DOI:10.14188/j.1671-8844.2024.0082　　文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-12

考虑多充电站调控能力的VSG动态一致性控制策略

张帆[1,2],熊亮[3],施兴烨[4,5],黄城[3],钱斌[1,2],林伟斌[1,2],杨军[4,5]

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司,广东 广州 510663; 2. 广东省电网智能量测与先进计量企业重点实验室,广东 广州 510663; 3. 广东电网有限责任公司肇庆供电局,广东 肇庆 526060; 4. 交直流智能配电网湖北省工程中心,湖北 武汉 430072; 5. 武汉大学电气与自动化学院,湖北 武汉 430072)

摘要:电动汽车参与调频应用发展迅速,针对分布式充电站协同调频问题,首先,提出基于充电站的虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制方法,考虑用户需求建立充电站响应能力模型;然后,计及用户充电体验,基于充电站调控能力,设计了充电站电动汽车分类调频功率分配策略;最后,基于多智能体一致性算法实现了异质性充电站VSG的协同调频控制。仿真结果表明,所提方法能有效评估充电站集群调控能力,在满足用户使用需求的基础上,合理分配电动汽车调频功率;一致性算法有效实现异质性充电站VSG间的协同调频目标,充分利用充电站的调频能力,维持系统频率稳定。

关键词:电动汽车;调控能力;虚拟同步机;多智能体;一致性算法

中图分类号:TM 761　**文献标志码:**A

VSG dynamic consistency control strategy considering the control capability of multiple charging stations

ZHANG Fan[1,2], XIONG Liang[3], SHI Xingye[4,5], HUANG Cheng[3], QIAN Bin[1,2], LIN Weibin[1,2], YANG Jun[4,5]

(1. Electric Power Research Institute Co., Ltd., China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Measurement and Advanced Metering of Power Grid, Guangzhou 510663, China; 3. Zhaoqing Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhaoqing 526060, China; 4. Hubei Engineering and Technology Research Center for AC/DC Intelligent Distribution Network, Wuhan 430072, China; 5. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The application of electric vehicles participating in frequency modulation is developing rapidly. For the problem of coordinated frequency modulation of distributed charging stations, firstly, the VSG control method based on charging station is proposed, and the response capability model of charging station is established considering user's demand. Further, considering the user's charging experience, based on the control ability of the charging station, the classified frequency modulation power allocation strategy is designed. Finally, the collaborative frequency modulation control of heterogeneous charging station VSG is realized based on multi-agent consistency algorithm. The simulation results show that the proposed method can effectively evaluate the cluster control ability of charging stations, and reasonably allocate the frequency modulation power

收稿日期:2024-12-28

作者简介:张帆(1996-),男,工程师,从事车网双向互动技术、电动汽车无线充电技术研究,E-mail:zhangfan4@csg.cn。

通信作者:施兴烨(1999-),男,硕士研究生,从事柔性负荷优化调度、微电网运行控制研究,E-mail: shixy1222@ whu.edu.cn。

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(编号:031200KK52222008)。

本文引用格式:张帆,熊亮,施兴烨,等.考虑多充电站调控能力的VSG动态一致性控制策略[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-12.

Citation:ZHANG Fan, XIONG Liang, SHI Xingye, et al. VSG dynamic consistency control strategy considering the control capability of multiple charging stations[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-12.

of EVs on the basis of meeting the user demand. The consistency algorithm can effectively achieve the target of cooperative frequency modulation among VSG of heterogeneous charging stations, make full use of the frequency modulation ability of charging stations, and maintain the frequency stability of the system.

Key words: electric vehicle; potential ability; virtual synchronous generator; multi-agent; consensus algorithm

电动汽车(electric vehicle, EV)的快速发展促进了电网向高比例电力电子型转化[1-2],给电网带来深刻影响,同时促进了车网互动(vehicle to grid, V2G)技术的发展[3]。其中,EV并网参与调频服务成为目前的研究热点之一。

由于EV并网逆变器缺乏与同步机类似的转子结构,大量EV入网会导致电力系统惯量水平不足、抗扰能力下降,传统V2G技术不能有效发挥EV参与调频的能力。虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制策略作为解决该问题的有效手段受到广泛关注[4]。将VSG控制应用于V2G技术可使EV在参与调频的过程中为系统提供惯量支撑与阻尼特性,从而提高其抗扰动能力。文献[5]设计了EV-VSG控制方案,有效提高了低惯量微电网频率稳定性;文献[6]将充电站(charging station, CS)内EV等效为储能,设计了基于CS的VSG控制策略,有效平抑微电网中光伏与负荷波动,改善系统频率特性;文献[7]在传统EV-VSG控制策略基础上结合模型预测控制,提高了EV-VSG的动态性能;文献[8]在考虑EV用户需求的基础上,设计了CS-VSG辅助调频控制策略,当EV数量较多时调频效果显著,可有效降低系统频率波动、提高系统稳定性;文献[9]利用VSG控制策略实现对EV聚合商的充电控制,通过控制EV充电功率实现微电网内的频率调整。但上述研究未对CS中EV的可控能力进行有效评估,忽略了不同EV参与调频时响应能力的差异,导致调频任务与用户需求难以协调,EV响应能力未能充分利用,影响用户体验。同时,由于单体CS-VSG调频能力有限,且实际微电网中存在多个CS-VSG并联运行的场景,因此多CS-VSG协同调频问题需进一步研究。此外,由于CS-VSG随机分布带来的并网阻抗不一致等问题的影响,CS-VSG间不可避免地存在功率分配不均及并联振荡等问题[10],因此,有必要在CS-VSG间引入二次控制,以实现系统频率的恢复和精确的功率分配,充分发挥CS-VSG的调频能力。

传统的二次控制方法为集中式控制[11-12],主要特征是通过中央控制器对微电网进行统一管理,这严重依赖中央控制器的可靠性,同时无法发挥CS参与调频即插即用的优点。随着多智能体系统(multi-agent systems, MAS)分布式控制技术的发展,分布式控制方式被广泛应用于微电网的二次控制。MAS分布式控制方法多应用于基于传统下垂控制的微电网,基于VSG控制的二次控制研究相对滞后[13-16]。文献[17-18]提出多VSG的分布式二次控制,实现了多VSG有功比例分配及频率一致性,然而却没有考虑多VSG二次调频的协同恢复问题;文献[19]提出抑制频率振荡的分布式VSG二次控制方案,但由于控制中不交换频率信息,在线路阻抗与负载不同的影响下不能消除频率偏差。上述文献中,为保持多VSG协同控制的稳定性,各控制器的参数设定保持一致。然而,当CS以VSG的形式参与调频时,CS调控能力会随EV的随机性需求与充电状态发生变化,不可避免存在因CS-VSG参数差异而导致的CS-VSG间并联功率环流与功率分配问题。

综上,为合理利用EV资源调节系统频率,需在顾及用户充电需求的基础上合理评估CS的调节能力,同时考虑不同参数CS-VSGs的协同控制。因此,本文提出一种考虑异质CS调控能力的VSG动态一致性控制策略。首先,提出一种考虑CS调控能力的VSG控制架构,通过建立CS调控模型评估CS调控能力,进而结合CS-VSG架构实现系统频率恢复;其次,提出一种反映EV参与调频的响应能力评估模型,并设计了站内EV功率分配控制策略,通过EV集群分类响应,最大程度避免EV放电,提升充电体验;再次,基于分布式充电站协同网络,提出多目标分布式CS-VSG协同控制策略,实现不同CS-VSG的协同调频控制;最后,在Simulink中搭建多CS-VSG微电网模型进行仿真分析,验证本文方法的有效性。

1 基于CS可调能力的VSG控制策略

1.1 VSG控制基本原理

逆变器结构中缺乏实际的转子结构,因而缺少惯量,VSG控制策略通过将同步发电机的转子运动方程与电磁暂态方程加入到逆变器并网控制算法中,使得逆变器具有类似同步发电机的调频功能与惯量特性。

当系统中存在功率不平衡偏差时，在不平衡功率引起的转矩作用下，VSG的功角特性与频率特性可以表示如下：

$$\begin{cases} \mathrm{d}\delta/\mathrm{d}t=\omega-\omega_{\mathrm{n}} \\ \mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t=(T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{e}}-T_{\mathrm{D}})/J \end{cases} \tag{1}$$

