

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.02.016

# 基于充放电裕度的电动汽车集群一次调频控制策略

吴盛军<sup>1</sup>, 曹路<sup>2</sup>, 陈浩<sup>2</sup>, 丁浩寅<sup>2</sup>, 贾勇勇<sup>1</sup>, 朱鑫要<sup>1</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 国家电网有限公司华东分部, 上海 200120)

**摘要:**针对未来电网一次调频资源不足的问题,文中提出一种基于充放电裕度的电动汽车集群虚拟储能参与电网一次调频的自适应控制策略。首先,分析电动汽车的调控运行范围。其次,研究电动汽车集群参与电网一次调频方法。考虑电动汽车充放电时间和电池荷电状态(state of charge, SOC)裕度,设计电动汽车充放电裕度指标。接着,提出基于充放电裕度的自适应一次调频控制策略,优化电动汽车参与一次调频的下垂功率,从而兼顾电网一次调频和电动汽车充放电需求。然后,通过定时更新方式评估电动汽车集群虚拟储能的一次调频能力,并提出一次调频效果评价指标。最后,通过区域电网仿真案例分析,验证所提策略减少系统频率偏差和优化电动汽车一次调频出力的有效性。

**关键词:**电动汽车集群;虚拟储能;一次调频;下垂控制;自适应控制;充电计划

**中图分类号:** TM761

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2024)02-0154-09

## 0 引言

近年来,我国能源结构处于加速构建清洁低碳、安全高效能源体系的战略转型期,电动汽车产业进入高速发展阶段,清洁能源占发电能源比例不断提高。风电、光伏等新能源发电大量接入电力系统,但其出力具有天然的波动性和随机性,导致电力系统的调频资源需求提高,此外大规模新能源及区外直流来电替代传统发电机组,导致电网惯性和调频能力进一步减弱<sup>[1-2]</sup>。一方面,电网调频资源不足的问题日益凸显,亟须增加新的调频资源。另一方面,电动汽车规模快速增长,未来不仅可能会成为电网中最大负荷之一,而且电动汽车停驶时间长、充电灵活性较强<sup>[3-4]</sup>,大规模电动汽车集群可作为优质的可调节资源,参与电网调频的潜力巨大。

文中将电动汽车及其充放电系统视为分布式储能资源,通过大量分布式储能聚合成为电动汽车集群虚拟储能系统,从而参与电网的调控运行。电动汽车集群虚拟储能及应用研究大致可以分为电动汽车充放电行为分析研究<sup>[5-7]</sup>、电动汽车集群到电网(vehicle to grid, V2G)可用容量研究<sup>[8-10]</sup>和电动汽车参与电网调控运行的研究<sup>[11-15]</sup>。其中,电动汽车参与电网调频研究方面,文献[12]以电动汽车聚合商的投标净收益最大化为目标,构建一种考虑用户响应意愿、调频信号和市场电价的多重不确定性的电动汽车聚合参与能量-调频市场的鲁棒优化模

型。文献[13]提出基于云边融合的规模化电动汽车聚合参与电网调频服务的市场流程和调度架构,预测、评估和修正电动汽车聚合调频能力。文献[14]考虑电动汽车中断退出风险,提出基于条件风险价值的中断退出风险评估方法,建立计及中断退出风险的聚合商投标决策模型。文献[15]针对电动汽车聚合商参与电网调频的调度与用户结算问题,提出结合日前电量/备用优化方法、实时功率分配、聚合商与用户收益分成机制。综上,电动汽车集群参与调频研究主要集中在电动汽车聚合的调频能力、调频市场决策和结算等技术经济层面,但较少从电动汽车的充放电时间和电池荷电状态(state of charge, SOC)裕度方面研究电动汽车集群参与电网一次调频控制方法。

目前,储能参与电网一次调频常规方法包括下垂控制和虚拟惯性控制,已有较多学者展开研究<sup>[16]</sup>,并在这2种控制方法基础上做了改进研究。文献[17-18]中储能采用下垂控制降低一次调频的稳态偏差。文献[19]提出一种基于频率偏差和储能运行状态的动态下垂控制策略,在不同的频率偏差阶段设定不同的下垂系数。文献[20-21]中储能采用虚拟惯性控制改善频率变化速度和频率偏差变化量。文献[22]通过自适应频率变化率和虚拟惯性的关系,改进虚拟惯性的储能控制策略。文献[23]以正/负虚拟惯性控制改善储能调频动态特性、下垂控制改善储能稳态特性,提出惯性与下垂控制互相配合的综合控制策略。文献[24]动态调整一次调频过程中虚拟惯性控制和虚拟下垂控制

收稿日期:2023-09-14;修回日期:2023-11-16

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2501600)

所承担的调频任务比例,根据储能电池的 SOC 自适应平滑储能出力。

储能能在改善电网一次调频性能,抑制频率扰动频率变化速率和减小稳态频率偏差等控制方法方面已有深入的研究,但电动汽车集群参与电网调频时须满足用户的充电需求,与储能电池的 SOC 控制目标不同。电动汽车集群的虚拟储能运行控制为大量的单体电动汽车充放电功率聚合调控,由于各个单体电动汽车的充放电要求不同,应在每辆电动汽车的充放电可控范围内制定合适的参与一次调频控制策略。电动汽车集群的虚拟储能在单体控制、一次调频策略和聚合评估方面与储能不同,现有研究中储能的一次调频控制方法不完全适用。

文中提出一种基于充放电裕度的电动汽车集群虚拟储能参与电网一次调频控制策略。从电动汽车的充放电时间和 SOC 裕度方面研究兼顾一次调频和充放电需求的控制策略,构建充放电裕度指标,自适应调整电动汽车参与一次调频的下垂功率,从而满足电网一次调频和电动汽车充放电需求。文中研究作为电动汽车参与一次调频提供一种低影响的控制策略,有助于提升用户参与一次调频的意愿。

## 1 电动汽车的调控分析

### 1.1 电动汽车调控影响因素

电动汽车的调控能力影响因素较多,其中电池的 SOC、额定容量和健康状态,以及电动汽车的时间分布状态是比较重要的因素,这些因素影响调控能力的程度也存在较大差异。电池 SOC 反映电动汽车动力电池的电量状态, SOC 决定电动汽车参与电网调度可以提供和吸收的电能极限值,与此时的可调度能力直接相关。电动汽车的时间分布状态决定对应虚拟储能的时间分布,即电动汽车在何时可参与到电网的调控过程。

