

电动汽车参与电网辅助服务的控制策略综述

裴振坤, 王学梅, 康龙云

(华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640)

摘要: 电动汽车(EV)利用其储能特性向电网提供辅助服务,既能缓解EV数量急剧增加带来的负荷压力,还可以参与维持电网的稳定运行。但由于EV参与辅助服务过程中存在时空分布随机、可用容量不固定、电池退化加速以及需兼顾用户需求等问题,其控制策略比传统储能更加复杂。基于以上问题,首先,从EV响应机制介绍EV响应电网调度的方式及对应的辅助服务种类。然后,从终端层控制策略和电网层控制策略两个方面对EV参与电网辅助服务的控制策略及其关键技术进行总结。最后,分析了现有研究面临的挑战,并展望了EV参与电网辅助服务控制策略的未来发展方向。

关键词: 电动汽车; 储能; 辅助服务; 响应机制; 控制策略

0 引言

近年来,中国电动汽车(electric vehicle, EV)的保有量迅速增加,至2021年已达到912.4万辆^[1],可储存约450 GW·h电能,巨大的储能容量使EV成为一种新的分布式储能资源。充分利用同时具备负荷和电源双重性质的EV,合理地调配EV进行充放电,不仅能减小EV入网带来的负荷压力,还可以使其参与电网辅助服务,有助于解决电网频率波动、电压跌落、负荷分布不平衡等问题^[2],相比于传统调节机组还具有选址灵活和环保的特点。此外,对于EV车主,参与电网辅助服务还能为其带来额外的收入,实现用户与电网的互利共赢。

EV参与电网辅助服务需要通过车网互动(vehicle-to-grid, V2G)技术来实现,V2G最早于1995年由Amory Lovins提出,随后美国特拉华大学William Kempton教授及其团队对其开展了进一步研究^[3]。V2G技术可以实现电能在EV与电网之间双向流动:在电池电量不足时,EV可以作为负载从电网获取电能;而在电池电量充足时,EV可以作为储能单元向用电设施或电网输送电能。

现有研究表明,EV可参与的电网辅助服务主要包括调频、无功补偿、调峰和备用4种服务。国内外已有相应的实际工程应用出现。2018年,日本中部电力公司与丰田株式会社合作开发了V2G系统,

验证了EV在电网频率调节、负荷转移方面的作用^[4];2020年4月,国家电网有限公司首次将V2G充电桩资源纳入华北电力调峰服务市场并正式结算^[5];同月,德国消纳风力发电的V2G试点项目正式完成^[6];同年6月,菲亚特克莱斯勒公司在意大利开展全球最大V2G试点项目,实现对电网的削峰填谷等^[7]。目前,有大量文献针对EV控制策略、优化方法和经济收益等方面进行了相关研究。文献[8]从电网侧和用户侧出发分析了EV参与辅助服务给电网和用户带来的影响。文献[9]总结了目前V2G研究所面临的挑战,但对EV参与电网辅助服务的控制策略讨论得不够全面。由于EV在参与辅助服务过程中具有时空分布随机、总体可用容量随时变化、电池寿命衰减加速等特点,并且需要兼顾电网、EV、用户三者的需求,EV控制策略比传统储能更加复杂。因此,有必要对EV参与辅助服务的控制策略进行全面的分析和总结。EV参与辅助服务的过程为:当调度中心确定了EV所需提供的辅助服务后,首先需要明确EV的响应机制与终端层控制策略,进而根据辅助服务类型选定电网层控制策略,生成相应的控制信号(如电价/激励价格、功率信号等),再交由终端层控制落实。基于此,本文将从EV响应机制、终端层控制策略及关键技术、电网层控制策略及关键技术3个方面对EV参与辅助服务的控制策略研究进行综述,并对现有技术面临的挑战以及未来的发展趋势和潜在的研究热点进行了探讨和预测。

收稿日期: 2022-07-28; 修回日期: 2022-09-28。

上网日期: 2023-08-15。

广东省重点领域研发计划资助项目(2019B090911001)。

1 EV 响应机制

EV 响应机制指 EV 根据调度中心发布的价格或者激励信号调整其用电行为,改变其电能需求。EV 响应机制是制定电网层控制策略的基础,本文从响应方式和响应时间尺度及对应的辅助服务两方面对其进行总结。

1.1 响应方式

EV 的时间和空间分布受用户行为影响很大,在调度其参与辅助服务时需要采取一定的响应方式促使用户响应电网需求,包括价格型响应方式和激励型响应方式。

1.1.1 价格型响应

价格型响应通过调整电价(分时电价、实时电价等)间接引导用户在电价高时减少 EV 充电负荷,在电价低时增加 EV 充电负荷。价格型响应难以保证响应速度和 EV 参与的数量,适用于调节时间尺度较长、大规模 EV 参与的服务,如调峰、无功调压等。文献[10]基于合作博弈思想,提出分时电价的动态优化模型,能有效提高聚合商和用户的联合收益,减小负荷峰谷差,但该文献未考虑用户响应电价的不确定性。考虑用户充电行为,文献[11]提出分时电价与积分制结合的响应方式,可以有效地引导用户参与改善总体负荷曲线。然而,分时电价容易造成负荷低谷涌入大量 EV 形成新的负荷高峰问题。基于此,文献[12]根据 EV 入网数量动态调整电价,可以有效避免负荷新高峰。文献[13]提出基于分时电价与实时电价双重电价机制的两阶段 EV 优化调度策略,可以充分利用不同停车时长 EV 的调度潜力。文献[14]根据系统无功负荷预测值制定动态分时电价,以减小 EV 接入电网节点的电压偏差。

1.1.2 激励型响应

激励型响应需要用户提前与调度中心签订协议,通过经济补偿方式来激励用户参与辅助服务,一般由调度中心决定是否实施。该响应方式下调度中心对 EV 的控制程度高,调节实时性好,可以适用于调频、无功调压、调峰、备用等几乎所有类型的辅助服务,并在光伏^[15]和区域电网^[16]中也得到应用。采用激励型响应存在以下问题:一是只有签订合同的 EV 参与辅助服务;二是这种响应方式仅考虑最小化调度中心的运营成本,较少考虑用户需求。文献[17]将激励合约分为充电优先和允许放电两种模式,在保证用户充电需求的前提下提供备用服务,以鼓励用户参与。文献[18]基于激励型响应机制,提出了空调负荷与 EV 的协同调频策略,并考虑消费

心理模型给出了激励合同的制定方法,可以有效提高用户参与度。

总的来说,价格型响应中用户对电价响应的不确定性较大,难以充分利用 EV 的潜力。相比之下,激励型响应与用户签订协议,不确定性较小,但难以覆盖所有 EV。基于此,文献[19]建立了基于分时电价的有序充电模型和基于激励的充放电调度模型,利用激励协议充分调用 EV 的响应潜力,不愿签订协议的用户可以通过分时电价的方式响应电网调度。

1.2 响应时间尺度及对应的辅助服务

不同类型的辅助服务需要控制 EV 响应不同时间尺度的功率控制信号,主要分为实时、分钟级、小时级响应,明确辅助服务及其所需的 EV 响应时间尺度才能有针对性地制定控制策略。

1.2.1 实时响应

实时响应的 EV 能够快速地为电网提供所需功率,但长时间响应功率控制会影响用户的出行需求,因此常用来参与电网调频服务^[20]。相对于调峰、备用等服务,调频服务需要 EV 有较高的充放电状态转换频率,但调频对能量的需求较小,充入或放出的能量很快能相互抵消,因而对 EV 电量的要求较低。文献[21]设计了 EV 与传统机组协调的调频策略,由 EV 承担调频信号的高频部分,可以提高电网整体调节速率和调节精度,但未考虑 EV 的充电需求。基于此,文献[22]根据频率偏差、EV 电池荷电状态(state of charge, SOC)和停留时间设计调频策略,可以兼顾调频和提升 EV 电量的需求。

1.2.2 分钟级响应

分钟级响应通常可以维持发电侧和负荷侧的功率供需平衡,从而提高系统的稳定性,常用于电压调整、消纳新能源出力等。文献[23]提出 EV 参与电网节点电压调整的控制策略,通过控制无功功率输出实现电压调节,对 EV 电池寿命和电量影响较小。文献[24]利用 EV 的可调度特性和储能特性,通过动态分时电价机制调用 EV 参与消纳风电出力,考虑了用户用电成本,但电价对用户参与度的影响未具体分析。

1.2.3 小时级响应

小时级响应对 EV 的响应速度要求较低,但需要 EV 在每次控制中能够长时间地维持功率输出或输入,常用于改变功率曲线分布的辅助服务,例如,调峰、备用等,对 EV 所提供的总体能量需求较高^[25]。文献[26]根据 EV 负荷运行特性将 EV 进行分类,以调峰成本最小和负荷峰谷差最小为目标对

调峰电价进行两阶段优化,该文献考虑了多种EV类型,且充分考虑了用户充电需求。文献[27]构建了EV提供备用的多市场协同调度策略,考虑了能量市场价格、光伏出力波动等因素对调度策略的影响,但并未对用户响应行为的影响进行讨论。

2 终端层控制策略及关键技术

终端层控制负责执行电网层提供的控制信号,控制对象为EV个体或集群,终端层控制策略是在EV侧落实电网层控制策略的手段。本章将从控制框架、控制模式和关键技术3个方面介绍EV终端层控制策略及关键技术,如图1所示。