式中：δ为VSG的转子功角；ω为VSG的电气转动角速度；t为时间；ω_{n}为额定转子角速度，本文取为100π rad/s；T_{m}、T_{e}和T_{D}分别为VSG的输入转矩、输出转矩和阻尼转矩；J为VSG的虚拟转动惯量。

根据转矩与功率的关系，VSG的转子运动方程可由VSG的频率特性方程改写得到：

$$J\,\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}t=P_{\mathrm{m}}/\omega-P_{\mathrm{e}}/\omega-D(\omega-\omega_{\mathrm{n}}) \tag{2}$$

式中：P_{m}为VSG的输入功率；P_{e}为电磁功率，即VSG的输出功率；D为VSG的虚拟阻尼系数。

1.2　CS-VSG控制架构

VSG控制算法为逆变器带来了一次调频功能与虚拟惯性支撑能力，然而在负载波动时，仅靠上述控制机制调节频率，稳定点会产生偏移，为使频率得到恢复，需在综合考虑充电站调节能力的基础上设计二次控制器，将CS的调频能力作为VSG的有功-频率控制器的前馈补偿，即有：

$$P_{\mathrm{m}}=P_{\mathrm{set}}+\Delta P_{\mathrm{m\text{-}ev}} \tag{3}$$

式中：P_{set}为CS-VSG的有功指令功率，对应当前CS的等效用电需求；$\Delta P_{\mathrm{m\text{-}ev}}$为CS二次控制器提供的反馈补偿功率。

含CS-VSG的控制拓扑架构如图1所示，CS二次控制器可以通过接受控制中心的调节信息以及检测微电网中的频率来调整CS-VSG的功率输出，通过合理分配手段实现CS内功率响应在EV间分配以提供相应的调频能力。利用CS-VSG实现微电网频率调节控制关键在于：1）考虑EV用户需求建立CS的V2G功率响应模型，准确评估CS-VSG的可调控能力；2）在实时响应控制阶段，CS中EV的功率分配策略通过考虑不同EV的综合状态进行设计；3）设计CS间的二次控制策略，实现多CS信息交互，以确定CS间功率响应分配。

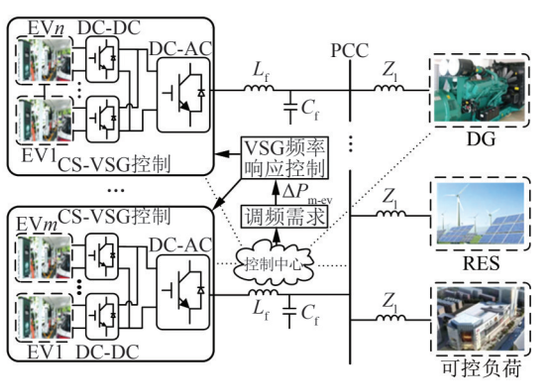


图1　含CS-VSG的控制拓扑架构

Fig.1　Control topology architecture with CS-VSG

1.3　CS等效调控能力评估模型

CS-VSG的功率输出P_{m}受到站内EV充电需求因素的限制，因此需在考虑EV需求的基础上对站内EV的等效可调节容量进行等效评估，为CS-VSG响应调频信号提供可调能力依据。

假设电动汽车i的并离网时刻分别为t_{a}、t_{l}，并网初始电量为$E_{i,0}$，充电需求电量为E_{need}，根据使用需求，其离网时荷电状态应不低于需求电量。因此，其接入充电桩后充电过程可行域可由图2等效描述，可行域上下边界如下[20]：

$$E_{i,t}^{+}=\begin{cases} 0, & t<t_{\mathrm{a}} \\ E_{i,0}, & t=t_{\mathrm{a}} \\ \min\{E_{i,t-1}+P_{i,\max}^{\mathrm{ch}}\Delta t,E_{i,\max}\}, & t_{\mathrm{a}}<t\leqslant t_{\mathrm{l}} \\ 0, & t>t_{\mathrm{l}} \end{cases} \tag{4}$$

$$E_{i,t}^{-}=\begin{cases} 0, & t<t_{\mathrm{a}} \\ E_{i,0}, & t=t_{\mathrm{a}} \\ \max\{E_{i,t-1}+P_{i,\max}^{\mathrm{dis}}\Delta t,E_{i,\min},E_{\mathrm{need}}-P_{i,\max}^{\mathrm{ch}}(t_{\mathrm{l}}-t)\Delta t\}, & t_{\mathrm{a}}<t\leqslant t_{\mathrm{l}} \\ 0, & t>t_{\mathrm{l}} \end{cases} \tag{5}$$

式中：$E_{i,t}^{-}$、$E_{i,t}^{+}$分别为时刻t的荷电量下界、上界；$E_{i,t-1}$为时刻$t-1$的荷电量；$E_{i,\max}$、$E_{i,\min}$分别为能接受的最大、最小荷电量；$P_{i,\max}^{\mathrm{ch}}$、$P_{i,\max}^{\mathrm{dis}}$分别为最大充、放电功率。

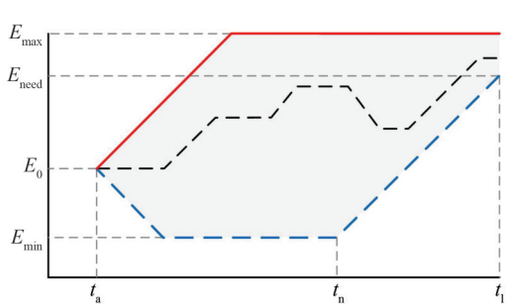


图2　单辆EV充电过程可行域

Fig.2　Feasible range of single EV charging process

文献[21]指出EV充放电功率不会同时不为0。因此，EV充放电约束可以表示为

$$\begin{cases} 0\leqslant P_{i,t}^{\mathrm{ch}}\leqslant P_{i,\max}^{\mathrm{ch}}x_{i,t},\ 0\leqslant P_{i,t}^{\mathrm{dis}}\leqslant P_{i,\max}^{\mathrm{dis}}x_{i,t} \\ P_{i,t}=P_{i,t}^{\mathrm{ch}}x_{i,t}^{\mathrm{ch}}-P_{i,t}^{\mathrm{dis}}x_{i,t}^{\mathrm{dis}} \\ E_{i,t}=E_{i,t-1}+P_{i,t}\Delta t \\ E_{i}^{-}\leqslant E_{i,t}\leqslant E_{i}^{+},\ x_{i,t}^{\mathrm{ch}}+x_{i,t}^{\mathrm{dis}}\leqslant x_{i,t} \end{cases} \tag{6}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{ch}}$、$P_{i,t}^{\mathrm{dis}}$和$P_{i,t}$分别为t时刻的充、放电功率和

实际功率;$x_{i,t}^{\mathrm{ch}}$、$x_{i,t}^{\mathrm{dis}}$和$x_{i,t}$分别为t时刻的充、放电状态与并网状态的布尔变量,并网时$x_{i,t}$为1,离网时$x_{i,t}$为0;$E_{i,t}$为时刻t的荷电量。

设CS中n辆EV组成的集群为I^{EV},对式(6)中变量空间进行闵可夫斯基和[20]可得到CS的等效可调节容量:

$$\begin{cases} P_{\mathrm{CS},t}^{\mathrm{ch,max}}=\sum\limits_{i\in I^{\mathrm{EV}}}P_{i,\max}^{\mathrm{ch}}x_{i,t},\ P_{\mathrm{CS},t}^{\mathrm{dis,max}}=\sum\limits_{i\in I^{\mathrm{EV}}}P_{i,\max}^{\mathrm{dis}}x_{i,t} \\ P_{\mathrm{CS},t}=\sum\limits_{i\in I^{\mathrm{EV}}}P_{i,t} \\ E_{\mathrm{CS},t}=\sum\limits_{i\in I^{\mathrm{EV}}}E_{i,t-1}+\sum\limits_{i\in I^{\mathrm{EV}}}(P_{i,t}^{\mathrm{ch}}x_{i,t}^{\mathrm{ch}}-P_{i,t}^{\mathrm{dis}}x_{i,t}^{\mathrm{dis}})\Delta t+ \\ \quad\sum\limits_{i\in I^{\mathrm{EV}}}E_{i}^{\mathrm{ar}}x_{i,t}(x_{i,t}-x_{i,t-1})- \\ \quad\sum\limits_{i\in I^{\mathrm{EV}}}E_{i}^{\mathrm{le}}x_{i,t-1}(x_{i,t-1}-x_{i,t}) \\ E_{\mathrm{CS},t}^{\min}=\sum\limits_{i\in I^{\mathrm{EV}}}E_{i}^{-}x_{i,t},\ E_{\mathrm{CS},t}^{\max}=\sum\limits_{i\in I^{\mathrm{EV}}}E_{i}^{+}x_{i,t} \\ P_{\mathrm{res},t}=\min\{P_{\mathrm{CS},t}^{\mathrm{ch,max}}-P_{\mathrm{CS},t},P_{\mathrm{CS},t}-P_{\mathrm{CS},t}^{\mathrm{dis,max}}\} \end{cases} \tag{7}$$

