

电动汽车参与微电网辅助调频的充放电控制策略

倪 坤

(国网宁夏电力有限公司吴忠供电公司, 宁夏 吴忠 751100)

摘要: 随着电动汽车规模化应用, 其“分布式储能特性”成为研究热点。提出一种电动汽车参与孤岛运行的微电网辅助调频充放电控制策略。首先, 提出电动汽车辅助调频两级控制算法, 通过反馈的频率差以及当前电动汽车荷电情况改变电动汽车的充放电功率指令, 实现对电网调频的辅助服务功能。其次, 根据辅助调频算法得到的功率指令值, 应用虚拟同步机控制策略控制实际的充放电行为。算例仿真验证了所提出控制策略的有效性和正确性。

关键词: 分布式储能; 电动汽车; 调频; 虚拟同步机控制

Charge and discharge control strategy of electric vehicle participating in microgrid-auxiliary frequency modulation

NI Kun

(State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Wuzhong Power Supply Company, Wuzhong 751100, China)

Abstract: With the large-scale application of electric vehicles, distributed energy storage characteristics has become a research hotspot. A micro-grid auxiliary frequency charging and discharging control strategy for electric vehicles participating in island operation is proposed. Firstly, the two-level control algorithm of electric vehicle auxiliary frequency modulation is proposed. The frequency differences between the feedback and the current electric vehicle charging condition change the charging and discharging power command of the electric vehicle to realize the auxiliary service function for the power grid frequency modulation. Secondly, according to the power command value obtained by the auxiliary frequency modulation algorithm, the virtual synchronous machine control strategy is applied to control the actual charging and discharging behavior. The simulation results verify the validity and correctness of the proposed control strategy.

Key words: distributed energy storage; electric vehicle; frequency modulation; virtual synchronous machine control

0 引言

随着环境问题和能源危机的愈发严峻, 电动汽车作为一种清洁环保的交通工具逐步替代

燃油汽车, 深入人们的生活中, 而电动汽车作为一种移动式储能资源, 其对电网的辅助作用也得到人们的重视, 电动汽车向电网输送电能 (Vehicle to Grid, V2G) 的技术应运而生。V2G技术的核心在于充分利用电动汽车的储能

南充市科技战略合作专项 (NC17SY4003)

资源, 将其作为电网可调节资源的后备。其具体内容为当电动汽车处于可调度状态时, 在满足用户需求的前提下, 调度电动汽车的充放电行为给电网提供辅助的调峰调频服务。电动汽车作为移动式储能资源, 若作为微电网独立运行时的后备资源, 能够降低微电网运行成本, 提高微电网运行稳定性, 提高资源利用率^[1]。

目前有关电动汽车参与微电网调频的研究中, 文献[2]建立电动汽车参与电网充放电的模型, 提出电动汽车参与电网调频的控制策略; 文献[3]提出电动汽车作为一种移动式储能资源参与电网频率控制具体的控制策略, 结合电动汽车可调用容量提出相应的调控措施。但是现有的研究对电动汽车参与电网调频实际的充放电控制策略研究较少, 因此本文针对现有研究中的不足, 提出一种电动汽车参与微电网调频的充放电控制策略, 参与微电网的调频, 提高微电网运行稳定性。

1 电动汽车充放电电路及控制结构

一般情况下, 微电网含有光伏、风电和储能等新能源发电设备, 传统燃气轮机为微电网

提供基础的电能支撑, 电动汽车通过交流母线公共连接点与交流微电网进行连接, 通过该端口开关实现交流微电网孤岛运行和独立运行的切换。参考文献[4]中的方法, 图1给出电动汽车实际充放电的电路拓扑及其控制结构。从图1中可以看出, 电动汽车控制结构包括辅助调频控制模块、充放电控制策略模块以及功率控制模块, 下面对其进行详细介绍。

2 辅助调频设计

2.1 一次调频

电动汽车参与电网调频中, 一次调频为有差调节, 设计的核心思路为: 计及电动汽车出行需求、电动汽车电池荷电状态等因素, 通过下垂控制实现对充放电功率的调节。因此, 一次调频的核心在于确定电动汽车充放电功率能够调节的上下限。