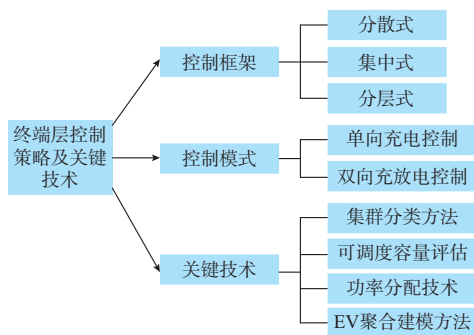


图1 终端层控制策略及关键技术
Fig.1 Control strategies and key technologies of terminal layer

2.1 控制框架

1)分散式控制框架

随着人们对EV的接受,随机、分散接入电网的小容量私家EV及商务用车越来越多,此类EV达到足够数量也可以参与辅助服务^[11]。分散式控制将此类EV通过智能充电设施与电网相连,如图2(a)所示,EV根据提前设定的控制策略直接、自治地参与辅助服务。分散式控制的一个特点是无须统一调度和预测EV可调度容量,建设成本低,多适用于无法集中管理、需要EV即插即用的应用场景,如社区配电网、微电网的调频、调压场景^[28]。分散式控制的另一个特点是决策过程在本地进行,因而可以根据车辆和用户的需求灵活调整控制策略,提高用户响应度,并且对通信和计算能力的要求较低,只需充电设施与电网检测设备通信获取电网信息,与EV通信获取其实时状态,便可决策EV所需的充放电功率。文献[29]设计了自适应下垂控制策略,结合EV电量调节一次调频功率。文献[30]设计虚拟同步机分散控制策略,结合EV电池SOC进行频率和电压调节。文献[31]设计分散模糊控制器,根据用户充电需求来提供一、二次调频,但分散式控制的效果受用户行为和检测设备的影响较大,控制可靠性、精度较低,且难以保证整体最优。

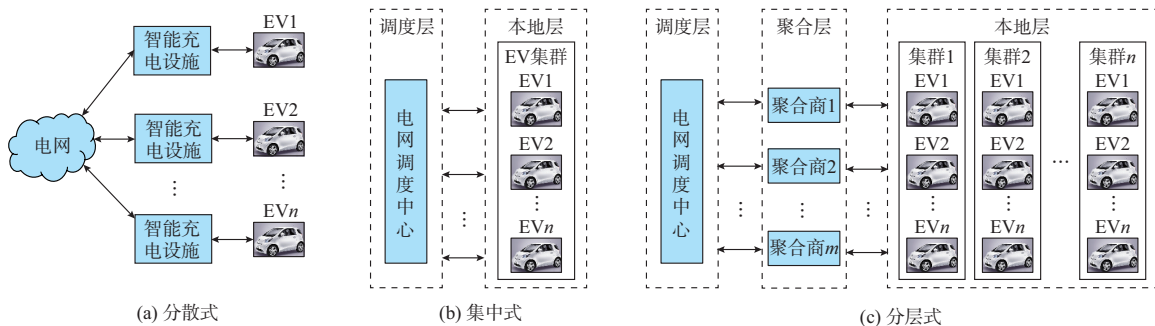


图2 终端层控制框架
Fig.2 Control framework of terminal layer

2)集中式控制框架

集中式控制将区域内的EV通过一定形式聚集,由调度中心统一管理,如图2(b)所示。电网调度中心与每辆EV通信,统计各EV的状态信息,根据EV可调度容量和电网负荷信息经过优化计算得到控制信号,并直接发送给EV集群。集中式控制的特点是控制精度很高,相对于分散式控制,可以实现全局最优。但集中式控制的难点是对系统的双向通信能力和信息存储能力要求较高,当应用于大规模EV区域时,需要建设大量的通信通道并且调度中心的计算压力较大。基于此,文献[32]提出一种

半托管式的用户响应方式,可以简化用户响应电网调度信号的过程。文献[33]基于集中式框架,提出两阶段有功无功混合控制方法,简化了充电能量优化调度和无功优化问题的复杂度,可以减小控制算法的计算难度。

3)分层式控制框架

分层式控制综合了集中式控制和分散式控制的特征,在调度层和本地层之间增加了聚合层^[34],如图2(c)所示。聚合层由聚合商组成,EV聚合商是电网和EV之间的接口,其从EV处获取所需信息,如充电需求、充电状态等,也将电价和充电站地址等

信息传送给EV。聚合层分担了电网的EV数据统计、可调度容量评估以及EV功率分配的任务,能够降低电网压力,并对分散的EV进行统一且灵活的管理调度。调度层只需与聚合层通信,接收其上报的EV可调度容量,并结合电网信息优化计算各集群的功率控制信号^[35],因而相对于集中式控制,分层式控制对通信能力和优化计算能力的要求较低,在目前EV参与辅助服务研究中应用最多。文献[36-38]基于分层式控制建立优化模型,使系统能够实现EV充/放电功率、充电费用、电网调节效果等整体最优。可以看出,分层式终端控制框架在一定地理范围内都具有自治性,有去中心化的作用。未来,可以通过与邻近聚合商通信,做到聚合商间的一致性协同控制。

综上,3种终端层控制框架的优缺点比较如表1所示。

表1 EV不同控制框架对比
Table 1 Comparison of different control frameworks for EVs

控制框架	优点	缺点
分散式控制	建设成本低,对通信要求低,响应速度很快,用户响应度较高	随机性大,可用容量少,控制精度差
集中式控制	控制精度高,服务容量较大	建设成本高,响应速度较慢,非常依赖双向通信
分层式控制	控制可靠性和精度均较高,适用场景多,响应速度较快,服务容量大	较为依赖双向通信,集群分类较为烦琐

2.2 控制模式

EV兼具负荷和储能特性,既能作为可调负荷通过改变充电功率来维持系统发/用电平衡或削峰填谷,也能作为电源增加系统的发电能力,主动参与各项辅助服务。因此,本节将EV控制模式分为单向充电控制和双向充放电控制。

2.2.1 单向充电控制

在双向充放电设施普及和V2G控制系统完善之前,EV在实际应用中主要通过单向充电控制参与辅助服务^[39]。文献[40]基于动态电价机制引导用户进行有序充电,并结合电网负荷、充电费用等调节充电功率,以提高EV的调峰或备用服务能力。但调峰、备用服务的时间尺度较大,所需电量较多,各用户的充电需求可能相互冲突,需从主从博弈或非合作博弈的角度解决^[41]。调频服务的时间尺度较短,各用户需求可以得到协调满足。为此,文献[42]在满足用户多样化充电需求的同时,提出了一种EV集群参与日前能量市场和调频辅助服务市场

的协同充电优化策略,能有效提升EV的调频效果和经济性。

单向充电控制不涉及EV放电,因而对系统的软、硬件设施的改进较小,便于实施,并且无须EV在充放电状态之间频繁切换,因此对电池寿命的影响较小。但EV仅通过增减充电功率,无法充分利用EV的储能能力。

2.2.2 双向充放电控制

双向充放电控制除了可以改变EV的充电功率,还能够控制EV向电网注入电能提供辅助服务,但同时也需要考虑放电带来的EV电量损失,影响用户出行的问题。文献[31]设计了基于模糊控制的EV充放电调频控制策略,能够满足用户的充电计划,但对SOC处于较大/较小值的情况考虑不足,有过充、过放风险。文献[23]基于双向充放电控制设计EV的无功调压策略,考虑了充电桩容量对有功、无功功率的限制,以保证EV对充电功率的需求。文献[43]利用双向充放电控制设计EV调峰策略,验证了该控制相对于有序充电控制策略有更好的调峰效果。

两种EV控制模式的优缺点对比如表2所示。

表2 EV不同控制模式对比
Table 2 Comparison of different control modes for EVs

控制模式	优点	缺点
单向充电控制	便于实施,对EV电量影响小	控制效果差,可用容量小
双向充放电控制	控制效果好,可调容量大	控制复杂,减少电池寿命

2.3 终端层控制关键技术

终端层控制直接面对各种不同位置、不同型号、不同容量、不同SOC和不同充电需求的EV。因此,如何将这些EV进行分类和聚合建模,是首先要解决的关键问题。同时,结合EV可调度容量对所需总体功率进行合理分配是终端层对EV进行调度的重要环节。因此,可调度容量评估方法和功率分配技术也是需要关注的关键技术。本节从以下4个方面对终端层控制关键技术展开讨论。

2.3.1 EV集群分类方法

分层式控制框架中需要对EV进行分群以降低控制难度,由于EV具有时空分布随机的特点,合理的集群分类方法是控制的前提和关键。

现有研究常按照EV的时空分布和车辆特性进行分类,如EV与充电桩的距离^[24]、EV的负荷特性^[26]、车辆类型^[44]和离网时间^[45]等。文献[24]将充

电桩之间距离作为分类的评判标准,利用K-means聚类算法,根据充电桩的位置对EV进行空间分类。该分类方法可以适应不同的配电网拓扑,方便多区域EV的统一控制,但忽略了EV的自身特性。文献[26]将EV的负荷特性作为分类依据,根据EV的可调用程度将其分为刚性负荷、可调度负荷、灵活性负荷和智能换电负荷,该分类方法对EV可用容量的建模更加简单,但未考虑EV的时间分布,依赖实时计算能力。文献[44]根据EV车辆类型将其分为私家EV、公交EV以及梯次利用EV,关注了不同类型EV的行为特性、管理模式等差异对建模的影响,方便进行分时调度,但难以覆盖所有车辆类型,如共享EV、网约EV等。文献[45]根据EV的行驶特性,将离网时间相近的EV编入同一集群,方便根据EV的可调度时间调整充放电功率,可以适应用户的不同充电需求。但该分类方式的聚合商数量不固定,需要采集用户需求信息后进行再分配。

各种集群分类方法的优缺点对比如表3所示。总的来说,EV的时空分布以及负荷类型等都可以作为分类依据,关键在于满足哪种控制需求(对配电网拓扑的兼容性强、建模简单、适应用户需求等),需要根据需求来选择合适的分类方法。

