳定优化控制,保证系统大干扰下的安全裕度和鲁棒稳定性。

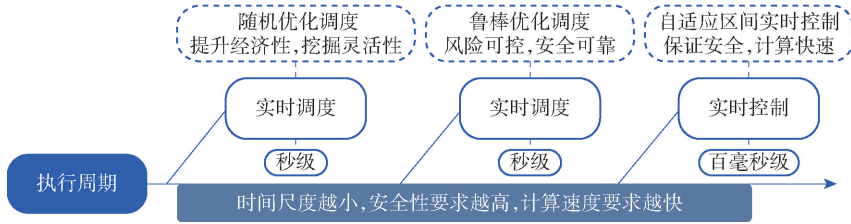


图 5 多时间尺度递阶的协同优化技术

Fig. 5 Multi-time scale hierarchical collaborative optimization

4.3 适用源网荷储一体化能量管理的多时间尺度协同趋优快速求解算法

由于基于规则的能量管理策略对于车载电力系统不同工况下的适应性较差,无法在不同工况下都达到较好的控制效果。因此,采用基于启发式优化算法的多时间尺度协同趋优快速求解算法,实现对供电系统兼顾稳定性和可靠性的稳态工作点自动寻优。利用分解协调机制将多时间尺度的复杂优化问题分解为各个时间尺度上的子问题,对各个优化调度子模型进行分层递阶运算,得到最优的坦克装甲车辆电力系统调度方案。

5 坦克装甲车辆电力系统弹性优化控制的内涵与特点

5.1 弹性优化控制过程的内涵

传统的优化控制方法往往侧重于确定性的运行环境,并假设所有系统参数均为恒定。这使得它们在面对实际运行中的不确定性和动态变化时,可能难以实时适应,从而导致控制性能下降或系统不稳定。特别是在坦克装甲车辆电力系统可能面临的极端条件和故障模式下,系统的操作和控制策略需要具有更高的适应性和鲁棒性,以确保在各种不确定和不利条件下维持稳定和高效的性能,因此,本节我们引入了弹性优化控制这一前沿概念,旨在克服传统策略的弊端,提高坦克装甲车辆电力系统在复杂环境下的稳定性和可靠性。

弹性又称恢复力,其概念最早在 1973 年由 Holling C S 在生态学研究提出,用以衡量生态系统承受、吸收扰动量,并保持系统稳定的能力。自此以后,恢复力被广泛应用于包括电力系统在内的诸多学科中,图 6 形象地展示了系统弹性优化控制应对极端事件的基本过程,包括预先准备、抵御与吸收、响应与适应、快速恢复 4 个阶段^[60]。

