

电动汽车作为主动负荷参与需求响应的研究

于娜¹,刘甲利¹,孙莉²,张鹏宇³

(1. 东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012;2. 吉林省电力有限公司,吉林 长春 130000;3. 吉林省电机工程学会,吉林 长春 130000)

摘 要: 随着我国电动汽车(Electric Vehicle, EV)数量的不断增加,电动汽车参与需求响应(Demand Response, DR)的研究备受关注。在阐述电动汽车的发展现状和需求响应基本概念的基础上,分析了电动汽车参与需求响应的基本条件和途径,结合已有的研究成果探讨了电动汽车通过参与需求响应,如分时电价(Time-of-Use, TOU)、实时电价(Real Time Pricing, RTP)实现辅助电网调频和协助间歇性新能源入网等功能,并深入分析了集群电动汽车与常规机组组合(Unit Commitment, UC)优化的可能性。最后,对电动汽车参与需求响应的策略及方法进行较为全面的总结,并指出该研究领域可能的前瞻性研究问题。

关 键 词: 电动汽车;需求响应;电力系统;新能源

中图分类号: U469.72

文献标识码: A

温室效应、能源危机等全球性问题的日益严重,推动了电动汽车行业的发展。目前电动汽车主要分为三类^[1]:纯电动汽车(Plug-in Electric Vehicle, PEV)、混合动力电动汽车(Hybrid Electric Vehicle, HEV)和燃料电池电动汽车(Fuel Cell Vehicle, FCV),混合动力汽车又逐渐发展成插电式混合动力汽车(Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)。插电式混合动力汽车有两种动力源,实用性强,是电动汽车发展的过渡期车型,受续航里程的限制,纯电动汽车目前的普及规模较小,但它是电动汽车的最终发展方向。目前研究中参与需求响应的车型主要是纯电动汽车和插电式混合动力汽车^[2-4]。

需求响应是需求侧管理(Demand Side Management, DSM)的重要内容,智能电网的发展为需求响应的实施提供了有利条件。需求响应主要内容包括^[5-6]:(1)基于电价的项目,即分时电价(TOU),实时价格(RTP),尖峰价格项目(Critical Peak Pricing, CPP);(2)基于激励补偿的项目,包括直接控制负荷(Direct Load Control, DLC)、紧急需求响应项目(Emergency Demand Response Program, EDRP)、市场容量项目(Capacity Market Program, CAP)、可中断/可削减服务(Interruptible/Curtailable Service, I/C)、需求侧竞价(Demand Bidding, DB)和辅助服务项目(Ancillary Service, A/S)。某类参与需求响应的负荷可以在某些时段完全与电网脱离,甚至向电网供电,这类负荷称为主动负荷^[7]。主动负荷强调负荷的“主动性”,可以通过智能电网通信系统随时了解电网发布的信息,避峰就谷,减少用电费用。电动汽车拥有充电和放电的物理特性,可以作为一种典型的主动负荷利用需求响应手段对其充放电行为进行合理引导和控制,在避免大规模电动汽车充电对电网造成冲击的同时,还可以参与系统的调峰、调频等,辅助电网的安全稳定运行。足够多的电动汽车数量是保证电动汽车参与需求响应有效性的前提条件。预计到2020年,我国的汽车保有量将达到1.5亿辆^[8]。假设其中电动汽车的渗透率为0.1%,每辆电动汽车以平均5kW的功率进行放电,则总功率可达750万kW。每辆汽车每天平均有94.35%的时间处于停驶状

收稿日期:2016-05-03

基金项目:国家自然科学基金(51307019);吉林省科技发展项目(20140101210JC)

作者简介:于娜(1977-),女,博士,副教授,主要研究方向:电力系统经济运行。

电子邮箱:yuna0616@163.com(于娜);juanliujiali@163.com(刘甲利);66856518@qq.com(孙莉);89705999@qq.com(张鹏宇)