表3 不同集群分类方法对比
Table 3 Comparison of different cluster classification methods

分类依据	优点	缺点	文献
充电桩距离	可适应不同配电网拓扑	忽略了EV自身特性	[24]
EV负荷特性	建模简单	实时计算量较大	[26]
EV车辆类型	可用容量容易预测,方便设置聚合商位置	难以覆盖所有车辆类型	[44]
EV行驶特性	适应用户充电需求	聚合商数量不固定	[45]

2.3.2 EV聚合建模方法

EV以集群方式参与电网辅助服务时,精确可靠的聚合模型是执行控制策略的基础。此外,合理的聚合模型能够直接嵌入电网调度模型中参与系统优化和控制,意义重大。

传统的EV聚合建模方法为:先针对单辆EV的充放电过程建模,然后进行整体聚合,并将聚合建模问题转化为规划问题,采用随机优化^[46]、遗传算法^[47]等智能优化算法进行求解。但对于大规模EV集群,此类建模方法的计算难度较大,精度和实时性都较差,而基于随机过程^[48]和数据驱动^[49-50]的建模方法可以有效解决以上问题。文献[48]考虑了EV的充电、放电和闲置3种状态,提出一种基于马尔可夫链的EV聚合建模方法,描述了充放电过程的动

态变化。该方法能够提高建模的精确度,但过多的离散状态区间仍会增加模型的计算难度。文献[49-50]采用数据驱动的方法建立EV聚合模型,结合大量的EV充电行为数据挖掘其充电规律,并采用扩散核密度估计法进行概率建模,能够提升模型的计算速度。

2.3.3 可调度容量评估方法

可调度容量指EV集群在某一时段内可用于参与辅助服务的功率,分为可上调容量和可下调容量,分别表示充电功率可减少量和增加量或者放电功率的可增加量和减少量^[51]。

容量评估的重点在于准确地判断各用户是否响应电网调度和计算各种需求限制下各EV可提供的功率值。通过采用蒙特卡洛^[51-53]和排队论^[54-56]等随机统计方法模拟EV的充电时间、出行行为等来建立概率模型,可以估计各时段EV的SOC,用以判断车辆是否能参与辅助服务,然后根据充放电功率、SOC等约束估计总体可用容量。但概率模型中采用了大量的参数假设,实际评估精度不高。基于此,通过采用随机森林^[57]和决策树^[58]等机器学习算法,对车辆的行驶状态、能耗状况、驾驶行为以及补偿价格等信息进行分析,判断用户是否参与辅助服务,结合EV充放电功率、充电时间、SOC等估计出不同时段EV集群的充放电容量,评估精度较高。

2.3.4 功率分配技术

功率分配是指在调度中心确定EV集群所需提供的总功率后,对集群内EV个体进行功率再分配的技术。功率分配不能简单地平均计算,关键是在能满足总体所需功率的基础上,使每辆EV提供的功率更加合理,因此,必须结合EV的电池状态进行计算,其中,文献[59]针对调频场景,根据各EV的SOC对调频功率进行加权分配。由于EV型号不同,相同SOC代表的电量不一定相同,文献[60]还考虑了EV电池容量。以上方法计算简单,应用广泛,但考虑因素较少,难以保证系统整体控制效果,因而目前也有许多优化分配方法。文献[61]采用最优价值网络方法,根据不同EV的充电时长、充电电量,对EV的充放电功率进行优化,可以在容量受限条件下提高EV的充电效率和应急备用能力。文献[43]根据调度中心的计划充放电功率信号,结合EV的状态信息,以调度中心给出的功率信号与EV实际充放电功率的方差最小为目标函数,采用粒子群优化算法求解,从而得到满足电网调峰需求的EV最优充放电功率。

3 电网层控制策略及关键技术

电网层控制策略由调度中心或聚合商执行。目

前,不同的辅助服务类型和多样的控制目标衍生出了大量电网层控制策略,本章从EV参与的4种辅助服务类型,即调频、无功调压、调峰、备用对其进行总结和分析。

3.1 调频策略

3.1.1 一次调频策略

一次调频策略为应对周期短、幅度小的负荷波动,要求EV能够快速响应频率变化^[62]。因此,终端层多选择分散式的控制架构。控制策略可归类为下垂控制与虚拟同步机控制。

1)下垂控制

传统储能系统参与一次调频的下垂控制特性如图3所示。图中: P_c 为充电功率; f_n 为额定频率; $P_{c,max}$ 和 $P_{d,max}$ 分别为最大充、放电功率,由储能电池自身参数决定,死区用于防止储能单元频繁地充放电。与传统储能一次调频策略相似的是:EV的功率由电池提供,因此,在调频过程中要考虑对电池寿命的影响。文献[22,63]考虑车辆充电需求与过充、过放问题,设置了电池SOC的上下限 $S_{SOC,max}$ 和 $S_{SOC,min}$,并结合充电机自身的最大充放电功率给出了 $P_{c,max}$ 和 $P_{d,max}$ 的计算公式。为避免电池老化带来的SOC计算误差影响充放电功率,文献[64]借助锂电池的老化衰减模型及时地更新电池容量,进而精确估计SOC。

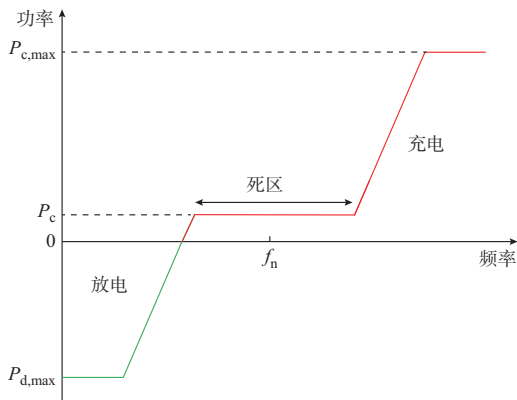


图3 传统储能参与系统与一次调频的下垂特性
Fig.3 Droop characteristic of traditional energy storage systems participating in primary frequency regulation

与传统储能一次调频策略不同,EV作为交通工具参与一次调频需解决的问题是如何协调EV的调频能力与充电需求。文献[65]采用自适应下垂系数控制,根据EV电池SOC改变下垂系数,如图4(a)所示,便可通过自适应改变调频功率来协调电网与用户的需求,但SOC期望值 $S_{SOC,e}$ 无法直接调整。文献[64]采用图4(b)所示椭圆函数来构建SOC与下垂系数 K 的函数关系,可迅速稳定SOC,并且

$S_{SOC,e}$ 在函数中作为参数可直接调整,能够灵活适应不同用户的充电需求。图4中:下标1、2表示不同用户; K_{max} 为下垂系数最大值。

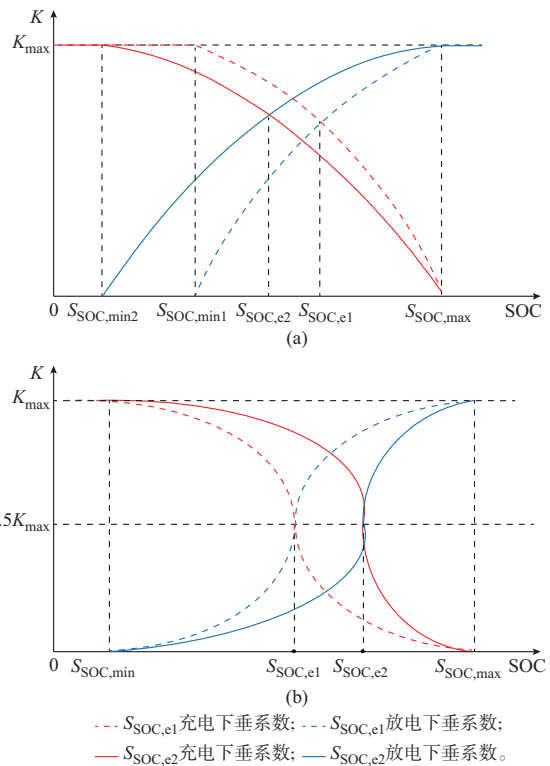


图4 自适应下垂系数
Fig.4 Adaptive droop coefficients

2)虚拟同步机控制

下垂控制缺乏惯性,无法快速抑制频率的突然变化,虚拟同步机通过模拟传统电机的惯性过程,引入虚拟惯量 J 以增加系统稳定性^[66]。该控制策略用于V2G同样面临协调用户与电网两方需求的问题^[67-68]。为此,文献[62]提出自适应虚拟惯量算法,可根据SOC自适应地改变 J ,同时调频功率依然由电网频率与阻尼系数决定,对EV的调频出力影响不大。文献[30]在虚拟同步机模型中加入模糊控制器,使充放电功率能够根据电网频率和EV电池SOC以及用户设定的电量限值进行调节。文献[31]根据EV剩余可参与V2G的时间与电网频率偏差,自适应改变一次调频功率,可以保证按时完成充电计划,当EV数量较多时有良好的调频性能。

3.1.2 二次调频策略

对于幅度变化较大、波动时间长的负荷,一次调频无法保证频率调节的准确性,需要二次调频参与使系统频率恢复到额定值^[69]。传统的二次调频通过改变发电机组调速系统的运行点,增加或减少机组有功功率来适应负荷变化^[70]。EV参与二次调频

时,可将EV集群等同于一个主调频机组,通过控制区域控制偏差(area control error, ACE)来维持系统频率稳定以及各区域交换功率的平衡,其中,ACE为系统频率偏差与区域交换功率偏差之和^[20]。

