

控制与决策

Control and Decision

面向电动汽车的车-车能量互济装置及多类型协同控制综述

王睿, 贾惟, 孙秋野, 王鹏

引用本文:

王睿, 贾惟, 孙秋野, 等. 面向电动汽车的车-车能量互济装置及多类型协同控制综述[J]. *控制与决策*, 2026, 41(5): 1201-1218.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.1492>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电动汽车时代的电网-交通网协同优化综述

A survey of cooperative optimization of traffic-grid networks in the era of electric vehicles

控制与决策. 2021, 36(9): 2049-2062 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1736>

基于协同控制的串联超级电容电压均衡策略

Voltage equalization strategy for series-connected ultracapacitors based on cooperative control

控制与决策. 2021, 36(8): 1997-2001 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1736>

基于虚拟角急动度并网控制策略

Grid connected strategy based on virtual angular jerk

控制与决策. 2021, 36(5): 1268-1272 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1030>

基于指数趋近律的车载复合储能系统全局滑模控制

Global sliding mode control of vehicle-mounted hybrid energy storage system based on exponential reaching law

控制与决策. 2021, 36(4): 885-892 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0478>

数据驱动的综合能源系统运行优化方法研究综述

Review of research of data-driven methods on operational optimization of integrated energy systems

控制与决策. 2021, 36(2): 283-294 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0725>

面向电动汽车的车-车能量互济装置及 多类型协同控制综述

王睿¹, 贾惟¹, 孙秋野^{2†}, 王鹏³

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819; 2. 沈阳工业大学 人工智能学院, 沈阳 110027;
3. 新加坡南洋理工大学 电气与电子工程学院, 新加坡 639798)

摘要: 近年来交通运输业呈现出迅猛发展的态势, 电动汽车由于可以减少环境污染并使得交通系统更加智能得到了快速发展. 然而, 由于电动汽车充电桩分布不均匀, 导致出现电动汽车里程焦虑问题. 车-车 (V2V) 能量互济装置的研究成为消除电动汽车里程焦虑的关键技术之一. V2V 技术不仅可实现两辆电动汽车之间的电能传输, 缓解电池续航不足与充电桩分布不均的问题, 还能显著提升充电灵活性. 鉴于此, 对现有车-车能量互济装置的拓扑结构和控制策略进行全面讨论, 首先分析隔离型、非隔离型和无线传输型 3 类主要拓扑结构的工作原理和应用场景; 进而探讨对其线性和非线性控制策略的优缺点, 并结合不同拓扑给出优化建议; 同时扩展讨论 V2X 技术的发展趋势, 包括车-车 (V2V)、车-家 (V2H)、车-网 (V2G) 协同控制等多种应用场景在智能电网中的应用前景; 最后讨论 V2V 充电技术的商业化发展现状、商业化解决方案和面临的挑战.

关键词: 能量互济; 电动汽车; 控制策略; 拓扑结构; V2X; 协同控制

中图分类号: U469.72 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.1492

引用格式: 王睿, 贾惟, 孙秋野, 等. 面向电动汽车的车-车能量互济装置及多类型协同控制综述 [J]. 控制与决策, 2026, 41(5): 1201-1218.

A Review of vehicle-vehicle energy mutualization devices and multi-type cooperative control for electric vehicles

WANG Rui¹, JIA Wei¹, SUN Qiu-ye^{2†}, WANG Peng³

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. College of Artificial Intelligence, Shenyang University of Technology, Shenyang 110027, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

Abstract: The transportation industry has shown rapid development in recent years. Electric vehicles (EVs) have developed rapidly because they can reduce environmental pollution and make the transportation system smarter. However, the uneven distribution of electric vehicle charging piles has led to the electric vehicle mileage anxiety problem. Vehicle-vehicle (V2V) energy mutual aid has become one of the key technologies to eliminate the mileage anxiety of EVs. The V2V technology not only enables the transmission of electricity between two EVs, alleviating the problems of insufficient battery range and uneven distribution of charging piles, but also significantly improves charging flexibility. In this paper, the topologies and control strategies of existing V2V devices are comprehensively discussed. Firstly, the working principles and application scenarios of the three main topologies, namely, isolated, non-isolated, and wireless transmission, are analyzed. Then, the advantages and disadvantages of the linear and non-linear control strategies are discussed, and optimization suggestions are given in combination with the different topologies. Further, this paper also extends the discussion on the development trend of V2X (vehicle-X) technology, including the application prospects of vehicle-vehicle (V2V), vehicle-home (V2H), vehicle-grid (V2G) cooperative control, and other application scenarios in the smart grid. Finally, the current status of the commercialization of V2V charging technology, commercialization solutions, and challenges are discussed.

Keywords: energy mutualization; electric vehicle; control strategy; topology; V2X; cooperative control

收稿日期: 2024-12-26; 录用日期: 2025-03-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52307194, 5247072151); 国家重点研发计划项目 (2023YFF0615000); 辽宁省科协科技创新智库项目 (LNKX2025QN04).

†通信作者. E-mail: sunqiuye@ise.neu.edu.cn.

0 引言

化石能源危机和环境污染问题已引发广泛的社会关注,传统燃油汽车数量的持续增加使得环境污染问题日益严重^[1].在近年来交通运输业取得的进展中,电动汽车以其“零排放”的优势^[2],逐渐成为人们关注的焦点.电动汽车由于续航里程不断增加,且充电成本远低于传统燃油汽车,使其在经济上对消费者越来越有吸引力.因此,电动汽车作为新能源汽车的代表,被视为解决环境污染和能源消耗问题的有效途径之一.我国已构建多维度政策支撑体系,通过《新能源汽车产业发展规划(2021-2035年)》等专项政策^[3-4],配合分阶段实施碳达峰(2030)、碳中和(2060)的战略布局^[5-6],形成了目标明确的技术路线图.根据国际能源署(IEA)发布的《全球电动汽车展望2024》,全球电动汽车销量目前呈现持续增长态势,并预计今年全球电动汽车销量将达到1700万辆.中国的电动汽车市场表现尤为强劲,国家能源局最新统计数据显示,截至2024年9月底,我国电动汽车充电设施总数达到1143.3万台,同比增长49.6%.新能源汽车保有量达到2809万辆.

尽管电动汽车在技术和市场上取得了显著进展,但是充电桩还存在许多不完善之处,其发展仍面临诸多挑战^[7].电动汽车的电池技术在不断进步,但大多数电动汽车的续航里程仍然有限^[4,8],难以满足车主长距离出行的需求.目前,许多城市和地区的充电桩数量呈快速增长趋势,正在逐渐满足人们的充电需求.但是高速公路以及一些偏远地区充电桩匮乏的现象还是较为明显,充电桩在城市中分布仍不均匀.许多电动汽车车主表示自己总会出现里程焦虑,在长途旅行时容易遭遇电量不足的情况^[9].此外,“坏桩”“僵尸桩”等问题在现实中依然存在,找桩难、充电桩无人维护、车多桩少、需要排队充电等情况亟待解决.如果是在偏远地区,电动汽车一旦出现中途电量不足,且附近充电桩满载的情况下,车主基本只能通过移动设备寻求救援,这大幅降低了人们购买电动汽车的意愿.

为了解决上述问题,一种新型的电动汽车用车-车能量互济装置被提出,也被称为V2V(vehicle-to-vehicle, V2V)功率传输.该装置允许电动汽车在没有快速充电桩的情况下共享电能.通过两车之间的电能传输,电量充足的车辆可为电量不足的车辆提供电力支持,从而缓解电动汽车因电量耗尽而需等待救援的问题.V2V技术正逐渐成为电动汽车之间能量传输的核心技术.该装置可减少传统充电桩

的依赖^[10],消除电动汽车里程焦虑.这种装置还能够将高峰时间公用事业负载转移到非高峰时间^[11],平衡当地的电力需求^[12],缓解电网系统过载,保证配电网的安全稳定运行^[13],提高配电系统的能源效率^[14],并降低相应基础设施部署的成本^[15].此外,该装置为电动汽车(EV)充电提供了更大的灵活性^[16],且无需依赖充电基础设施或专用停车场^[11].出于商业目的,该装置还可在高峰时段以更高的价格出售能源.研究表明^[17-18],已有3种不同功率的充电等级应用于车-车能量互济装置.分别是:一级慢速充电(1.4~1.9 kW)、二级普通充电(4~19.2 kW)和三级快速充电(50~240 kW).

另一方面,为了增加输出电压的可调范围^[19-20],实现高频工作^[21],简化装置结构^[22]并优化转换效果^[23-25],近年来,车-车能量互济装置的拓扑结构及其控制策略研究取得了大量新成果.交错双输入三电平升压变换器(DITLB)的设计方案由文献[26]提出,通过双升压拓扑结构与间接串联方式实现新设计.此外,文献还研究了基于电压电流环和电压平衡环的闭环控制策略,以缓解中性点不平衡问题.具体内容将在下文详细讨论.

除了V2V功率传输,V2X(vehicle-to-X)技术还包括V2H(车对家)、V2G(车对电网)、V2B(车对建筑)等.随着V2X技术的发展,智能汽车的研究重点逐渐从单车控制转向多车协同控制,汽车协同控制系统成为重要的发展课题^[27],并得到了广泛研究^[28].V2X技术具有提供紧急服务^[29]、保证道路安全^[30]、调节电网反馈及减少能源消耗^[31]等一系列优势.

本文重点研究V2V技术的两个关键方面及V2X技术,并对最新研究进展进行综述.首先详细讨论车-车能量互济装置的拓扑结构,并归纳其工作特性及优缺点;然后分析针对这些拓扑结构的控制策略,包括线性和非线性控制策略;接着介绍V2X技术及多类型车-车/家/网协同控制的研究现状;最后介绍V2V的商业化路径及挑战.

1 车-车能量互济装置典型拓扑

车-车能量互济装置用于进行电动车间的电能传输,其设计目标、充电速度、拓扑结构、功率水平及成本等方面均存在显著差异.按照输入和输出端是否存在电气隔离,可分为隔离型变换器和非隔离型变换器,上述两种变换器均通过线缆连接.近年来,电动汽车无线充电技术受到广泛关注^[32],因此,本文主要讨论隔离型、非隔离型及无线传输型3种变换器的典型车-车能量互济装置用拓扑结构.