态^[9],而且大部分用户为理性用户,所以电动汽车自身有足够的条件来参与需求响应。

V2G(Vehicle-to-Grid)是 Amory Lovins 在 1995 年提出的概念,后来特拉华大学的 William Kempton 教授又对此技术做了进一步的研究和发展^[10]。V2G 技术是电动汽车参与需求响应、与电网互动必不可少的技术条件。V2G 系统总体分为 AC-DC 和 DC-DC 前后两个模块,它们由电压源 PWM 转换器、对称半桥 LLC 转换器和其它硬件组成^[11],当然还应包括智能通信和管理系统。电动汽车作为代步工具的固有特性阻碍了电动汽车参与需求响应的及时性和有效性,以电动汽车与电池解耦为前提条件的 B2G(Battery-to-Grid)^[12]更有利于提高电动汽车参与需求响应的整体效应。

文章首先介绍了电动汽车通过分时电价、峰谷电价、直接负荷控制等方式直接参与需求响应的基本方式,然后分析了电动汽车大量分散分布情况下通过聚合商(Load Aggregator,LA)参与需求响应的基本方法并给出了数学模型,结合该领域内相关研究成果探讨了电动汽车在参与电网调峰、调频和协助新能源并网等方面的作用,进一步讨论了电动汽车参与机组优化的可能性,最后给出了下一步可能的研究方向。

1 电动汽车参与需求响应的方式

1.1 用户直接参与需求响应项目

目前所研究的电动汽车参与的需求响应项目主要有实时电价、分时电价、峰谷电价和直接控制负荷。实时电价是反映电力市场 1h 或小于 1h 的费率结构,可以更精确地反映发电成本变化情况;分时电价是在不同的时间段有不同单位价格的费率机构,峰谷电价是分时电价的一种,根据本地区负荷特性将 1 天(1 年)分为峰平谷三个时段^[13],电价政策是引导用户用电行为易行、有效的调控手段。直接控制负荷指在负荷高峰期由调度机构直接对用户用电设备进行关闭控制或循环控制^[14],对供电质量及用户的用电舒适度影响不大。文献[15]利用需求弹性矩阵得出了不同时段电价变化与负荷量变化的关系,以研究时段峰谷差最小为目标函数,得出实时电价下电动汽车集中充电调度策略;文献[16]用一个等效电池模型来计算电池充放电过程中的能量损耗,以燃料消耗量和电费最小为目标函数,用二次规划的方法求解,得到分时电价下插电式混合动力汽车最优充电方式;文献[17]用效用函数为用户的放电需求模型,以负荷方差最小为目标函数,最后以京津唐地区为例,预算出了 2030 年最优峰谷电价。

电动汽车个体直接参与需求响应是电动汽车发展初始阶段与电网互动的基本形式,它依赖于智能电网的高级量测体系(Advanced Metering Infrastructure,AMI),使车主及时了解电网的运行状态,结合电动汽车的具体行驶规划,做出有利于自己的抉择。当电动汽车发展到一定数量时,应逐渐过渡到以负荷聚合商的形式参与需求响应,分层分区,方便管理,提高工作效率。

1.2 通过 LA 参与需求响应

LA 是整合用户需求响应资源并提供给市场购买者的独立组织,可以为中小负荷提供参与市场调节的机会,通过技术手段充分挖掘可用于辅助服务的负荷响应资源^[18-19]。文献[20]指出电动汽车聚合商(Electric Vehicle Aggregator,EVA)是一种虚拟实体,在实施需求响应项目的过程中它是电力系统运营商与电动汽车负荷之间的调解员。

LA 负责对分散电动汽车用户的充放电情况进行分类汇总和整理,化零为整,然后供电公司和 LA 直接进行交易。LA 和供电公司可以签订合同,内容包括充放电时间、电价、充放电量等,通过售卖电价差来实现赢利。同样,每个 LA 都拥有一定数量的用户服务对象,也是通过与用户签订合同的方式来达到使用户主动根据系统需要调整充放电策略的目的。合同内容包括充放电量、激励值、违约赔偿等。