电动汽车充放电功率的上限由电动汽车当前的荷电状态以及充电桩最大充放电功率决定^[5], 计算公式为

$$P_{\max} = \min(P_{\max}, \frac{(1 - \text{SOC})Q}{\Delta t}) \quad (1)$$

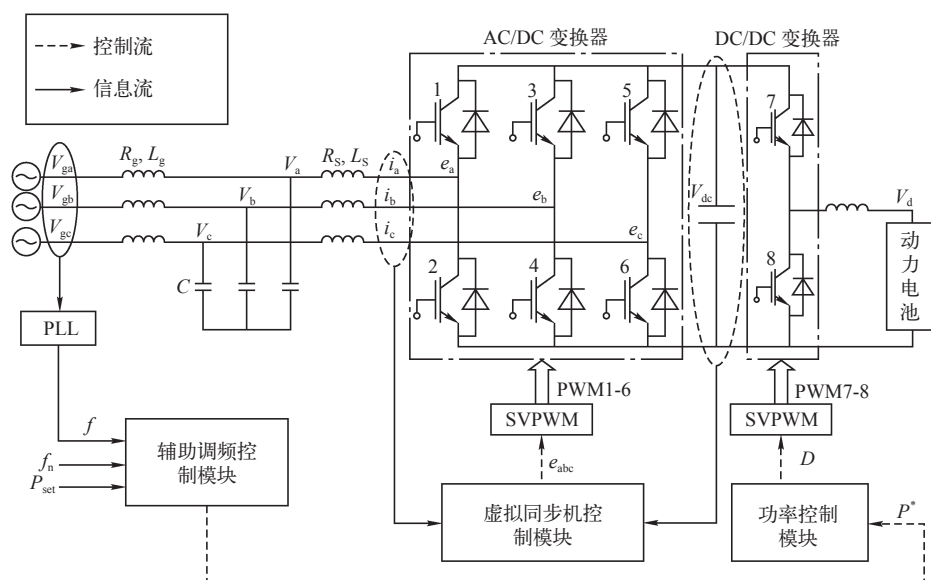


图1 电动汽车充放电变流器电路拓扑及控制结构

Fig. 1 Circuit topology and control structure of electric vehicle charging and discharging converter

式中, P_{cmax} 为充电桩最大充放电功率; SOC为该电动汽车当前时段的荷电容量; Q 为电动汽车的电池容量; Δt 为人为确定的控制时段周期。

电动汽车充放电功率的下限由电动汽车用电需求、当前电池的荷电状态以及电池的使用寿命决定。若电动汽车停留在站内时间能够调度的裕度不足, 则电动汽车参与微电网调频可调用的容量很低。考虑用户充电需求时, 为了保证电动汽车在停留站内的时间满足预设的充电需求, 那么电动汽车需要在一个调度时段后达到的最小电量高于 $\text{SOC}_{\text{min},t+\Delta t}$ 。否则电动汽车即使在后续的调度时段以最大充电功率充电, 也不能在离开时达到预设的充电需求。计算公式为

$$P_{\text{min}} = \begin{cases} \min(P_{\text{cmax}}, \frac{(\text{SOC}_{\text{min},t+\Delta t} - \text{SOC})Q}{\Delta t}), & \text{SOC}_{\text{min},t+\Delta t} - \text{SOC} > 0 \\ \max(-P_{\text{dmax}}, \frac{(\text{SOC}_{\text{min},t+\Delta t} - \text{SOC})Q}{\Delta t}), & \text{SOC}_{\text{min},t+\Delta t} - \text{SOC} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\text{SOC}_{\text{min},t+\Delta t}$ 为电动汽车下一调度时段的最小电量, 若达到最小电量, 则允许电动汽车放电, 若未达到最小电量, 则不允许电动汽车放电; P_{dmax} 为电动汽车最大允许放电电量。