1.1 隔离型变换器

隔离型变换器是指将电源与用电回路通过变压器作电气上的隔离,即将用电的分支电路与整个电气系统隔离的 DC-DC 变换器。

1.1.1 双有源桥变换器

双有源桥 (dual active bridge, DAB) 变换器是一种高效的隔离式双向 DC-DC 变换器,通常采用移相控制策略,即通过改变原边与副边之间的超前滞后关系实现能量流动。

DAB 变换器现已被深入研究并得到广泛应用。然而,传统三电平 DAB 变换器在 V2V 功率传输中面临过宽增益问题。文献 [33] 提出了一种基于三电平 DAB 的双向电动汽车充电器。如图 1 所示,两个阻塞电容器分别与变压器的两个绕组串联。与传统的三电平 DAB 变换器不同,所提出变换器的两个三电平电桥可在 4 种模式下工作,并产生 4 种幅值的方波。因此,所提出的三电平 DAB 变换器能够适应电动汽车较宽的充电电压范围。与基于 SiC 的两电平 DAB 变换器相比,所提出变换器的三电平结构虽增加了硬件复杂度并降低了可靠性,但通过优化元件选择与 PCB 设计可克服这一缺点。此外,该变换器在成本方面具有显著优势。

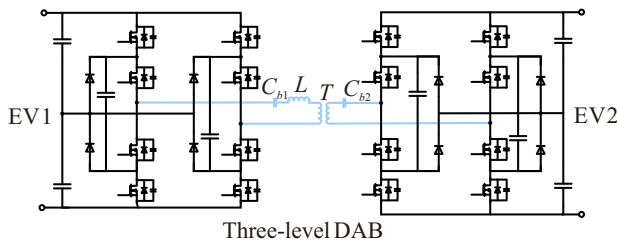


图1 三电平双有源桥变换器拓扑结构

高频开关器件易产生损耗,并在轻载或参数失配时可能出现振荡现象。为了解决这一现象,文献 [21] 将一种高度紧凑且高效的 DAB 变换器应用于电动汽车充电器,如图 2 所示。该变换器采用一种低寄生、基于电路板 (printed circuit board, PCB) 的无线键合全桥模块,无引线键合、裸片 SiC MOSFET 全桥模块及小尺寸集成冷却系统显著提升了变换器的功率密度和效率。其低寄生特性使变换器能在高

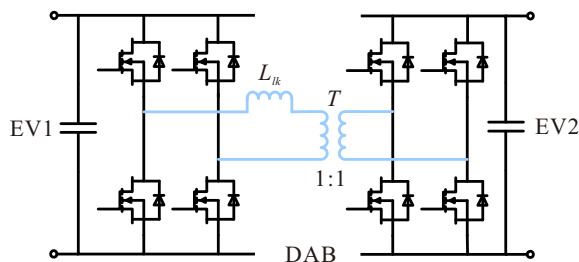


图2 双有源桥变换器拓扑结构

频下稳定高效工作,且不会产生高开关损耗或振荡。经过验证,所提出变换器在充电阶段和轻负载条件下均表现出相当高的效率。

1.1.2 电感-电感-电容谐振变换器

传统的硬开关电路开关损耗较大,且在高频操作下损耗问题更加突出。软开关技术应运而生,谐振变换器便是软开关技术的一种重要实现形式。作为一种典型谐振变换器,电感-电感-电容 (LLC) 谐振变换器是一种软开关电源拓扑,具有高变换效率、宽范围电压调节、低开关损耗等特点。

由于控制复杂及参数设计繁琐,LLC 变换器在较长时间内未得到广泛应用。近年来,随着半导体器件技术的快速发展及小型化电源需求的急剧增加,LLC 变换器开始广泛应用。大量研究表明,LLC 变换器已应用于车-车能量互济装置。文献 [34] 提出了一种采用交错并联 LLC 变换器的电动汽车车载充电器。如图 3 所示,该变换器由两个并联 LLC 谐振变换器组成,每个 LLC 谐振变换器由一个开关网络和一个谐振槽组成。所提出的变换器采用交错相位控制策略进行控制。因此,该变换器能够实现 20 kW 的最大输出功率,并具有宽电压输出范围和宽工作温度范围的特点。

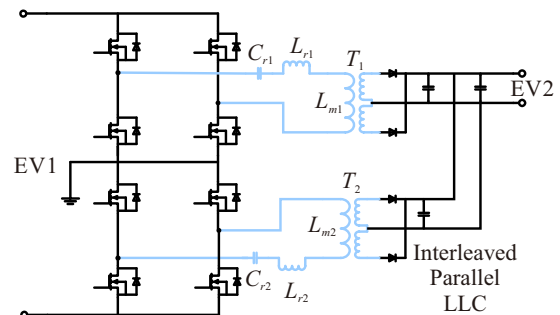


图3 交错并联 LLC 变换器拓扑结构

文献 [35] 提出了一种基于 SiC 的双向便携式电动汽车充电器,通过复用动力系统实现双向 AC-DC 与 DC-DC 的高效功率转换。如图 4 所示,该变换器的后级作为反向 LLC 变换器,产生 DC 链路电压。该变换器在 V2V 模式下可以提供高达 96.1% 的满载效率,并且可以提供 36 ~ 400 V 的宽范围电压输出。

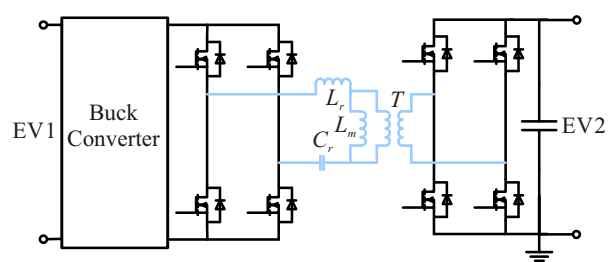


图4 反向 LLC 变换器拓扑结构

1.2 非隔离型变换器

隔离型变换器通过变压器实现电气隔离,具有高电压比、宽输出电压范围和强稳定性等优势;但其结构复杂、体积大、成本高,部分应用场景中存在局限性.非隔离型变换器是指在电源与用电回路之间不作电气隔离,采用直接耦合方式,即各部件直接相连的DC-DC变换器.因此,输入端发生的变化会直接影响到非隔离型变换器的输出端.该变换器结构简单、成本低、无额外能量损失且工作效率较高.因此在更多的应用场景中,非隔离型直流变换器更受欢迎,目前已被广泛应用.

1.2.1 降压-升压变换器

降压-升压变换器(Buck-Boost)是输出电压可低

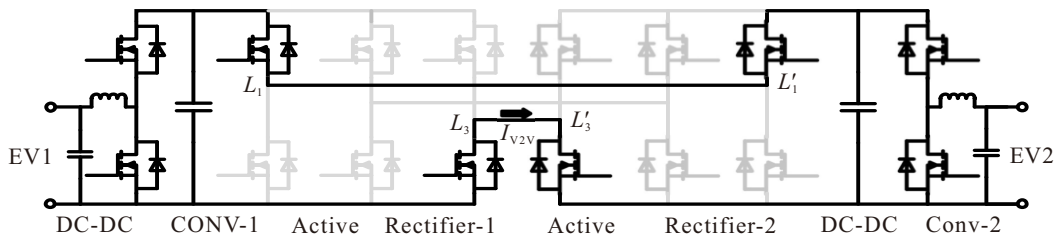


图5 降压-升压变换器拓扑结构

1.2.2 升压变换器

升压变换器(Boost)是一种输出电压高于输入电压的单管非隔离直流变换器.图6为采用Boost变换器的单相多功能电动汽车车载充电器的拓扑结构,该充电器具有V2V电能传输功能,两辆电动汽车之间通过LC滤波器连接.不过采用这种拓扑结构进行V2V电能传输时效率仅为87%,这是由于整流器和DC-DC变换器的开关导通造成损耗.为了有效抑制充电系统中两级之间的电流流动,该充电器于两个整流器之间配置了一个由相移控制器调控的双有源桥(DAB)变换器.这一设计不仅实现了电流隔离,而且避免了对V2V操作的潜在干扰,从而提升了充电器的安全性^[37].

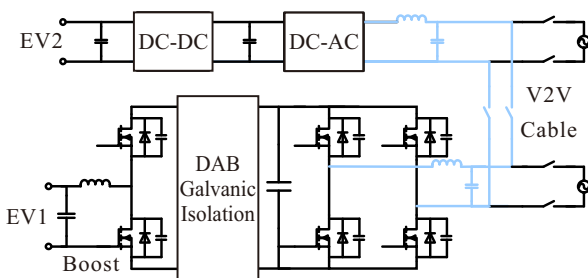


图6 V2V模式升压变换器拓扑结构

1.2.3 交错升压变换器

交错升压变换器(Interleaved Boost)是一种采用交错技术,利用多个变换器单元以交错的方式工作

于或高于输入电压的一种单管直流变换器,可以对输入电压进行提升/降低并产生一个稳定的输出电压,因此在电源管理和可再生能源系统中被广泛应用以调节电力^[36].

采用Buck-Boost变换器来实现V2V电能传输,可以在EV1的电池电压小于、等于、大于EV2的电池电压3种模式下工作^[22].如图5所示,所提出装置将两节电动汽车电池直接连接在一起共享能量.由于两个有源整流器只是被用作连接两个直流链路的接口,而实际目的不是整流,两个有源整流器的其他开关在整个V2V操作中保持关断,只使用少数开关作为接口连接电池.开关连续导通,避免了多余的功率转换和损耗,有效提高了整体V2V的传输效率.

实现的直交到直流的电压转换装置.文献[38]提出了一种基于交错升压变换器的直流快速充电方法.该方法通过复用电动汽车的电机绕组中性点与车载传动系统的负极轨道,构建双向DC-DC变换器.如图7所示,两端直接连接后,得到的变换器结构形成了一个双向DC-DC变换器,可用于V2V电能传输.变换器的交错结构使得该装置能够实现3种模式下的直流充电,并且可以同时实现高功率传输和较低的损耗.

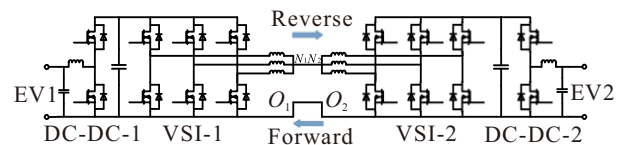


图7 交错升压变换器拓扑结构

研究表明,交错型变换器结合其他结构能够实现附加功能.一种将交错变换器与LLC变换器相结合的碳化硅双向便携式充电器已用于V2V电力传输^[35].如图8所示,所提出的装置在前端使用交错变换器实现DC-DC变换功能,后端使用反向LLC变换器产生DC链路电压.通过复用同一动力系统,该装置可以实现双向AC-DC和双向DC-DC的高效功率转换.在V2V功率传输模式下,所提出的装置采用两级直接DC-DC电源转换,传输能量的效率更高^[39],并且同样能够实现宽输出电压范围.

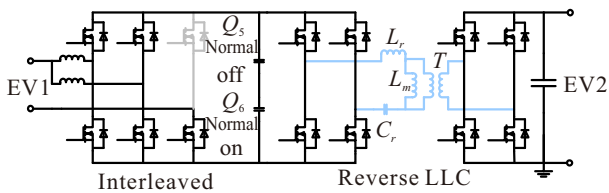


图8 交错结合 LLC 变换器拓扑结构

另一种结合的 V2V 车载充电器的拓扑结构如图 9 所示, 共有 3 个单相 H 桥转换器. 充电器包括一个用于升压/降压的交错 DC-DC 变换器, 以及一个额外的 DAB 转换器, 用于控制功率流并为每辆电动汽车提供电流隔离. 两辆电动汽车的充电器通过直流端口上的开关连接, 从而实现 V2V 电力传输. 两个充电器后面直接连接 DC-AC 转换器, 从而实现 G2V/V2G 运行、无功支持等功能. 然而, 当仅使用 V2V 电力传输时, 该装置中这些其他功能则被禁用, 但仍会导致进一步的传导和开关损耗, 最终降低 V2V 电力传输效率^[40].