二次调频所需EV数量多,调节时间长,因此,可采用集中式或分层式的终端层控制框架,目前研究多数围绕分层式框架的优点进行讨论。以分层式控制框架为例,EV参与二次调频的控制框架如图5所示。ACE控制信号经比例-积分(PI)环节^[20]或根据历史数据预测^[70]得到功率调节信号 A_1 ,与EV总体可调度容量 A_2 在电网调度中心进行决策得到调频信号 A_3 ,根据各集群可调度容量大小加权分配给各EV聚合商,各聚合商再根据各EV电池SOC、容量大小对调频功率进行再分配。

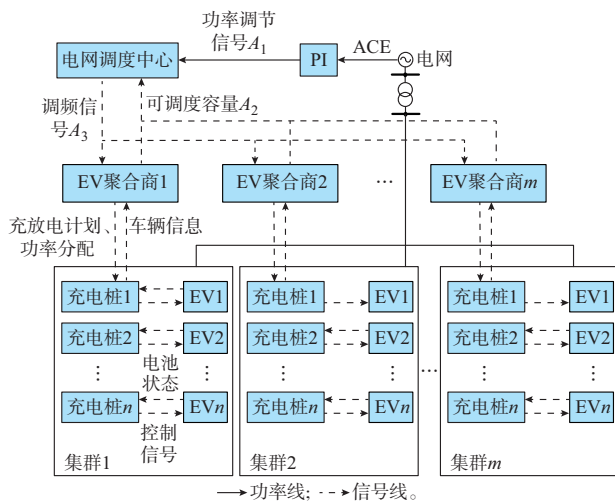


图5 EV参与二次调频的控制框架
Fig. 5 Control framework of EV participating in secondary frequency regulation

为协调电网调频需求与用户充电需求,文献[71]采用模糊控制器代替PI环节与功率加权分配环节,直接根据ACE信号与电池SOC来计算EV群体所需的输出功率,满足用户对电量需求的同时可增加频率控制的稳定性。为充分利用EV调频的快速性,文献[20]提出让EV承担ACE信号的高频部分,常规机组承担低频部分,可以提高调频效率。但高频的调频信号带来的充放电切换次数增加会对电池寿命造成损害。以上策略均针对已接入电网的EV进行控制,而未考虑EV的参与度和时空分布随机性。

3.2 无功调压策略

EV参与电网无功调压服务能够充分体现EV时空分布随机带来的灵活调度特性,但同时也面临充电设施容量限制带来的有功、无功功率相互制约

问题,以下为两种特性所对应的控制策略。由于需要统一调度多个电网节点下的EV充放电,以下控制策略均以分层式控制框架进行讨论。

3.2.1 灵活调度策略

EV车主的充电行为在时间和空间上具有强随机性,当EV仅作为负荷大规模接入电网进行无序充电时,难以确定配电网何时何处的电压将会跌落,从而给传统无功补偿设备的设计带来困难。将EV作为补偿源参与无功补偿服务中进行有序充放电,不仅能大大缓解其无序充电带来的电压问题,EV的分散性、随机性的特点也使其比传统无功补偿设备更加灵活、及时。

利用EV随机、分散接入电网的特点,协调各个节点上EV的无功输出,可使每个节点电压都在稳定范围内。文献[72]使用沟通调节算法协调各节点电压,如图6所示。当EV1在PQ控制下容量不足时,配电所调取相同次级馈线下的EV2参与无功补偿;当该馈线的容量也不足时,则调取相同初级馈线下其他次级馈线的EV3、EV4参与调节。该控制方法对节点间的通信条件要求较高,并且逐级调用不同馈线容量的方式计算量大,全局可靠性较低。文献[38]提出一种适用于平衡/非平衡微电网的分布式模型预测控制策略,建立了考虑EV无功补偿的电压调节模型,可以实现通信条件较差情况下的多EV协同控制。

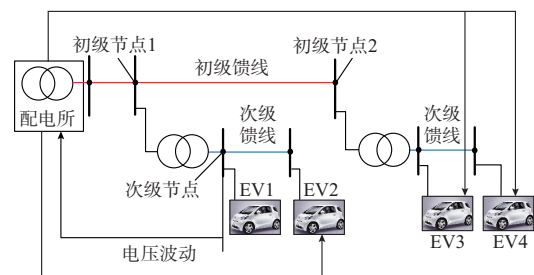


图6 沟通调节算法控制图
Fig. 6 Control diagram of communication regulation algorithm

3.2.2 有功、无功功率协调策略

由于充电桩容量的限制,EV在进行充放电时,无功功率 Q 的增加将导致有功功率 P 的减少,如图7所示,这个联动的运行过程可用第四象限运行特性表示^[73]。因此,在进行V2G无功补偿的同时必须考虑EV的有功需求。

文献[23]根据用户目标电量、电池容量计算出充电桩功率因数角的可调控范围,以功率因数角 φ 为优化变量,建立以减小电压波动最小、网损最小、用户花费费用最少、充电结束后SOC达到出行需求

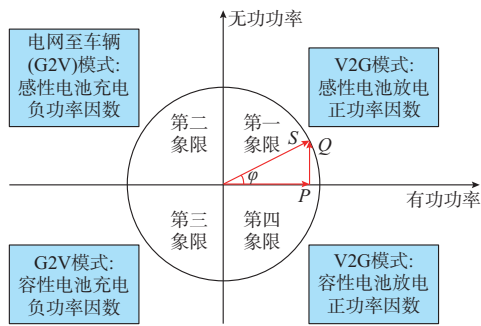


图7 EV四象限运行特性示意图
Fig. 7 Schematic diagram of four-quadrant operation characteristic of EV

为优化目标的节点电压调控模型,并采用粒子群优化算法对该模型进行求解。文献[74]通过EV的时空分布与SOC的概率模型建立了以配电网运营成本最小为优化目标的日前优化模型,确定充电站日前计划有功功率;然后,根据日前优化结果和EV实时数据,以有功功率满足日前计划、网损最小、总视在功率 S 最小为优化目标,建立了配电网与充电站分层协调的EV有功和无功功率实时优化模型。文献[75]考虑EV的行为特性,利用二次规划方法求取不同时段EV的最优充放电功率,然后以系统网损最低为目标,利用二阶锥规划对各时段充电站的有功及无功功率进行优化。

3.3 调峰策略

调峰服务用于解决电力系统负荷日分布不均导致的负荷峰谷差较大的问题。由于电力市场发展阶段不同,国内外关于负荷调峰问题的解决方式不同^[69],国外成熟的电力市场主要通过现货市场制定实时电价的方式来解决负荷日分布不均的问题,不存在单独的调峰市场^[76-77],而中国电力市场尚未成熟,需通过短时电力调节使发电出力匹配负荷的变化^[19]。

调峰服务的调度工作主要包括:日前优化调度、定价和日内实时功率调度^[78]。以分层式控制框架的调峰策略为例,EV参与调峰的基本流程如图8所示。首先,调度中心根据历史负荷和EV行为数据对负荷曲线进行预测,用于日前优化调度和电价制定;EV聚合商实时统计EV的状态信息并计算出总体可用容量,结合历史容量数据预测各时段用于调峰的可用容量,并上传给电网调度中心;然后,电网调度中心以负荷曲线波动最小、电力传输损耗最小等为目标对日前调度计划进行优化矫正,制定出EV集群的计划充放电功率发送给各聚合商;最后,聚合商结合EV的状态信息,以聚合商或用户成本最低为目标,经粒子群优化等算法优化后将所需充

放电功率实时分配给各EV^[43,79]。

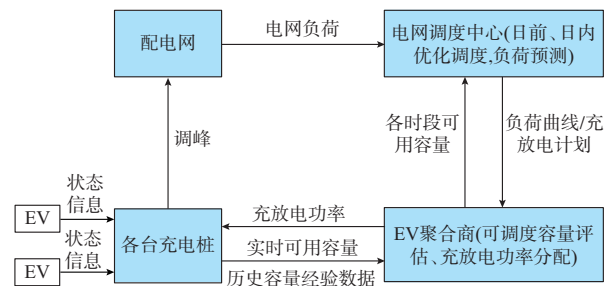


图8 EV参与调峰控制策略
Fig. 8 Control strategy of EV participating in peak shaving

根据EV的负荷特性,在调峰时既能将EV充电负荷转移到负荷低谷时期,又能通过控制EV馈电增强系统调峰能力,实现灵活调度。文献[26]根据EV负荷特性,建立了刚性负荷、可调度负荷、灵活性负荷以及智能换电负荷4种EV负荷模型,基于该模型设计EV参与调峰的日前定价策略与日内优化调度策略。该策略根据EV的充放电特性评估其可调用程度,能够充分利用EV的调峰潜力。

3.4 备用策略

备用服务用于储备足够的容量以应对电网需要,保证系统稳定运行,对控制的可靠性要求高,需要EV的服务容量较大^[80]。因此,同样以分层式的控制框架为主。利用EV在时间和空间上灵活调度的优点,可快速调取故障地区的EV群体提供备用服务,增强电网运行的可靠性。EV的备用能力按调节方向可分为上备用(向电网反向放电或降低充电功率)能力和下备用(降低放电功率或增加充电功率)能力2类。按可稳定提供一定容量的备用服务时间还可进一步细分为短时(1h到数小时)和长期(1日到数日)^[61]。针对EV备用能力的评估方法,文献[81]考虑EV的出行特性和充电计划,提出了决定EV备用能力的2个关键边界约束(功率边界和电量边界),结合EV当前的运行功率便可对上、下备用能力进行定量评估。文献[82]考虑了EV提供备用时出现的风险对备用能力的影响,并建立风险模型用于修正计算的备用容量。