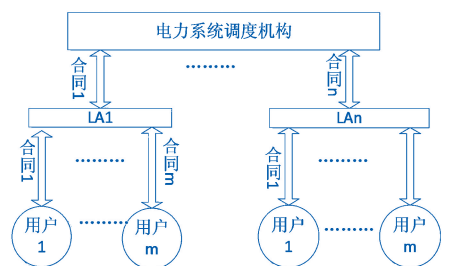


图 1 调度机构、负荷聚合商和用户的相互关系

因单个用户的电力贡献能力十分有限,所以补偿结算的周期可以适当延长,如一个月或两个月。LA 的工作机制,如图 1 所示。

对于 LA 来说,一方面要尽可能缩小约定提供功率和实际提供功率之间的差值,以减少惩罚值;另一方面要通过售卖电价的制定获取尽可能多的利益,而用户则希望通过策略性充放电来减少用电费用,或者获取更多收益,LA 和用户的优化模型如下:

(1) LA 优化模型

$$\min f_1 = (P_D - P_A)^2, \quad (1)$$

$$\max f_2 = M_1 + M_2 - Q_1, \quad (2)$$

式中: f_1 为调度机构需求调度功率与聚合商实际提供功率的偏差; P_D 为调度机构下达的需求调度功率; P_A 为聚合商提供的功率; f_2 为聚合商的收益; M_1 为 LA 买卖电价差收益; M_2 为电动汽车放电 LA 获得和支付的补偿差收益; Q_1 为 LA 违约惩罚值。

(2) 用户优化模型

$$\max f_3 = M_d - M_c - Q_2, \quad (3)$$

式中: f_3 为用户收益; M_d 为用户放电补偿收益; M_c 为用户充电费用; Q_2 为用户违约惩罚值。

同时需要考虑充放电功率、电池荷电状态(State of Charge, SOC)、结束联网时 SOC 等约束条件。联网过程中,电动汽车的充电功率和 SOC 都应该保持在一定范围之内,否则会对电池寿命产生不利影响。联网结束时,电池的 SOC 必须达到一定水平,不能影响车主的正常出行,这是保证和提高电动汽车用户参与车网互动积极性的重要前提。因目标函数之间存在矛盾性,可以用人工神经网络算法、粒子群算法等智能算法进行求解。

LA 领域有着很大的开发潜力,我国在这方面做的研究比较少,相应的技术开发和实际应用更少。我国电力行业、电动汽车产业和智能电网的快速发展对 LA 技术的实施水平提出了新的要求,可以通过加强理论研究、推进基础设施和示范工程建设、颁布相关政策法规等手段推动 LA 在我国的发展,从而大幅提高需求响应资源的利用率。电动汽车通过 LA 参与需求响应将是未来车网互动重要形式之一。

2 电动汽车参与需求响应支持电网运行

2.1 电动汽车参与调频

由于电能不可以大规模经济性储存,所以电力系统的一大特点就是发电量与用电量要时刻保持平衡。如果发电量超过负荷需求,电网频率会上升;反之,发电量小于负荷需求,电网频率会下降^[21]。传统的调频方式是调节机组的出力,经济性差,响应速度慢。与传统调频的方式相比,电池储能调频具有响应速度快、跟踪精确和成本低的特点。电动汽车特有的充放电特性使电动汽车参与系统调频成为可能。当对电动汽车进行分散控制时,系统中需要安装大量的频率测量装置和通信设备,这会提升系统响应速度和调节能力,但也会一定程度上影响到系统的抗噪能力和鲁棒性。