电动汽车的使用过程伴随着动力电池的损耗,所存储的实际电能也在逐渐下降,结合电池的健康状态可以确定电池实际的可用电池容量。电池的额定容量是针对不同电动汽车车型而言的,不同的电动汽车车型有不同的电池额定容量。

### 1.2 电动汽车的调控范围

考虑上述调控能力影响因素,在不影响电动汽车正常使用需求下,分析电动汽车的调控运行范围<sup>[25-26]</sup>,如图 1 所示。

A 点为电动汽车到达充电地点进入充电状态,边界 AB 为车辆从 A 点以最大功率充至最高 SOC;

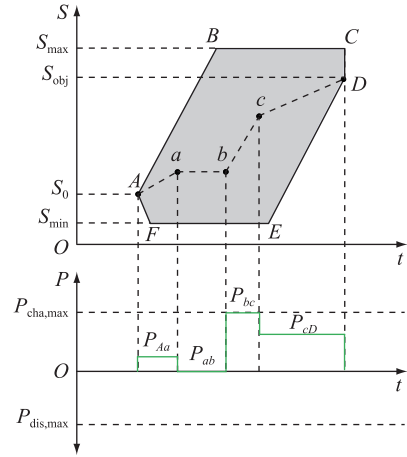


图 1 电动汽车的充放电运行区域

Fig.1 Charging and discharging operating area of electric vehicles

边界 BC 为车辆处于最高 SOC 至充电结束;边界 CD 为车辆充电结束时刻须满足的 SOC 范围;边界 ED 为车辆从 E 点以最大功率充电至结束;边界 AF 为车辆从 A 点以最大功率放电至最低 SOC;边界 FE 为车辆处于最低 SOC。由边界 ABCDEF 构成的灰色区域即为电动汽车的充放电最大运行区域。图 1 中 AabcD 为充电序列,各段充电功率分别为  $P_{Aa}$ 、 $P_{ab}$ 、 $P_{bc}$ 、 $P_{cD}$ ;  $S_0$  为充电起始时刻动态 SOC;  $S_{obj}$  为电动汽车用户设置的充电结束时目标 SOC 值。车辆离开时满足充电需求,充电过程功率调整不影响用户充电体验。电动汽车充放电过程中电池 SOC 与时间  $t$  之间的关系为:

$$S(t) = S_0 + \int_{t_0}^{t_{end}} P(t) dt / E_b \quad t_0 \leq t \leq t_{end} \quad (1)$$

式中:  $S(t)$ 、 $P(t)$  分别为车辆  $t$  时刻的动力电池 SOC 和充放电功率;  $E_b$  为动力电池容量;  $t_0$ 、 $t_{end}$  分别为充电起始和结束时刻。

电池充电功率和 SOC 满足的约束条件为:

$$P_{dis,max} \leq P(t) \leq P_{cha,max} \quad (2)$$

$$S_{min} \leq S(t) \leq S_{max} \quad (3)$$

式中:  $P_{dis,max}$ 、 $P_{cha,max}$  分别为电动汽车的最大放电功率和最大充电功率;  $S_{min}$ 、 $S_{max}$  分别为电动汽车动力电池设定的最低 SOC 和最高 SOC。

由 AB-BC-CD-DE-EF-FA 围成的区域为电动汽车充放电运行可行域,其边界可以表示为:

$$\begin{cases} AB: S(t) = P_{cha,max}(t - t_0) / E_b + S_0 \\ BC: S(t) = S_{max} \\ CD: S_{obj} \leq S(t) \leq S_{max} \\ AF: S(t) = P_{dis,max}(t - t_0) / E_b + S_0 \\ FE: S(t) = S_{min} \\ ED: S(t) = P_{cha,max}(t - t_E) / E_b + S_{min} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $t_E$ 为E点对应的充电时刻。

在电动汽车的充放电运行可行域内,可以在不影响用户充放电体验下,调整充放电功率,实现电动汽车与电网的友好互动。

## 2 电动汽车参与一次调频控制方法

电动汽车在充放电过程中,充放电功率通过电力电子控制可以实现毫秒级响应和调节。毫秒级调频资源在电网中非常稀缺和珍贵,电动汽车参与调频有利于提高电力系统的频率调节性能,电动汽车有可能成为未来电网中重要的调频资源。

电动汽车参与一次调频时,当电网频率低于或者高于规定的死区时,快速降低或者增大电动汽车充电功率,可以起到类似发电机组的一次调频效果,大规模电动汽车的功率响应能够一定程度抑制电网频率偏离额定值。电动汽车参与一次调频控制结构如图2所示,通过有功-频率下垂控制调节电动汽车计划充电功率,抑制电网频率偏离额定值。其中, $K_{EV}$ 为一次调频下垂系数。

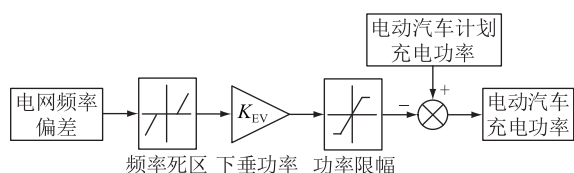


图2 电动汽车参与一次调频控制结构

Fig.2 Control structure of electric vehicles participating in a primary frequency regulation

以电动汽车充电站并网频率为一次调频参考频率,电动汽车的一次调频控制对象为正在充电的直流充电桩或者车载充电装置。通过设定频率偏差与有功功率折线函数实现一次调频响应,电动汽车充电工况的一次调频功率响应如下:

$$P_{cha,pfr} = \begin{cases} K_{EV}P_{cha,max}(f-f_L)/f_0 & f < f_L \\ 0 & f_L \leq f \leq f_H \\ K_{EV}P_{cha,max}(f-f_H)/f_0 & f > f_H \end{cases} \quad (5)$$

$$f_L = 50 - f_d \quad (6)$$

$$f_H = 50 + f_d \quad (7)$$

式中: $P_{cha,pfr}$ 为充电工况一次调频的响应功率; $f, f_0$ 分别为系统实际频率、额定频率; $f_d, f_L, f_H$ 分别为一次调频死区频率、低频死区频率、高频死区频率。

考虑V2G工况,电动汽车放电时一次调频功率响应如下:

$$P_{dis,pfr} = \begin{cases} -K_{EV}P_{dis,max}(f-f_L)/f_0 & f < f_L \\ 0 & f_L \leq f \leq f_H \\ -K_{EV}P_{dis,max}(f-f_H)/f_0 & f > f_H \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{dis,pfr}$ 为放电工况一次调频的响应功率。