文献[61]根据EV充电计划对EV进行有序充放电调度。首先,根据充电计划将EV按充电时长进行分组,无法按时完成充电合约的汽车则在分组中剩余并优先参与调度;然后,结合电网负荷信息,利用最优价值网络算法对功率进行组间分配。但该策略有个前提,即用户愿意响应有序充放电调度且EV接入电网时间较长,才能有效提高系统备用能力。文献[83]考虑单台EV充、放电与配电变压器

容量的双重约束,以调度中心收益最大化为优化目标对EV的充放电功率进行优化,可以在市场备用价格变化时提供较大的备用容量。

3.5 电网层控制关键技术

电网层控制是EV参与电网辅助服务的顶层控制,需要结合可参与服务的EV容量来制定控制策略。EV与传统储能不同,其在辅助服务中的参与度较低,并且在响应过程中具有较大的不确定性,这都会对电网层控制策略的制定产生影响。因此,提升用户参与度和应对存在的不确定性是电网层控制需要重点解决的关键技术。

3.5.1 用户参与度提升方法

EV参与辅助服务的实际可用容量受用户参与度的影响很大,需要提高用户参与服务的主动性,才能灵活调用EV。目前,控制策略一般通过经济补偿(电价补偿^[84]、激励补偿^[32]、电池退化补偿^[85])或满足用户需求^[31]的方式来提高其参与度。

EV参与辅助服务涉及电池向电网的放电过程,会造成电量损耗,对车主进行经济补偿是提高参与度的直接、有效的方式。根据EV的响应机制,文献[84]针对EV参与调峰服务,提出基于电价引导的EV控制策略,可以有效减少用户充电费用,同时提升调峰效果。文献[32]提出基于充、放电双重激励机制的备用服务策略,建立了充、放电激励价格与用户响应度的映射模型,可以看出用户响应度随激励价格增加而增加。聚合商合理地把控激励价格在响应阈值附近,便可以得到最优的充放电激励计划,但该策略需要统计大量用户参与数据来提高模型的精度。除了电量损耗,车主往往关心EV参与辅助服务带来的电池退化风险。为此,文献[8]提出一种随机混合整数线性规划模型,在模型中加入EV电池退化成本模型,并设置电池退化补偿,可以降低用户充电成本,提高用户参与度。经济补偿的关键在于确定合理的补偿价格,平衡用户和聚合商的利益,这需要在价格确定之前根据采集到的足够的用户数据来提高补偿模型的准确性。

若希望用户长时间持续为电网提供辅助服务,仅通过经济补偿的方式是不够的,必须设计控制策略使EV在提供服务的同时不影响用户的充电、出行需求。文献[31]充分考虑用户的充电需求,根据用户期望充电时间和期望SOC设计调频参与度因子,通过模糊控制算法决定EV的具体调频功率,便能在满足用户需求的前提下参与调频服务,有利于增强用户的积极性。但考虑用户需求的同时也增加了控制规则的复杂程度,如何设计规则以保证各种EV充电工况下的合理性是该类方法的重点。

3.5.2 不确定性及应对方法

EV作为交通工具,受用户出行规律、充电习惯的影响,其时空分布和用户的响应意愿都具有较大的不确定性,从而给EV调度和可用容量评估带来困难。

1)EV时空分布的不确定性

EV时空分布的不确定性带来的是EV实时容量计算难度大、无法及时准确调度等难题。因此,需要对不确定的时空分布问题进行数学建模,从而进一步计算各时段SOC、可用容量等数据。目前,主要采用的方法为:一是建立概率模型,如文献[86]结合EV的出行规律,采用蒙特卡洛随机模拟方法估计出EV各时刻的SOC情况,进而计算出EV可用于参与调频的功率;二是建立数据驱动模型,如文献[80]采用数据驱动的分布式鲁棒机会约束来描述EV参与调峰时空间分布的不确定性,用于充电运营商参与调峰市场的日前投标决策过程,能够适应EV出行规律的随机性。这两种方法的准确性都需要大量的历史数据作基础,当EV历史数据较多时,模型的精度令人满意;反之,当EV历史数据较少时,模型精度较低。

2)用户响应的不确定性及应对方法

对EV的任何调度都应在用户愿意响应的基础上进行,然而用户的响应行为也具有较大的不确定性,往往难以预测。因此,与EV时空分布的不确定性类似,对该不确定性采用概率和机器学习的方法进行建模。此外,也有学者将心理学方法用在不确定性建模,如文献[87]考虑用户违约的不确定性,提出了预约-违约放电机制下的调度机制,能够降低用户行为随机性对调度的不利影响。文献[88]针对EV用户响应电价时存在的不确定行为,提出了一种计及用户响应电价关联的EV调峰策略,通过调整电价来增强对EV的调控能力,也可以降低这种不确定性。

4 展望

V2G技术的应用使EV发挥移动储能的作用,相比传统机组参与电网调节更加灵活、环保。因此,应用V2G技术使EV参与电网辅助服务有望成为未来改善电网稳定性的重要措施。V2G技术成为电力系统与电力电子学科交叉的一个新兴研究热点,但EV参与电网辅助服务的研究仍存在以下难点。

1)多主体V2G带来的综合优化问题。EV与电网之间是一个多主体系统(调度中心、聚合商、EV用户等),EV参与辅助服务决策的实施必须寻求电网需求、聚合商成本和用户需求间的平衡,本质上是

多目标优化问题,需要在实时性、有效性和计算量之间进行权衡,难度较大。

2)多主体 V2G 带来的多源信息融合问题。V2G 参与辅助服务涉及多主体的信息具有多源性和异构性的特点,即数据类型、数据结构和数据时序等不一致,要进行数据重构,就需要建立合理的数据融合模型和数据融合算法来解决以上问题。

3)大数据云端通信带来的数据存储、数据阻塞和控制延迟问题。EV 的时空不确定性建模需要大量历史数据进行模型训练,要消耗大量的云端存储空间。同时, EV 与云端的海量数据传输也可能出现网络阻塞和数据掉包等问题,使系统效率降低。此外,通信延时、聚合延时的存在会对控制系统的稳定性产生影响^[89],随着参与 V2G 的 EV 数量快速增长,控制算法复杂性不断增加,带来的延时也会越来越高。

4)EV 集中充、放电带来的配电网稳定性问题。EV 参与辅助服务时,若集群中大量 EV 都处于充、放电模式,集中的充、放电行为很可能会导致配电网拥塞,对于电力系统的稳定是不利的。

从以上问题可以看出,由于 EV 具有随机性和波动性,V2G 参与电网辅助服务亟须解决其实时性、时延性和安全性问题。云边协同计算是近年来备受关注的协同计算形式,一般由云端负责大数据分析、模型训练、算法更新等任务,由边缘端负责基于本地信息的数据计算、存储和传输^[90]。这种方法结合了云计算的高效率和边缘计算的低延时,因而能节省通信带宽和保护用户数据隐私,在智能电网^[91-92]、智能交通^[93]、电池管理^[94]和物联网^[95]等方面已经得到了广泛应用。基于云边协同的 V2G 辅助电网服务,调度中心和 EV 聚合商可以分别承担云端和边端的功能,提升电网稳定运行和智能化管理,深度助力 V2G 技术的发展。未来有以下关键研究技术值得进一步探索:

1)适用于 V2G 的云边协同计算框架。云边协同计算可以满足 V2G 参与辅助服务的智能性和协同性,但也需要同时在计算复杂度和通信成本之间合理分配计算资源。此计算框架本质为云边协同计算任务的调度问题,调度算法需综合考虑时延、能耗、带宽成本及服务损失等^[95]。

2)云边和边边结合的 EV 时空模型。V2G 参与电网辅助服务的任务具有多样性,需要借助多种算法和多源信息才能完成。虽然云边协同使云端和边端间互补协作,但边端只与云端的交互也会使边端节点互相独立,形成数据孤岛,影响服务质量^[90]。利用边边分布式协同训练等方法可以弥补只采用云

边计算的不足,实现云边和边边的深度融合,获得更为可靠的 EV 时空模型。

3)EV 的多样性带来的模型失配问题。由于实际中的 EV 电池种类、可用容量、电池寿命、用户充/放电意愿等差别很大,相同的云边协同策略在不同的对象应用中可能存在模型失配的问题,协同计算算法的兼容性和协调性也是未来研究的一个重要方向。

5 结语

EV 渗透率正在快速增加,将给传统电力系统的稳定调节带来巨大挑战。国内外已开展大量研究将 EV 用作移动储能参与辅助服务,能有效减小电网的负荷压力,提高电网运行的稳定性和经济性。由于 EV 具有分布随机、可用容量变化、需兼顾用户需求等特点,其参与电网辅助服务呈现多主体和多源信息融合的问题,控制策略要比传统储能更加复杂。

本文首先从响应方式和响应时间尺度及对应的辅助服务对 EV 的响应机制进行概述;接着,从控制框架、控制模式和关键技术 3 个方面对终端层控制策略进行分析、对比;然后,以辅助服务类型为分类依据对电网层的控制策略进行梳理;最后,结合目前的研究现状,提出了 EV 参与电网辅助服务的控制策略相关的挑战,并对未来的研究方向进行展望,使读者对该领域有一个较为全面的认识,为后续进行相关研究提供参考。