文献[22]分析评估了不同情境(不同的行驶里程,不同的荷电状态等)下电动汽车参与调频的效果,以及如何在考虑电池寿命的条件下建立最优的频率控制方法;文献[23]指出电动汽车可以代替部分发电机参与一次调频,作为调度负荷通过 AGC(Automatic Generation Control)参与二次调频,可在经济调度情况下参与三次调频;文献[24]提出了一种新概念—V4G(Vehicle-for-Grid),在充电状态的电动汽车可以通过改变充电功率的方法来参与调频,不考虑电动汽车向电网馈电,V4G 要比 V2G 获得的经济补偿少,但是要求的技术难度相对较小,且避免了对电池造成过度损伤。对于单辆电动汽车来说,并不能每次都能响应调度需求,如当电池满电时不能再充电,当电池空电(SOC 已达到允许下限,不是 0)时不能再放电,所以针对电动汽车的 AGC 信号要具有灵活性,考虑多种因素,提供多种方案。

根据采用调频方法的不同可以将系统调频分一次调频、二次调频和三次调频。只有经过前两次调频系统频率仍不能达到要求时,才会启动三次调频,所以三次调频相对于一次调频和二次调频应用较

少。因此,更应该注重对电动汽车参与一次和二次调频的理论研究。当电网频率低于 50 Hz 时电动汽车向电网放电,而当频率高于 50 Hz 时,电动汽车进行充电,以此调整系统能量不平衡,使电网频率波动保持在要求范围之内。同时,需要利用智能充电器做好电动汽车充放电量的测量和控制工作。

2.2 电动汽车协调新能源入网

以风电和光伏为代表的新能源显著特点是出力波动性大,随机性强^[25],与负荷需求匹配性差,在不受控情况下并入电网会对电网的稳定运行产生威胁。储能技术是解决风电并网“瓶颈”问题,提高电网对风电接纳能力的有效途径之一^[26-27]。电动汽车,特别是集群电动汽车的储能特性在抑制风电波动性方面拥有巨大的潜力。目前我国正对智能电网技术进行全面而深入的研究,国家电网、南方电网、中石油等大型国企都已经对电动汽车充电基础设施的建设采取行动^[28],这些工作都为实现风电与电动汽车储能功能协调优化奠定了基础。文献[29]用随风电出力波动性变化的电价来引导用户充放电行为,然后从电动汽车提供备用电源的潜力、作为储能系统的潜力综合考察了电动汽车协助风电并网的能力;文献[30]分析了电动汽车以不同参与程度辅助风电渗透率很高的丹麦电力系统运行的情况,证明 10% 的电动汽车足以为风电渗透率达 50% 的丹麦电力系统提供电网调节服务。

如果电动汽车的所需电能全部来源于传统燃煤电厂,必将会增加煤炭的燃烧量,间接地增加了污染物排放。所以电动汽车在环保方面的优势只有在以低碳电力或新能源为主要供电电源的情况下才会更加凸显,如风电、光伏发电等。电动汽车与新能源之间的协调互补是双赢性策略,是平抑新能源出力波动性的重要途径,而且由此产生的成本要低于单独配置储能设备成本。对于我国来说,当电动汽车渗透率和新能源开发程度达到一定水平后,电力系统中的电源包括新能源发电厂、传统发电厂、拥有电源和负荷双重特性的电动汽车,负荷可分为刚性需求负荷和弹性需求负荷。刚性需求负荷每日的用电规律比较固定,由出力可调的传统发电厂供电,弹性需求负荷用电时间和用电量具有随机性,可选择以新能源供电为主,传统能源为辅。而风电、光伏的发电能力不可调,为了尽可能减少弃风和弃光的发生,可利用电动汽车对新能源的出力进行间接调节,即当新能源出力大而负荷需求小的时候电动汽车进行充电,当新能源出力小而负荷需求大时电动汽车进行放电,同时可以保证电动汽车能源大部分来源于新能源。调度中心需要及时收集整理电动汽车的状态信息、充放电特性等相关信息,尽可能准确地预测新能源出力和负荷需求情况,呈辐射状进行信息的双向流通,统筹规划,提高系统运行的整体效益。风-光-车互补的结构示意图如图 2 所示,电气连接和通信连接分别用于电能的传输和信息的输送。