由上式可知, 电动汽车参与电网一次调频时, 采用下垂特性。当频率波动在系统能够容忍的范围之内时, 电动汽车不参与频率调节; 当频率波动范围较大时, 则根据下垂控制原理来调整电动汽车的充放电功率。其中, 下垂控制系数的计算公式为

$$K_{\text{pf}} = -\frac{P - P_{\text{set}}}{f_n - f} = -\frac{\Delta P}{\Delta f} \quad (3)$$

当频率波动在系统能够容忍的范围之内时, 一次调频不起作用; 当频率波动越限时, 按照下垂控制的方式进行比例式调节。控制框图如图2所示。

2.2 二次调频

二次调频作为一种无差调节, 其在一次调频基础上, 通过增加或减少担任调频任务机组的功率实现静态频率曲线的平移, 保证系统频

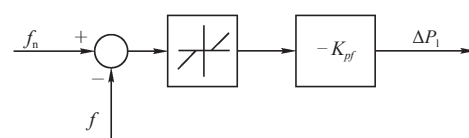


图2 一次调频控制框图

Fig. 2 Primary frequency control block diagram

率稳定在额定值附近。而电动汽车作为一种移动式储能资源, 其具有负荷特性也具有发电特性^[6]。因此二次调频的设计原则如下: 按照积差调频法, 在一次调频的基础上增加积分调节环节, 积分增益可以依据功率调节的暂态响应需求进行调整, 具体控制框图如图3所示。从图3中可以看出, 频率偏差通过积分环节得到频率偏差积分信号, 之后按照电动汽车可承担功率的比例分配给各个电动汽车, 实现无差调节。图3中, T 为充放电时间常数, 该系数是考虑到信息传递以及控制过程出现的延迟, 通过一阶惯性环节模拟电动汽车二次调频控制的完整过程。

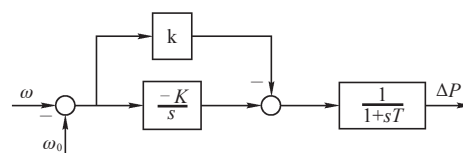


图3 二次调频控制框图

Fig. 3 Secondary frequency control block diagram

3 电动汽车充放电控制策略

一方面, 由于电动汽车参与微电网调频, 其充放电功率可能时常发生变化, 传输功率变化会对并网点处产生一定的扰动, 要求控制策略具有一定的抵御扰动的能力; 另一方面, 考虑到大量电动汽车与电网之间的能量流动变化瞬间有可能产生较大的冲击, 要求控制策略能够提供一定的柔性缓冲作用, 保证暂态过程平稳过渡。因此, 对电动汽车控制策略提出了较高的要求, 变流器作为充电机与电网的接口, 承担着交直流转换和实现与电网友好交互的职责, 而传统的控制策略功率响应过快、冲击较大、惯量缺失及对电网支撑作用不足, 无法满足运行要求。为了解决这一问题, 本文采用虚拟同步机控制算法, 克服传统控制策略的不

保持不变,微电网频率持续下降直至到达稳定状态;当电动汽车参与微电网调频时,在初始时段微电网频率下降在限值之内,电动汽车充电功率不发生变化,当微电网频率下降超越波动限值时,电动汽车充电功率发生变化,开始参与微电网的频率调节,保证微电网频率下降至一定幅度后保持稳定状态,有利于微电网的频率稳定。此外,对比EV1和EV2分别参与微电网调节的曲线可以看出,由于EV1充电功率的下限为2.5 kW,而EV2的调节范围比EV1宽,充电功率下限为2 kW,因此EV2的调节范围更广,使得微电网频率保持稳定后,EV1参与微电网频率调节时的频率偏差高于EV2参与微电网频率调节的偏差值。由以上分析可以看出,电动汽车参与微电网一次调频实现频率的有差调节,调节效果良好,充电功率的上下限对调频效果有一定的影响,可以通过设置合理的范围将微电网频率限制在一定范围内。