式中:$P_{\mathrm{CS},t}^{\mathrm{ch,max}}$、$P_{\mathrm{CS},t}^{\mathrm{dis,max}}$分别为$t$时刻CS能达到的最大充、放电功率;$P_{\mathrm{CS},t}$为$t$时刻CS的等效功率;$E_{\mathrm{CS},t}$为CS的等效电池电量;$E_{\mathrm{CS},t}^{\max}$、$E_{\mathrm{CS},t}^{\min}$分别为CS等效电池荷电量上、下界;$E_{i}^{\mathrm{ar}}$、$E_{i}^{\mathrm{le}}$分别为第$i$辆EV并、离网时刻的电池电量;$P_{\mathrm{res},t}$为$t$时刻CS的有功功率裕度。

1.4 站内EV控制响应模型

CS等效调控能力评估模型在满足EV需求的前提下提供了CS各运行时段的等效调节能力,为进一步明晰调节功率来源,同时在CS对外响应调频响应过程中,避免站内EV频繁切换充放电状态,提升EV用户充电体验,需协调站内EV的响应情况。本文提出EV参与调频的响应能力评估模型,基于该模型评估不同类型EV的调频响应顺序。

站内的EV可根据其可调空间分为5种类型:T1,不能参与调频,保持最大功率充电状态;T2,能通过增加充电功率参与调频以及降低充电功率提供等效放电调频,但为保护电池寿命,不宜放电参与调频;T3,既能通过放电参与调频,也能通过增加充电功率参与调频,但未达到期望电量E_{need};T4,既能放电也能通过增加充电功率调频,且已达到期望电量E_{need};T5,能通过放电参与调频。

在充电站实时运行阶段,站内的各类EV数量会随时间发生改变,站内不同类型EV可通过区分因子φ_i^+、φ_i^-等效描述:

$$\varphi_i^+=\begin{cases} 0, & \delta_i>0,E_{i,t}\leqslant E_{\min} \\ \dfrac{1}{2}-\dfrac{1}{2}\sqrt{\dfrac{E_{\mathrm{need}}-E_{i,t}}{E_{\mathrm{need}}-E_{i,\min}}}, & \delta_i>0,E_{\min}<E_{i,t}<E_{\mathrm{need}} \\ \dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{2}\sqrt{\dfrac{E_{\mathrm{need}}-E_{i,t}}{E_{\mathrm{need}}-E_{i,\max}}}, & \delta_i>0,E_{\mathrm{need}}\leqslant E_{i,t}\leqslant E_{\max} \\ -1, & \delta_i\leqslant 0 \end{cases} \tag{8}$$

$$\varphi_i^-=\begin{cases} 1-\varphi_i^+, & \delta_i>0 \\ -1, & \delta_i\leqslant 0 \end{cases} \tag{9}$$

$$\delta_i=(t_1-t-t_{\mathrm{need}})/(t_1-t) \tag{10}$$

$$t_{\mathrm{need}}=\max\left(\frac{E_{\mathrm{need}}-E_{i,t}}{P_{i,\max}},0\right) \tag{11}$$

以$\alpha_i=1$、0、-1分别表示EV在充电、闲置、放电状态,EV类型的区分取决于站内响应调频时考虑EV出行需求的限制约束状态,表述如下:

1) $\varphi_i^+=-1$,对应$\delta_i\leqslant 0$,表明EV在剩余时间内达不到或恰好能达到需求电量状态E_{need},因此EV不响应调频信号,始终保持最大功率充电,$\alpha_i=1$,分类为T1;

2) $\varphi_i^+\geqslant 0$,对应$\delta_i>0$,表示EV停留时间充足,δ_i越大,则EV在站内的调控时间越充裕。当$\varphi_i^+=0$,EV电量状态小于电量下限$E_{i,\min}$,为避免深度放电对电池造成损耗,这类EV不宜参与放电,但可通过降低充电功率或暂停充电达到等效放电的效果,即$\alpha_i=1$、0,分类为T2;

3) 当$0<\varphi_i^+<0.5$,此类EV既可以降低功率或反向放电提供等效放电能力,也可以在放电状态时切换至充电状态或增大充电功率提供等效用电能力,$\alpha_i=\pm 1$、0,由式(8)可知,此类EV电量未达到E_{need},分类为T3;

4) 当$0.5<\varphi_i^+<1$,此类EV与T3具有相同的调频功率提供能力,但已达到E_{need},分类为T4;

5) 当$\varphi_i^+=1$,EV电池已达到容量上界,此时可放电参与调频,$\alpha_i=-1$、0,分类为T5。

根据上述分析,EV分类方法如图3所示。

若系统对充电站的调频需求不大,所需调频功率在充电站调控能力范围内,为避免响应系统需求过程中频繁切换站内EV的充放电状态,减小对电池的影响,提升用户的充电体验,只需要部分类型EV对充电状态进行调整,其余类型EV保持原状态即可达到等效调频效果。

在EV充电过程中,设CS中5类EV的集群分别表示为$I_j(j=1,2,\cdots,5)$,则j类EV切换至最大功率充电的等效用电调频功率$\Delta P_{\mathrm{T,ch},j}$、切换至暂停

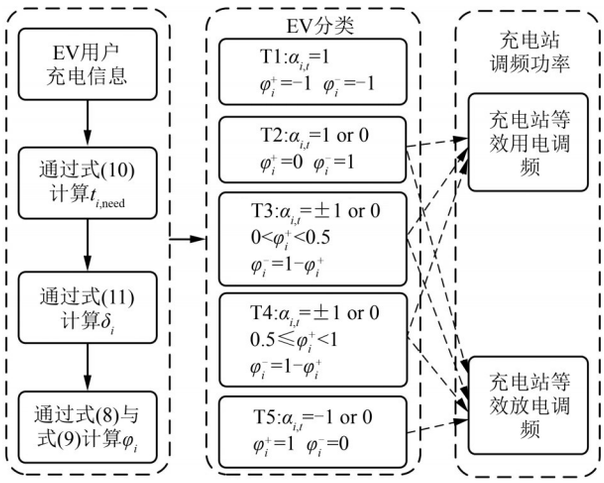


图3 站内EV分类方法

Fig.3 Classification model for EV in charging stations

充电的等效调频功率$\Delta P_{\mathrm{T,st},j}$和切换至最大放电功率的等效放电调频功率$\Delta P_{\mathrm{T,dis},j}$可以分别表示如下：

$$\Delta P_{\mathrm{T,ch},j}=\sum_{i\in I_j}(P_{i,\max}^{\mathrm{ch}}-P_{i,t}) \tag{12}$$

$$\Delta P_{\mathrm{T,st},j}=-\sum_{i\in I_j}P_{i,t} \tag{13}$$

$$\Delta P_{\mathrm{T,dis},j}=-\sum_{i\in I_j}P_{i,\max}^{\mathrm{dis}} \tag{14}$$

EV区分因子φ_i^+、φ_i^-确定了EV荷电状态与需求电量的映射关系，其大小反映了EV的调节能力。因此，具备更大放电区分因子平均值的j类EV优先下调充电功率。设1～5类EV区分因子平均值分别为$\bar{\varphi}_1^+$～$\bar{\varphi}_5^+$、$\bar{\varphi}_1^-$～$\bar{\varphi}_5^-$，下面结合图4所示功率分配方法对分类响应进行说明：1）当$0<\Delta P_{\text{m-ev}}\leqslant\sum_{j=1}^{5}\Delta P_{\mathrm{T,st},j}$，需求CS进行降功率参与调频时，由于$\bar{\varphi}_5^+>\bar{\varphi}_4^+>\bar{\varphi}_3^+>\bar{\varphi}_2^+$，且第5类EV不具备降功率能力，因此第4、3、2类EV依次降低功率直至满足$\Delta P_{\text{m-ev}}$；2）当$\sum_{j=1}^{5}\Delta P_{\mathrm{T,st},j}<\Delta P_{\text{m-ev}}$，需求CS放电参与调频时，由于第2类EV不具备放电能力，因此第5、4、3类EV依次放电直至满足$\Delta P_{\text{m-ev}}$或抵达CS等效放电边界；3）当$\Delta P_{\text{m-ev}}<0$，需求CS提高充电功率进行调频时，由于$\bar{\varphi}_2^->\bar{\varphi}_3^->\bar{\varphi}_4^->\bar{\varphi}_5^-$，因此第2、3、4、5类EV依次提高充电功率直至满足$\Delta P_{\text{m-ev}}$或抵达CS等效用电边界。