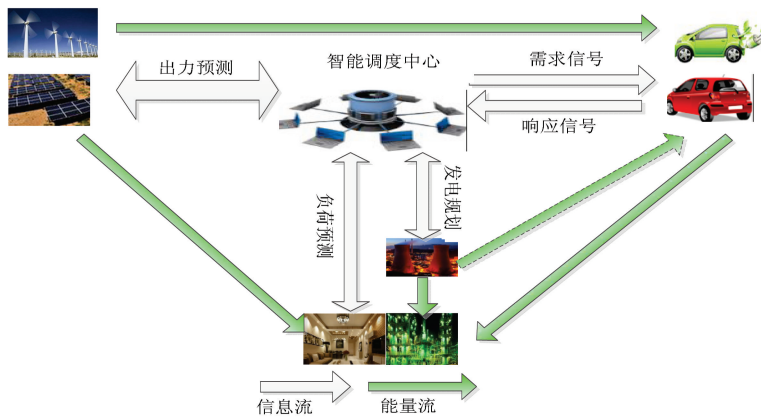


图 2 风-光-车互补结构示意图

根据图 2 模型,电力系统智能调度中心实时监测电网运行情况,风电出力水平,并结合常规机组的运行计划,向电动汽车管理系统发出合理的调度指令,管理系统根据所接收到的调度指令,综合考虑电动汽车状态、电池 SOC 等因素,以不影响用户之后的出行计划为前提,对可控电动汽车的充放电行为进行合理地安排。

2.3 电动汽车支持高峰电力

由于电力负荷复杂多样及其运行时间的不一致,导致日负荷曲线、季度负荷曲线和年负荷曲线会出现短时高峰的现象。传统的解决方法是设置备用机组,由于高峰负荷出现的频率低、持续时间短,所以设置备用机组的方法工作效率低、经济效益差。需求响应概念引入以后,一般通过调度手段和需求响应来支持系统高峰电力^[31-32]。电动汽车作为特殊的储能元件可以通过需求响应来支持高峰电力。

电力系统负荷高峰的出现会对系统的供电可靠性产生严重的影响,加重网络阻塞程度,增加网损,影响电能质量,降低用户的用电满意度。利用电动汽车储能特性作为另类“旋转备用”来支持电网高峰电力,既可以减少设置小容量机组,提高电网运行效率和经济性,又可以避免大规模电动汽车接入电网对系统产生冲击。文献[33]根据“行驶(D)”、“停在家(H)”、“停在工作地点(W)”、“停在其它地方(O)”四种状态对英国 2000TUS(Time Use Survey)调查结果进行分类,利用非齐次马尔科夫链模拟电动汽车在不同时段间的状态转换,结果证明即使考虑电动汽车在工作地点充电,低渗透率的电动汽车也表现出支持高峰电力的巨大潜力。文献[34]将电动汽车的充电时间进行序列化,由调度机构或电动汽车管理系统根据电网调节信号对电动汽车充放电策略进行调整,每时段的充电功率可以为固定值或可变值,算例结果表明该调控策略下电动汽车充电负荷的峰值出现了大幅度降低。

考虑到放电会对蓄电池的寿命产生不利影响,所以应尽可能控制电动汽车参与需求响应进行放电的频率和深度。电力高峰往往只在夏季、冬季或其它特殊时段发生,出现频率低,在电动汽车数量足够的情况下,不会对电池的寿命产生太大影响,所以在技术水平达到的情况下电动汽车支持高峰电力具有高度可行性,将是电动汽车辅助电网运行的重要内容。