5.2 坦克装甲车辆电力系统弹性优化控制的特点

图 7 所示梯形图可以反映坦克装甲车辆电力系统弹性优化控制过程的基本特点。该梯形图描

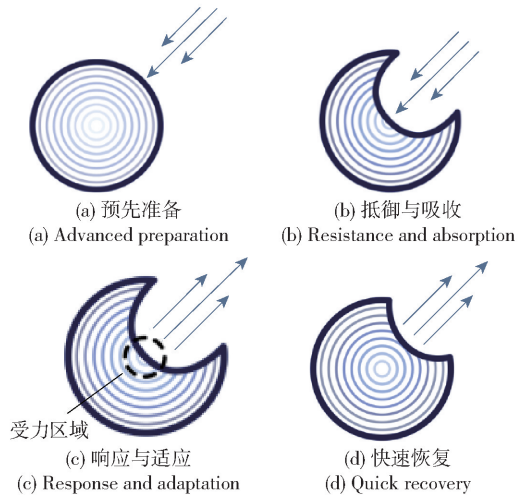


图 6 弹性优化控制应对极端场景的基本过程

Fig. 6 Response of resilient control to extreme events

述的是车辆电力系统的性能(通常用负载损失来衡量)在极端环境或突发状况发生前、中、后的变化情况。

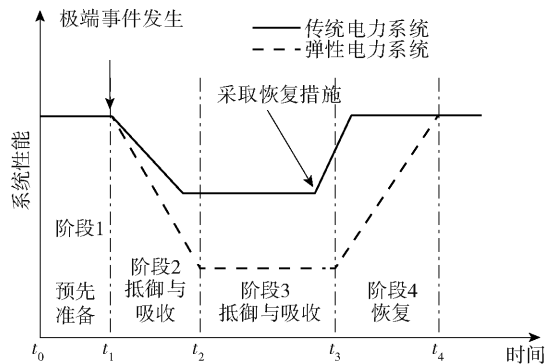


图 7 极端事件发生后车辆电力系统弹性优化控制状态示意图

Fig. 7 Resilient control states of vehicular electric power system before and after an extreme event optimization

1) 鲁棒性(阶段 1):在极端环境或突发状况发生前,坦克装甲车辆电力系统应具有足够的鲁棒性以抵抗可能的极端事件扰动。而为了预先提升鲁棒

性,需要结合极端事件的预测模型,对车辆电力系统的风险进行预判,以安全裕度最大和失负荷最小作为目标,综合进行临时的规划与部署(例如元件加固、应急资源的预布置等),最大程度提升系统鲁棒性。

2) 充裕性(阶段 2、阶段 3):在极端环境或突发状况发生时,坦克装甲车辆电力系统弹性优化控制应保证系统具有足够的充裕性以应对变化的极端事件场景。大量分布式电源、储能装置、可控负荷是保障极端事件下系统充裕性的基本元素,而这些设备的优化、调度、控制则是实现充裕性的重要手段。

3) 快速性(阶段 4):在极端环境或突发状况发生后,坦克装甲车辆电力系统弹性优化控制应能快速恢复负荷。而恢复过程又分为暂时功能恢复和基础设施恢复。暂时功能恢复是指利用各种弹性资源(如应急发电车、备用设备)暂时“撑”起尽可能多的负荷,尤其要优先保障重要负荷,其时间尺度较短;而基础设施恢复时间尺度更长,是指车辆电力系统设施的完全修复,重新回到正常供电状态的过程。

从极端事件发生 t_1 到完全恢复系统性能 t_4 期间系统损失性能的累积量,即图 3 中的梯形面积,可以衡量坦克装甲车辆电力系统受某极端环境或突发事件影响的弹性。而针对极端事件集合 Φ (如历史极端事件集、预测极端事件集、训练集等)的平均累积量,可用于评价系统的弹性水平^[61]:

$$R(s) = \frac{1}{\mathcal{N}(\Phi)} \sum_{i \in \Phi} \int_{t_1}^{t_4} (F_{s,i}(t) - F_{s,0}) dt \quad (1)$$

式中: $R(s)$ 表示系统 s 的弹性; $\mathcal{N}(\cdot)$ 表示集合大小; $F_{s,i}(t)$ 为系统 s 在极端事件 i 下的性能; $F_{s,0}$ 为系统 s 在正常情况下的理想运行系统性能。其各个离散时刻的值可通过在坦克装甲车辆 EMS 上仿真模拟得到,仿真步长的选取与极端或突发事件下系统的响应和恢复时间相关。系统性能可由车辆电力系统的供电量、线路潮流、节点电压等状态参量指标表示。如可采用负荷供应量来具体描述系统性能,损失的负荷量为负荷节点孤立、孤岛平衡切负荷和过负荷控制切负荷控制 3 部分之和。

由图 6 可以看出,采用弹性优化控制的车辆电力系统比常规控制下的电力系统在极端事件下系统性能损失累积量更小(下降幅度降低且持续时间减少),这是弹性优化控制的主要特征和优势所在。