在EV充电过程中，各类EV响应调频时可通过φ_i^+、φ_i^-协调类内EV调频功率分配：

$$\Delta P_{i,t+1}^{\mathrm{ch}}=\begin{cases}(\varphi_i^-/\sum\varphi_i^-)\Delta P_{\mathrm{T},j}^{\mathrm{ch}},\Delta P_{i,t+1}^{\mathrm{ch}}<(P_{i,\max}^{\mathrm{ch}}-P_{i,t})\\P_{i,\max}^{\mathrm{ch}}-P_{i,t},\qquad\text{else}\end{cases} \tag{15}$$

$$\Delta P_{i,t+1}^{\mathrm{st}}=\begin{cases}(\varphi_i^+/\sum\varphi_i^+)\Delta P_{\mathrm{T},j}^{\mathrm{st}},\Delta P_{i,t+1}^{\mathrm{st}}<P_{i,t}\\P_{i,t},\qquad\text{else}\end{cases} \tag{16}$$

$$\Delta P_{i,t+1}^{\mathrm{dis}}=\begin{cases}(\varphi_i^+/\sum\varphi_i^+)\Delta P_{\mathrm{T},j}^{\mathrm{dis}},\Delta P_{i,t+1}^{\mathrm{dis}}<P_{i,\max}^{\mathrm{dis}}\\P_{i,\max}^{\mathrm{dis}},\qquad\text{else}\end{cases} \tag{17}$$

式中：$\Delta P_{i,t+1}^{\mathrm{ch}}$、$\Delta P_{i,t+1}^{\mathrm{st}}$和$\Delta P_{i,t+1}^{\mathrm{dis}}$分别为第$i$辆EV响应调频指令的用电功率、暂停充电功率和放电功率调整量；$\Delta P_{\mathrm{T},j}^{\mathrm{ch}}$、$\Delta P_{\mathrm{T},j}^{\mathrm{st}}$和$\Delta P_{\mathrm{T},j}^{\mathrm{dis}}$分别为$j$类EV接收的用电功率、暂停充电功率和放电功率调整指令。

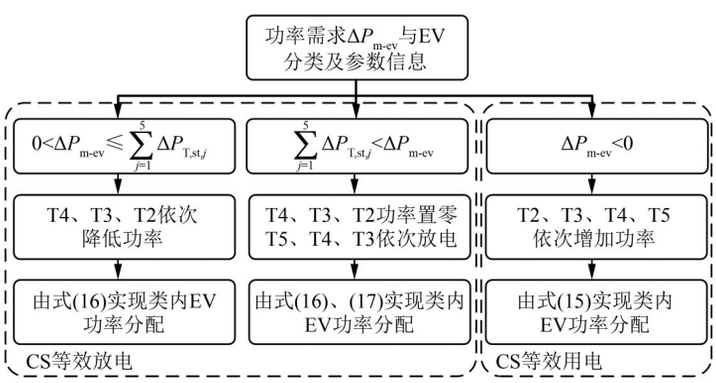


图4 EV分类响应功率分配方法

Fig.4 Classification response power allocation method for EV

2 基于虚拟领导者的一致性控制算法

2.1 图论与虚拟领导者

在图论中，常用$G=\{V,e\}$表示多智能体间的通信拓扑结构。其中，V为节点的集合，每个节点代表1个智能体；e为边的集合。如果节点v_i能向节点v_j传输信息，则$(v_i,v_j)\in e$，是图G的一条边；如果节点v_i与v_j能互相传输信息，则(v_i,v_j)是无向边。若G中的边均为无向边，则G为无向图，否则G为有向图。对有向图，如果存在一个节点，从该节点到其他任意节点均存在一条有向路径，则该图包含一个

有向生成树,且该节点为根节点。图G中各节点的通信情况常用邻接矩阵$\boldsymbol{A}=[a_{ij}]_{N\times N}$表示,$(v_i,v_j)\in e$时,$a_{ij}=1$,否则$a_{ij}=0$。节点$v_i$的入度$d_{\text{in},i}$定义为$d_{\text{in},i}=\sum_{j=1}^{N}a_{ij}$,则入度矩阵可表示为$\boldsymbol{D}_{\text{in}}=\text{diag}\{d_{\text{in},i}\}$。另外,定义图$G$的Laplacian矩阵$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{D}_{\text{in}}-\boldsymbol{A}$。对于由$n$个跟随者与1个虚拟领导者构成的$n+1$节点多智能体系统,以图$\tilde{\Gamma}$表示其通信拓扑结构,图$\tilde{\Gamma}$与图$G$除了虚拟领导者节点外其余部分完全相同。

在多智能体系统分布式协同控制一致性问题中,领导者往往被赋予一个期望状态,作为最终收敛目标,虚拟领导者agent0在系统中起到为控制器提供参考值的作用,系统中必有1个或多个节点接受其参考信息。在领导-跟随系统中,常用矩阵$\boldsymbol{H}=\boldsymbol{L}+\boldsymbol{B}$表示含领导者在内的系统的通信关系,其中$\boldsymbol{B}=\text{diag}\{b_i\}$。若agent0为agent$i$的邻居,则$b_i>0$,否则$b_i=0$。

为保证所有节点信息跟随agent0并达到渐进一致,$\boldsymbol{H}$需具有简单零特征值,即当图$\tilde{\Gamma}$中至少包含以agent0为根节点的有向生成树,则各节点状态将收敛到agent0所提供的目标[22]。

2.2 一致性控制算法控制的目标

VSG经过一次控制后的频率与系统额定频率存在偏差,一致性控制作为二次控制,其目标为恢复各充电站的输出频率到额定值,并在充电站间合理分配有功功率。因此,二次控制应实现频率与功率的一致性。

1)多充电站的频率恢复到额定值,即:

$$\lim_{t\to\infty}\omega_i(t)=\omega_{\text{ref}} \tag{18}$$

式中:$\omega_i(t)$为第i个VSG的频率;ω_{ref}为系统的额定频率。

2)充电站之间的有功功率按照CS有功功率裕度$P_{\text{res}i}$与阻尼因子D_i的比率进行分配,等效于按照CS二次控制器提供的反馈补偿功率$\Delta P_{\text{m-ev}i}$与阻尼因子D_i的比率进行分配。这便于充分利用各充电站的调节潜力,最大化发挥出充电站参与调频的能力,同时避免功率振荡[10,23],即:

$$\lim_{t\to\infty}\frac{P_{\text{res}i}}{D_i}=\frac{P_{\text{res}j}}{D_j}\Leftrightarrow\lim_{t\to\infty}\frac{\Delta P_{\text{m-ev}i}}{D_i}=\frac{\Delta P_{\text{m-ev}j}}{D_j} \tag{19}$$

CS-VSG仅靠其初级控制的调频能力响应频率调整时,当频率变化1/3 Hz时,其输出功率应为CS有功功率裕度的40%~100%,因此D_i与$P_{\text{res}i}$存在如下关系[4]:

$$0.4P_{\text{res}i}/(\omega_{\text{n}}\Delta\omega_{\max})\leqslant D_i\leqslant P_{\text{res}i}/(\omega_{\text{n}}\Delta\omega_{\max}) \tag{20}$$

式中:$\Delta\omega_{\max}$为最大频率,$\Delta\omega_{\max}=2/3\pi$。

2.3 分布式二次控制协议设计

类似于同步发电机,CS-VSG的二次控制采用虚拟调速器实现二次调频,调速器方程可以表示为

$$k_{\text{f}}(\omega_i-\omega_{\text{n}})=\Delta P_{\text{m}i} \tag{21}$$

式中:k_{f}为虚拟调速器的调频系数;$\Delta P_{\text{m}i}$为有功指令补偿量。对式(21)求时间导数,有:

$$k_{\text{f}}\left(\frac{\text{d}\omega_i}{\text{d}t}-\frac{\text{d}\omega_{\text{n}}}{\text{d}t}\right)=\frac{\text{d}\Delta P_{\text{m}i}}{\text{d}t} \tag{22}$$