2.4 电动汽车与机组优化组合

机组优化组合是指在保证系统安全运行的前提下合理安排机组的启停计划,使系统消耗的燃料总量或运行费用最少^[35-37],这对于电力系统安全与经济运行至关重要。电动汽车的出现给传统机组组合优化问题加入了新的内涵。如果能通过需求响应对大规模电动汽车充放电行为进行合理调控,参与机组的优化组合,不仅能降低对“小而贵”应急机组的依赖,节省燃料和发电费用,给用户带来收益,还可以避免电动汽车群聚效应对电网造成冲击,提高系统资源的综合利用率。

电动汽车参与机组组合的根本目的是取代小容量机组,减少发电成本,提高经济效益。但是机组组合问题需要对电动汽车进行连续控制,目前大部分文献没有考虑电动汽车在时空分布上与传统机组的组合匹配度问题。实际模型中往往以发电费用最小为目标函数,包括机组的冷启动费用、热启动费用、燃料费用以及电动汽车的调度费用等,同时考虑机组出力约束、供需平衡约束、爬坡约束以及电动汽车放电功率、SOC 等约束条件。文献[38]利用两阶段双随机规划的方法研究了如何利用电动汽车的接入解决在负荷预测不确定的条件下机组组合的安全约束问题,指出这也是评估 V2G 对电网造成影响的有效方法。文献[39]分析了在低损耗和低充电中断率情况下电动汽车作为响应备用与传统热电机组的优化组合,结果表明独立系统运营商(Independent System Operator, ISO)购买电动汽车备用要比购买传统机组备用所用费用少,而且车主可以获得更多收益。

单辆电动汽车电池容量十分有限,而可调度容量又肯定小于额定容量,所以电动汽车参与机组优化组合的具体实施需要等到电动汽车数量足够多、管理系统足够智能和科学以及电动汽车蓄电池充放电性能和循环寿命有突破性提高的情况下才有可能实现。提供换电服务的充电站或 LA 应是电动汽车参与机组组合优化的主要形式。

3 结 论

积极推动电动汽车的发展已经成为解决环境污染问题和缓解能源危机的有效途径之一,电动汽车有着可预见性的广阔发展前景。大量电动汽车接入电网将给电网的安全稳定运行带来机遇和挑战。本文从需求响应的角度全面分析了电动汽车参与需求响应的条件和途径,以及电动汽车如何通过需求响

应从调频、促进新能源消纳等多方面来辅助电网可靠、稳定、经济性运行。

结合我国电动汽车的发展现状和发展趋势,本文认为下一步研究方向包括以下三个方面:

(1)建立科学合理的电动汽车充电负荷曲线。把握电动汽车的充电负荷特性是研究电动汽车对电网造成影响的基础,在此基础上探讨有效的解决方法。电动汽车充电负荷曲线的建立与电动汽车的数量、类型以及不同车主日行驶习惯密切相关,需要考虑如何以合适的方式将它们融入到电动汽车充电负荷曲线的建立中来。

(2)补偿问题。目前大部分文献直接研究如何使电动汽车通过需求响应和 V2G 技术与电网的互动效果达到最好,却很少提及对车主的具体补偿方案。如何量化馈电对电池造成的伤害以及如何确定合理的补偿方案即能达到缓解网络压力的目的又能兼顾车主和电网公司利益值得研究。

(3)需求侧竞价。当电动汽车大范围普及时,负荷聚合商应该是电动汽车参与需求响应的主要形式。每个聚合商都拥有一定数量具有放电潜力的电动汽车储能负荷,相当于一个小型发电厂,大量聚合商和传统发电厂平等竞价,甚至优先对待,优化资源配置,提高资源综合利用率,实现多方共赢。