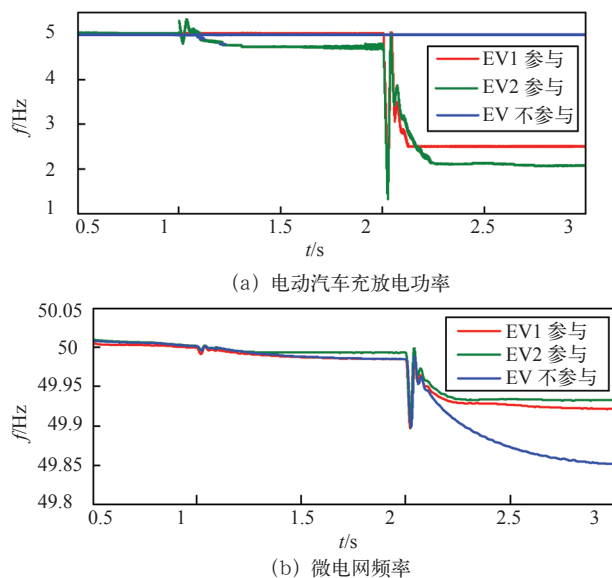


图5 一次调频仿真结果

Fig. 5 Primary frequency control simulation results

图6为二次调频仿真结果,本文提出的二次调频方案的仿真结果用红线表示,以往研究中采用单积分环节的传统二次调频仿真结果用蓝线表示。图6a、b分别展示了微电网频率和电动汽车充/放电功率,可见1 s之前电动汽车充电功率稳定在5 kW,在 $t=1\text{ s}$ 时微电网中加入

负载后,由于负荷冲击造成微电网频率下降,微电网频率稳定在49.97 Hz左右; $t=2\text{ s}$ 时加入负载,微电网中频率功率等变化情况与前面类似,由于负荷加大,微电网频率降为49.9 Hz。 $t=2.5\text{ s}$ 时加入二次调频控制,此时微电网频率已经超出设定的允许波动范围,二次调频控制进行作用。可知,在本文提出的二次调频控制环节作用下,电动汽车由充电状态变为放电状态,变化过程中最大放电功率为5 kW左右,并最终2.5 kW左右的功率放电运行,微电网频率经过0.5 s的时间升高到参考值50 Hz,调节过程中频率波动接近于0 Hz;在单独积分环节控制作用下,电动汽车由充电状态变为放电状态,变化过程中最大放电功率为10 kW左右,并最终2.5 kW左右的功率放电运行,微电网频率经过1.5 s的时间稳定到参考值50 Hz,且稳定过程中频率波动超过0.15 Hz。图6c为仿真过程中动力电池SOC的变化,相比于传统二次调频所采用的积分无差控制方法,在本文提出的二次调频控制过程中,电动汽车SOC及功率变化更平稳,对电池影响更小。

4.2 充放电控制策略效果验证

图7为不同转动惯量对虚拟同步机输出功率和角频率的影响,从图7中可以看出,随着转动惯量的增大,系统惯性增强,减缓了功率和角频率的变化速度。当转动惯量取值较小时,功率变化速度较快;当转动惯量较大时,功率的变化速度减缓,柔性缓冲作用较明显。由此可以看出,转动惯量能够增强系统惯性,具有柔性缓冲作用,能够抑制功率过快变化,确保暂态过程平稳过渡。

图8为连续时段变流器功率响应曲线。可以从图8中看出,当传输功率发生变化时,传统变流器控制策略下的暂态功率冲击较大,振荡过程较明显,对并网点处安全稳定运行不利。而虚拟同步机为并网点提供有益的惯量阻尼支撑,有效抑制功率冲击振荡过程,保证传输功率的平稳过渡,为电动汽车提供柔性缓冲接口。