## 3 基于充放电裕度的自适应一次调频策略

通过第2章频率下垂控制电动汽车充放电功率,调节电力系统有功功率与频率平衡,可以抑制电网频率偏移,不过电动汽车在参与一次调频时要兼顾电动汽车充电需求。根据电动汽车充电需求、充电时间和充电设备性能等信息制定的充电计划,在电动汽车参与一次调频时,充电计划执行将受到影响,导致未能按计划完成充电,影响用户充电体验。因此,需要协调电动汽车的一次调频功率与计划充电功率控制。

为满足电动汽车一次调频功率下垂控制和充电需求,考虑电动汽车充电时间和电池SOC裕度<sup>[26]</sup>,充电裕度指标设计如下:

$$T_{plenty} = \frac{(t_{end} - t) - (S_{obj} - S(t))E_b/P_{cha,max}}{T_{cha}} \quad (9)$$

$$S_{plenty} = S(t)/S_{obj} \quad (10)$$

式中: $T_{plenty}$ 为充电时间裕度; $T_{cha}$ 为充电富余时间常数,对电动汽车达到充电目标后的富余时间进行标幺化,文中算例 $T_{cha}$ 取0.5h; $S_{plenty}$ 为电池SOC裕度。

$$C_{plenty} = T_{plenty}S_{plenty} \quad (11)$$

式中: $C_{plenty}$ 为电动汽车充电裕度指标。

考虑电动汽车充电裕度指标,低频和高频区间自适应调整一次调频下垂功率控制如下。

(1) 当 $f < f_L$ 时:

$$P_{a,cha,pfr} = \begin{cases} 0 & C_{plenty} \leq 0 \\ C_{plenty}P_{cha,pfr} & C_{plenty} > 0 \end{cases} \quad (12)$$

(2) 当 $f > f_H$ 时:

$$P_{a,cha,pfr} = \begin{cases} P_{cha,pfr}/S_{plenty} & C_{plenty} \leq 0 \\ P_{cha,pfr}C_{plenty} & 0 < C_{plenty} < 1 \\ 0 & C_{plenty} \geq 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{a,cha,pfr}$ 为电动汽车考虑充电裕度的自适应一次调频响应功率。

当 $f < f_L$ 时, $C_{plenty} \leq 0$ 则电动汽车充电裕度不足,电动汽车不减少充电功率,即不参与一次调频; $0 < C_{plenty} < 1$ 则充电有一定裕度,电动汽车根据充电裕度指标自适应减少充电功率,即减弱下垂控制功率参与一次调频; $C_{plenty} \geq 1$ 则充电有较大裕度,电动汽车根据充电裕度指标自适应大幅减少充电功率,即增强下垂控制功率参与一次调频。

当 $f > f_H$ 时, $C_{plenty} \leq 0$ 则电动汽车充电裕度不足,电动汽车根据充电裕度指标大幅增加充电功率,即增强下垂控制功率参与一次调频; $0 < C_{plenty} < 1$

则充电有一定裕度,电动汽车根据充电裕度指标自适应增加充电功率,即减弱下垂控制功率参与一次调频; $C_{\text{plenty}} \geq 1$  则充电有较大裕度,电动汽车不增加充电功率,即不参与一次调频。

根据电动汽车充电裕度情况,单体电动汽车自适应减弱或者增加参与一次调频的充电响应功率,从而优化电动汽车充电功率,在满足充电需求基础上,电动汽车集群基本不减少参与一次调频的响应功率,保障电网的一次调频功率需求。

考虑 V2G 工况,即电动汽车向电网放电,放电裕度指标设计如下:

$$T_{\text{dplenty}} = \frac{(S(t) - S_{\text{obj}})E_b / P_{\text{dis,max}} - (t_{\text{end}} - t)}{T_{\text{dis}}} \quad (14)$$

$$D_{\text{plenty}} = T_{\text{dplenty}} S_{\text{plenty}} \quad (15)$$

式中: $T_{\text{dplenty}}$ 为放电时间裕度; $T_{\text{dis}}$ 为放电富余时间常数,对电动汽车达到放电目标后的富余时间进行标幺化,文中算例  $T_{\text{dis}}$  取 0.5 h; $D_{\text{plenty}}$ 为电动汽车放电裕度指标。

V2G 工况的自适应一次调频控制逻辑为低频区间,电动汽车有放电裕度,自适应增加放电功率;高频区间,电动汽车有放电裕度,自适应减少放电功率。

考虑电动汽车放电裕度指标,低频和高频区间自适应调整一次调频下垂功率控制如下。

(1) 当  $f < f_L$  时:

$$P_{\text{a,dis,pfr}} = \begin{cases} P_{\text{dis,pfr}} D_{\text{plenty}} & D_{\text{plenty}} \geq 0 \\ 0 & D_{\text{plenty}} < 0 \end{cases} \quad (16)$$

(2) 当  $f > f_H$  时:

$$P_{\text{a,dis,pfr}} = \begin{cases} P_{\text{dis,pfr}} / S_{\text{plenty}} & D_{\text{plenty}} \leq 0 \\ P_{\text{dis,pfr}} D_{\text{plenty}} & 0 < D_{\text{plenty}} < 1 \\ 0 & D_{\text{plenty}} \geq 1 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{\text{a,dis,pfr}}$ 为电动汽车考虑放电裕度的自适应一次调频响应功率。

基于电动汽车充电裕度的自适应一次调频策略如图 3 所示。

以电动汽车充电为例说明:

(1) 由于负荷和风电等功率扰动影响,当系统频率偏差大于调频死区阈值后,电动汽车参与电网一次调频响应,判断电动汽车充电时间和电池 SOC 裕度。

(2) 若电动汽车充电裕度  $C_{\text{plenty}} \leq 0$ ,则电动汽车继续按计划功率充电,不参与电网一次调频;若电动汽车充电裕度  $0 < C_{\text{plenty}} < 1$ ,则电动汽车按充电裕度指标自适应减弱下垂控制功率参与一次调频;