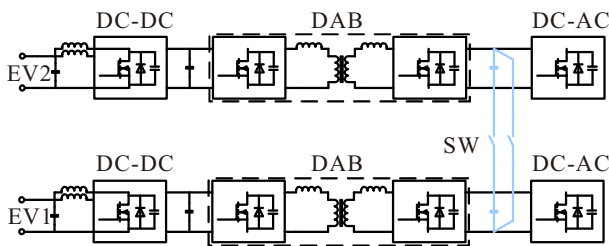


图9 交错结合 DAB 变换器拓扑结构

1.3 无线传输型变换器

无线充电技术通过电磁感应原理实现非接触式电能传输, 具有无需物理连接、操作便捷等优势. 研究表明, 近年来 WPT(wireless power transmission) 发展迅速^[41], 正在成为一种有前途的电动汽车充电技术^[42]. 同时无线充电以其安全、低维护成本、舒适、操作自动化等特点, 越来越受到电动汽车用户的关注^[43-44]. 然而, 限制该技术发展应用的主要障碍是由于发射器 (Tx) 与接收器 (Rx) 之间的弱耦合导致传输效率低下^[43], 实现高效率、高功率传输和宽偏差容限仍是电动汽车无线充电技术商业化的主要挑战^[42]. 人们设计了许多策略来提高 WPT 模型的效率^[45-46], 如采用谐振式电感耦合设计 WPT 系统充电线圈的思路, 并采用降雨优化算法对耦合系数进行优化, 能够提高 WPT 系统的整体性能以及传输效率^[47]. 近年来有关学者提出了 WPT-V2V 系统, 其通过无线链路在两辆电动汽车之间传输电力, 无需线缆即可实现两辆电动汽车之间的充电^[43].

根据所使用的拓扑结构, 用于便携式车-车能量

互济装置的无线传输型变换器可以分为基于 LLC/Buck/Boost/LCC/SPMC 等拓扑结构的变换器.

一种基于 LCC-LCC 结构的 V2V WPT 系统如图 10 所示. 该系统的双向全桥变换由高频 mosfet 组成. LCC 谐振网络由补偿电感和补偿电容组成, 有着尺寸紧凑、元件应力低、不受耦合和负载条件的影响的特点. 由于 LCC-LCC 拓扑的谐振频率独立于耦合和负载条件, 且具有更高的自由度、低元件应力和软开关能力, 使得系统具有较强的鲁棒性. 该结构能够降低谐振频率漂移带来的影响, 提高效率, 有效减少高次谐波影响, 提高功率传输质量. 该系统还能够耦合变化的影响下, 输出功率仍保持相对恒定, 并实现较高的闭环传输效率^[48].

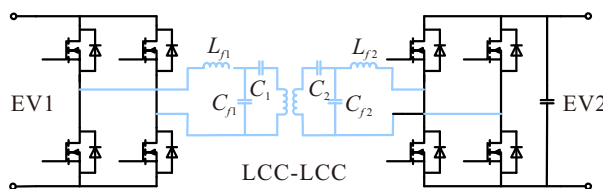


图10 LCC-LCC 无线变换器拓扑结构

文献 [49] 提出一种基于 Buck 结构用于 IWPT 系统的 DC/DC 变换器. 如图 11 所示, 发射端采用交错耦合 Buck 变换器, 并且该 DC-DC 变换器集成了连接到半逆变器桥和并联谐振负载的两个 Buck 变换器, 因此所提出的 DC-DC 变换器能够获得低失真输出电压, 适用于高效率传输的便携式无线功率传输系统.

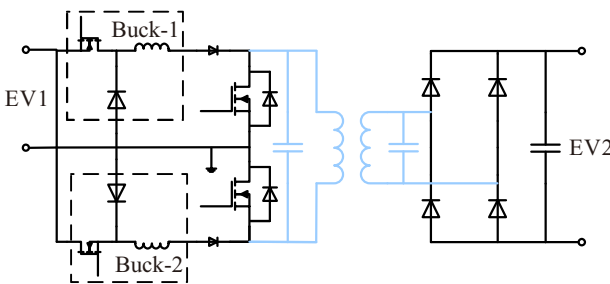


图11 降压无线变换器拓扑结构

文献 [50] 提出一种基于单相矩阵变换器 (single-phase matrix converter, SPMC) 的 V2V WPT 装置. 如图 12 所示, 车辆 1 的 SPMC 将输入直流电源转换为高频交流电源, 经过理想的变压器, 通过交变磁场将高频功率从车辆 1 转移到车辆 2 执行 WPT 操作. 采用该变换器的 WPT 系统可以改善系统的功率因数和电能质量, 因为 SPMC 能够作为有源电力滤波器工作, 改善非正弦电源电流波形. 通过 SPMC 运行在整流模式时执行谐波抑制, 确保输入电流接近纯正弦波, 使系统满足 IEEE-519 谐波标准. SPMC 结构

虽然减少了变换级数,但由于其高频开关特性,仍然需要高效的散热管理以防止器件过热.

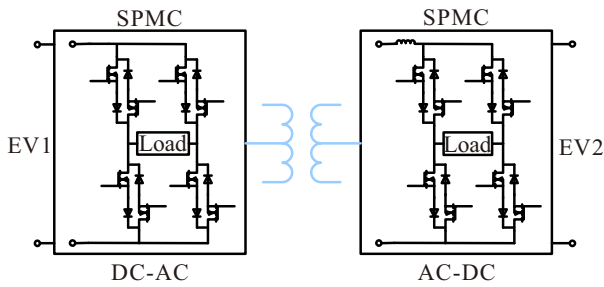


图12 单相矩阵无线变换器拓扑结构

一种基于 LLC 补偿网络的 V2V WPT 系统如图 13 所示^[51]. 该系统由双向变换器、LLC 补偿网络和两个线圈组成,通过相移控制即可实现无线功率传输. 文献 [52] 还提出一种基于 Boost 结构的 V2V WPT 系统,如图 14 所示. 电压先经过 Boost 变换器进行升压,然后经过逆变器、线圈和整流器完成无线

电能传输.

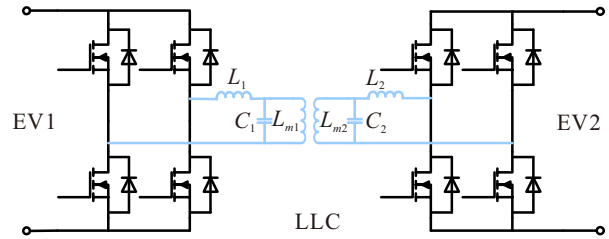


图13 LLC无线变换器拓扑结构

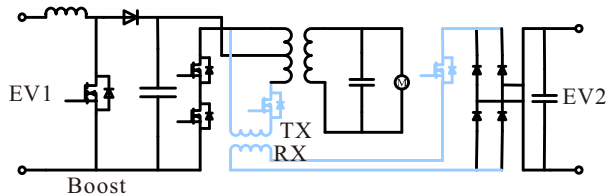


图14 升压无线变换器拓扑结构

基于上述分析,车-车能量互济装置所使用的拓扑结构在传输类型、连接方式、充电速度、转换阶段等方面的特性如表 1 和表 2 所示.

表1 变换器拓扑结构比较

拓扑结构	传输类型	连接方式	速度	优点	转换阶段	开关数量
三电平DAB变换器	DC-DC	/	普通	四种工作模式,宽范围充电电压	2	18
DAB变换器	DC-DC	/	普通	轻负载条件下效率高	2	8
交错并联LLC变换器	DC-DC	/	普通	宽电压输出范围、工作温度范围 最大20 kW输出功率	2	8
反向LLC变换器	DC-DC/AC	车载	普通	满载效率高,宽电压输出范围	2	8
降压-升压变换器	DC-DC	车载	快速	开关损耗小,效率高,3种模式	4	8
升压变换器	DC-DC	车载	普通	相同组件即可实现V2V和V2G	4	12
交错升压变换器	DC-DC	车载	普通	3种模式,低损耗,高效率	2	16
交错降压变换器	DC-DC	车载	普通	满载效率高,宽电压输出范围	1	5
交错变换器&DAB	DC-DC/AC	车载	普通	能实现V2V/V2G/G2V	6	18
LCC-LCC无线变换器	DC-AC	无线	普通	效率高,不受耦合负载变化影响	2	8
降压无线变换器	DC-DC/AC	无线	普通	输出电压低失真,高传输效率	3	4
单相矩阵无线变换器	DC-AC	无线	/	改善系统功率因数和电能质量	2	16
LLC无线变换器	DC-AC	无线	慢速	改变相位角即可改变输出功率	2	8
升压无线变换器	DC-AC	无线	/	高电压增益,运行状态即可传输电能	4	4

表2 变换器拓扑结构性能比较

拓扑结构	开关频率/Hz	传输效率/%	输出功率/kW
三电平DAB变换器	50	92.5	3.5
DAB变换器	500	95.8 ~ 98	3.3
交错并联LLC变换器	150 ~ 250	97.2 ~ 97.8	20
反向LLC变换器	66.7	96.1	6.6
降压-升压变换器	20	98.43	11.172
升压变换器	/	87	3.02
交错升压变换器	20	91.53	/
交错降压变换器	300	96.2	6.6
交错变换器	100	/	4.5
LCC-LCC无线变换器	85	94.1	6.6
降压无线变换器	500	85.1	/
LLC无线变换器	85	/	1.44

由表 1 和表 2 可知,大多数拓扑结构的充电速度为普通或快速,且转换阶段数量均较少,少数拓扑结构的转换阶段数量较多,这是因为与仅进行 DC-DC 传输相比,它们还具有额外的传输功能等.

2 车-车能量互济装置的典型控制策略

鉴于不同工况的设备外特性要求,相关学者提出了面向便携式车-车能量互济装置变换器的多种控制策略,当前控制策略主要分为线性控制策略和非线性控制策略.其中,线性控制策略主要面向简单系统模型或者系统模型线性化处理的系统,兼具控制器设计简单和控制算法复杂度低等特点.然而,随着变换器设备要求激增和拓扑复杂度提升,传统线

性控制策略难以满足设备需求. 因此, 相关的非线性控制策略得到众多学者的关注^[25].

2.1 线性控制策略

便携式车-车能量互济装置变换器的线性控制策略主要包括比例 (P)、比例积分 (PI)、比例微分 (PD)、比例-积分-微分 (PID) 控制, 以及线性自抗扰控制、线性模型预测控制和线性二次调节器等. P 控制是最简单的控制算法; PI 控制在 P 控制基础上加入积分环节; PD 控制则加入微分环节; PID 控制器综合了 P、I、D 三个环节的优点, 具有快速响应、降低稳态误差、减小超调和抑制噪声等特性, 应用最为广泛.

2.1.1 PI 控制策略

文献 [53] 提出了一种比例+积分 (PI) 控制器作为补偿器, 其控制回路如图 15 所示. 采用该控制策略的 V2V 系统平均效率为 95.7%, 输出功率保持相对恒定, 并且控制系统能够很好地跟随参考. 然而为了获得准确的输出, 需要对参考发生器进行精确的建模, 否则将导致 V2V 系统性能下降.

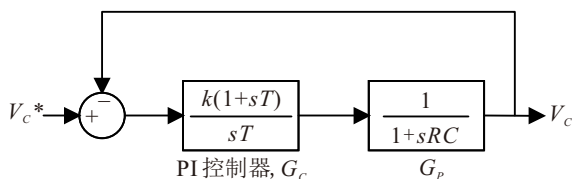


图15 比例积分控制策略

文献 [24] 提出了一种基于 PI 控制器的电压平衡控制策略, 如图 16 所示. 该控制策略在电压-电流环和电压平衡环中采用了 PI 控制器, 通过检测电压差, PI 控制器输出差分占空比, 进而调整开关的占空比, 控制转换器的输入电流和输出电压, 使其保持稳定.