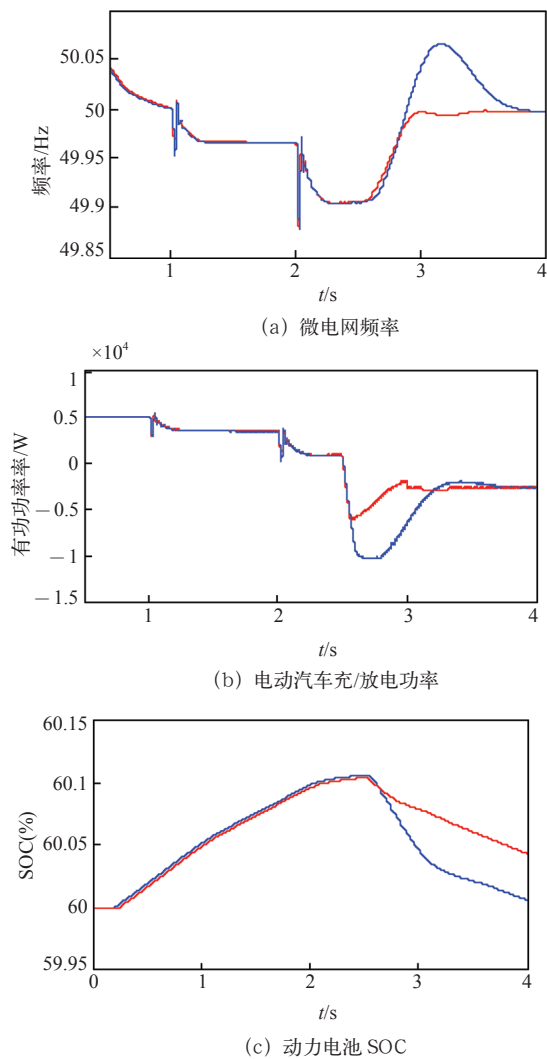


图6 二次调频仿真结果

Fig. 6 secondary frequency control simulation results

5 结束语

本文提出一种电动汽车参与孤岛运行的微电网辅助调频充放电控制策略。一方面，该控制策略能够使得大量电动汽车储能资源参与微电网调频，实现频率的无差调节；另一方面，采用虚拟同步机控制算法改善系统的暂态响应，提高微电网运行稳定性。最后通过算例仿真验证本文所提出控制策略的有效性和正确性。

参考文献

[1] 郭建龙, 文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6):

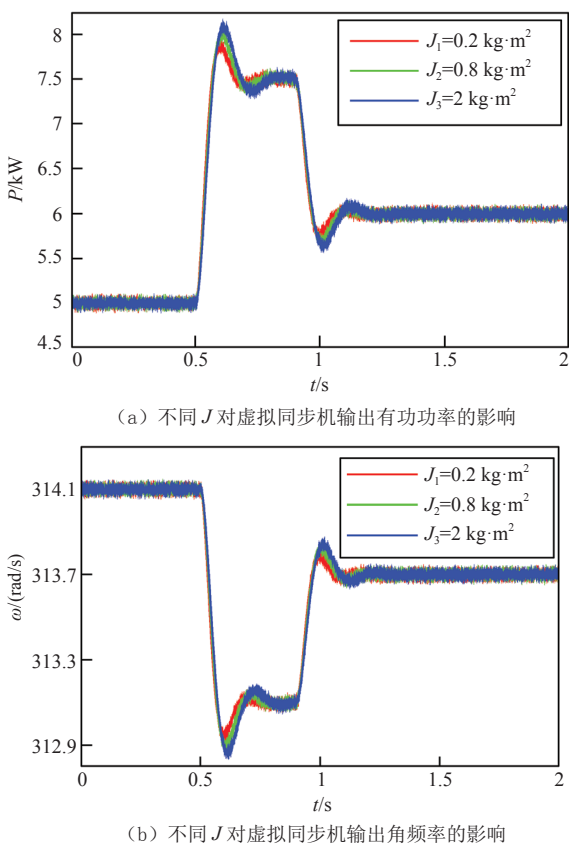


图7 不同J对虚拟同步机输出有功功率和角频率的影响

Fig. 7 Effect of different J on virtual synchronous machine output active power and angular frequency