5.3 研究中应关注的重点问题

5.3.1 加强先进信息与人工智能技术的研究与应用

坦克装甲车辆电力系统弹性优化控制依赖多时空多层级源网荷储的高效协同,需采用先进信息与人工智能技术而实现^[62]。需增强在线电力平衡分析能力,支撑场景筛选、模型简化与初值设定等,提升源网荷储协同互动水平;其次,需提升在线感知能力,满足新型电源及储能部件、负荷侧调控对象的可视、可感、可知,支撑高效的调控策略^[63];再次,弹性电力系统影响因素繁多、特性复杂,往往难以完全利用可解释性模型进行描述,还需依赖人工智能方法高效捕捉影响因素特征,实现求解速度的大幅提升;最后,极端环境或突发状况发生前、中、后的状态切换需依赖先进信息技术实现高效信息互动下源网荷储的分散自治和协同优化,提升坦克装甲车辆电力系统的分析精度与管控能力^[64]。

5.3.2 建立面向概率性、多目标、动态特征的新型研究范式

坦克装甲车辆电力系统弹性优化控制过程具有显著的概率性、多目标、动态特性,这不仅要求分析和理论方法的创新,还应变革研究范式。

首先,考虑到弹性电力系统固有的概率性特征,传统的以源网荷储外特性精准建模来提升分析精度的方法存在瓶颈,难以准确描述多重影响因素之间复杂的耦合关系。针对车载电力系统弹性优化控制下的供需平衡分析,应不再单纯追求给出准确的确定性分析结果,而更应关注如何给出关键信息完备、表达形式简洁的概率性分析结果,并充分揭示潜在风险,为调控能力提升策略制定提供支撑。

其次,考虑到车载电力系统能量分配和功率平衡机理的复杂性,对坦克装甲车辆电力系统弹性优化控制理论和方法提出准确、实用、简洁、高效等多重目标,但这些目标间存在相互制约甚至矛盾的关系。因此,调控策略应充分考虑研究对象(场景、地域、网架结构等)的特征和应用场景(火力压制、越野循环、应急救援、故障恢复等)的具体需求,建立定制化分析方法,做好多重目标的权衡。

最后,考虑到坦克装甲车辆电力系统弹性控制能力与状态受源网荷储资源运行状态与调控机制的显著影响,具有动态变化的特点,既要兼顾结构性与策略性的弹性调控能力分析,还应强化弹性状态分析评估与能力管控提升的相互支撑,构建坦克装甲车辆电力系统弹性优化控制架构的评估-预警-管

控-提升-再评估的全流程动态、高效机制^[65-66]。

6 结束语

本文构建的未来一代坦克装甲车辆电力系统源网荷储协同优化与安全控制的基础研究架构,可以看作是将现有成熟的智能电网和直流微网方面的理论体系推广到小型车载电力系统的一次尝试和思考。基于这一框架体系,未来可以进一步结合信息化、数字化的要求,开展以下的研究:

1) 面向坦克装甲车的 EMS 研制将受限于车辆空间限制,服务器运算能力、展示面积等,而且需要满足复杂环境下的快速响应控制,对计算速度、可靠性的要求都更高,操作人员需要同时执行多项功能,对计算结果的展示内容和形式也提出了新的要求;

2) 在车辆的狭小空间里集成一个含源网荷储全部环节、特性各异多种设备的直流电力系统,运行场景更加恶劣,电磁干扰问题突出,易诱发传感器失效或信息传输错误,难以保障车辆智慧化运行所需要信息的数据质量^[67]。因此,有必要研究恶劣工况下的车辆电力信息在线监测与全景感知^[68],为后续能量管理与运行控制提供可信的模型与数据基础;