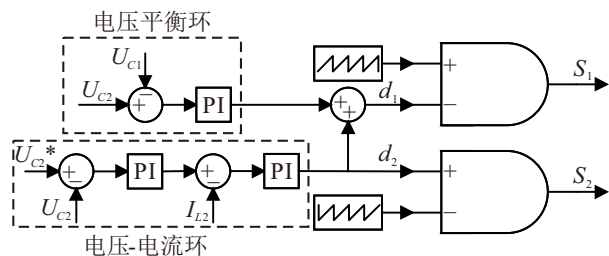


图16 闭环中的比例积分控制策略

2.1.2 PID 控制策略

PID 控制作为一种经典工业控制技术, 因其参数调整简单、鲁棒性强等特点, 仍广泛应用于 DC-DC 变换器. 文献 [54] 提出了一种采用 PID 控制策略的 DC-DC 升压变换器, 如图 17 所示. 在所提出的 PID 控制策略中, 微分控制器 (KD) 改善了系统的

瞬态响应, 积分控制器 (KI) 减小了系统的稳态误差. 因此该控制策略有着更好的电压调节性能, 能够降低过调量并优化变换器的转换效果.

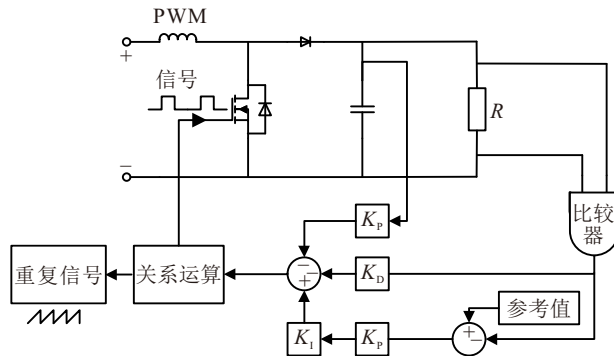


图17 比例积分微分控制策略

2.1.3 线性自抗扰控制策略

线性自抗扰控制是自抗扰控制的线性化版本, 基于状态观测器, 通过估计和补偿系统扰动实现精确控制. 该控制策略的核心是扩展状态观测器, 可实时估计系统状态和外部扰动, 并将估计值用于反馈控制. 文献 [55] 提出了一种线性自抗扰控制策略, 用于 DC-DC 变换器的电压控制. 该策略通过修改原有控制律, 引入用户定义的零点, 以改善系统的瞬态特性. 线性自抗扰控制通过线性扩展状态观测估计系统状态和扰动, 然后利用这些估计值进行反馈控制. 所提出的控制策略进一步优化了系统的动态响应和稳态性能, 特别是在 Buck 和 Buck-Boost 变换器的电压控制中, 线性自抗扰控制显示出了其对不同频率扰动的良好抵抗力.

2.1.4 线性模型预测控制策略

线性模型预测控制是一种基于系统模型的控制方法, 通过当前系统状态预测未来状态, 并优化控制输入以实现期望目标. 文献 [56] 研究了线性模型预测控制和非线性模型预测控制在全桥 DC-DC 变换器中的应用, 特别是在启动、过载和负载阶跃变化条件下的性能. 控制目标为调节输出电压, 同时确保系统不违反峰值电流约束. 线性模型预测控制基于系统线性模型, 预测未来一段时间内的系统行为. 通过求解一个在线优化问题, 计算出使系统状态最接近期望值的控制输入. 然而, 线性模型预测控制需要在每个控制周期内重新计算控制输入, 且需要较高的计算能力, 尤其是在动态变化较快的系统中. 因此通过使用预计算的最优控制输入, 线性模型预测控制可以有效提高计算效率.

2.1.5 线性二次调节器

线性二次调节器是一种经典的最优控制方法, 用于求解线性系统的状态反馈控制问题. 其目标是

在满足动态约束的前提下,通过设计状态反馈控制器,从而实现对系统的最优控制.线性二次调节器特别适用于处理具有不确定性和扰动的系统,其在DC-DC变换器中也表现出良好的性能,能够实现快速响应和高精度的电压控制.文献[57]提出了一种改进的基于线性二次调节器的控制器,用于开关型DC-DC变换器.该控制器利用状态变量反馈理论,通过线性二次调节器优化控制器来提高电压和电流的调节性能,并结合数字观察器设计实现状态估计,解决了之前状态估计器导致输出电压与参考值之间的稳态误差问题.线性二次调节器控制能够有效处理系统中的扰动并保证良好的暂态响应和稳态误差.改进的设计避免了传统线性二次调节器控制中的稳态误差问题,同时也增强了系统的鲁棒性.

2.2 非线性控制策略

便携式车-车能量互济装置变换器的非线性控制策略主要用于解决线性控制策略难以处理的复杂问题,表现出较强的鲁棒性^[58-59]以及优越的控制性能^[60].根据大量研究成果,便携式车-车能量互济装置变换器的非线性控制策略主要涵盖了滑模控制、模糊逻辑控制、模型预测控制、反步控制算法以及基于非线性状态反馈的控制方法.

2.2.1 滑模控制策略

与其他控制策略不同之处在于,采用滑模控制策略系统的“结构”并不固定,而是可以在动态过程中根据系统当前状态有目的地不断变化,迫使系统按照预定“滑动模式”的状态轨迹运动.即使存在外部干扰,滑模控制策略也能够保证变换器正常工作.因此,滑模控制策略具有快速响应^[61]、对参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识、物理实现简单^[62]等优点,其在高频条件下也会有较高的开关损耗,以及会出现抖振误差.这种控制技术在电动汽车等行业有着广泛的应用.一种改进的基于PWM(pulse width modulation)的滑模控制器被用于DC-DC级联升压变换器^[63].为了克服现有控制器的缺点,所提出控制器结合了基于归一化输出电压误差的积分动作,能够提高系统的闭环输出电压响应,实现更广泛的工作范围和更好的调节性能.

为了克服抖振误差^[64],滑模控制也被用于与其他控制策略结合设计使用.基于非线性扰动观测器(nonlinear disturbance observer, NDO)的滑模控制策略是在采用广义降阶模型观测器的基础上设计滑模控制器,能够实现快速的系统动态性能和精确的输出电压跟踪.因此该算法具有输出电压稳定、鲁棒性

好、不需要额外的硬件开销等优点^[65].

2.2.2 模型预测控制策略

模型预测控制策略是一种利用系统动态模型来预测未来系统行为,并通过求解最优控制问题来优化控制输入的策略.在每个控制时刻,模型预测控制通过解决一个基于系统模型的优化问题,考虑控制变量的约束和系统状态的变化来生成最优控制策略.因此,模型预测控制具有系统鲁棒性、稳定性较好^[66]、动态控制性能好^[67]的优点.模型预测控制广泛应用于多种需要处理约束或具有延时特性的动态系统,尤其适合于多输入多输出(MIMO)系统的控制设计.

对于DC-DC变换器的不稳定变化,控制策略需要能够对这种不确定性作出响应变化.因此,模型预测控制策略适用于双向DC-DC变换器.通过对功率缓冲器进行建模,并定义组合MPC控制目标,从而在阻抗控制与直流电压控制之间进行最佳权衡^[68].模型预测控制能够实现源负载动态解耦,减轻恒功率负载带来的不稳定影响,且对于电压电流波动,模型预测控制策略依然能够实现最佳权衡,提高系统的稳定性.

2.2.3 模糊逻辑控制策略

模糊逻辑控制是一种基于模糊集理论和模糊推理的非线性控制策略,其核心思想是通过模拟人类决策过程来处理系统的不确定性和非线性特性^[69].与传统精确控制方法不同,模糊逻辑控制不依赖于精确的数学模型,而是通过模糊化、模糊推理和去模糊化3个步骤来实现控制目标.滑模控制通过强制系统状态沿预设滑模面运动,结构在动态过程中不断变化,而模糊逻辑控制的结构(隶属函数等)通常是固定的,但在自适应模糊逻辑控制中通过在线调整缩放因子也可以实现动态优化.模糊逻辑控制不依赖于精确的系统模型,而且适用于复杂非线性系统,通过模糊推理处理系统不确定性和参数摄动,具有较强的鲁棒性,其规则库和隶属函数可根据系统特性灵活设计,适应多种控制场景.一种基于连续混合 p -范数算法的自适应模糊控制策略在文献[70]中被提出,能够非常有效地处理非线性动态系统,无需设计复杂的优化方法即可实现良好的性能表现.该策略通过在线更新模糊逻辑控制的输入/输出缩放因子,动态优化控制性能,从而适应系统的非线性与参数摄动.因此该控制策略无需精确数学模型,通过自适应调整应对系统非线性与不确定性.相比于PI控制器,所提出的控制策略具有更低的稳态误差、更快的调节时间以及更优的抗扰能力.

2.2.4 反步控制算法

反步控制是一种非线性控制策略,其基本思想是通过递归设计控制器来确保系统稳定性.在应用反步控制时,首先将系统分解为一系列较小的子系统,对每个子系统逐步设计反馈控制器,最终通过组合这些控制器来实现系统的全局稳定.反步法通常适用于具有非线性动态特性的系统,尤其是在处理不确定性、扰动以及大范围参数变化时表现出良好的鲁棒性和控制性能.

文献 [25] 提出了一种基于扰动观测器的反步控制策略,用于 DC-DC 变换器.系统整体控制框图如图 18 所示.为了实时估计系统扰动,文献设计了非线性扰动观测器 (NDO) 对扰动项进行估计.利用扰动观测器的输出,进一步设计了反步控制器,通过寻找虚拟和中间控制量,建立李雅普诺夫函数,得到反步控制器表达式.采用该控制策略的变换器能够在在供能车源侧和耗能车负载侧存在大信号扰动 (输入输出电压、负载功率扰动等) 的情况下保持输出电压的稳定,且所提出的控制策略相比于其他非线性控制策略,在结构设计上更加简单.

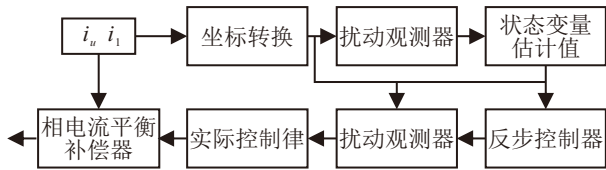


图18 含反步控制算法的系统框图

文献 [71] 提出了一种将非线性扰动观测器 (NDO) 前馈补偿与反步设计算法相结合的非线性复合控制器,用于 Boost 变换器.如图 19 所示,该控制首先采用 NDO 估计负载功率,保证电压准确跟踪;然后通过递归设计程序,设计出保证大信号稳定性的控制器.因此,相比于传统 PI 控制器,在动态性能相似的情况下,所提出的控制器可以在负载、输出电

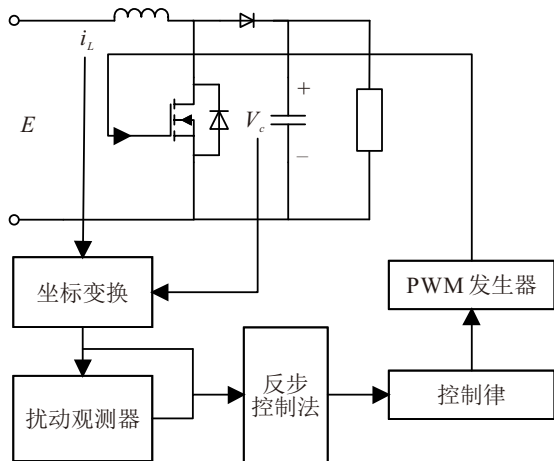


图19 反步控制算法结合非线性扰动观测器

压变化的情况下仍保证电压跟踪准确.