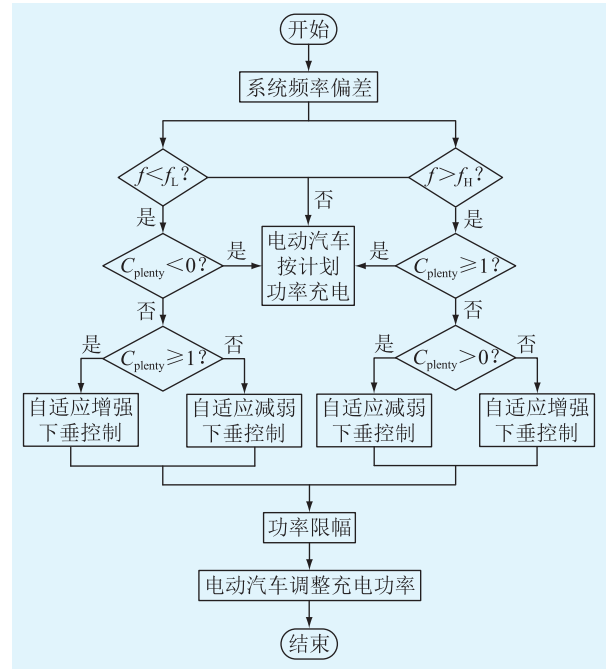


图 3 基于充电裕度的自适应一次调频策略

Fig.3 Adaptive primary frequency regulation strategy based on charging margin

若电动汽车充电裕度  $C_{\text{plenty}} \geq 1$ ,则电动汽车按充电裕度指标自适应增强下垂控制功率参与一次调频。

(3) 根据上述策略判断电动汽车充电功率是否超限,若超限则以最大充电功率运行。

电动汽车放电的一次调频策略和充电过程相似,负荷和风电等功率扰动导致频率波动,频率偏差大于调频死区阈值后,判断电动汽车放电裕度指标,然后启动自适应一次调频控制策略,不再展开叙述。

## 4 电动汽车集群虚拟储能的一次调频能力及调频评价指标

### 4.1 电动汽车集群虚拟储能的一次调频能力

电动汽车集群的实时充放电功率可以通过监控数据汇总获取,在不影响电动汽车正常使用需求下,电动汽车集群的一次调频响应功率受充放电需求和电池 SOC 影响,须根据充放电需求和电池 SOC 定时评估更新,以较为准确的获取电动汽车集群虚拟储能的一次调频能力。区域电动汽车充电功率汇总如下:

$$P_{\text{cha,k}}(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m P_{\text{cha,i,j}}(t) \quad (18)$$

式中: $i, j$ 分别为充电桩和充电站编号; $m, n$ 分别为充电桩和充电站数量; $P_{\text{cha,k}}(t)$ 为  $k$  地区  $t$  时刻的电动汽车充电总功率; $P_{\text{cha,i,j}}(t)$ 为该地区  $t$  时刻第  $j$  号充电站第  $i$  号充电桩的充电功率。

$$P_{a,cha,pfr,k}(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m P_{a,cha,pfr,i,j}(t) \quad (19)$$

式中： $P_{a,cha,pfr,k}(t)$  为  $k$  地区  $t$  时刻电动汽车在充电状态下自适应一次调频响应总功率； $P_{a,cha,pfr,i,j}(t)$  为该地区  $t$  时刻第  $j$  号充电站第  $i$  号充电桩的自适应一次调频响应功率。

考虑 V2G 工况,放电情况的区域电动汽车放电功率和自适应一次调频响应功率如下:

$$P_{dis,k}(t) = \sum_{p=1}^s \sum_{q=1}^w P_{dis,p,q}(t) \quad (20)$$

式中： $p, q$  分别为充电桩和充电站编号； $s, w$  分别为充电桩和充电站数量； $P_{dis,k}(t)$  为  $k$  地区  $t$  时刻的电动汽车放电总功率； $P_{dis,p,q}(t)$  为该地区  $t$  时刻第  $q$  号充电站第  $p$  号充电桩的放电功率。

$$P_{a,dis,pfr,k}(t) = \sum_{p=1}^s \sum_{q=1}^w P_{a,dis,pfr,p,q}(t) \quad (21)$$

式中： $P_{a,dis,pfr,k}(t)$  为  $k$  地区  $t$  时刻电动汽车在放电状态下自适应一次调频响应总功率； $P_{a,dis,pfr,p,q}(t)$  为该地区  $t$  时刻第  $q$  号充电站第  $p$  号充电桩的自适应一次调频响应功率。

根据上述公式可计算出区域电动汽车集群虚拟储能的充放电功率和自适应一次调频响应功率,通过每辆车的充放电功率及调频响应功率汇总,精细化评估该虚拟储能一次调频能力,为调度运行提供较为准确一次调频资源参考,提升电力系统频率安全水平。

#### 4.2 一次调频效果评价指标

文中采用时域指标评估一次调频策略的效果,根据功率扰动类型提出阶跃功率扰动和连续功率扰动的一次调频评价指标。电网中阶跃功率扰动通常是特高压直流系统故障或者大容量机组故障切机,引起电力系统频率快速跌落;连续功率扰动主要是负荷或者新能源功率连续扰动导致电力系统频率波动。

(1) 阶跃功率扰动的调频评价指标主要有最大频率偏差  $\Delta f_m$ 、稳态偏差  $\Delta f_s$  和频率恢复速度  $\beta$ <sup>[23]</sup>,如下。

$$\beta = (|\Delta f_m| - |\Delta f_s|) / (t_s - t_m) \quad (22)$$

式中： $t_s$  为频率偏差稳态时刻； $t_m$  为频率偏差峰值时刻。

在一次调频介入后,频率将从最大频率偏差逐步恢复到新的平衡,即频率稳态偏差状态。一次调频能力增强将减小最大频率偏差  $\Delta f_m$  和稳态偏差  $\Delta f_s$ ,提升频率恢复速度  $\beta$ 。

(2) 连续功率扰动的评价指标为频率和电池 SOC 与目标值偏差的均方根,反映频率偏离基准值

和电池 SOC 偏离目标值的离散程度<sup>[23-24]</sup>。

$$Q_f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{z=1}^N (f_z - f_0)^2} \quad (23)$$

$$Q_{soc} = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (S_{i,j} - S_{obj})^2} \quad (24)$$

式中： $Q_f, Q_{soc}$  分别为一次调频的频率和电池 SOC 评价指标； $N$  为总采样点数； $f_z$  为第  $z$  个采样点的频率； $f_0$  取 50 Hz； $S_{i,j}$  为第  $j$  号充电站第  $i$  号充电桩电动汽车充电结束时电池 SOC； $S_{obj}$  取 0.9。

## 5 算例分析

### 5.1 仿真模型介绍

在 MATLAB/Simulink 环境建立如图 4 所示区域电网的一次调频仿真模型<sup>[23,27]</sup>。为简化分析,假设该模型中一次调频资源只有传统火电和电动汽车集群。火电装机容量 100 MW,风电装机容量 40 MW,电动汽车 1 000 辆,单辆电动汽车最大充电功率 100 kW。