二次控制的目标是使得频率恢复到额定值,根据VSG的转子运动方程,考虑连续时间的频率的一致性,控制状态方程可以表示为

$$\begin{cases}\text{d}\omega_i/\text{d}t=f(\omega_i)+u_{\omega i}\\ f(\omega_i)=\dfrac{1}{J_i}\left[\dfrac{P_{\text{set}i}-P_{\text{e}i}}{\omega_i}\right]-D_i(\omega_i-\omega_{\text{n}i})\end{cases} \tag{23}$$

式中:$f(\omega_i)$为转子运动方程中关于状态量ω_i的非线性函数;$u_{\omega i}$为二次控制的输入;$P_{\text{set}i}$、$P_{\text{e}i}$、J_i分别为VSGi的有功额定值、有功功率输出、虚拟转子惯量;$\omega_{\text{n}i}$为VSGi一次控制中的设定频率。当VSGi处于额定工作状态时,频率能维持在ω_{ref},而当负载扰动时,频率与额定值产生偏差,由二次控制将其恢复至额定值。

2.3.1 频率控制

不同充电站间存在一定的差异,等效VSG的有功功率指令值、转子惯量、阻尼因子等频率模型参数不完全相同,参数异构的CS-VSGs形成非线性多智能体系统。为解决该系统中非线性智能体跟随领导者的收敛性问题,首先需要建立各智能体状态的基准模型,即:

$$\dot{\bar{\omega}}_i=u_i(t) \tag{24}$$

式中:$\bar{\omega}_i$为对应智能体状态ω_i的基准参考状态。

根据一致性控制状态方程中的频率表达式(23)、(24),频率的分布式二次控制可以表示为

$$u_{\omega i}=\dot{\bar{\omega}}_i-f(\omega_i)-k\delta_i(t) \tag{25}$$

$$\delta_i(t)=\omega_i(t)-\bar{\omega}_i(t) \tag{26}$$

式中:$\delta_i(t)$为系统状态ω_i对基准状态$\bar{\omega}_i$的跟踪误差;k为系数。

二次频率控制包含2个控制过程:1)智能体i的系统状态ω_i对基准模型状态$\bar{\omega}_i$的跟踪误差收敛至0,即满足$\lim_{t\to\infty}\delta_i(t)=0$;2)由$\dot{\bar{\omega}}_i=u_i(t)$实现基准状态$\bar{\omega}_i(t)$与频率参考值$\omega_{\text{ref}}$相等,实现一致性,满足$\lim_{t\to\infty}\bar{\omega}_i(t)=\omega_{\text{ref}}$。

为实现对虚拟领导者的目标跟踪,频率分布式控制器可以构造为

$$u_i(t)=k_{\bar{\omega}}e_{\omega i}(t) \tag{27}$$

$$e_{\omega i}(t)=\sum_{j\in N_i}[\omega_j(t)-\omega_i(t)]+d_i[\omega_{\mathrm{ref}}-\omega_i(t)] \tag{28}$$

式中：$k_{\bar{\omega}}$为频率反馈控制增益，$k_{\bar{\omega}}>0$。

2.3.2 有功功率分配控制

为抑制多VSG之间的振荡，需结合有功功率增量$P_{\mathrm{res}i}$和VSG的虚拟阻尼因子D_i综合考虑有功分配控制问题。结合VSG的转子运动方程，即式(2)、(21)，可以得到在有虚拟调速器指令时VSG的转子运动方程式为

$$J_i\frac{\mathrm{d}\omega_i}{\mathrm{d}t}=\frac{P_{\mathrm{set}i}+\Delta P_{\mathrm{m}i}-P_{\mathrm{e}i}}{\omega_i}-D_i(\omega_i-\omega_{\mathrm{n}}) \tag{29}$$

当系统达到稳态时，式(29)可描述为

$$\frac{P_{\mathrm{set}i}+\Delta P_{\mathrm{m}i}-P_{\mathrm{e}i}}{\omega_i}-D_i(\omega_i-\omega_{\mathrm{n}})=0 \tag{30}$$

结合调速方程，式(30)可以描述为

$$\Delta P_{\mathrm{m\text{-}ev}i}=P_{\mathrm{set}i}-P_{\mathrm{e}i}=\left(\frac{\omega_iD_i}{k_{\mathrm{f}}}-1\right)\Delta P_{\mathrm{m}i} \tag{31}$$

在VSG运行时，系统频率一般不会出现过大的偏差，故在近似计算中可将ω_i近似为100π。此外，频率恢复不在于虚拟调频系数k_{f}，其值相较D_i而言可以取得较小，因此可以通过适当的参数设置，使得$\omega_iD_i/k_{\mathrm{f}}\gg1$。在此情形下，式(31)可简化为

$$P_{\mathrm{set}i}-P_{\mathrm{e}i}=\frac{\omega_iD_i}{k_{\mathrm{f}}}\Delta P_{\mathrm{m}i} \tag{32}$$

为便于分析，假设所有VSG的虚拟调频系数相同。当系统频率达到稳态时，即$\lim\limits_{t\to\infty}\omega_i=\lim\limits_{t\to\infty}\omega_j$，VSG的功率调节可以表示为

$$\lim_{t\to\infty}\Delta P_{\mathrm{m}i}=\lim_{t\to\infty}\Delta P_{\mathrm{m}j}\Rightarrow \lim_{t\to\infty}(P_{\mathrm{set}i}-P_{\mathrm{e}i})/D_i=\lim_{t\to\infty}(P_{\mathrm{set}j}-P_{\mathrm{e}j})/D_j \tag{33}$$

如果将VSG的有功功率指令$P_{\mathrm{set}i}$设置为VSG的额定功率，那么在所设计的控制器下，当有功功率补偿量趋于一致性相同时，有功功率将得到准确分担。因此，有功功率补偿量的分布式一致性控制器可以构造为

$$\begin{cases}\Delta\dot{P}_{\mathrm{m}i}=u_{\mathrm{p}i}(t)\\ u_{\mathrm{p}i}(t)=k_{\mathrm{p}}e_{\mathrm{p}i}(t)\end{cases} \tag{34}$$

$$e_{\mathrm{p}i}(t)=\sum_{j\in N_i}[\Delta P_{\mathrm{m}j}(t)-\Delta P_{\mathrm{m}i}(t)] \tag{35}$$

式中：k_{p}为功率反馈控制增益，$k_{\mathrm{p}}>0$。

3 算例分析

在Matlab/Simulink中搭建相应CS-VSG及其二次控制算法模型。为体现CS-VSG的调频控制效果，建立如图5所示微电网拓扑及通信框架。

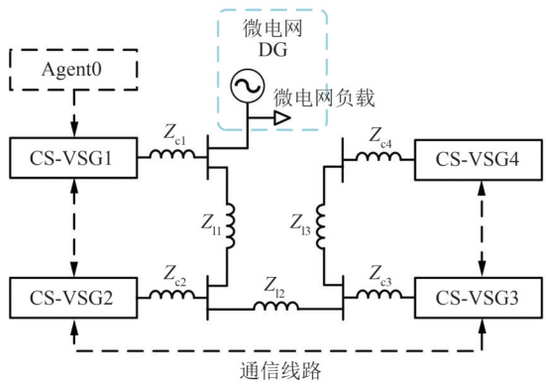


图5 含CS-VSGs的微电网拓扑及通信框架

Fig.5 Microgrid topology and communication framework with CS-VSGs

3.1 CS可调能力评估及EV功率响应验证

微电网中CS的参数选取如下：EV入站数量n服从$U(30,40)$，即在区间[30,40]均匀分布；EV用户充电需求电量E_{need}服从$N(0.8,0.1)$，即期望为0.8、标准差为0.1的正态分布；EV入站并网开始充电时刻的初始电量E_0服从$U(0.1,0.4)$；EV入站充电时间t_{a}与离站结束充电时间t_{l}分别服从$N(17,1.5)$和$N(21,1)$；EV自身最大电池容量C取值为60 kW·h；EV在站内单桩最大充电功率P_{cmax}和放电功率P_{dmax}分别取值为40和15 kW。

1) CS可调能力评估

根据式(4)～(7)得到在满足用户充电需求情况下基于上述参数的CS等效容量边界如图6所示。CS等效容量在边界范围内均可调控，具体调控方案与聚合商调控手段有关，本文假设现有市场机制完善，暂不考虑EV在站内充电产生的经济效益。