2.2.5 非线性复合控制策略

非线性复合控制策略将两种非线性控制策略结合起来应用,并重新推导设计.非线性复合控制策略通常能够结合两种控制策略的优点,进而表现出更好的控制性能.一种新型非线性复合控制策略 MPADRC 在文献 [23] 中被提出,用于 Boost 变换器,详细控制图如图 20 所示.该控制策略将模型预测控制器与自抗扰控制器相结合,控制包括两个回路:用于跟踪电流到参考电流的内部 ADRC 回路和用于产生参考电流的外部 MPC 回路.实验结果表明,在该控制器控制下,Boost 变换器的跟踪性能明显优于其他算法.

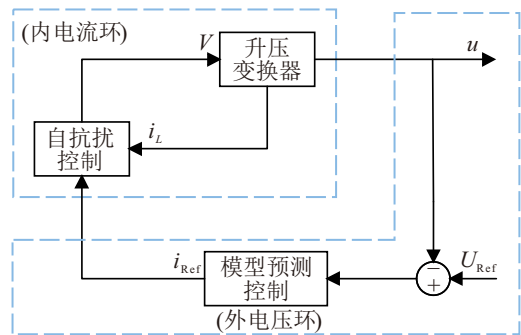


图20 MPADRC 控制策略

本文在表 3 中对比分析了上述提到的非线性控制策略的重要特性以及优缺点.由于变换器的工作频率较高,且车-车能量互济装置对于变换性能的要求也较高,高效快速的控制策略尤为关键.相较于表 3 所列的非线性控制策略, PID 等线性控制是最简单的控制技术,仅需简单调整参数即可获得预期效果,但是需要依赖精确的建模技术,否则在面对复杂情况 (满足动态响应、恒功率负载、参数变化及扰动等) 时转换性能会下降.因此滑模控制被提出,能够快速响应动态并对参数变化及扰动不灵敏.但其在高频条件下也会有较高的开关损耗,以及会出现抖动误差.滑模控制也常与其他控制策略结合设计使用,以减轻上述问题.模型预测控制则能够很好地避免这些问题,表现出非常好的效果,但是需要巨大的计算量计算出精确模型,才能达到上述要求.模糊逻辑控制则无需精确的数学模型,通过模拟人类决策过程,从而表现出良好的鲁棒性,适合复杂非线性系统.在实现变换器的输出准确跟踪方面,反步控制表现出优越的性能,且能够抗大信号扰动,实现过程也较为简单,但其最大的缺点是稳态误差较大.复合控制策略 MPADRC 同样能够实现优越的跟踪性能,其将模型预测控制器与自抗扰控制器进行结合.除了

表3 控制策略特点比较

控制策略	特征	优点	缺点
滑模控制	优异的鲁棒性, 向滑动面收敛	稳定性优异, 易于实现, 响应快	超调量高, 开关频率导致抖振问题
模型预测控制	预测未来状态实现最佳权衡	闭环稳定性好, 鲁棒性	巨大的计算量, 需要精确模型
模糊逻辑控制	鲁棒性, 模拟人类决策	无需精确模型, 适合复杂非线性系统	计算量大, 需要规则操作
反步控制	鲁棒性, 估算功率扰动	输出准确跟踪, 抗大信号扰动	稳态误差大, 不能直接调节输出电压
MPADRC	预测未来值优化当前值	优越跟踪性能, 波纹小	计算量大, 设计过程复杂

拥有优越的跟踪性能, 该控制策略还更加精确, 且稳态误差较小. 由于该策略将两种控制策略进行结合, 也存在设计过程中需要巨大的计算量这一缺点.

3 多类型车-车/家/网的协同控制

随着人们对环境问题和清洁能源的日益关注, 电动汽车越来越受到政府、行业和消费者的关注. 然而, 由于安装成本高^[72], 电动汽车的充电基础设施并没有得到充分发展. 此外, 充电站部署不统一导致高速公路和农村地区缺乏充电基础设施. 基于电动汽车的充放电能力和电网的节能要求, 近年来, 车对户 (V2H)、车对车 (V2V) 和车对网 (V2G) 的概念越来越有吸引力^[73], 逐渐得到研究发展^[74]. V2X(vehicle-everything) 是一个综合术语, 不仅涵盖 V2V、V2H、V2G, 还包括车对基础设施 (V2I)、车对行人 (V2P) 等, 旨在通过车辆与外部实体的互联提升能源效率与交通安全性. 多类型车-车/家/网的协同控制包括在非使用时间使用电动汽车电池以获得额外价值, 为电网提供便利, 减少建筑物和家庭的能源消耗, 或为负载提供备用电源^[31] 等功能. 本文对这 3 个方面的现有研究技术成果进行讨论分析.

3.1 车-车协同控制

车-车协同控制作为电动汽车能量共享的关键技术之一, 近年来受到越来越多学者的关注. 为了满足电动汽车用户的能源需求, 需要智能能源管理解决方案来有效地分配潜在的多余能源^[75], 以及优化充电价格和成本^[76-79]、提供社会福利以及用于公用事业^[80] 等, 这些因素均阻碍了 V2V 能源共享解决方案的推进.

近年来, 大量学者开始研究车-车协同控制. 为了获得鲁棒和准确的车间状态估计, 文献 [81] 提出了一种新的协同架构, 采用全球导航卫星系统 (GNSS)、惯性测量单元 (IMU) 和车对车 (V2V) 观测技术. 文献 [82] 提出一种多智能体强化学习 (MARL) 方法来协调电动汽车充电与车对车能量交换, 同时考虑电动汽车到达时间、能源价格和太阳能发电的不确定性. 利用 MARL 学习电动汽车充电环境的能力, 将电动汽车充电器建模为智能体, 在没有信息交

换的情况下进行独立决策. 结果表明, 这种方法能够在提高电动汽车用户充电满意度和公平性的同时, 最大限度地降低总能源成本.

由此可见, 研究 V2V 协同控制可以更好地分配和管理电动汽车之间的能源^[72, 74, 83-84]、优化充电价格和成本^[76-77]、减轻交通堵塞^[85-87] 以及提供公用事业和社会福利^[76, 78, 83]. 下面对以上方面进行详细的论述.

3.1.1 能源分配管理

为了实现高效、真实和有效的 V2V 匹配和能量共享, 一种智能、全面地利用 V2V 能量共享概念的框架在文献 [74] 中被提出, 用于管理和分配电动汽车之间的能量. 所提出的框架对 V2V 的能量共享问题进行了仿真建模, 并提出了一种双层匹配方法, 可以有效地匹配电动汽车. 该方法不仅优化了成本, 而且优化了时间、系统能效, 提升了用户满意度.

在提出能源管理框架后, 能量共享过程的协议也是重要的研究内容. 选择合适的协议也会为能量共享带来一系列优势. 文献 [83] 提出了一种基于车辆自组织网络 (VANETs) 的新型放电驱动能源共享协议, 在分组传输比、端到端延迟和整体 V2V 能量共享效率方面具有优越的性能. 首先提出了一种通过 vanet 传输放电信息的路由方法; 随后建立了充电请求者选择模型, 以确定最适合的能源共享请求者; 最后开发了一种确认消息传输方案, 以确保放电电动汽车与充电电动汽车之间完成选择确认. 如图 21 所示, 所提出的协议考虑了距离、充电状态、相邻车辆数量和车速等关键因素, 优化了个人效用, 同时考虑了请求者的充电状态.

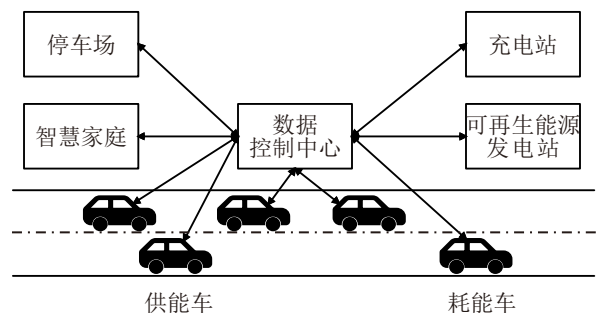


图21 V2V 合作充电系统

同样基于协同 V2V 充电理念,文献 [72] 提出了一种具有不同 V2V 匹配算法的灵活能量管理协议,帮助电动汽车实现更灵活、更智能的充放电行为.在提出的能源管理协议中,利用二部图来建模作为车与车之间的充放电合作,并提出了一种最大权值 V2V 匹配算法,以优化社会福利,并进一步引入稳定匹配的概念,用于产生最优的稳定 V2V 匹配.所提出的基于协作式 V2V 充电的能量管理协议在提高电动汽车效用和网络社会福利以及降低电动汽车能耗方面有着显著效果.

3.1.2 优化成本价格

为了降低成本和价格以优化 V2V 协同控制,文献 [76] 提出了一个成本最小化问题.其引入 3 种公平指标来证明公平的能量转移,基于此制定公平的 V2V 能源转移策略解决公平性问题,以避免个别电动汽车的过量排放.结果表明,在 V2V 协同控制中应用此策略可以显著降低电动汽车充电成本,并突出公平执行与充电成本最小化之间的权衡.此外,一种快速有效且可以节省一定能源费用的方法于文献 [78] 提出,其使用基于电动汽车灵活性的优先级来实时管理需求偏差.

3.1.3 缓解交通堵塞

近年来,交通拥堵现象日益突出,严重影响了交通安全,造成了许多经济损失.V2V 协同控制在缓解交通堵塞方面扮演着重要角色.一种基于车对车 (V2V) 的道路交通拥堵检测方法在文献 [85] 中被提出.该方法基于车速、交通密度和交通拥堵等级体系构建模糊控制器,然后查询邻近车辆的局部交通拥堵程度计算得到车辆节点的退避时隙和接收数据包.与传统方法相比,该方法在检测精度提高并缓解交通堵塞的同时,还可以使网络成本开销大幅降低.

文献 [79] 提出了电动汽车智能充放电的多目标优化框架以及一种混合整数线性规划.所提出的框架有助于在高峰时段管理电动汽车负荷,防止公用事业拥堵.同时结果表明,所提出的方法还可以减少电力成本和充电成本.由此可见,这些研究内容在被应用到实际中时,除了能够有效缓解交通堵塞,还会带有降低开销成本等附加效果.

3.2 车-家协同控制

当电动汽车需要充电或放电时,用户最方便的方式是开车回家,V2H 便这样形成了^[72].V2H 通过以下形式体现:V2H 能够通过有源电力交换平滑家庭日负荷剖面 (DLP),多数 V2H 系统的核心功能是有功率的充放电管理.部分 V2H 系统有着特定的

双向逆变器,可以为家庭电网甚至社区电网提供无功功率.V2H 具有非常简单的配置,易于安装,无需大量改变现有的家庭电网,可以通过使用电动汽车存储来提高家庭可再生能源的有效性,并且可以极大地促进智能电网的发展.因此,下面主要讨论 V2H 协同控制的能源管理.

为了给没有能源资源的家庭提供备用电源,文献 [88] 研究了在外部电网停电情况下提供备用电源的车对户 (V2H) 操作,提出了备份时间最大化的优化问题以及一种简化的 V2H 算法,并将该模型扩展到由多户家庭、电动汽车和光伏发电组成的 V2H 系统.它能够为系统中的家庭提供更平衡的备用持续时间,采用该算法的 V2H 系统能够在相对简单的情况下为家庭提供足够的备用电源.不过该方法没有考虑系统内的电网,也没有考虑应急发电机之间共享发电所需的详细实时控制.未来工作将集中在捕获网络中的真实和无功潮流,并研究频率和电压调节.