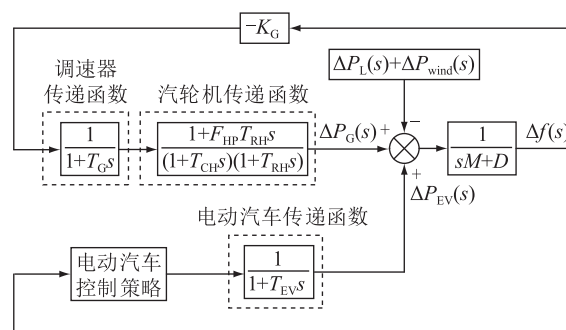


图 4 区域电网的一次调频模型

Fig.4 Primary frequency regulation model of regional power grid

图 4 中,  $s$  为拉式算子； $D$  为负荷阻尼系数； $M$  为电网惯性时间常数； $K_G$  为传统火电机组的调频下垂系数； $\Delta P_L(s)$ 、 $\Delta P_{wind}(s)$  分别为负荷和风电的扰动功率； $\Delta f(s)$  为区域电网的频率偏差； $\Delta P_{EV}(s)$  为电动汽车响应调频的功率； $\Delta P_G(s)$  为传统火电机组响应调频的功率； $T_G$  为调速器的时间常数； $F_{HP}$ 、 $T_{RH}$  分别为锅炉再热器增益和时间常数； $T_{CH}$  为汽轮机时间常数； $T_{EV}$  为电动汽车的时间常数。电力系统仿真模型参数如表 1 所示。

为对比分析所提考虑充放电裕度的自适应下垂控制策略,设计了无电动汽车、传统下垂控制策略的一次调频效果分析算例。传统下垂控制采用第 2 章电动汽车参与一次调频控制方法中所述下垂控制方法,不区分电动汽车充放电裕度,所有电动汽车采用相同下垂控制系数。

表1 电力系统仿真模型参数

Table 1 Simulation parameters of power system

仿真参数	数值
火电装机容量/MW	100
风电装机容量/MW	40
电动汽车数量	1 000
电动汽车最大充电功率/kW	100
电网惯性时间常数/s	10
锅炉再热器增益	0.5
锅炉再热器时间常数/s	10
调速器时间常数/s	0.08
汽轮机时间常数/s	0.3
电动汽车时间常数/s	0.1

## 5.2 阶跃功率扰动

在单区域电网中加入 0.03 p.u. 的阶跃功率扰动,对无电动汽车、传统下垂控制策略和文中所提自适应下垂控制策略的一次调频效果进行仿真分析,对比 3 种控制策略的调频特性,该阶跃扰动下频率偏差和电动汽车集群虚拟储能出力曲线如图 5 和图 6 所示,调频评价指标见表 2,其中  $\Delta f$  为系统频率偏差。

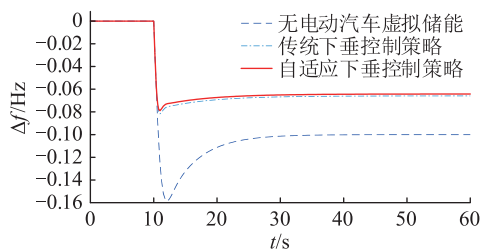


图5 阶跃功率扰动下的频率偏差曲线

Fig.5 Frequency deviation curves under step power disturbance

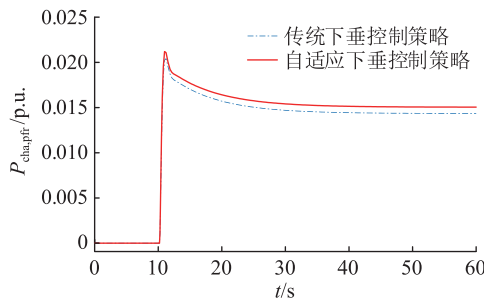


图6 阶跃功率扰动下的电动汽车出力曲线

Fig.6 Electric vehicles output curves under step power disturbance

3 种控制策略在阶跃功率扰动初期系统频率均迅速下降,在系统频率下降到低于一次调频死区后,电动汽车集群虚拟储能的一次调频快速动作,在频率下跌过程提供有功支撑,阻止系统频率的持续跌落。无电动汽车参与一次调频时,频率最大跌

表2 阶跃功率扰动下调频评价指标

Table 2 Frequency regulation evaluation index under step power disturbance

控制方法	$ \Delta f_m /\text{Hz}$	$ \Delta f_s /\text{Hz}$	$\beta/(\text{Hz}\cdot\text{s}^{-1})$
无电动汽车虚拟储能	0.158 6	0.102 0	0.003 5
传统下垂控制策略	0.081 7	0.067 7	0.010 3
自适应下垂控制策略	0.078 9	0.066 6	0.011 2

落为 0.158 6 Hz;传统下垂控制策略下频率最大跌落为 0.081 7 Hz;自适应下垂控制策略下频率最大跌落为 0.078 9 Hz。传统下垂控制策略和自适应下垂控制策略分别比无电动汽车虚拟储能的频率最大跌落少 48.49% 和 50.25%,有效提升了系统的一次调频能力。

频率恢复过程中,在传统火电机组一次调频出力基础上,加上电动汽车集群虚拟储能的一次调频出力,加速频率恢复到了新的稳态,无电动汽车、传统下垂控制策略和自适应下垂控制策略的频率恢复速度  $\beta$  分别为 0.003 5 Hz/s、0.010 3 Hz/s 和 0.011 2 Hz/s。

从图 6 可见,传统下垂控制策略和自适应下垂控制策略的电动汽车集群虚拟储能最大出力分别为 0.020 4 p.u. 和 0.021 2 p.u.,自适应下垂控制策略根据电动汽车充电裕度,优化了电动汽车的一次调频出力,提升了一次调频支撑能力。

## 5.3 短时连续功率扰动

连续功率扰动曲线如图 7 所示,仿真对比 3 种控制策略下的 5 min 连续功率扰动,得到系统频率偏差曲线、电动汽车虚拟储能出力曲线分别如图 8 和图 9 所示,调频评价指标如表 3 所示,其中  $\Delta P$  为系统功率扰动。