参 考 文 献

- [1] 杨孝纶. 电动汽车技术发展趋势及前景(上)[J]. 汽车科技,2007,6(4):10-13.
- [2] 夏天,熊威,何永秀. 国外电动汽车发展机制[J]. 电力需求侧管理,2013,15(4):58-61.
- [3] 潘樟惠,高赐威. 基于需求响应的电动汽车经济调度[J]. 电力建设,2015,36(7):139-145.
- [4] 王锡凡,邵成成,王秀丽,等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):1-10.
- [5] 于娜,何德明,李国庆. 电力需求响应的决策因素与分类模型[J]. 东北电力大学学报,2014,34(4):112-116.
- [6] M. Parsa Moghaddam, A. Abdollahi, Rashidinejad. Flexible demand response programs modeling in competitive electricity market[J]. Applied Energy,2011,88(9):3257-3269.
- [7] 程瑜,安甦. 主动负荷互动响应行为分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(20):63-70.
- [8] 张秦庚,牛鲁燕,周永刚. 新形势下对我国汽车尾气污染的思考[J]. 环境科技,2011,2(24):111-113.
- [9] 张蓓蓓,孙广明. 电动汽车与电网互动协调运行技术探讨[J]. 电网与清洁能源,2011,27(11):58-61.
- [10] 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,2012,29(2):121-127.
- [11] Xiangwu Yan, Bo Zhang, Xiangning Xiao, et al. A bidirectional power converter for electric vehicles in V2G systems[C]//Electric Machines & Drive Conference (IEMDC), Chicago, USA;2013:254-259.
- [12] 薛飞,雷宪章,张野彪,等. 电动汽车与智能电网从 V2G 到 B2G 的全新结合模式[J]. 电网技术,2012,36(2):29-34.
- [13] 赵鸿图,朱治中,于尔铿. 电力市场中需求响应市场与需求响应项目研究[J]. 电网技术,2010,34(5):146-153.
- [14] 张钦,王锡凡,王建学,等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化,2008,32(3):97-106.
- [15] 邹文,吴福保,刘志宏. 实时电价下插电式混合动力汽车智能集中充电策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):62-67.
- [16] Saeid Bashash, Hosam K. Fathy. Cost-optimal charging of plug-in hybrid electric vehicles under time-varying electricity price signals[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2014,15(15):1958-1968.
- [17] 项顶,宋永华,胡泽春,等. 电动汽车参与 V2G 的最优峰谷电价研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(31):15-25.
- [18] Mahnoosh Alizadeh, Anna Scaglione, Rober J. Thomas. Direct load management of electric vehicles[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Prague, Czech Republic;2011:5964-5967.
- [19] Claudia Battistelli. Demand response program for electric vehicle service with physical aggregators[C]//IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, Copenhagen, Denmark;2013:1-5.
- [20] Stylianos I. Vagropoulos, Dimitrios K. Kyriazidis, Anastasios G. Bakirtzis. Real-time charging management framework for electric vehicle aggregators in a market environment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(2):948-957.
- [21] Marc PETIT, Yannick PEREZ. Plug-in vehicles for primary frequency regulation: what technical implementation[C]//IEEE Power Tech, Grenoble, France;2013:1-7.
- [22] Guoxuan Xiao, Canbing Li, Zhicheng YU, et al. Review of the impact of electric vehicles participating in frequency regulation on power grid[C]//Chinese Automation Congress, Changsha, China;2013:75-80.
- [23] Hongming Yang, C. Y. Chung, Junhua Zhao. Application of plug-in electric vehicles to frequency regulation based on distributed signal acquisition via limited communication[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(2):1017-1026.
- [24] Mohammad Hassan Bahmani, Mojtaba Abolfazli, Saeed Afsharnia, et al. Introducing a new concept to utilize plug-in electric vehicles in frequency regulation service[C]//International Conference on Control, Instrumentation and Automation, Shiraz, France;2011:106-109.