参考文献

- [1] 李丽, 来小康, 慈松, 等. 动力电池梯次利用与回收技术[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 3-7.
LI Li, LAI Xiaokang, CI Song, et al. Reuse and recycling technology of power batteries [M]. Beijing: Science Press, 2020: 3-7.
- [2] 刘晓飞, 张千帆, 崔淑梅. 电动汽车 V2G 技术综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 121-127.
LIU Xiaofei, ZHANG Qianfan, CUI Shumei. Review of electric vehicle V2G technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 121-127.
- [3] 徐博文. 电动汽车 V2G 变换器及控制技术[D]. 济南: 山东大学, 2018.
XU Bowen. Research on V2G converter for electric vehicles and its control strategy[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [4] “全球电动汽车与可再生能源融合”里程碑示范项目[EB/OL]. (2020-09-04) [2022-07-04]. <https://new.qq.com/rain/a/20200904A0MX6X00>.
Landmark demonstration project of “global convergence of electric vehicles and renewable energy”[EB/OL]. (2020-09-04) [2022-07-04]. <https://new.qq.com/rain/a/20200904A0MX6X00>

- X00.
- [5] 国内首次! 华北将V2G充电桩资源正式纳入电力调峰辅助服务市场并结算[EB/OL].(2020-04-21)[2022-07-04]. <https://news.bjx.com.cn/html/20200421/1065131.shtml>.
A domestic first! In North China, V2G charging pile resources are officially included in the auxiliary service market of power peak regulation and settled [EB/OL]. (2020-04-21) [2022-07-04]. <https://news.bjx.com.cn/html/20200421/1065131.shtml>.
- [6] 德国V2G试点项目:通过电动汽车存储多余风能减少CO₂排放[EB/OL].(2020-04-02)[2022-07-04]. <https://new.qq.com/rain/a/20200402A05CP300>.
V2G pilot project in Germany: reducing CO₂ emissions by storing excess wind energy in electric vehicles [EB/OL]. (2020-04-02)[2022-07-04]. <https://new.qq.com/rain/a/20200402A05CP300>.
- [7] FCA全球最大V2G试点项目第一阶段任务已完成[EB/OL].(2020-09-16)[2022-07-04]. <https://new.qq.com/rain/a/20200916A0597500>.
FCA has completed the first phase of the world's largest V2G pilot project [EB/OL]. (2020-09-16) [2022-07-04]. <https://new.qq.com/rain/a/20200916A0597500>.
- [8] 师瑞峰,李少鹏.电动汽车V2G问题研究综述[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(6):28-37.
SHI Ruifeng, LI Shaopeng. Review on studies of V2G problem in electric vehicles[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(6): 28-37.
- [9] ESTHER S, SINGH S K, GOSWAMI A K, et al. Recent challenges in vehicle to grid integrated renewable energy system: a review[C]// 2018 2nd International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), June 14-15, 2018, Madurai, India: 427-435.
- [10] 程杉,陈梓铭,徐康仪,等.基于合作博弈与动态分时电价的电动汽车有序充放电方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(21):15-21.
CHENG Shan, CHEN Ziming, XU Kangyi, et al. An orderly charging and discharging method for electric vehicles based on a cooperative game and dynamic time-of-use price [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 15-21.
- [11] 洪奕,刘瑜俊,徐青山,等.基于积分制和分时电价的电动汽车混合型精准需求响应策略[J].电力自动化设备,2020,40(11):106-116.
HONG Yi, LIU Yujun, XU Qingshan, et al. Hybrid targeted demand response strategy of electric vehicles based on integral system and time-of-use electricity price [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 106-116.
- [12] 程杉,赵孟雨,魏昭彬.计及动态电价的电动汽车充放电优化调度[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(10):31-36.
CHENG Shan, ZHAO Mengyu, WEI Zhaobin. Optimal scheduling of electric vehicle charging and discharging with dynamic electricity price [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(10): 31-36.
- [13] 董海鹰,贡韞韵,汪宁渤,等.基于双重电价的电动汽车充放电两阶段优化调度策略[J].太阳能学报,2021,42(4):115-124.
DONG Haiying, YUN Yunyun, WANG Ningbo, et al. Two-stage dispatch optimization strategy for charging and discharging of electric vehicles based on double electricity price [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(4): 115-124.
- [14] 赵冬梅,马泰屹.基于动态分时电价的含电动汽车电网无功优化策略[J].华北电力大学学报(自然科学版),2022,49(1):1-11.
ZHAO Dongmei, MA Taiyi. Reactive power optimization strategy of power grid with electric vehicles based on dynamic time-of-use tariffs [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2022, 49(1): 1-11.
- [15] 郭瑶,张新慧,彭克,等.考虑电动汽车与光伏电源联动的配电网电压调控策略[J].电测与仪表,2019,56(7):75-83.
GUO Yao, ZHANG Xinhui, PENG Ke, et al. Voltage regulation strategy of distribution network considering the joint action of electric vehicle and photovoltaic power supply [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(7): 75-83.
- [16] 阿依努尔·阿布都艾尼江,希望·阿不都瓦依提,王维庆,等.基于补偿激励的电动汽车与电网联合优化调度[J].科学技术与工程,2022,22(10):4206-4214.
ABUDUAINJIANG Ayinuer, ABUDUWAYITI Xiwang, WANG Weiqing, et al. Joint optimal dispatch of electric vehicles and power grid based on compensation incentives [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(10): 4206-4214.
- [17] 吴洲洋,艾欣,胡俊杰,等.电动汽车聚合商参与调频备用的调度方法与收益分成机制[J].电网技术,2021,45(3):1041-1050.
WU Zhouyang, AI Xin, HU Junjie, et al. Dispatching and income distributing of electric vehicle aggregators' participation in frequency regulation [J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1041-1050.
- [18] 沈运帷.动态可控负荷参与电力系统调频辅助服务理论与市场化应用研究[D].南京:东南大学,2020.
SHEN Yunwei. Research on theory and market application of power system frequency regulation service considering dynamic controllable load [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [19] 侯慧,王逸凡,赵波,等.价格与激励需求响应下电动汽车负荷聚集商调度策略[J].电网技术,2022,46(4):1259-1269.
HOU Hui, WANG Yifan, ZHAO Bo, et al. Electric vehicle aggregator dispatching strategy under price and incentive demand response [J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1259-1269.
- [20] 李嘉媚,艾芊,殷爽睿.虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J].中国电机工程学报,2022,42(1):37-56.
LI Jiamei, AI Qian, YIN Shuangrui. Market mechanism and foreign experience of virtual power plant participating in peak-regulation and frequency-regulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 37-56.
- [21] 陈浩,胡俊杰,袁海峰,等.计及配电网阻塞的集群电动汽车参与二次调频方法研究[J].中国电力,2021,54(12):162-169.
CHEN Hao, HU Junjie, YUAN Haifeng, et al. Research on supplementary frequency regulation with aggregated electric vehicles considering distribution network congestion [J]. Electric Power, 2021, 54(12): 162-169.

- [22] 刘其辉, 逯胜建. 参与微电网调频的电动汽车虚拟同步机充放电控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 171-179.
LIU Qihui, LU Shengjian. Charging and discharging control strategy based on virtual synchronous machine for electrical vehicles participating in frequency regulation of microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 171-179.
- [23] 姚蓝霓, 李钦豪, 杨景旭, 等. 考虑电动汽车充放电支撑的配用电系统综合无功优化[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 39-47.
YAO Lanni, LI Qin hao, YANG Jingxu, et al. Comprehensive reactive power optimization of power distribution and consumption system with support of electric vehicle charging and discharging [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 39-47.
- [24] 朱磊, 黄河, 高松, 等. 计及风电消纳的电动汽车负荷优化配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊1): 194-203.
ZHU Lei, HUANG He, GAO Song, et al. Research on optimal load allocation of electric vehicle considering wind power consumption [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41 (Supplement 1): 194-203.
- [25] JAN M U, XIN A, ABDELBAKY M A, et al. Adaptive and fuzzy PI controllers design for frequency regulation of isolated microgrid integrated with electric vehicles [J]. IEEE Access, 2020, 8: 87621-87632.
- [26] 杨镜司, 秦文萍, 史文龙, 等. 基于电动汽车参与调峰定价策略的区域电网两阶段优化调度[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 58-71.
YANG Jingsi, QIN Wenping, SHI Wenlong, et al. Two-stage optimal dispatching of regional power grid based on electric vehicles' participation in peak-shaving pricing strategy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 58-71.
- [27] CHANDRA M G R, KEFAYATI M, BALDICK R, et al. Integrated PV charging of EV fleet based on energy prices, V2G, and offer of reserves [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1313-1325.
- [28] JAMPEETHONG P, KHOMFOI S. Coordinated control of electric vehicles and renewable energy sources for frequency regulation in microgrids [J]. IEEE Access, 2020, 8: 141967-141976.
- [29] LIU H, YANG Y D, QI J J, et al. Frequency droop control with scheduled charging of electric vehicles [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11 (3): 649-656.
- [30] 刘东奇, 钟庆昌, 王耀南, 等. 基于同步逆变器的电动汽车V2G智能充放电控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 544-557.
LIU Dongqi, ZHONG Qingchang, WANG Yaonan, et al. A synchronverter-based V2G smart charging and discharging control strategy for electric vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 544-557.
- [31] 苏粟, 李家浩, 李泽宁, 等. 考虑用户需求的电动汽车虚拟同步机辅助调频控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 40-47.
SU Su, LI Jiahao, LI Zening, et al. Auxiliary frequency regulation control strategy based on virtual synchronous machine for electric vehicles considering user demand [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 40-47.
- [32] 王俊杰, 贾雨龙, 米增强, 等. 基于双重激励机制的电动汽车备用服务策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 68-76.
WANG Junjie, JIA Yulong, MI Zengqiang, et al. Reserve service strategy of electric vehicles based on double-incentive mechanism [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 68-76.
- [33] 高爽, 原凯, 孙充勃, 等. 电动汽车集群优化充电时段有功无功混合控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(4): 1-6.
GAO Shuang, YUAN Kai, SUN Chongbo, et al. Multi-stage active and reactive mixed power control strategy for optimal charging of aggregated electric vehicles [J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2018, 30(4): 1-6.
- [34] 王鑫, 周步祥, 张百甫, 等. 基于分层控制的电动汽车调频策略研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(6): 8-15.
WANG Xin, ZHOU Buxiang, ZHANG Baifu, et al. Research on electric vehicles providing frequency regulation strategy based on hierarchical control [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(6): 8-15.
- [35] 王浩林. 电动汽车时空多维度负荷预测及其可调度潜力容量评估方法[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
WANG Haolin. Spatio-temporal multi-dimensional load forecasting of electric vehicles and its schedulable potential capacity assessment method [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [36] LI H L, AZZOUZ M A, HAMAD A A. Cooperative voltage control in MV distribution networks with electric vehicle charging stations and photovoltaic DGs [J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(2): 2989-3000.
- [37] AHMED M, ABOUELSEUD Y, ABBASY N H, et al. Hierarchical distributed framework for optimal dynamic load management of electric vehicles with vehicle-to-grid technology [J]. IEEE Access, 2021, 9: 164643-164658.
- [38] HU J D, YE C J, DING Y, et al. A distributed MPC to exploit reactive power V2G for real-time voltage regulation in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 576-588.
- [39] 师景佳, 袁铁江, KHAN S A, 等. 计及电动汽车可调度能力的风/车协同参与机组组合策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3433-3440.
SHI Jingjia, YUAN Tiejia, KHAN S A, et al. Unit commitment strategy considering cooperated dispatch of electric vehicles based on scheduling capacity and wind power generation [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3433-3440.
- [40] 史一炜, 冯冬涵, ZHOU E, 等. 基于主从博弈的充电服务商充电引导方法及其定价策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊2): 742-751.
SHI Yiwei, FENG Donghan, ZHOU E, et al. Stackelberg game based on supervised charging method and pricing strategy of charging service providers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(Supplement 2): 742-751.