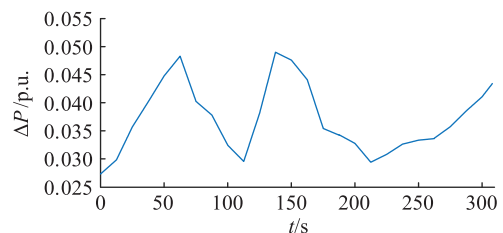


图7 5 min 连续功率扰动曲线

Fig.7 5 min continuous power disturbance curve

## 5.4 长时间连续功率扰动

进一步仿真对比 30 min 的连续功率扰动如图 10 所示,3 种控制策略下的一次调频特性,系统频率偏差曲线、电动汽车虚拟储能出力曲线分别如图 11 和图 12 所示,调频评价指标如表 4 所示。

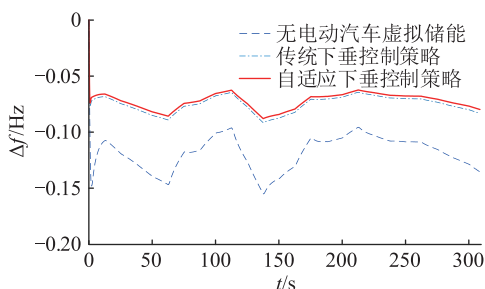


图 8 5 min 连续功率扰动下的频率偏差曲线  
Fig.8 Frequency deviation curves under 5 min continuous power disturbance

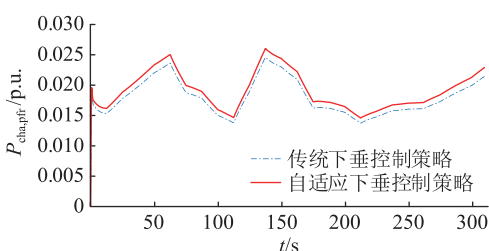


图 9 5 min 连续功率扰动下的电动汽车出力曲线  
Fig.9 Electric vehicles output curves under 5 min continuous power disturbance

表 3 5 min 连续功率扰动下调频评价指标  
Table 3 Frequency regulation evaluation indexes under 5 min continuous power disturbance

控制方法	$Q_f$	$Q_{soc}$
无电动汽车虚拟储能	0.118 7	
传统下垂控制策略	0.075 0	0.295 8
自适应下垂控制策略	0.072 3	0.290 2

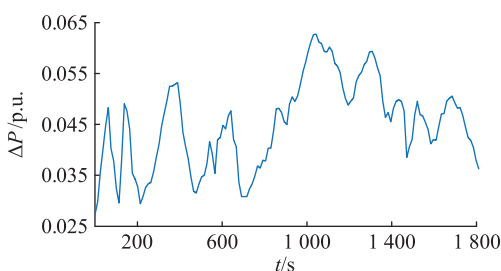


图 10 30 min 连续功率扰动曲线  
Fig.10 30 min continuous power disturbance curve

从图 11 可见,2 种下垂控制策略的系统频率偏差始终小于无电动汽车虚拟储能参与一次调频的情况。由图 12 可知,自适应下垂控制策略参与一次调频的功率略大于传统下垂控制策略,经计算,自适应下垂控制策略因参与一次调频减少充电量为 1 161 kW·h;传统下垂控制策略减少充电量为 1 085 kW·h。尽管自适应下垂控制策略参与一次调频的功率和电量更多,但自适应下垂控制策略的评价指标  $Q_{soc}$  为 0.236 2;传统下垂控制策略的  $Q_{soc}$  为 0.259 8,表明自适应下垂控制策略的电池 SOC 的统

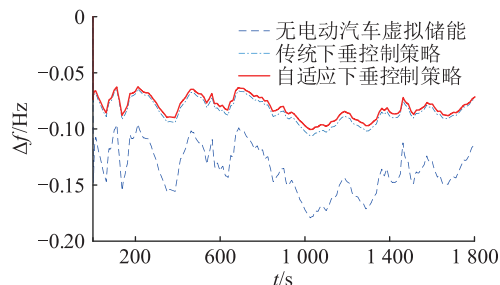


图 11 30 min 连续功率扰动下的频率偏差曲线  
Fig.11 Frequency deviation curve under 30 min continuous power disturbance

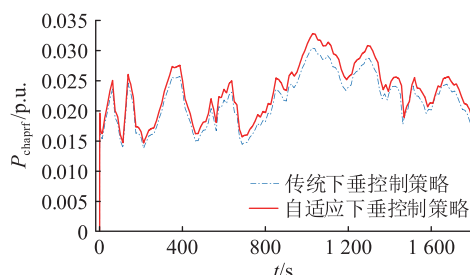


图 12 30 min 连续功率扰动下的电动汽车出力曲线  
Fig.12 Electric vehicles output curves under 30 min continuous power disturbance

表 4 30 min 连续功率扰动下调频评价指标  
Table 4 Frequency regulation evaluation indexes under 30 min continuous power disturbance

控制方法	$Q_f$	$Q_{soc}$
无电动汽车虚拟储能	0.137 6	
传统下垂控制策略	0.084 9	0.259 8
自适应下垂控制策略	0.081 2	0.236 2

计数据更接近充电目标值。这是因为自适应下垂控制策略根据充电裕度优化参与一次调频的下垂功率,充电裕度大的电动汽车自适应增加一次调频功率,充电裕度小的电动汽车自适应减少一次调频功率,无充电裕度的电动汽车不参与一次调频,在集群内部自适应调整一次调频的出力。

电动汽车集群虚拟储能自适应下垂控制策略一次调频效果与电动汽车集群的充放电裕度有关,算例是有充放电裕度的情况,得出所提的自适应下垂控制策略效果优于传统下垂控制。综上所述,文中所提的电动汽车集群虚拟储能自适应下垂控制策略,根据充电裕度优化一次调频的下垂功率,在满足一次调频要求时,兼顾电动汽车的充电需求,降低因电动汽车参与一次调频影响充电体验,具有工程应用意义。

## 6 结论

文中提出一种基于充放电裕度的电动汽车集群虚拟储能参与电网一次调频控制策略。考虑电

网一次调频功率和电动汽车用户充电需求,设计充放电裕度指标,提出基于充放电裕度的电动汽车集群自适应一次调频控制策略,实现电网一次调频与电动汽车充电的友好互动。

(1) 电动汽车充放电有一定的调控运行范围,在不影响用户充放电体验下,调整充放电功率,可以实现电动汽车与电网的友好互动。

(2) 在电动汽车充放电裕度较大情况,电动汽车集群虚拟储能参与电网一次调频在阶跃功率扰动、短时和长时间连续功率扰动工况都能减少系统频率偏差,加快频率恢复速度,提升系统一次调频能力。