同样是为了满足家庭备用电源需求,文献 [89] 提出一种包括车辆到家庭 (V2H) 的组合家庭能源管理系统,见图 22,旨在通过调度最佳自动化设备来控制家庭能源需求.在没有额外电网供电的情况下,拟议的 HCPV(home centralized photovoltaic) 设计将满足晴天和阴天的家庭用电需求.此方法还将光伏与 V2H 传输的电力相结合,足以满足多云天气下的家庭负荷需求,可以有效降低太阳能负荷波动情况下的能源需求.未来的工作将集中于在嵌入式系统中实现所提出的方法,并重点考虑延迟问题.

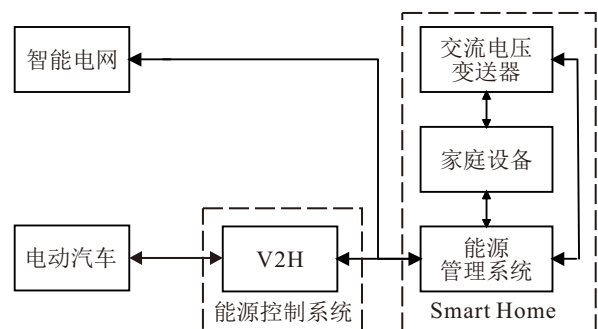


图22 V2H 家庭能源管理系统

对于上文所讨论的综合能源管理方法,针对 V2H 的充放电过程,为了实现优化管理,文献 [90] 提出了最优控制策略.其将家庭与来自电动汽车和固定电池组的额外能源相结合,可以在单个家庭实现微电网.当输入功率大于家庭所需功率时,先对电动汽车进行恒功率充电,超出部分都被转移到电池组.如果有多余的输入功率,但不足以为电动汽车充

电,则将电池组放电以增加所需的功率.当输入功率低于家庭所需功率时,首先由电池组供电.当电池的最大放电深度和最大供电功率其中任何一项被超过时,则执行以下操作:1)电动汽车的电池提供额外电力;2)电池组提供有限的放电功率.

此外,V2H也可以为电动汽车家庭带来额外的收入.文献[91]用线性规划对车辆到家庭(V2H)进行建模,通过管理充电,可以降低电费和成本.与非管理充电电动汽车相比,德国家庭双向充电的平均收入约为310欧元/年.文献[92]所提出的V2H聚合器能够成功地为电网提供可预测的功率,并使市场个体参与者的利润最大化.

3.3 车-网协同控制

电动汽车不仅能够通过充电站(charging station, CS)为电池充电,而且当智慧城市面临能源短缺时,它们也可以直接插入电网,作为负载吸收能量或作为资源输送能量,将多余的能源供应给电网以满足能源需求[73].电动汽车也可以用作电网成分布式储能系统,以更大的灵活性管理能源,或以高效和经济的方式提供电网服务[93].具体而言,V2G对电网有着稳定电压,满足高峰负荷需求,解决电能质量问题,降低线损和控制频率等作用.

特斯拉Roadster^[15]、三菱欧蓝德(Mitsubishi Outlander)和日产聆风(Nissan LEAF)已经宣布推出具有V2G功能的电动汽车.此外,美国、英国、日本和丹麦等国家已经启动了V2G的试点项目,以确定V2G概念在全球规模部署的可行性[94].在V2G的协同控制中,对电网进行调频、与微网结合逐渐成为研究的热点内容.下面将对这些方面的研究现状进行讨论.

一种基于改进MA-DDPG的V2G多微电网负载-频率协同控制策略在文献[95]中被提出.通过构建包括分布式发电、微型燃气轮机、电动汽车在内的多微网模型,改进算法,实现面对各种复杂操作场景时,能够通过协同控制保证多微网系统的整体稳定性的功能.该策略在保证控制效果的前提下,显著降低了传动造成的损失,还考虑了电动汽车的用户随机性.

电力系统的最优调度一直是电力系统研究人员关注的问题.文献[96]根据多源电动汽车经济环保调度的基本原则提出了考虑电动汽车接入的两阶段优化策略.第1阶段,基于电动汽车车主出行需求建立基于激励的电动汽车充放电模型,明确电动汽车整合对日用电负荷的影响.第2阶段,MG调度被视

为一个多目标问题.协同V2G模式充分发挥了可调度电动汽车的主动性,通过负荷转移缓解高峰时段电力需求,减弱对外部电网的依赖,明显缓解供电压力,减轻对电网的影响.不过,该策略的不足在于未考虑无功功率的影响及不同类型的发电机组.

由间歇性可再生能源在电网中的渗透率不断提高引起的电网频率偏差已成为电力系统安全运行的主要关注问题^[97-99],因此频率调节成为了研究热点.然而,V2G系统中电池容量的限制和电动汽车的实时动态驾驶需求对V2G系统的调频性能产生了影响,因此文献[100]提出了一种基于切换积分强化学习(swapped integral reinforcement learning, SIRL)的电网频率协同控制方案.提出的方案将V2G控制与电厂频率控制相结合,相互配合完成频率调节任务.结果表明,在不对称V2G容量约束下,与其他方案相比,所提出方案以更小的控制成本获得了更好的频率调节性能.

文献[101]评估了V2G和电源协调优化控制对电力系统碳减排能力的影响,提出了一种综合考虑电动汽车、电源和碳排放动态特性的技术,见图23.该方法将V2G技术、可再生能源发电和负荷需求整合到一个框架中,旨在优化电力系统运行并最大限度地减少碳排放.所提出策略可以为促进电动汽车的采用和V2G技术融入电网的战略提供信息,还可以作为电力系统运营商的宝贵工具,对政策制定和实际应用具有重要意义.

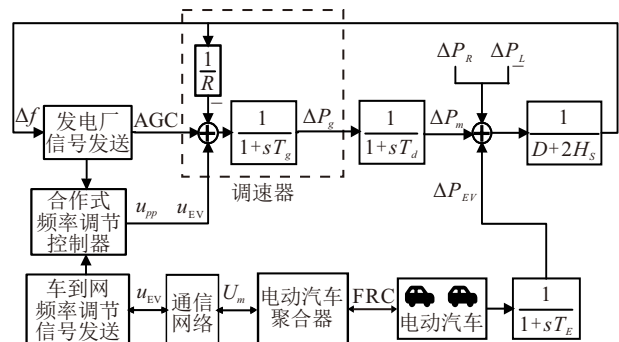


图23 V2G综合网络模型

4 待研究问题与未来展望

目前,随着智能电网与车联网技术的快速发展,将V2X技术融入到智能电网中,成为提升能源分配、储存效率及优化电力供应系统的重要方向,并已经取得了一定的进展,但是仍有一些关键问题亟待解决,主要分为以下4个方面:

1) V2X技术与智能电网的融合问题.在智能电网中存在着许多数据交换和控制机制的环节,如何将这与V2X系统的实时动态需求相兼容,确保系

统稳定高效运行还有待研究.在电动汽车充电过程中,通过V2X技术优化充电站与电网的互动,平衡电力供应和负载压力;高效地将V2X技术与智能电网基础设施结合,通过精确的预测算法和实时控制策略,实现电力需求响应和能量流的双向调节,这些问题仍有待突破.

2) 无线充电系统的传输效率问题.目前关于无线电能传输的研究已有许多,这项技术也正在逐渐融入人们的生活,但是其在传输过程中的传输效率仍是困扰这项技术得到更广泛应用的最大难题.提高能源传输效率,尤其在动态充电的场景中,如何确保无线充电高效率、高功率,这些问题仍亟待解决.未来研究需聚焦于新型磁性材料和耦合线圈拓扑优化,以提升动态充电场景下的传输效率至90%以上.通过高效的能量传输,特别是在V2V和V2G场景下,能够进一步降低能源浪费,提高充电速度.

3) V2V系统的可扩展性问题.提高V2V系统的可扩展性也是一个待研究的问题.可以通过提高V2V系统的规模化部署能力,设计一个高效的协议框架,确保信息传输实时准确,以支持大规模的充放电操作,从而支持更大范围的车间能量交换.

4) V2G和V2H系统兼容性问题.在部署V2G和V2H系统的过程中,技术层面的相互兼容仍面临挑战.解决车辆、电网以及家庭能源管理系统之间的兼容性和互操作性对于提升V2G和V2H系统的应用普及有着重大意义.

5 商业化路径与挑战

目前,V2V充电技术尚未广泛商业化,但已有部分企业和研究机构在该领域进行了探索研发.以美国交通部主导的V2X技术国家部署计划为例^[102],其通过近6000万美元的资金注入,在西部三州构建了覆盖450个智能路口的示范性充电网络,配套部署215辆装备车载单元的测试车辆.这种政府主导的基建模式为技术推广提供了重要参考.在商业领域,有线充电产品已率先实现突破.Andromeda Power公司推出的ORCA Inceptive便携式充电站,其50 kW直流快充能力极具实用价值,但该设备需要额外购置,增加了电动汽车用户的经济负担,同时由于其体积较大,占用车辆储物空间,影响了使用便利性.

在整车端应用方面,现代汽车在印度市场试行的预充电车辆救援方案^[103],以及日产Leaf、福特F-150 Lightning和大众ID.4等车型配备的双向充放电系统^[104],均显示出车企对V2V技术的战略布局.然而,现有实践多限于特定场景,尚未构建完整的商业

化生态体系.这种碎片化发展现状凸显出商业化进程中的关键瓶颈——缺乏统一的技术标准体系.

现有各厂商采用的多样化拓扑结构与控制策略,导致设备间兼容性不足,正如ISO 15118-20标准在V2G领域的成功经验所示,建立涵盖能量接口、通信协议(如5G-V2X)及安全认证的V2V专用标准,将成为打通产业协同的关键节点.技术标准的建立需要政策框架的同步支撑.欧盟“Fit for 55”计划将V2X纳入清洁能源转型体系的做法值得借鉴,其通过碳交易机制与财政补贴的双重激励,有效降低了技术推广的初期成本.我国“十四五”新型储能规划中提出的电动汽车参与电力市场交易机制,为V2V商业化提供了政策试验田.基础设施改造方面,双向充电桩的智能化升级需与城市智慧交通系统深度融合.特斯拉Cybertruck预留双向接口的设计启示车企需加快搭载V2V功能的车型研发,整车电气架构的前瞻性布局可大幅降低后期改造成本.在应用场景拓展上,高速公路服务区及停车场V2V应急节点的建设,既可以进行实践来验证技术可靠性,又能培育用户使用习惯,这种“动态充电网络”的构建策略具有显著的边际效益.

风险管理机制同样能够推动V2V商业化发展.针对用户普遍关注的电池损耗与隐私泄露问题,开发定制化保险产品可作为有效的风险缓释手段.通过保险机制分担V2V设备损坏或电池寿命损失的经济成本,减少用户的后顾之忧,降低用户使用门槛,吸引更多消费者参与V2V能量互济.这些推出V2V保险产品的公司可以与车企以及充电运营商进行合作.在销售电动汽车时,将V2V保险作为增值服务提供给用户;或者在V2V能量交易平台中嵌入保险服务,用户可在充电时选择按次投保.