EV进站后充电达到自身目标需求E_{need}的CS实时容量如图7所示。在该情况下，CS分类调频结果如图8所示。由图8(a)可知，初始时T3数量较多，大部分EV进站充电后电量均已大于$E_{i,\min}$，且停留时间相对充裕，在离站前能达到$E_{i,\mathrm{need}}$，是初始时

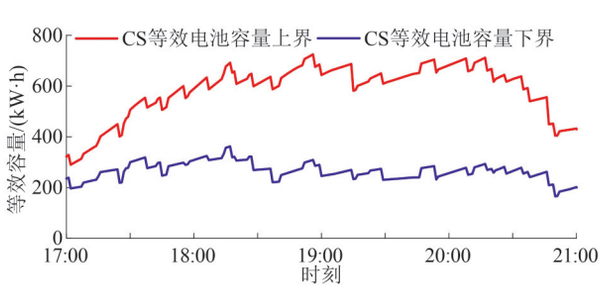


图6 CS等效电池容量边界

Fig.6 Equivalent energy boundaries of CS

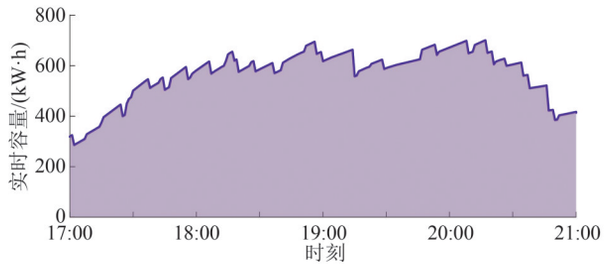


图7 CS实时容量

Fig.7 Real-time capacity of CS

CS等效可调能力的主要组成部分;随着时间的推移,T3类EV的荷电状态逐渐增大,T3逐渐转变为T4与T5。由图8(b)可知,由于EV的充电需求,CS等效放电功率明显大于等效用电功率。在以EV充电至$E_{i,\mathrm{need}}$与$E_{i,\mathrm{max}}$的过程中,T4、T3、T2可进行充电功率的闲置,等效于CS放电;同时,荷电状态已大于$E_{i,\mathrm{min}}$的EV具备反向放电能力,T5、T4、T3可切换到反向放电状态提供CS等效放电。而等效用电场景中仅T4达到$E_{i,\mathrm{need}}$而未达到$E_{i,\mathrm{max}}$,可从闲置状态切换充电提供CS等效用电能力。

2) 站内EV控制响应方案有效性验证

选取20:00时CS分类调频结果,可得该时刻CS内所有EVs类别、充电功率、区分因子信息如图9所示。由图9可见,该时刻站内T1、T2、T3、T4、T5类型EV各有1、0、3、5、6辆,且当前除不可充电的T5类EV外,所有EV均处于充电状态。

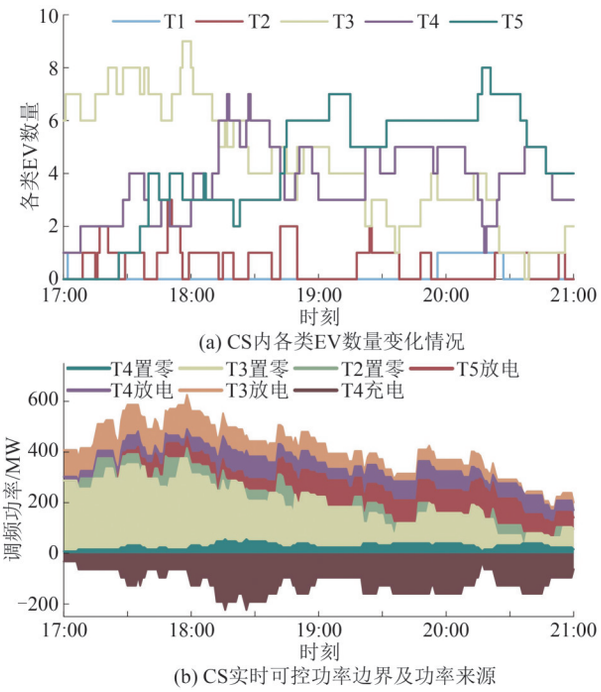


图8 CS分类调频结果

Fig.8 Classification frequency regulation results of CS

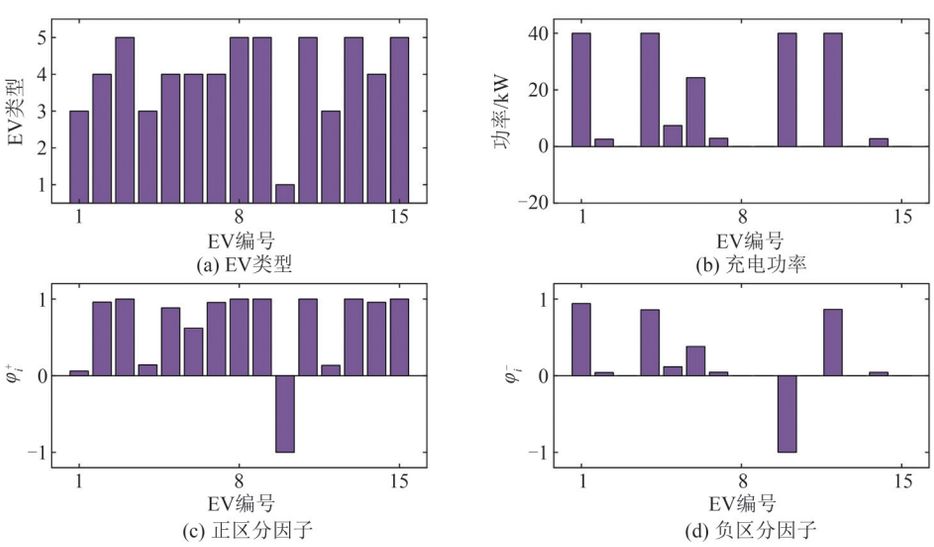
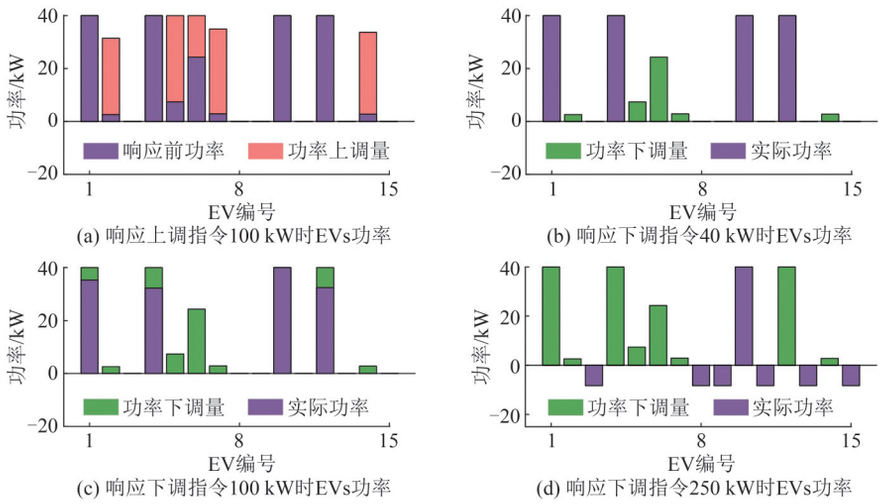


图9 20:00时刻CS中所有EV信息

Fig.9 All EVs information in CS at 20:00

根据图8(b)中CS可控边界,在20:00时CS等效放电功率边界与等效用电功率边界分别为400与−150 kW,在原有CS充电状态的基础上调节CS响应功率指令$\Delta P_{\mathrm{m\text{-}ev}}$,得到如图10所示的CS响应不同调频功率需求时CS内各EV功率响应情况。由图10可知,当CS响应功率$\Delta P_{\mathrm{m\text{-}ev}}$为−100 kW,即上调充电功率提供等效用电调节能力时,EV根据式(15)中功率分配方式,负区分因子φ_i^-越大,即荷电状态越低的EV优先提高充电功率;当CS响应功率$\Delta P_{\mathrm{m\text{-}ev}}$为40 kW,即下调充电功率提供等效放电调节能力时,根据图4中EV分类响应及式(16)中功率分配方法,优先下调T4类EV功率,此时闲置全部T4