(3) 文中的自适应下垂控制策略,在电动汽车集群内部优化一次调频的出力,整体上减少因参与一次调频导致的SOC偏离情况,降低对电动汽车使用的影响。

文中从控制方法角度提出兼顾一次调频与充放电需求的电动汽车集群虚拟储能自适应参与电网一次调频策略,未考虑用户的参与意愿和补偿措施等因素,后续将进一步开展电动汽车集群虚拟储能的调度运行与商业模式研究。

#### 参考文献:

- [1] 徐贤,陆晓,周挺,等. 华东电网一次调频能力量化评估及运行控制策略[J]. 电力工程技术,2021,40(2):205-211,219.  
XU Xian, LU Xiao, ZHOU Ting, et al. Evaluation method and operation control strategy of primary frequency response for East China Grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2):205-211,219.
- [2] 李华,李献伟,张鹏,等. 考虑负荷频率特性的新能源场站一次调频控制方法[J]. 供用电,2022,39(1):81-87.  
LI Hua, LI Xianwei, ZHANG Peng, et al. Primary frequency modulation control regulation of new energy stations considering the load frequency characteristic [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(1):81-87.
- [3] CAPUDER T, MILOŠ SPRIC D, ZORICIC D, et al. Review of challenges and assessment of electric vehicles integration policy goals; integrated risk analysis approach [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 119:105894.
- [4] 范培潇,胡文平,温裕鑫,等. 基于可进化PID的含电动汽车孤岛微电网负荷频率控制策略[J]. 全球能源互联网,2023(3):258-265.  
FAN Peixiao, HU Wenping, WEN Yuxin, et al. A load frequency control strategy of island microgrid with V2G based on evolutionary-PID [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023(3):258-265.
- [5] 李琳玮,宁光涛,俞悦,等. 基于交通信息的多类型电动汽车综合充电需求研究[J]. 电力工程技术,2020,39(1):191-199.  
LI Linwei, NING Guangtao, YU Yue, et al. Comprehensive charging demand of multi-type electric vehicles based on traffic information [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1):191-199.
- [6] 邵成成,李徐亮,钱涛,等. 基于交通均衡的电动汽车快速充电负荷模拟[J]. 中国电机工程学报,2021,41(4):1368-1376.  
SHAO Chengcheng, LI Xuliang, QIAN Tao, et al. Simulation of EV fast charging load based on traffic equilibrium [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4):1368-1376.
- [7] BUZNA L, DE FALCO P, FERRUZZI G, et al. An ensemble methodology for hierarchical probabilistic electric vehicle load forecasting at regular charging stations [J]. Applied Energy, 2021, 283:116337.
- [8] WEI H Q, ZHANG Y T, WANG Y Z, et al. Planning integrated energy systems coupling V2G as a flexible storage [J]. Energy, 2022, 239:122215.
- [9] 周椿奇,向月,童话,等. 轨迹数据驱动的电动汽车充电需求及V2G可调容量估计[J]. 电力系统自动化,2022,46(12):46-55.  
ZHOU Chunqi, XIANG Yue, TONG Hua, et al. Trajectory-data-driven estimation of electric vehicle charging demand and vehicle-to-grid regulable capacity [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12):46-55.
- [10] 王吉兴,余洋,米增强,等. 考虑响应不确定性的电动汽车集群可调度容量评估方法[J]. 浙江电力,2022,41(5):1-7.  
WANG Jixing, YU Yang, MI Zengqiang, et al. An estimation method for schedulable capability of aggregated electric vehicles considering response uncertainty [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(5):1-7.
- [11] 郭建府,赵松,韩晓娟. 基于冗余配置的电动汽车虚拟储能参与电网调峰研究[J]. 热力发电,2020,49(8):162-168.  
GUO Jianfu, ZHAO Song, HAN Xiaojuan. Research on electric vehicles virtual energy storage based on redundant configuration participating in power grid peak shaving [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8):162-168.
- [12] 徐湘楚,米增强,詹泽伟,等. 考虑多重不确定性的电动汽车聚合商参与能量-调频市场的鲁棒优化模型[J]. 电工技术学报,2023,38(3):793-805.  
XU Xiangchu, MI Zengqiang, ZHAN Zewei, et al. A robust optimization model for electric vehicle aggregator participation in energy and frequency regulation markets considering multiple uncertainties [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3):793-805.
- [13] 陈文哲,孙海顺,徐瑞林,等. 电动汽车参与调频服务的云边融合分层调控技术研究[J]. 中国电机工程学报,2023,43(3):914-926.  
CHEN Wenzhe, SUN Haishun, XU Ruilin, et al. Cloud-edge collaboration based hierarchical dispatch technology for EV participating in frequency regulation service [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3):914-926.
- [14] 李永刚,孙浩瀚,周一辰,等. 考虑新增电动汽车充放电中断风险的聚合商调频辅助服务投标策略[J]. 电力自动化