- [41] 陈吕鹏,潘振宁,余涛,等.基于动态非合作博弈的大规模电动汽车实时优化调度[J].电力系统自动化,2019,43(24):32-40.
CHEN Lvpeng, PAN Zhenning, YU Tao, et al. Real-time optimal dispatch for large-scale electric vehicles based on dynamic noncooperative game theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 32-40.
- [42] 高爽,戴如鑫.电动汽车集群参与调频辅助服务市场的充电调控策略[J/OL].电力系统自动化:1-11[2022-08-30].https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220829.1653.008.html.
GAO Shuang, DAI Ruxin. Charging control strategy for electric vehicle cluster participating in frequency regulation ancillary service market[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-11 [2022-08-30]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220829.1653.008.html.
- [43] 魏倩.V2G模式下的电网调峰控制策略研究[D].西安:西安理工大学,2018.
WEI Qian. Research on grid peaking control strategy in V2G mode[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [44] 翁国庆,张有兵,戚军,等.多类型电动汽车电池集群参与微网储能的V2G可用容量评估[J].电工技术学报,2014,29(8):36-45.
WENG Guoqing, ZHANG Youbing, QI Jun, et al. Evaluation for V2G available capacity of battery groups of electric vehicles as energy storage elements in microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 36-45.
- [45] 甘霖,胡帆,杨思渊,等.面向电动汽车集群实时充放电优化的分群调度机制[J].电力建设,2019,40(1):41-48.
GAN Lin, HU Fan, YANG Siyuan, et al. Group-based interactive scheduling mechanism for real-time charging and discharging optimization of electric vehicle clusters[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(1): 41-48.
- [46] TRUJILLO D, GARCÍA TORRES E M. Demand response due to the penetration of electric vehicles in a microgrid through stochastic optimization[J]. IEEE Latin America Transactions, 2022, 20(4): 651-658.
- [47] TABATABAEI J, MOGHADDAM M S, BAIGI J M. Rearrangement of electrical distribution networks with optimal coordination of grid-connected hybrid electric vehicles and wind power generation sources[J]. IEEE Access, 2020, 8: 219513-219524.
- [48] 董锴,蔡新雷,崔艳林,等.基于马尔科夫链的电动汽车聚合建模及多模式调频控制策略[J].电网技术,2022,46(2):622-634.
DONG Kai, CAI Xinlei, CUI Yanlin, et al. Aggregation modeling based on Markov chain and multi-mode control strategies of aggregated electric vehicles for frequency regulation [J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 622-634.
- [49] 林铭蓉,胡志坚,高明鑫,等.基于时空规律的电动汽车负荷建模及其自动需求响应[J].南方电网技术,2022,16(1):99-107.
LIN Mingrong, HU Zhijian, GAO Mingxin, et al. Electric vehicle load modeling and automatic demand response based on space-time law[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1): 99-107.
- [50] 黄松渝.数据驱动的电动汽车充电行为和充电需求建模分析[D].杭州:浙江大学,2020.
HUANG Songyu. Data-driven modeling and analysis of electric vehicle charging behaviors and demands [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [51] KAUR K, KUMAR N, SINGH M. Coordinated power control of electric vehicles for grid frequency support: MILP-based hierarchical control design [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3364-3373.
- [52] 吴洲洋,艾欣,胡俊杰.需求侧灵活性资源参与调频辅助服务的备用优化与实时调度[J].电力系统自动化,2021,45(6):148-157.
WU Zhouyang, AI Xin, HU Junjie. Reserve optimization and real-time scheduling of frequency regulation ancillary service with participation of flexible resource on demand side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 148-157.
- [53] 陈丽丹,张尧,FIGUEIREDO A.电动汽车充放电负荷预测研究综述[J].电力系统自动化,2019,43(10):177-191.
CHEN Lidan, ZHANG Yao, FIGUEIREDO A. Overview of charging and discharging load forecasting for electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 177-191.
- [54] LAM A Y S, LEUNG K C, LI V O K. Capacity estimation for vehicle-to-grid frequency regulation services with smart charging mechanism [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 156-166.
- [55] 王震坡,刘鹏,张照生.新能源汽车大数据分析与应用技术[M].北京:机械工业出版社,2018:50-54.
WANG Zhenpo, LIU Peng, ZHANG Zhaosheng. Analysis and application technology of big data for EVs[M]. Beijing: China Machine Press, 2018: 50-54.
- [56] 张圣亮.基于机器学习的电动汽车可调度容量预测及其在微网EMS的应用[D].合肥:合肥工业大学,2020.
ZHANG Shengliang. Schedulable capacity forecasting for EVs based on machine learning and its application in energy management system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [57] 邓艺璇,黄玉萍,黄周春.基于随机森林算法的电动汽车充放电容量预测[J].电力系统自动化,2021,45(21):181-188.
DENG Yixuan, HUANG Yuping, HUANG Zhouchun. Charging and discharging capacity forecasting of electric vehicles based on random forest algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 181-188.
- [58] MAO M Q, ZHANG S L, CHANG L C, et al. Schedulable capacity forecasting for electric vehicles based on big data analysis [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(6): 1651-1662.
- [59] 谢佳锟.电动汽车参与电网调频控制技术研究[D].西安:西安理工大学,2019.
XIE Jiakun. Research on electric vehicle participating in power grid frequency control technology[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [60] KAUR K, SINGH M, KUMAR N. Multiobjective optimization for frequency support using electric vehicles: an aggregator-based hierarchical control mechanism [J]. IEEE