3) 安全评估能够发现车辆电力系统的薄弱环节,及时给出告警信息^[69-70]。研究构建面向车辆安全的多元件多维度评价指标体系,对于准确辨识出坦克装甲车辆电力系统连锁故障的典型传播路径,分析系统崩溃的演化过程具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] 高强,袁东,刘春光,等. 车载综合电力系统大信号失稳预测[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 143-148.
GAO Q, YUAN D, LIU C G, et al. Large-signal instability prediction of vehicular integrated power system[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12): 143-148. (in Chinese)
- [2] KUMAR S, SAKET R K, DHEER D K, et al. Reliability enhancement of electrical power system including impacts of renewable energy sources: a comprehensive review [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(10): 1799-1815.
- [3] 白华,刘春光,张运银,等. 新型车载综合电力系统拓扑结构研究[J]. 价值工程, 2018, 37(24):136-137.
BAI H, LIU C G, ZHANG Y Y, et al. Research on topological structures of new integrated power system of electric drive vehicle [J]. Value Engineering, 2018, 37(24): 136-137. (in Chinese)
- [4] 李嘉麒,魏曙光,廖自力,等. 陆战平台全电化关键技术发展综述[J]. 兵工学报, 2021, 42(10): 2049-2059.
LI J L, WEI S G, LIAO Z L, et al. Review on the key technologies and development of all-electric land warfare platform [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(10): 2049-2059. (in Chinese)
- [5] 袁东,魏曙光,马晓军. 装甲车辆供电系统研究现状与发展趋势[J]. 装甲兵工程学院学报, 2016, 30(6): 68-74.
YUAN D, WEI S G, MA X J. Research status and development trend of power supply system for armored vehicle[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2016, 30(6): 68-74. (in Chinese)
- [6] 马晓军,徐浩轩,刘春光. 串联式混合动力车辆发电机组协调控制策略[J]. 兵工学报, 2021, 42(10): 2075-2081.
MA X J, XU H X, LIU C G. Coordinated control strategy of generator sets of series hybrid electric vehicles [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(10): 2075-2081. (in Chinese)
- [7] 刘春光,徐浩轩,马晓军. 基于复合控制的发电机组协调控制方法研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(4): 188-192.
LIU C G, XU H X, MA X J. Research on coordinated control method of generator set based on compound control strategy[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(4): 188-192. (in Chinese)
- [8] LIU H Y, YAO Y M, WANG J, et al. A control architecture to coordinate energy management with trajectory tracking control for fuel cell/battery hybrid unmanned aerial vehicles [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(34): 15236-15253.
- [9] DONG P, ZHAO J W, LIU X W, et al. Practical application of energy management strategy for hybrid electric vehicles based on intelligent and connected technologies: development stages, challenges, and future trends [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 170: 112947.
- [10] CHEN Z, WU S M, SHEN S Q, et al. Co-optimization of velocity planning and energy management for autonomous plug-in hybrid electric vehicles in urban driving scenarios[J]. Energy, 2023, 263: 126060.
- [11] HAN X F, HE H W, WU J D, et al. Energy management based on reinforcement learning with double deep Q-learning for a hybrid electric tracked vehicle[J]. Applied Energy, 2019, 254: 113708.
- [12] ZHANG L J, YE X M, XIA X H, et al. A real-time energy management and speed controller for an electric vehicle powered by a hybrid energy storage system [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(10): 6272-6280.
- [13] LIU T, TAN W H, TANG X L, et al. Driving conditions-driven energy management strategies for hybrid electric vehicles: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 151: 111521.
- [14] 李光华,王智,何润敏. 基于大数据的电力系统车辆智慧管理[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2020, 46(2):