- 设备,2022,42(10):3-12.
- LI Yonggang, SUN Haochao, ZHOU Yichen, et al. Frequency regulation auxiliary service bidding strategy for aggregators considering charging and discharging interruption risk of newly added electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(10):3-12.
- [15] 吴洲洋,艾欣,胡俊杰. 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):1041-1049.
- WU Zhouyang, AI Xin, HU Junjie. Dispatching and income distributing of electric vehicle aggregators participation in frequency regulation [J]. Power System Technology, 2021, 45(3):1041-1049.
- [16] 叶林,王凯丰,赖业宁,等. 低惯量下电力系统频率特性分析及电池储能调频控制策略综述[J]. 电网技术,2023,47(2):446-462.
- YE Lin, WANG Kaifeng, LAI Yening, et al. Review of frequency characteristics analysis and battery energy storage frequency regulation control strategies in power system under low inertia level [J]. Power System Technology, 2023, 47(2):446-462.
- [17] 陈良,李欣然,黄际元,等. 基于幅频特性的储能系统参与调频的效果评价方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(1):22-29.
- CHEN Liang, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Effect evaluation method for energy storage system participating in frequency regulation based on amplitude-frequency characteristics [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(1):22-29.
- [18] 马骏超,周洁洁,江全元,等. 储能参与一次调频的优化控制策略研究[J]. 浙江电力,2021,40(9):1-9.
- MA Junchao, ZHOU Jiejie, JIANG Quanyuan, et al. Study on optimal control strategy of primary frequency regulation of energy storage power station[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(9):1-9.
- [19] 李军徽,高卓,应鸿,等. 基于动态下垂系数与SOC基点的储能一次调频控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(5):1-10.
- LI Junhui, GAO Zhuo, YING Hong, et al. Primary frequency regulation control strategy of energy storage based on dynamic droop coefficient and SOC reference[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5):1-10.
- [20] 邓霞,孙威,肖海伟. 储能电池参与一次调频的综合控制方法[J]. 高电压技术,2018,44(4):1157-1165.
- DENG Xia, SUN Wei, XIAO Haiwei. Integrated control strategy of battery energy storage system in primary frequency regulation[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4):1157-1165.
- [21] 秦晓辉,苏丽宁,迟永宁,等. 大电网中虚拟同步发电机惯量支撑与一次调频功能定位辨析[J]. 电力系统自动化,2018,42(9):36-43.
- QIN Xiaohui, SU Lining, CHI Yongning, et al. Functional orientation discrimination of inertia support and primary frequency regulation of virtual synchronous generator in large power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9):36-43.
- [22] 李美依,黄文焘,邵能灵,等. 频率扰动下虚拟同步电机控制型分布式电源自适应惯性控制策略[J]. 电网技术,2020,44(4):1525-1533.
- LI Meiyi, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Adaptive inertial control strategy for inverter interfaced distributed generator based on virtual synchronous generator under frequency disturbances[J]. Power System Technology, 2020, 44(4):1525-1533.
- [23] 吴启帆,宋新立,张静冉,等. 电池储能参与电网一次调频的自适应综合控制策略研究[J]. 电网技术,2020,44(10):3829-3836.
- WU Qifan, SONG Xinli, ZHANG Jingran, et al. Study on self-adaptation comprehensive strategy of battery energy storage in primary frequency regulation of power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(10):3829-3836.
- [24] 李军徽,高卓,李翠萍,等. 基于动态任务系数的储能辅助风电一次调频控制策略[J]. 电力系统自动化,2021,45(19):52-59.
- LI Junhui, GAO Zhuo, LI Cuiping, et al. Control strategy for dynamic task coefficient based primary frequency regulation of wind power assisted by energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19):52-59.
- [25] DENG R Q, XIANG Y, HUO D, et al. Exploring flexibility of electric vehicle aggregators as energy reserve[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 184:106305.
- [26] 张亚朋,穆云飞,贾宏杰,等. 电动汽车虚拟电厂的多时间尺度响应能力评估模型[J]. 电力系统自动化,2019,43(12):94-103.
- ZHANG Yapeng, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Response capability evaluation model with multiple time scales for electric vehicle virtual power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12):94-103.
- [27] 刘辉,吴晓鸣,苏懿. 基于动态下垂控制的温控负荷一次调频控制策略[J]. 电力工程技术,2023,42(2):48-57.
- LIU Hui, WU Xiaoming, SU Yi. Thermostatically controlled loads control for primary frequency regulation based on dynamic droop control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2):48-57.

作者简介:



吴盛军

吴盛军(1988),男,博士,高级工程师,从事新能源发电及储能应用工作(E-mail:wsj33-3@163.com);

曹路(1971),男,博士,研究员级高级工程师,从事电网调度运行、电力系统分析与控制工作;

陈浩(1984),男,硕士,高级工程师,从事电网调度运行、电力系统分析与控制工作。

## Simulation analysis of arc extinguishing performance of $C_4F_7N/CO_2$ gas with under impulse arc

WU Dong, CHEN Wengui

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Automation Technology (Guilin University of Technology),  
Education Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin 541006, China)

**Abstract:** Currently, the  $C_4F_7N/CO_2$  hybrid gas is regarded as one of the most promising  $SF_6$  substitutes. In order to explore the arc quenching capabilities of the  $C_4F_7N/CO_2$  gas mixture, a set of arc energy balance equations is developed in accordance with the arc energy balance theory to determine the change law of overpressure within the arc-quenching pipe with time. In the paper, COMSOL Multiphysics software is used to establish a two-dimensional magneto-hydrodynamic model of the arc quenching structure of the pressure-explosive gas flow lightning gap, and the arc quenching characteristics of the different ratios of  $C_4F_7N/CO_2$  gas mixtures in the pipeline are simulated and analyzed in the condition that the amplitude of the lightning current is 4 kA under the action of the impulse arc. Based on the above method, the change laws of conductivity, velocity and pressure are analyzed in the model by combining the arc energy balance theory. When compared to the theoretical results, it can be shown that 20%  $C_4F_7N/80\%CO_2$  extinguishes arcs more effectively than 10%  $C_4F_7N/90\%CO_2$  or 5%  $C_4F_7N/95\%CO_2$  does, while the arc quenching time is in line with the specifications for air blowing to extinguish arcs.

**Keywords:**  $C_4F_7N/CO_2$  hybrid gas; arc quenching capabilities; arc energy balance theory; magneto-hydrodynamic model; impulse arc; arc quenching time

(编辑 方晶)

(上接第 162 页)

## Primary frequency regulation control strategy for electric vehicle aggregation based on charging and discharging margin

WU Shengjun<sup>1</sup>, CAO Lu<sup>2</sup>, CHEN Hao<sup>2</sup>, DING Haoyin<sup>2</sup>, JIA Yongyong<sup>1</sup>, ZHU Xinyao<sup>1</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. East China Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of insufficient primary frequency regulation resources of power grid in the future, an adaptive control strategy based on charging and discharging margin is proposed for virtual energy storage of electric vehicle aggregation to participate in primary frequency regulation of power grid. Firstly, regulatory and operating range of the electric vehicle is analyzed. Secondly, the primary frequency regulation method of electric vehicle aggregation participating in the power grid is studied. Considering the margin of charging and discharging time and state of charge (SOC), charging and discharging margin index of electric vehicles is designed. Then, an adaptive primary frequency regulation control strategy based on charging and discharging margin is proposed to optimize the droop power of electric vehicles participating in primary frequency regulation, which considers both requirements of primary frequency regulation of power grid and charging, discharging of electric vehicles. Then, the primary frequency regulation capability of virtual energy storage in electric vehicle aggregation is evaluated by regular update, and the evaluation index of primary frequency regulation effect is proposed. Finally, through the simulation analysis of regional power grid cases, the effectiveness of the proposed strategy in reducing the system frequency deviation and optimizing the primary frequency regulation output of electric vehicles is verified.

**Keywords:** electric vehicle aggregation; virtual energy storage; primary frequency regulation; droop control; adaptive control; charging plans

(编辑 吴昊)