- [25] 刘波,贺志佳,金昊. 风力发电现状与发展趋势[J]. 东北电力大学学报,2016,36(2):7-13.
- [26] 于大洋,宋曙光,张波,等. 区域电网电动汽车充电与风电协同调度的分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):24-29.
- [27] Ying Li,Zofia Lukszo,Margot Weijnen. The potential of electric vehicles to facilitate a high wind power penetration[C]//IEEE International Conference on Networking,Science and Control,Evry,France;2013:901-906.
- [28] 鲁莽,周小兵,张维. 国内外电动汽车充电设施发展状况研究[J]. 华中电力,2010,23(5):16-20.
- [29] Tan Ma,Osama Mohammed. Real-time plug-in electric vehicles charging control for V2G frequency regulation[C]//IEEE IECON 2013-39th Annual Conference of the Industrial Electronics Society,Vienna,Austria;2013:1197-1202.
- [30] Jayakrishnan R. Pillai,Birgitte Bak-Jensen,Paul Thogersen. Electric vehicles to support large wind power penetration in future danish power systems[C]//IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference,Seoul,Korea;2012:1475-1479.
- [31] Mahmoud Ghofrani,Amirsaman Arabali,Mehdi Etezadi-Amoli,et al. Smart scheduling and cost-benefit analysis of grid-enabled electric vehicles for wind power integration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(5):2306-2313.
- [32] 范子恺,俞豪君,朱俊澎,等. 电力高峰时段电动汽车负荷优化调度[J]. 电力需求侧管理,2014,16(5):3-9.
- [33] Yue Wang,Sikai Huang,David Infield. Investigation of the potential for electric vehicles to support the domestic peak load[C]//IEEE International Electric Vehicle Conference,Florence,Italy;2014:1-8.
- [34] Van-Linh NGUYEN,Tuan TRAN-QUOC,Seddik BACHA,et al. Charging strategies to minimize the peak load for an electric vehicle fleet [C]//IEEE Industrial Electronics Society,IECON 2014-40th Annual Conference,Dallas,USA;2014:3522-3528.
- [35] 张舒,胡泽春,宋永华,等. 考虑电动汽车换电站与电网互动的机组组合问题研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(10):49-55.
- [36] S. M. Hossein Imani,S. Asghari,M. T. Ameli. Considering the load uncertainty for solving security constrained unit commitment problem in presence of plug-in electric vehicle [C]//The 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering,Tehran,Iran;2014:725-732.
- [37] Lei Jin,Huan Yang,Fangbin Cheng,et al. A novel approach for the unit commitment with vehicle-to-grid[C]//International Conference on Electrical Machine and Systems,Sapporo,Japan;2012:1-6.
- [38] Srikanth Reddy K,Lokesh Kumar Panwar,Rajesh Kumar. Potential benefits of electric vehicle deployment as responsive reserve in unit commitment[C]//International Conference on Industrial and Information Systems,Gwalior,India;2014:1-6.
- [39] Abolfazl Esmaili Kherameh,Morteza Aien,Masoud Rashidinejad,et al. A particle swarm optimization approach for robust unit commitment with significant vehicle to grid penetration[C]//Iranian Conference on Intelligent Systems,Bam,Iranian;2014:1-6.

Research on Electric Vehicle Access Demand Response As Active Load

Yu Na¹, Liu Jiali¹, Sun Li², Zhang Pengyu³

(1. Electrical Engineering College, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012; 2. Jilin Province Electric Power Maintenance Company, Changchun Jilin 130000; 3. Jilin Institute of Electrical Engineering, Changchun Jilin 130000)

Abstract: With persistent increase in number of electric vehicle(EV) in our country, the research on electric vehicle participating in demand response(DR) is getting more and more attention. The basic conditions required and the way that electric vehicle takes part in demand response are analyzed based on elaborating the current development status of electric vehicle and basic concept of demand response, the functions of electric vehicle on frequency regulation and assistance in grid accommodating intermittent new energy through participation in demand response, such as time of use(TOU), real time pricing(RTP) are analyzed combined with the existing research results, the possibility of optimizing unit commitment(UC) considering cluster of electric vehicles is deeply analyzed. At last, the strategies and methods of electric vehicle participating in DR are comprehensively summarized and prospective research problems in this field are pointed out.

Key words: Electric vehicle; Demand response; Power system; Renewable energy resource