- Systems Journal, 2019, 13(1): 771-782.
- [61] 谢东亮,张宇琼,吴巨爱,等.容量受限下电动汽车充电策略优化及应急备用能力分析[J].电力系统自动化,2018,42(11): 56-63.
XIE Dongliang, ZHANG Yuqiong, WU Juai, et al. Charging optimization strategy and capability analysis as reserve measures for electric vehicles under limited-capacity area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 56-63.
- [62] 艾欣,赵阅群,周树鹏.适应清洁能源消纳的配电网集群电动汽车充电负荷模型与仿真研究[J].中国电力,2016,49(6): 170-175.
AI Xin, ZHAO Yuequn, ZHOU Shupeng. Study on aggregate electric vehicle charging load model and simulation for clean energy accommodation in distribution network [J]. Electric Power, 2016, 49(6): 170-175.
- [63] 何晨颖,耿天翔,许晓慧,等.利用电动汽车可调度容量辅助电网调频研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(22):134-140.
HE Chenying, GENG Tianxiang, XU Xiaohui, et al. Research on grid frequency regulation using schedulable capacity of electric vehicles [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 134-140.
- [64] JAN M U, XIN A, REHMAN H U, et al. Frequency regulation of an isolated microgrid with electric vehicles and energy storage system integration using adaptive and model predictive controllers [J]. IEEE Access, 2021, 9: 14958-14970.
- [65] LIU H, QI J J, WANG J H, et al. EV dispatch control for supplementary frequency regulation considering the expectation of EV owners[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9 (4): 3763-3772.
- [66] 周建萍,胡成奕,茅大钧,等.基于虚拟电机的V2G新型充放电控制策略[J].电机与控制应用,2020,47(2):97-103.
ZHOU Jianping, HU Chengyi, MAO Dajun, et al. Novel charging and discharging control strategy of V2G based on virtual machine [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(2): 97-103.
- [67] JAFARI H, MOGHADDAMI M, OLOWU T O, et al. Virtual inertia-based multipower level controller for inductive electric vehicle charging systems [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9 (6): 7369-7382.
- [68] ZHANG Q, LI Y, DING Z W, et al. Self-adaptive secondary frequency regulation strategy of micro-grid with multiple virtual synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 6007-6018.
- [69] 张怡冰.基于V2G技术的电动汽车充放电策略研究[D].北京:华北电力大学,2019.
ZHANG Yibing. Research on charge and discharge strategy for electric vehicles based on V2G technology [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [70] DONG C Y, CHU R H, MORSTYN T, et al. Online rolling evolutionary decoder-dispatch framework for the secondary frequency regulation of time-varying electrical-grid-electric-vehicle system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 871-884.
- [71] FALAHATI S, TAHER S A, SHAHIDEHPOUR M. Grid secondary frequency control by optimized fuzzy control of electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 5613-5621.
- [72] MITSUKURI Y, HARA R, KITA H, et al. A study on compensating voltage drop in distribution systems due to nighttime simultaneous charging of electric vehicles utilizing charging power adjustment and reactive power injection [J]. Electrical Engineering in Japan, 2014, 189(4): 9-21.
- [73] CHUKWU U C, MAHAJAN S M. The prospects of V2G for reactive power compensation in electric distribution networks [C]// 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 4-8, 2019, Atlanta, USA: 1-5.
- [74] 王强钢,田雨禾,王健,等.计及充电站无功补偿的配电网日前实时协调优化模型[J].电力系统自动化,2021,45(17):27-34.
WANG Qianggang, TIAN Yuhe, WANG Jian, et al. Coordinated day-ahead and real-time optimization model for distribution network considering reactive power compensation of charging station [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 27-34.
- [75] 王冠,刘苏贤,赵浩然,等.考虑电动汽车充电桩无功响应的优化调度策略[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(10): 152-160.
WANG Guan, LIU Suxian, ZHAO Haoran, et al. Optimal dispatching strategy considering reactive response of electric vehicle charging piles [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(10): 152-160.
- [76] MAHMUD K, HOSSAIN M J, TOWN G E. Peak-load reduction by coordinated response of photovoltaics, battery storage, and electric vehicles [J]. IEEE Access, 2018, 6: 29353-29365.
- [77] LI F C, GUO H X, JING Z, et al. Peak and valley regulation of distribution network with electric vehicles [J]. The Journal of Engineering, 2019, 16: 2488-2492.
- [78] 李嘉龙,陈雨果,刘思捷,等.考虑深度调峰的电力日前市场机制设计[J].电力系统自动化,2019,43(4):9-15.
LI Jialong, CHEN Yuguo, LIU Sijie, et al. Mechanism design of day-ahead market considering deep peak regulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 9-15.
- [79] FANG C, ZHAO X J, XU Q, et al. Aggregator-based demand response mechanism for electric vehicles participating in peak regulation in valley time of receiving-end power grid [J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(5): 453-463.
- [80] 文艺林,胡泽春,宁剑,等.基于分布鲁棒机会约束的充电运营商参与调峰市场投标策略[J].电力系统自动化,2022,46(7): 23-32.
WEN Yilin, HU Zechun, NING Jian, et al. Bidding strategy of charging operator participating in peak regulation market based on distributionally robust chance constraint [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 23-32.
- [81] 吴巨爱,薛禹胜,谢东亮,等.电动汽车参与运行备用的能力评估及其仿真分析[J].电力系统自动化,2018,42(13):101-107.
WU Juai, XUE Yusheng, XIE Dongliang, et al. Evaluation

- and simulation analysis of reserve capability for electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 101-107.
- [82] 吴洲洋,艾欣,胡俊杰,等.基于充电行为预测的电动汽车参与系统调频备用:容量挖掘与风险评估[J].电力自动化设备,2022,42(4):18-26.
WU Zhouyang, AI Xin, HU Junjie, et al. EVs' participation in system frequency regulation reserve based on charging behavior prediction: capacity mining and risk evaluation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 18-26.
- [83] 吴巨爱,薛禹胜,谢东亮.电动汽车聚合商对备用服务能力的优化[J].电力系统自动化,2019,43(9):75-81.
WU Juai, XUE Yusheng, XIE Dongliang. Optimization of reserve service capability made by electric vehicle aggregator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 75-81.
- [84] 宋晓通,吕倩楠,孙艺,等.基于电价引导的电动汽车与综合能源系统交互策略[J].高电压技术,2021,47(10):3744-3756.
SONG Xiaotong, LÜ Qiannan, SUN Yi, et al. Interactive strategy of electric vehicles and integrated energy system based on electricity price guidance [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3744-3756.
- [85] VATANDOUST B, AHMADIAN A, GOLKAR M A, et al. Risk-averse optimal bidding of electric vehicles and energy storage aggregator in day-ahead frequency regulation market [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2036-2047.
- [86] ZHANG Q, ZHU Y, WANG Z, et al. Reliability assessment of distribution network and electric vehicle considering quasi-dynamic traffic flow and vehicle-to-grid [J]. IEEE Access, 2019, 7: 131201-131213.
- [87] 李长云,徐敏灵,蔡淑媛.计及电动汽车违约不确定性的微电网两段式优化调度策略[J/OL].电工技术学报:1-12[2022-09-27].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DGJS20220530005&.uniplatform=NZKPT&.v=DGsAAIqa5NFJJHemONxopeWliJRWzZHF6t6YTEQgS2kZuWCuWYeYfiR6DNiHAMct>.
LI Changyun, XU Minling, CAI Shuyuan. Two-stage optimal scheduling strategy for micro-grid considering EV default uncertainty [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-12[2022-09-27].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DGJS20220530005&.uniplatform=NZKPT&.v=DGsAAIqa5NFJJHemONxopeWliJRWzZHF6t6YTEQgS2kZuWCuWYeYfiR6DNiHAMct>.
- [88] DONG C Y, XIAO Q, WANG M S, et al. Distorted stability space and instability triggering mechanism of EV aggregation delays in the secondary frequency regulation of electrical grid-electric vehicle system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5084-5098.
- [89] 董运昌,刘世民,曲朝阳,等.计及用户响应电价关联与多主体共赢的电动汽车充放电定价优化[J/OL].电力自动化设备:1-9[2022-04-27].https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DLZS2022018000&.uniplatform=NZKPT&.v=ocgPdO8pp1Uho59W096oVjMYyCwBO1-u_YF5NA0ksqDedAQvEXpdgF_bKwJhpqfL.
DONG Yunchang, LIU Shimin, QU Zhaoyang, et al. Charging and discharging pricing optimization of electric vehicles considering correlation of user response to electricity price and win-win results of multi-stakeholder [J/OL]. Electric Power Automation Equipment: 1-9 [2022-04-27]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DLZS2022018000&.uniplatform=NZKPT&.v=ocgPdO8pp1Uho59W096oVjMYyCwBO1-u_YF5NA0ksqDedAQvEXpdgF_bKwJhpqfL.
- [90] 白昱阳,黄彦浩,陈思远,等.云边智能:电力系统运行控制的边缘计算方法及其应用现状与展望[J].自动化学报,2020,46(3):397-410.
BAI Yuyang, HUANG Yanhao, CHEN Siyuan, et al. Cloud-edge intelligence: status quo and future prospective of edge computing approaches and applications in power system operation and control [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(3): 397-410.
- [91] SU Z, WANG Y T, LUAN T H, et al. Secure and efficient federated learning for smart grid with edge-cloud collaboration [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(2): 1333-1344.
- [92] WANG Y T, SU Z, XU Q C, et al. A novel charging scheme for electric vehicles with smart communities in vehicular networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(9): 8487-8501.
- [93] SUN T, WANG S Q, JIANG S, et al. A cloud-edge collaborative strategy for capacity prognostic of lithium-ion batteries based on dynamic weight allocation and machine learning [J]. Energy, 2022, 239: 122185.
- [94] RAHMAN M A, RASHID M M, HOSSAIN M S, et al. Blockchain and IoT-based cognitive edge framework for sharing economy services in a smart city [J]. IEEE Access, 2019, 7: 18611-18621.
- [95] 马璐,刘铭,李超,等.面向6G边缘网络的云边协同计算任务调度算法[J].北京邮电大学学报,2020,43(6):66-73.
MA Lu, LIU Ming, LI Chao, et al. A cloud-edge collaborative computing task scheduling algorithm for 6G edge networks [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(6): 66-73.

裴振坤(1998—),男,硕士,主要研究方向:电力电子与电力传动。E-mail:mszkpei@mail.scut.edu.cn

王学梅(1972—),女,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力电子变换器的可靠性和故障诊断技术、电力电子装置及其非线性行为控制等。E-mail:epxmwang@scut.edu.cn

康龙云(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:可再生能源、新能源变换控制技术。E-mail:lykang@scut.edu.cn

(编辑 施冬敏)

Review on Control Strategies for Electric Vehicles Participating in Ancillary Services of Power Grid

PEI Zhenkun, WANG Xuemei, KANG Longyun

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Electric vehicles (EVs) can provide auxiliary services to the power grid based on its energy storage characteristics, which can alleviate the load pressure caused by the rapidly increasing number of EVs, and maintain the stable operation of the power grid. However, due to the problems of random spatiotemporal distribution, irregular available capacity, and accelerated battery degradation as well as the need to take user demand into account in the process of EVs participating in auxiliary services, the control strategies of EVs are more complex than that of traditional energy storage. Aiming at the above problems, this paper first introduces the mode of EV responding to power grid dispatching from the response mechanism of EVs and the corresponding types of auxiliary services. Then, the control strategies and key technologies of EVs participating in the auxiliary services of the power grid are summarized from the control strategies of the terminal layer and the grid layer. Finally, the challenges faced by existing research are analyzed and the future development direction of control strategies for EVs participating in the auxiliary services of the power grid is prospected.

This work is supported by Key-area Research and Development Program of Guangdong Province (No. 2019B090911001).

Key words: electric vehicle (EV); energy storage; auxiliary service; response mechanism; control strategy