(a) 响应上调指令100 kW时EVs功率　(b) 响应下调指令40 kW时EVs功率

(c) 响应下调指令100 kW时EVs功率　(d) 响应下调指令250 kW时EVs功率

图10　CS内EVs应对不同功率需求时响应情况

Fig.10　Response of EVs in CS to different power commands

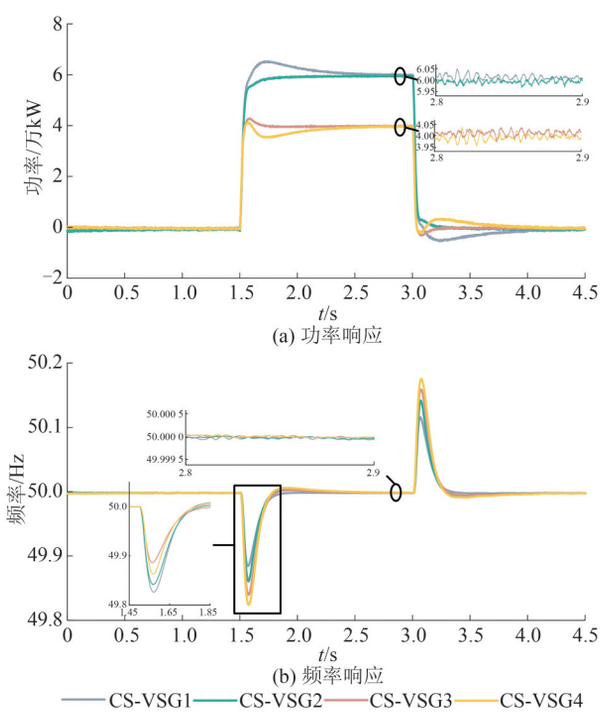
类EV即满足调节需求，不影响其他EV的充电状态；同理，当CS响应功率$\Delta P_{\text{m-ev}}$为100 kW，此时在限制T4类EV的基础上，按式(16)降低T3类EV充电功率，正区分因子φ_i^+越大，其功率下调量越大；当CS响应功率$\Delta P_{\text{m-ev}}$为250 kW，此时闲置所有可调EV均不能满足要求时，则开始调整T5状态从闲置切换为反向放电，以满足总功率下调需求。由该仿真结果可知，EV控制响应模型能有效协调站内EV的充放电控制以满足调频功率需求，在仅需部分类型EV切换闲置即满足功率调整需求时，不调整EV进行放电，尽可能避免了EV的频繁充放电状态切换，减小了对电池的影响从而提升用户充电体验。同时，根据区分因子进行分类调频优先级区分，使SOC低的EV能尽可能保持充电状态，让CS更有序调控EV参与调频响应。

3.2　CS-VSGs协同调频控制结果及分析

以20:00时CS的可调容量结果为例设定CS-VSG1的相应参数，为分别体现一致性策略的功率均分与不同参数CS-VSG的功率分配效果，设定同时段CS-VSG2有功功率裕度与CS-VSG1相同，即为150 kW，CS-VSG3、CS-VSG4有功功率裕度为100 kW，根据式(19)功率比例分配控制及多VSG并联运行[23]原则，仿真相关参数具体选取如下：

CS-VSG1～CS-VSG4的虚拟惯量分别为3、3、2、2，虚拟阻尼系数分别为90、90、60、60；空载输出端电压U_0取值为320 V；输出端电压U_1取值为311 V；并网连接阻抗为0.05+j0.63 Ω；连接线路的阻抗Z_{l1}、Z_{l2}、Z_{l3}分别为0.1+j1、0.12+j1.2、0.1+j1 Ω；频率分布式控制器中频率反馈控制增益k_ω为12；功率分布式控制器中功率反馈控制增益k_p为1.5。

通过负荷扰动的接入，验证CS-VSGs的协同调频效果。初始时，CS-VSGs工作于额定功率充电状态，以未参与调频时仅满足充电需求的CS充电功率作为0功率点建立功率参考坐标系，t=1.5 s时，系统出现负荷扰动，在3.0 s后恢复额定，CS-VSGs的有功与频率响应输出结果如图11所示。由图11



(a) 功率响应

(b) 频率响应

图11　分布式控制下CS-VSGs的响应性能

Fig.11　Response performance of CS-VSGs under distributed control

可看出，通过本文控制策略，CS-VSGs能在负荷扰动时跟随频率一致性目标，提供精确频率恢复能

力,同时通过本文控制算法实现有功功率在CS-VSGs间合理均分,充分利用CS-VSG的调节能力。

设定CS-VSGs仅在初级控制场景、常规二次控制场景与仅交换频率信息的分布式控制场景进行仿真分析,作为本文控制策略的对比。4种控制场景下平均CS-VSGs的频率响应结果如图12所示,对比场景下功率响应如图13~15所示。

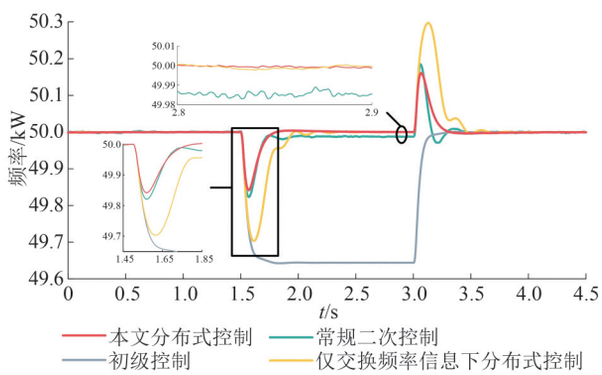


图12 不同控制下CS-VSGs频率响应

Fig.12 Frequency response of CS-VSGs under different controls

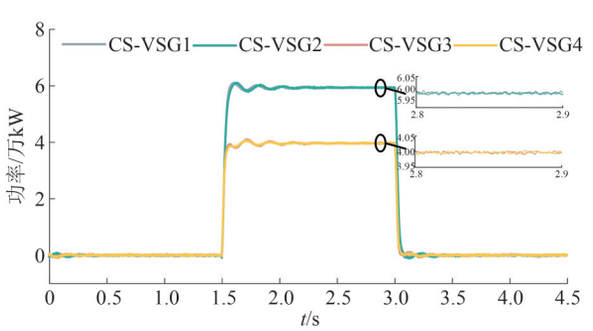


图13 初级控制下CS-VSGs的功率响应

Fig.13 Power response of CS-VSGs under primary control

从频率恢复角度,在本文控制策略下,CS-VSGs通过频率信息交互,在负荷扰动前后频率均能恢复到虚拟领导者提供的频率额定参考值,同时,由于CS-VSGs间及时交换输出功率信息,有功功率得到有效均分,频率恢复速度相较仅交换频率信息下的分布式控制而言更快,频率超调量与频率波动均得到有效抑制;在初级控制下,由于CS-VSGs的频率响应为有差调节,频率不能自行恢复额定,若在面对系统负荷扰动较大的情况时,会出现更大的频率偏差,这对系统的频率稳定性不利;在常规二次控制场景下,CS-VSGs频率响应效果与本文控制策略接近,然而由于线路阻抗不均以及CS-VSGs间缺少必要的功率和频率信息的交换,

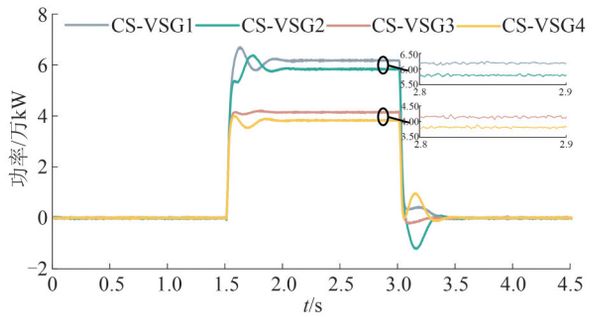


图14 常规二次控制下CS-VSGs的功率响应

Fig.14 Power response of CS-VSGs under conventional quadratic control

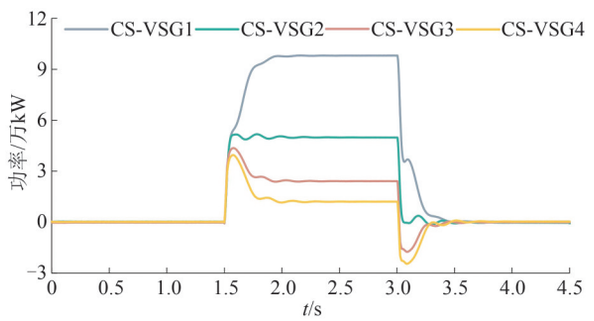


图15 仅交换频率信息下CS-VSGs的功率响应

Fig.15 Power response of CS-VSGs under the exchange of frequency information

CS-VSGs不能将频率精确恢复到额定值,同时频率恢复过程中的频率波动相较本文控制策略而言更为明显;在仅交换频率信息的二次控制下,虽然频率最终能恢复到额定值,但由于缺少有功功率信息交互,其频率恢复过程中出现了更大的超调与波动。