上述商业化路径在实施过程中会面临许多挑战.传输效率瓶颈是其面临的最大挑战,尤其是无线V2V电能传输系统,在动态场景下效率不足80%,需要通过磁耦合优化(如多线圈阵列设计)和寻找新型半导体材料(如GaN)提升能效.调研显示,超过半数车主担忧V2V充电可能导致电池损耗或隐私泄露^[105].需通过透明化数据管理和用户协议明确权责.此外,利益分配也是阻碍其发展的重要因素.V2V涉及车主、充电运营商、电网企业等多方利益,需设计公平的利益分配机制.英国Octopus Energy公司采用“Octopus Tracker”电价模式^[106],该模式允许电价每天根据批发价格变化,并披露管理费用和公司的利润率.该模式类似于“车主导价”模式,车主可自主设定售电价格,平台仅收取少量服务费.

除上述几大挑战之外,在能量传输中故障责任方的明确、V2V平台用户位置与能耗数据的匿名化处理等,也对其商业化发展造成了阻碍。这些挑战的协同应对,将决定V2V技术从实验室创新向规模化商业应用的转化效率。

6 结语

本文综合分析了现有的车-车能量互济装置及其控制策略,总结了各种优化技术,并详细探讨了不同电路拓扑结构以及不同控制方法的优缺点。这些技术已成为电动汽车在紧急情况下的有效解决方案,但也面临着一些挑战。装置的安全性、可靠性、成本、尺寸、充电速度、充电过程的功率损耗、控制方法对于不同拓扑结构的适应程度以及商业化的可行性,都是目前研究的重点方向。学者们正在进行新的拓扑结构和控制方法的研究,以应对这些现存的挑战。同时讨论了多类型的车-车/家/网协同控制的具体内容,并分析了不同V2X技术的优缺点。V2X技术的协同控制进一步拓展了电动汽车的能源管理能力,为智能电网建设和清洁能源利用提供了新的解决方案。最后讨论了V2V充电技术的商业化发展现状、商业化解决方案和面临的挑战。未来的研究需要进一步优化装置设计,提高能量传输效率,加强与智能电网的深度融合并积极推进V2V商业化,以推动电动汽车产业的可持续发展。

参考文献 (References)

- [1] 周孝信,曾嵘,高峰,等. 能源互联网的发展现状与展望[J]. *中国科学: 信息科学*, 2017, 47(2): 149-170.
(Zhou X X, Zeng R, Gao F, et al. Development status and prospects of the energy internet[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2017, 47(2): 149-170.)
- [2] 孙秋野,杨凌霄,张化光. 智慧能源——人工智能技术在电力系统中的应用与展望[J]. *控制与决策*, 2018, 33(5): 938-949.
(Sun Q Y, Yang L X, Zhang H G. Smart energy — Applications and prospects of artificial intelligence technology in power system[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(5): 938-949.)
- [3] 孙秋野,刘广亮,王一帆. 能源互联网中能源终端的研究综述及展望[J]. *电网技术*, DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1586.
(Sun Q Y, Liu G L, Wang Y F. Review and prospect of energy terminal in energy Internet[J]. *Power System Technology*, DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1586.)
- [4] 马建,刘晓东,陈轶嵩,等. 中国新能源汽车产业与技术发展现状及对策[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(8): 1-19.
(Ma J, Liu X D, Chen Y S, et al. Current status and countermeasures for China's new energy automobile industry and technology development[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(8): 1-19.)
- [5] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(8): 2806-2819.
(Zhang Z G, Kang C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(8): 2806-2819.)
- [6] 孙秋野,任一平,刘子铭,等. 基于熵理论的综合能源系统不可能三角研究综述[J]. *控制与决策*, 2023, 38(8): 2106-2121.
(Sun Q Y, Ren Y P, Liu Z M, et al. Review of energy trilemma research of integrated energy system based on entropy theory[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(8): 2106-2121.)
- [7] 张沈习,王丹阳,程浩忠,等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(8): 189-207.
(Zhang S X, Wang D Y, Cheng H Z, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(8): 189-207.)
- [8] 张细政,卢张宇,谭崇苗,等. 基于指数趋近律的车载复合储能系统全局滑模控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(4): 885-892.
(Zhang X Z, Lu Z Y, Tan C Z, et al. Global sliding mode control of vehicle-mounted hybrid energy storage system based on exponential reaching law[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(4): 885-892.)
- [9] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术综述:2023[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(11): 1-192.
(Editorial Board of the Chinese Journal of Highways. Review on China's automotive engineering research progress: 2023[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(11): 1-192.)
- [10] 任峰,向月,雷小林,等. 基于GPS数据的电动出租车充电桩选址定容[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(10): 273-279.
(Ren F, Xiang Y, Lei X L, et al. Location and capacity determination of electric taxi charging pile based on GPS data[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(10): 273-279.)
- [11] Bulut E, Kisacikoglu M C, Akkaya K. Spatio-temporal non-intrusive direct V2V charge sharing coordination[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(10): 9385-9398.
- [12] Kang J W, Yu R, Huang X M, et al. Enabling localized peer-to-peer electricity trading among plug-in hybrid electric vehicles using consortium blockchains[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(6): 3154-3164.
- [13] 胡泽春,宋永华,徐智威,等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(4): 1-10.
(Hu Z C, Song Y H, Xu Z W, et al. Impacts and

- utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.)
- [14] Kumar G G, Sundaramoorthy K. Dual-input nonisolated DC-DC converter with vehicle-to-grid feature[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 10(3): 3324-3336.
- [15] Ligo A K, Peha J M. Cost-effectiveness of sharing roadside infrastructure for Internet of vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(7): 2362-2372.
- [16] Dutta S, Rathore A K, Khadkikar V. Single-phase bridgeless converter for on-board EV charger with flexible charging capabilities[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2023, 4(4): 1170-1180.
- [17] Yilmaz M, Krein P T. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-In electric and hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2151-2169.
- [18] Shahidinejad S, Filizadeh S, Bibeau E. Profile of charging load on the grid due to plug-in vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 3(1): 135-141.
- [19] Ucer E, Buckreus R, Haque M E, et al. Analysis, design, and comparison of V2V chargers for flexible grid integration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4): 4143-4154.
- [20] Zhao Q L, Liu W, Wang Y J, et al. A novel multiresonant DC-DC converter with wide output-voltage range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(6): 5625-5638.
- [21] Park Y, Chakraborty S, Khaligh A. DAB converter for EV onboard chargers using bare-die SiC MOSFETs and leakage-integrated planar transformer[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 8(1): 209-224.
- [22] Shafiqurrahman A, Umesh B S, Al Sayari N, et al. Electric vehicle-to-vehicle energy transfer using on-board converters[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 9(1): 1263-1272.
- [23] Rajesh R, Prabakaran N, Santhosh T K. Design and analysis of a non-isolated DC-DC converter with a high-voltage conversion ratio[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 70(6): 2036-2041.
- [24] Chen J F, Hou S Y, Deng F J, et al. An interleaved five-level boost converter with voltage-balance control[J]. Journal of Power Electronics, 2016, 16(5): 1735-1742.
- [25] 李相科,董朝宇,赵鑫,等.便携式车载高增益DC-DC变换器大信号稳定控制策略:基于扰动观测器的反步技术[J].中国电机工程学报,2023,43(7):2790-2801.
(Li X K, Dong C Y, Zhao X, et al. Large-signal stabilization control strategy of portable high-gain DC-DC converter for electric vehicles: An observer-based backstepping technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2790-2801.)
- [26] Chen J F, Hou S Y, Sun T, et al. A new interleaved double-input three-level boost converter[J]. Journal of Power Electronics, 2016, 16(3): 925-935.
- [27] 张辰,徐云雯,李德伟.车路协同环境下数据驱动的混合交通流速度调控方法[J].控制与决策,2024,39(9):2950-2958.
(Zhang C, Xu Y W, Li D W. Data-driven speed control method for mixed traffic flow in vehicle-road cooperative environment[J]. Control and Decision, 2024, 39(9): 2950-2958.)
- [28] 王立夫,刘一铄,孔芝,等.多车道交叉口交通信号与混合车辆轨迹协同优化框架[J].控制与决策,2024,39(11):3567-3576.
(Wang L F, Liu Y S, Kong Z, et al. Integrated optimization framework for traffic signal and mixed vehicle trajectory at multi-lane intersection[J]. Control and Decision, 2024, 39(11): 3567-3576.)
- [29] Nair A, Tanwar S. Resource allocation in V2X communication: State-of-the-art and research challenges[J]. Physical Communication, 2024, 64: 102351.
- [30] Raviglione F, Risma Carletti C M, Malinverno M, et al. Ms-van3t: An integrated multi-stack framework for virtual validation of V2X communication and services[J]. Computer Communications, 2024, 217: 70-86.
- [31] Rehman M A, Numan M, Tahir H, et al. A comprehensive overview of vehicle to everything (V2X) technology for sustainable EV adoption[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 74: 109304.
- [32] Mohamed A A S, Lashway C R, Mohammed O. Modeling and feasibility analysis of quasi-dynamic WPT system for EV applications[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(2): 343-353.
- [33] Li L T, Xu G, Sha D S, et al. Review of dual-active-bridge converters with topological modifications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(7): 9046-9076.
- [34] Gao T, Sun G, Wang H, et al. Research on current sharing control method based on duty cycle regulation for interleaved parallel LLC resonant converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(4): 3977-3985.
- [35] Wang S D, Li H R, Zhang Z L, et al. Multifunction capability of SiC bidirectional portable chargers for electric vehicles[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 6184-6195.
- [36] Lee H S, Yun J J. High-efficiency bidirectional buck-boost converter for photovoltaic and energy storage systems in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(5): 4316-4328.
- [37] Taghizadeh S, Hossain M J, Poursafar N, et al. A multifunctional single-phase EV on-board charger with