- 167–171.
- LI G H, WANG Z, HE R M. Intellectual vehicle management for the electricity system based on big data [J]. *Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2020, 46(2): 167–171. (in Chinese)
- [15] BOZALAKOV D V, LAVEYNE J, DESMET J, et al. Overvoltage and voltage unbalance mitigation in areas with high penetration of renewable energy resources by using the modified three-phase damping control strategy[J]. *Electric Power Systems Research*, 2019, 168: 283–294.
- [16] 陈超洋, 周勇, 池明, 等. 基于复杂网络理论的大电网脆弱性研究综述[J]. *控制与决策*, 2022, 37(4): 782–798.
- CHEN C Y, ZHOU Y, CHI M, et al. Review of large power grid vulnerability based on complex network theory [J]. *Control and Decision*, 2022, 37(4): 782–798. (in Chinese)
- [17] GUO L X, ZHANG X D, ZOU Y, et al. Co-optimization strategy of unmanned hybrid electric tracked vehicle combining eco-driving and simultaneous energy management [J]. *Energy*, 2022, 246: 123309.
- [18] REZAEI H, ABDOLLAHI S E, ABDOLLAHI S, et al. Energy management strategies of battery-ultracapacitor hybrid storage systems for electric vehicles: review, challenges, and future trends[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 53: 105045.
- [19] 罗金满, 刘丽媛, 刘飘, 等. 考虑源网荷储协调的主动配电网优化调度方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(1): 167–173.
- LUO J M, LIU L Y, LIU P, et al. An optimal scheduling method for active distribution network considering source network load storage coordination [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(1): 167–173. (in Chinese)
- [20] YANG Z C, YANG F, LIAO X B, et al. Two stage affinely adjustable robust optimal scheduling for AC/DC hybrid distribution network based on source-grid-load-storage coordination[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 15686–15701.
- [21] 徐浩轩, 马晓军, 刘春光. 混合动力装甲车直流微电网大信号稳定性分析[J]. *兵工学报*, 2023, 44(1): 108–116.
- XU H X, MA X J, LIU C G. Large-signal stability of on-board DC microgrids for hybrid electric armored vehicles [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(1): 108–116. (in Chinese)
- [22] 魏曙光, 刘健, 可荣硕, 等. 装甲车辆串联型混合动力方案设计与分析[J]. *电气传动*, 2020, 50(3): 73–79.
- WEI S G, LIU J, KE R S, et al. Design and analysis of series hybrid power schemes for armed vehicle [J]. *Electric Drive*, 2020, 50(3): 73–79. (in Chinese)
- [23] HUANG T, GAO S C, XIE L. A neural Lyapunov approach to transient stability assessment of power electronics-interfaced networked microgrids [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 13(1): 106–118.
- [24] ZHANG Z F, YANG X Y, ZHAO S W, et al. Large-signal stability analysis of islanded DC microgrids with multiple types of loads [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 143: 108450.
- [25] XIE W Q, HAN M X, CAO W Y, et al. System-level large-signal stability analysis of droop-controlled DC microgrids [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 36(4): 4224–4236.
- [26] SAN G C, ZHANG W L, GUO X Q, et al. Large-disturbance stability for power-converter-dominated microgrid: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 127: 109859.
- [27] BRIGGS R W, GOLDBERG J H. Battlefield recognition of armored vehicles [J]. *Human factors*, 1995, 37(3): 596–610.
- [28] ZHANG P, YAN F W, DU C Q. A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometrics [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 48: 88–104.
- [29] LARSSON V, JOHANNESSON L, EGARDT B. Analytic solutions to the dynamic programming subproblem in hybrid vehicle energy management [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(4): 1458–1467.
- [30] CAIRANO S D, BERNARDINI D, BEMPORAD A, et al. Stochastic MPC with learning for driver-predictive vehicle control and its application to HEV energy management [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(3): 1018–1031.
- [31] YU K J, YANG H Z, TAN X G, et al. Model predictive control for hybrid electric vehicle platooning using slope information [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(7): 1894–1909.
- [32] PANIGRAHI S P, PANIGRAHI B K, SAMANTA C. Genetic-based bacteria foraging to optimize energy management of hybrid electric vehicles [J]. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2014, 4(3): 53–61.
- [33] CHENG Y H, LAI C M. Control strategy optimization for parallel hybrid electric vehicles using a memetic algorithm [J]. *Energies*, 2017, 10(3): 305–326.
- [34] HAN J, KUM D, PARK Y. Synthesis of predictive equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicles based on closed-form solution of optimal equivalence factor [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(7): 5604–5616.
- [35] DEXTREIT C, KOLMANOVSKY I V. Game theory controller for hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(2): 652–663.
- [36] CHINDAMO D, GADOLA M, ECONOMOU J T. A neurofuzzy-controlled power management strategy for a series hybrid electric vehicle [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering*, 2014, 228(9): 1034–1050.
- [37] SUN C, HU X S, MOURA S J, et al. Velocity predictors for predictive energy management in hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(3): 1197–1204.