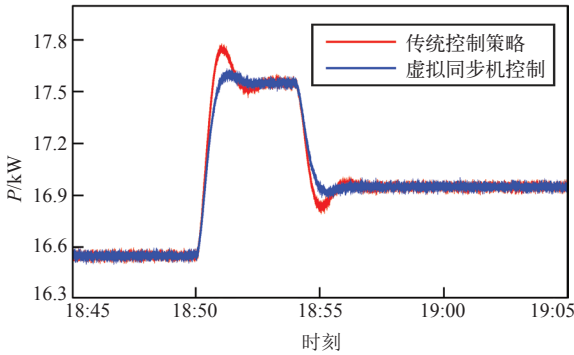


图8 不同策略下V2G变流器功率响应曲线

Fig. 8 V2G converter power response curve under different strategies

1-9.
[2] MOZINA C. Impact of green power distributed generation[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2010, 16(4): 55-62.
[3] 王建, 吴奎华, 刘志珍, 等. 电动汽车充电对配电网负荷的影响及有序控制研究[J]. 电力自动化

设备, 2013, 33(8): 47-52.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 鲍彦, 贾利民, 姜久春, 等. 电动汽车移动储能辅助频率控制策略的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 115-126.

作者简介



倪坤

倪坤 (1973-), 男, 工程师, 主要研究方向为智能配电网、配电自动化。

(收稿日期: 2019-01-18) **EA**

打造电力行业全能型服务品牌 ——东电云平台亮相上海 EP 电力展

2019年11月6日, 2019中国国际电工展 (EP电力展) 隆重开幕, 东电云平台亮相EP电力展, 受到众多媒体和观众的广泛关注。

聚合资源助行业发展

本次EP电力展, 东电云平台采用丰富的展示手段, 全方位、多角度地向社会各界展示了东电云平台在电力行业内的实力和社会影响力, 吸引了大批媒体、客户和观众驻足围观, 纷纷表达了愿与平台积极合作的意向。

长期以来, 东电云平台一直专注于电力领域, 经过多年的积累沉淀, 充分整合优化行业资源, 以“大数据+共享平台”为布局, 围绕泛在电力物联网, 向人工智能、大数据、5G、物联网和电力生态服务等领域拓展, 为电力企业服务, 为产业转型升级服务, 致力于打造一个电力行业智能、高效和前沿的全能型服务平台。

东电云平台主要为电力行业提供招标信息大数据、企业授权服务、标书制作、资质审核、检测、

认证、金融服务和互联网开发等服务, 定期召开电力会议、展览, 开设东电云学院、云商城, 建立“泛在电力物联网”孵化器等。后期将继续整合资源, 扩大服务范围, 为电力企业提供更加专业周到的一站式服务。

科技创新促行业转型

招标信息大数据, 覆盖全行业, 只需关注“东电云平台”微信公众号, 即可随时随地获取最新的招标采购信息, 每天数万条招标采购等相关信息及时更新发布, 免费向用户开放; 标书制作服务, 平台汇聚近百名专业的标书制作人员, 为企业提供标书编制、标书咨询和入企指导服务, 解决企业招投标难题; 企业授权服务, 解决电力供应商招投标及供货全流程服务; 金融服务, 解决中小微企业“融资难”、“融资贵”, 推出承兑汇票、银行保函服务和产业链金融等金融服务, 助力企业发展; 开展企业三标认证, 资质审核, 设备、材料检测报告办理。

为打通企业合作、共享信息资源, 东电云平台提供电力会议及展览, 举办全区域电力行业峰会, 整合行业优势资源, 已成功举办两届峰会。开设东电云学院, 线上+线下特色教学, 系统化提升电力行业人员的专业能力, 增强企业核心竞争力。

目前, 东电云平台业务覆盖国内34个省、市和自治区, 对企业进行专业精准高效的个性化服务和针对性赋能, 帮助企业走向产业链集权化、平台集约化、应用制度化、运营简单化和节能环保的发展道路, 助力企业轻松快速实现“互联网+”成长。针对传统电力行业提供工业互联网+解决方案, 全面实现区域产业优化升级, 为传统产业转型升级贡献平台力量。

据了解, 2020年3月27日, 东电云平台将在济南市召开第三届电力行业共商共享共赢峰会, 期待更多新老企业的参加, 探讨营销经验, 共商行业未来, 共享优势资源, 共赢发展大计! **EA**