- a new V2V charging assistance capability[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 116812-116823.
- [38] Umesh B S, Khadkikar V, Zeineldin H H, et al. Direct electric vehicle to vehicle (V2V) power transfer using on-board drivetrain and motor windings[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 69(11): 10765-10775.
- [39] Chen S H, Huang T C, Ng S S, et al. A direct AC-DC and DC-DC cross-source energy harvesting circuit with analog iterating-based MPPT technique with 72.5% conversion efficiency and 94.6% tracking efficiency[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 31(8): 5885-5899.
- [40] Taghizadeh S, Jamborsalamati P, Hossain M J, et al. Design and implementation of an advanced vehicle-to-vehicle (V2V) power transfer operation using communications[C]. *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering*. Palermo, 2018: 1-6.
- [41] Li S Q, Mi C C. Wireless power transfer for electric vehicle applications[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2014, 3(1): 4-17.
- [42] Wu L H, Zhang B, Zhou J L. Efficiency improvement of the parity-time-symmetric wireless power transfer system for electric vehicle charging[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(11): 12497-12508.
- [43] Xie R H, Wu Y C, Tang H M, et al. A strongly coupled vehicle-to-vehicle wireless charging system for emergency charging purposes with constant-current and constant-voltage charging capabilities[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 39(4): 3985-3989.
- [44] Babaki A, Vaez-Zadeh S, Zakerian A, et al. Variable-frequency retuned WPT system for power transfer and efficiency improvement in dynamic EV charging with fixed voltage characteristic[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(3): 2141-2151.
- [45] Wu M, Yu X, Yang X, et al. An efficiency optimization method for the multiple coils WPT system against the pad misalignment[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024, 11(1): 1743-1753.
- [46] Chakibanda V, Komanapalli V L N. Optimization in magnetic coupler design for inductively coupled wireless charging of electric vehicle: A review[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, 48(11): 14257-14294.
- [47] Sakthi B B, Sundari P D. Design of coil parameters for inductive type wireless power transfer system in electric vehicles[J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(10): 13316-13335.
- [48] Wu F J, Wei Y C, Su J Y, et al. Dual-side closed-loop control, stability analysis, and parameter design of two-stage LCC-LCC WPT[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2023, 12(1): 305-315.
- [49] Tian Y H, Li Z J, Liu H, et al. High-performance wireless charging system using interleaved buck converter and integrated solenoid magnetic coupler[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 9(3): 3821-3835.
- [50] Baharom R, Hakim N D A, Rahman N A. Wireless vehicle to vehicle (V2V) power transmission using SPMC[C]. *2020 IEEE 10th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics*. Malaysia, 2020: 125-130.
- [51] Bulkunde U S, Keshri R K, Buja G, et al. Phase shift control for V2V contactless energy exchange[C]. *2021 IEEE Transportation Electrification Conference*. Piscataway: IEEE, 2021: 1-6.
- [52] Henry H, Vijayan A T. Wireless electric vehicle to vehicle power transfer in single phase induction motor drivetrain[C]. *2022 International Conference on Innovations in Science and Technology for Sustainable Development*. Kollam, 2022: 128-133.
- [53] Alvarez-Ramirez J, Cervantes I, Espinosa-Perez G, et al. A stable design of PI control for DC-DC converters with an RHS zero[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2001, 48(1): 103-106.
- [54] Adnan M F, Oninda M A M, Nishat M M, et al. Design and simulation of a DC-DC boost converter with PID controller for enhanced performance[J]. *International Journal of Engineering Research and*, 2017, 6(9): 27-32.
- [55] Bose S, Hote Y V, Siddhartha V. Analysis and application of linear ADRC for the control of DC-DC converters[C]. *2019 5th Indian Control Conference*. New Delhi, 2019: 436-441.
- [56] Xie Y, Ghaemi R, Sun J, et al. Model predictive control for a full bridge DC/DC converter[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 20(1): 164-172.
- [57] Leung F H F, Tam P K S, Li C K. An improved LQR-based controller for switching DC-DC converters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1993, 40(5): 521-528.
- [58] Hua H A, Fang Y C, Zhang X T, et al. A novel robust observer-based nonlinear trajectory tracking control strategy for quadrotors[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, 29(5): 1952-1963.
- [59] Zhang J, Wang J, Han H, et al. Coevolution-based robust optimal control for nonlinear system with time-delay optimal objectives[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2024, 55(2): 1126-1136.
- [60] Shang Z, Jiang Y, Niu B, et al. Adaptive finite-time consensus tracking control for nonlinear multi-agent systems: An improved tan-type nonlinear mapping function method[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2023, 21(4): 5434-5444.
- [61] Sun Y H, Wang Y X, Wei Z N, et al. Robust H_∞ load

- frequency control of multi-area power system with time delay: A sliding mode control approach[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2018, 5(2): 610-617.
- [62] Komurcugil H, Biricik S, Bayhan S, et al. Sliding mode control: Overview of its applications in power converters[J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2020, 15(1): 40-49.
- [63] Chincholkar S H, Jiang W T, Chan C Y. An improved PWM-based sliding-mode controller for a DC-DC cascade boost converter[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2017, 65(11): 1639-1643.
- [64] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(3): 407-418. (Liu J K, Sun F C. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 407-418.)
- [65] Jiang W, Zhang X, Guo F, et al. Large-signal stability of interleaved boost converter system with constant power load using sliding-mode control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(11): 9450-9459.
- [66] Liao-McPherson D, Nicotra M M, Kolmanovsky I. Time-distributed optimization for real-time model predictive control: Stability, robustness, and constraint satisfaction[J]. *Automatica*, 2020, 117: 108973.
- [67] Zhang Z, Wang Z C, Wei X L, et al. Space-vector-optimized predictive control for dual three-phase PMSM with quick current response[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 37(4): 4453-4462.
- [68] Zhang X N, Vilathgamuwa D M, Tseng K J, et al. Power buffer with model predictive control for stability of vehicular power systems with constant power loads[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 28(12): 5804-5812.
- [69] Zhang J B, Deng Z H, Choi K S, et al. Data-driven elastic fuzzy logic system modeling: Constructing a concise system with human-like inference mechanism[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2017, 26(4): 2160-2173.
- [70] Soliman M A, Hasanien H M, Azazi H Z, et al. An adaptive fuzzy logic control strategy for performance enhancement of a grid-connected PMSG-based wind turbine[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 15(6): 3163-3173.
- [71] Xu Q W, Zhang C L, Wen C Y, et al. A novel composite nonlinear controller for stabilization of constant power load in DC microgrid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 10(1): 752-761.
- [72] Cui Q S, Weng Y, Tan C W. Electric vehicle charging station placement method for urban areas[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(6): 6552-6565.
- [73] Liu C H, Chau K T, Wu D Y, et al. Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle, and vehicle-to-grid technologies[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(11): 2409-2427.
- [74] Shurrab M, Singh S, Otrok H, et al. A stable matching game for V2V energy sharing a user satisfaction framework[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 23(7): 7601-7613.
- [75] Shurrab M, Singh S, Otrok H, et al. An efficient vehicle-to-vehicle (V2V) energy sharing framework[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 9(7): 5315-5328.
- [76] Wang M, Ismail M, Zhang R, et al. Spatio-temporal coordinated V2V energy swapping strategy for mobile PEVs[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 9(3): 1566-1579.
- [77] Gusrialdi A, Qu Z H, Simaan M A. Distributed scheduling and cooperative control for charging of electric vehicles at highway service stations[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(10): 2713-2727.
- [78] Lokhande S, Bichpuriya Y, Sarangan V. Real-time management of deviations in the demand of electric vehicle charging stations by utilizing EV flexibility[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 97: 112719.
- [79] Melgar-Dominguez O D, Pourakbari-Kasmaei M, Mantovani J R S. Adaptive robust short-term planning of electrical distribution systems considering siting and sizing of renewable energy based DG units[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 10(1): 158-169.
- [80] Zhang R Q, Cheng X, Yang L Q. Flexible energy management protocol for cooperative EV-to-EV charging[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 20(1): 172-184.
- [81] Xiong J, Cheong J W, Xiong Z, et al. Carrier-phase-based multi-vehicle cooperative positioning using V2V sensors[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(9): 9528-9541.
- [82] Fan J R, Wang H, Liebman A. MARL for decentralized electric vehicle charging coordination with V2V energy exchange[C]. *IECON 2023-49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Singapore, 2023: 1-6.
- [83] Tang Q, Li D, Zhang Y, et al. Discharging driven energy sharing protocol for V2V communication in vehicular energy networks[J]. *Vehicular Communications*, 2024:100801.
- [84] Nguyen H T, Choi D H. Distributionally robust model predictive control for smart electric vehicle charging station with V2G/V2V capability[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(6): 4621-4633.
- [85] Wang R, Xu Z, Zhao X, et al. V2V - based method for the detection of road traffic congestion[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2019, 13(5): 880-885.
- [86] 于树友, 冯阳阳, 曲婷, 等. 车辆队列协同控制综述[J]. *控制与决策*, 2024, 39(12): 3889-3909. (Yu S Y, Feng Y Y, Qu T, et al. A survey of cooperative control of vehicle platoons[J]. *Control and*

- Decision, 2024, 39(12): 3889-3909.)
- [87] Zeng L, Li C, Li Z, et al. Hierarchical bipartite graph matching method for transactive V2V power exchange in distribution power system[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 12(1): 301-311.
- [88] Shin H, Baldick R. Plug-In electric vehicle to home (V2H) operation under a grid outage[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 8(4): 2032-2041.
- [89] Ben Slama S. Design and implementation of home energy management system using vehicle to home (H2V) approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 312: 127792.
- [90] Hinov N, Dimitrov V, Vacheva G. Model for vehicle to home system with additional energy storage for households[J]. *Electronics*, 2021, 10(9): 1085.
- [91] Kern T, Dossow P, Morlock E. Revenue opportunities by integrating combined vehicle-to-home and-to-grid applications in smart homes[J]. *Applied Energy*, 2022, 307: 118187.
- [92] Nakano H, Nawata I, Inagaki S, et al. Aggregation of V2H systems to participate in regulation market[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2020, 18(2): 668-680.
- [93] 刘长石, 李君宇, 易鲲鹏, 等. 分时电价背景下电动车配送-充电/放电路径规划[J]. *控制与决策*, 2025, 40(3): 794-802.
(Liu C S, Li J Y, Yi K X, et al. Electric vehicle outing with charging/discharging under time-of-use electricity prices[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(3): 794-802.)
- [94] Wang L, Madawala U K, Wong M C. A wireless vehicle-to-grid-to-home power interface with an adaptive DC link[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 9(2): 2373-2383.
- [95] Fan P, Ke S, Yang J, et al. A load frequency coordinated control strategy for multi microgrids with V2G based on improved MA-DDPG[J]. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 2023, 146: 108765.
- [96] Huang Z, Guo Z W, Ma P B, et al. Economic-environmental scheduling of microgrid considering V2G-enabled electric vehicles integration[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2022, 32: 100872.
- [97] Yu X, Xue Y. Smartgrids: A cyber-physical systems perspective[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2016, 104(5): 1058-1070.
- [98] Lin J, Sun Y Z, Sorensen P, et al. Method for assessing grid frequency deviation due to wind power fluctuation based on “time-frequency transformation” [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2011, 3(1): 65-73.
- [99] Ranjan M, Shankar R. A literature survey on load frequency control considering renewable energy integration in power system: Recent trends and future prospects[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 45: 103717.
- [100] Song X, Sun J, Tan S, et al. Cooperative grid frequency control under asymmetric V2G capacity via switched integral reinforcement learning[J]. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 2024, 155: 109679.
- [101] Tian X, Zha H, Tian Z, et al. Carbon emission reduction capability assessment based on synergistic optimization control of electric vehicle V2G and multiple types power supply[J]. *Energy Reports*, 2024, 11: 1191-1198.
- [102] 汪逸丰. 美国 V2X 计划及其进展概述 [EB/OL]. (2024-09-15)[2025-02-10]. <https://www.istis.sh.cn/cms/news/article/77/27006>.
- [103] Nishmanya Bahadur. Hyundai introduces Vehicle to Vehicle charging facility [EB/OL]. (2019-12-04)[2025-02-10]. <https://www.autocarindia.com/car-news/hyundai-introduces-vehicle-to-vehicle-charging-facility-415144>.
- [104] Cars.com Editors. What’s bidirectional charging and which EVs offer it? [EB/OL]. (2024-07-11)[2025-02-10]. <https://www.cars.com/articles/whats-bidirectional-charging-and-which-evs-offer-it-457608/>.
- [105] Saxena N, Grijalva S, Chukwuka V, et al. Network security and privacy challenges in smart vehicle-to-grid[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(4): 88-98.
- [106] 美股之家. 英国可再生能源集团公司: Octopus Energy Group Ltd. [EB/OL]. (2023-12-25) [2025-02-10]. <https://www.mg21.com/octopus.html>.

作者简介

王睿 (1993-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为信息能源系统建模、智能微电网的机理建模与分布式协同控制, E-mail: wangrui@ise.neu.edu.cn;

贾惟 (2003-), 男, 硕士生, 主要研究方向为电力电子变换器在电力系统中的应用, E-mail: 1628143736@qq.com;

孙秋野 (1977-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为能源互联网的建模与优化运行、新能源并网运行、电力电子化的电力系统, E-mail: sunqiuye@ise.neu.edu.cn;

王鹏 (1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能电网、微型电网, E-mail: epwang@ntu.edu.sg.