- [38] ZHOU J H, XUE S W, XUE Y, et al. A novel energy management strategy of hybrid electric vehicle via an improved TD3 deep reinforcement learning [J]. *Energy*, 2021, 224: 120118.
- [39] WANG T H, LI Q, WANG X T, et al. An optimized energy management strategy for fuel cell hybrid power system based on maximum efficiency range identification [J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 445: 227333.
- [40] NARANJE V, JAVED H, ANJUM S, et al. Failure modes and effects analysis (FMEA) for electric converted vehicle [C] // *Proceedings of the 2023 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE)*. Dubai, United Arab Emirates: IEEE, 2023: 444 - 449.
- [41] OSHNOEI A, KHERADMANDI M, MUYEEN S M, et al. Disturbance observer and tube-based model predictive controlled electric vehicles for frequency regulation of an isolated power grid [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(5): 4351 - 4362.
- [42] TANG L, RIZZONI G, ONORI S. Energy management strategy for HEVs including battery life optimization [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2015, 1(3): 211 - 222.
- [43] 胡晓松, 陈科坪, 唐小林, 等. 基于机器学习速度预测的并联混合动力车辆能量管理研究[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(16): 181 - 192.
HU X S, CHEN K P, TANG X L, et al. Machine learning velocity prediction-based energy management of parallel hybrid electric vehicle [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(16): 181 - 192. (in Chinese)
- [44] 李军求, 刘吉威, 朱超峰. 基于时变底盘构型的混动车辆能量管理研究[J]. *汽车工程*, 2022, 44(12): 1866 - 1876.
LI J Q, LIU J W, ZHU C F. Research on energy management of hybrid electric vehicle based on time-varying chassis configuration [J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(12): 1866 - 1876. (in Chinese)
- [45] SAITEJA P, ASHOK B. Critical review on structural architecture, energy control strategies and development process towards optimal energy management in hybrid vehicles [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 157: 112038.
- [46] SANKARKUMAR R S, NATARAJAN R. Energy management techniques and topologies suitable for hybrid energy storage system powered electric vehicles: an overview [J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, 31(4): 12819.
- [47] 王晓远, 高鹏, 赵玉双. 电动汽车用高功率密度电机关键技术[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(6): 53 - 59.
WANG X Y, GAO P, ZHAO Y S. Key technology of high power density motors in electric vehicles [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(6): 53 - 59. (in Chinese)
- [48] 胡源, 李静, 黄旭珍. 连续极永磁直线同步电机定位力和推力波动抑制研究[J]. *电气技术*, 2022, 23(9): 1 - 7, 92.
HU Y, LI J, HUANG X Z. Research on detent force and thrust ripple suppression of consequent-pole permanent magnet linear synchronous motor [J]. *Electrical Engineering*, 2022, 23(9): 1 - 7, 92. (in Chinese)
- [49] 黄辉先, 丁灿, 刘嘉婷. 基于非线性干扰观测器的一类欠驱动系统跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2019, 34(3): 549 - 554.
HUANG H X, DING C, LIU J T. Nonlinear disturbance observer-based control for trajectory tracking of a class of underactuated systems [J]. *Control and Decision*, 2019, 34(3): 549 - 554. (in Chinese)
- [50] 曾繁琦, 俞妍, 卜建国, 等. 基于有限状态机的军用起动/发电一体化混合动力车辆能量管理策略研究[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(18): 7472 - 7483.
ZENG F Q, YU Y, BU J G, et al. Research on energy management strategy for military integrated starter generator hybrid vehicle based on finite state machine [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(18): 7472 - 7483. (in Chinese)
- [51] 曾繁琦, 袁晓静, 王旭平, 等. 基于荷电状态惩罚函数的能量管理策略优化方法[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(7): 852 - 857, 871.
ZENG F Q, YUAN X J, WANG X P, et al. Energy management strategy optimization method based on SOC penalty function [J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(7): 852 - 857, 871. (in Chinese)
- [52] 高强, 廖自力, 袁东, 等. 车载综合电力系统关键参数对系统稳定性的影响[J]. *兵工学报*, 2020, 41(9): 1727 - 1735.
GAO Q, LIAO Z L, YUAN D, et al. Effects of key parameters of integrated power system on vehicle stability [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(9): 1727 - 1735. (in Chinese)
- [53] 谈学超, 张军刚. 军用通信车系统功耗需求和电源系统设计方法研究[J]. *通信电源技术*, 2011, 28(4): 47 - 49.
TAN X C, ZHANG J G. System power-consuming requirement analysis of military communication vehicle and design means study of power system [J]. *Telecom Power Technologies*, 2011, 28(4): 47 - 49. (in Chinese)
- [54] 李辉, 王震, 周挺, 等. 含同步调相机的直流受端换流站全工况下多模式协调控制策略[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(17): 3678 - 3690.
LI H, WANG Z, ZHOU T, et al. Multi-mode coordinated control strategy for DC receiving converter station with synchronous condenser under full operating conditions [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(17): 3678 - 3690. (in Chinese)
- [55] ZHENG C H, ZHANG D F, XIAO Y, et al. Reinforcement learning-based energy management strategies of fuel cell hybrid vehicles with multi-objective control [J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 543: 231841.
- [56] TANG X L, JIA T, HU X S, et al. Naturalistic data-driven predictive energy management for plug-in hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2020, 7(2): 497 - 508.

- [57] TANG X L, CHEN J X, PU H Y, et al. Double deep reinforcement learning-based energy management for a parallel hybrid electric vehicle with engine start-stop strategy [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 8 (1): 1376 – 1388.
- [58] LI W H, CUI H, NEMETH T, et al. Deep reinforcement learning-based energy management of hybrid battery systems in electric vehicles [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 36: 102355.
- [59] QI C Y, ZHU Y W, SONG C X, et al. Hierarchical reinforcement learning based energy management strategy for hybrid electric vehicle [J]. *Energy*, 2022, 238: 121703.
- [60] WANG Y, ROUSIS A O, STRBAC G. On microgrids and resilience: a comprehensive review on modeling and operational strategies [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 134: 110313.
- [61] HUSSAIN A, BUI V H, KIM H M. Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience [J]. *Applied energy*, 2019, 240: 56 – 72.
- [62] 盖江涛, 生辉, 周广明, 等. 串联式混合动力履带车辆急加速工况功率平衡控制策略 [J]. *兵工学报*, 2021, 42 (10): 2180 – 2188.
GAI J T, SHENG H, ZHOU G M, et al. Power balance control strategy of series hybrid tracked vehicle under rapid acceleration [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42 (10): 2180 – 2188. (in Chinese)
- [63] ZHAO J B, NETTO M, HUANG Z Y, et al. Roles of dynamic state estimation in power system modeling, monitoring and operation [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 36(3): 2462 – 2472.
- [64] SHI Q X, LIU W, ZENG B, et al. Enhancing distribution system resilience against extreme weather events: concept review, algorithm summary, and future vision [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 138: 107860.
- [65] REHMAN A, HASEEB K, SABA T, et al. Towards resilient and secure cooperative behavior of intelligent transportation system using sensor technologies [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(7): 7352 – 7360.
- [66] LIU J J, GUO H Z, XIONG J Y, et al. Smart and resilient EV charging in SDN-enhanced vehicular edge computing networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 38(1): 217 – 228.
- [67] PAUL S, DING F, UTKARSH K, et al. On vulnerability and resilience of cyber-physical power systems: a review [J]. *IEEE Systems Journal*, 2021, 16(2): 2367 – 2378.
- [68] DADRAS S, DADRAS S, WINSTEAD C. Resilient control design for vehicular platooning in an adversarial environment [C] // *Proceedings of the 2019 American Control Conference (ACC)*. Philadelphia, PA, US: IEEE, 2019: 533 – 538.
- [69] CAI K Y, QU T, CHEN H, et al. Low-cost hybrid multisensor fusion method and implementation for production intelligent vehicles [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 3520516.
- [70] YUE W B, YANG Y, LI Y M, et al. Load frequency control of an armored vehicle power system with unknown disturbances based on adaptive dynamic programming [C] // *Proceedings of the 2022 China Automation Congress (CAC)*. Xiamen, China: IEEE, 2022: 4207 – 4212.