从功率恢复效果来看,初级控制下CS-VSGs能根据频率偏差响应功率缺额,自行依据虚拟阻尼比进行功率分配,无须通讯即可达到较好的功率控制效果,仅在有功功率间存在一定的暂态振荡;常规二次控制下,CS-VSGs间根据系统功率缺额,一次性分配功率裕度进行响应,但受到线路阻抗影响,在缺乏功率信息交互的情况下有功功率间不能精确分配,不利于充分发挥各CS的可调能力;仅交换频率信息的控制下,有功功率间的分配出现显著差异,同时由于输出功率与虚拟阻尼间的不匹配,CS-VSGs间出现明显的功率暂态波动,不利于CS-VSGs协同调频的稳定。

综上所述,本文控制策略能有效实现CS-VSGs的分布式二次调频控制目标,在实现频率恢复目标的前提下,实现CS-VSGs间调频功率的合理分配,充分发挥CS的可调能力,相较于已有控制方案,具

备更好的频率恢复效果与功率分配效果，提高CS-VSGs协同调频稳定性。

4 结论

本文提出了一种基于CS等效调节能力的多CS-VSGs一致性协同调频控制策略，针对CS间EV功率分配及参数异质CS-VSGs间的协同调频一致性问题进行了相应研究。

首先，通过考虑EV用户的充电需求，建立了计及用户需求的CS等效调节能力模型，有效评估了CS-VSG的等效调频能力，同时为EV分类参与调频响应提供依据；然后，为避免CS内EV在实时响应阶段的频繁充放电状态切换，设计了CS内EV分类方法及EV实时响应调频功率分配策略，通过EV区分因子实现站内EV分类及调频功率分配控制；最后，设计了基于虚拟领导者的CS-VSGs二次控制策略，推动充电站群协同调频控制，实现了参数各异的CS-VSGs间的信息交互和功率响应分配，相较于传统控制方案，有效提高系统频率动态特性，维持了系统频率的稳定。

本文对EV调频分配响应的考虑仍不够全面，以及在多CS-VSGs间的协同调频控制中缺少对通信信号故障、通讯延迟稳定性的分析，上述内容有待进一步的研究。

参考文献：

[1] 罗明，罗博雅，冯昊，等. 基于亨利气体溶解度优化算法的电动汽车二阶段优化调度方法[J]. 智慧电力，2023，51(9)：46-51.
LUO Ming，LUO Boya，FENG Hao，et al. Two-stage optimization scheduling method for electric vehicles based on henry gas solubility optimization algorithm [J]. Smart Power，2023，51(9)：46-51.

[2] 齐彩娟，张泽龙，吕于云，等. 计及用户行为决策的电动汽车负荷时空分布建模[J]. 南方电网技术，2023，17(10)：170-177.
QI Caijuan，ZHANG Zelong，(LÜ/LV/LU/LYU) Ganyun ，et al. Spatial-temporal modeling of EV load considering user behavior decision[J]. Southern Power System Technology，2023，17(10)：170-177.

[3] KE S，CHEN L，YANG J，et al. Vehicle to everything in the power grid (V2eG)：a review on the participation of electric vehicles in power grid economic dispatch[J]. Energy Conversion and Economics，2022，3(5)：259-286.

[4] 丁乐言，柯松，杨军，等. 基于充电站调频能力的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电网技术，2024，48(6)：2416-2425.
DING Leyan，KE Song，YANG Jun，et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on frequency control capability of charging station[J]. Power System Technology，2024，48(6)：2416-2425.

[5] RASOOL A，YAN X W，RASOOL U，et al. Enhanced control strategies of VSG for EV charging station under a low inertia microgrid[J]. IET Power Electronics，2020，13(13)：2895-2904.

[6] DHINGRA K，SINGH M. Handshaking of VSG with charging station to support the frequency in microgrid [J]. Electrical Engineering，2020，102(4)：2349-2362.

[7] 邱存勇，宋佳，宋海亮，等. 基于改进VSG技术双向充电桩控制策略研究[J]. 电源技术，2021，45(7)：936-940.
QIU Cunyong，SONG Jia，SONG Hailiang，et al. Research on control strategy of bidirectional charging pile based on improved VSG technology[J]. Chinese Journal of Power Sources，2021，45(7)：936-940.

[8] 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.

[9] ZHU X W，XIA M C，CHIANG H D. Coordinated sectional droop charging control for EV aggregator enhancing frequency stability of microgrid with high penetration of renewable energy sources[J]. Applied Energy，2018，210：936-943.

[10] 许振宇，陈殷，石梦璇，等. 基于一致性算法的并联虚拟同步机系统小信号模型分析[J]. 中国电机工程学报，2022，42(7)：2427-2438.
XU Zhenyu，CHEN Yin，SHI Mengxuan，et al. Small-signal analysis of consensus-algorithm-based parallel virtual synchronization generators system[J]. Proceedings of the CSEE，2022，42(7)：2427-2438.

[11] WANG Y，XU Y，TANG Y，et al. Aggregated energy storage for power system frequency control：a finite-time consensus approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2019，10(4)：3675-3686.

[12] ZHANG R F，SAVKIN A V，HREDZAK B. Centralized nonlinear switching control strategy for distributed energy storage systems communicating *via* a network with large time delays[J]. Journal of Energy Storage，2021，41：102834.

[13] MALIK S M, SUN Y Y, HUANG W, et al. A generalized droop strategy for interlinking converter in a standalone hybrid microgrid[J]. Applied Energy, 2018, 226: 1056-1063.

[14] 李晓晓, 王晓兰. 基于离散分组一致性算法的双母线孤岛直流微电网自适应下垂控制[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 7-14.
LI Xiaoxiao, WANG Xiaolan. Adaptive droop control of islanded DC microgrid with two buses based on discrete group consensus algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 7-14.

[15] 郑济林, 王军, 孙章, 等. 一致性算法下光储直流微网改进下垂控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(4): 116-125.
ZHENG Jilin, WANG Jun, SUN Zhang, et al. Improved droop control of PV energy storage DC microgrid based on consensus algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(4): 116-125.

[16] 张莹, 孟润泉, 王子昂, 等. 一种基于一致性算法的改进下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 104-111.
ZHANG Ying, MENG Runquan, WANG Ziang, et al. An improved droop control strategy based on a consensus algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 104-111.

[17] 林继灿, 刘沈全, 王钢, 等. 基于一致性算法的多虚拟同步机功率振荡协调抑制[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4668-4682.
LIN Jican, LIU Shenquan, WANG Gang, et al. Coordinated power oscillation suppression of multi-VSG based on consensus algorithm[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4668-4682.

[18] 蔡颖凯, 张冶, 康乃荻, 等. 基于动态一致性算法的VSG微网孤岛二次控制[J]. 电力电子技术, 2023, 57(5): 93-97.
CAI Yingkai, ZHANG Ye, KANG Naidi, et al. Secondary control strategy of micro-grid island with VSG based on dynamic consistency algorithm[J]. Power Electronics, 2023, 57(5): 93-97.

[19] SHI M X, CHEN X, ZHOU J Y, et al. Frequency restoration and oscillation damping of distributed VSGs in microgrid with low bandwidth communication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1011-1021.

[20] 施兴烨, 柯松, 张帆, 等. 考虑充电站可调潜力的虚拟惯性功率补偿控制策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(3): 73-81.
SHI Xingye, KE Song, ZHANG Fan, et al. Control strategy for virtual-inertial power compensation considering adjustable potential of charging station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(3): 73-81.

[21] 李媛, 冯昌森, 文福拴, 等. 含电动汽车和电转气的园区能源互联网能源定价与管理[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 1-10.
LI Yuan, FENG Changsen, WEN Fushuan, et al. Energy pricing and management for park-level energy internets with electric vehicles and power-to-gas devices [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 1-10.

[22] NASIRIAN V, MOAYEDI S, DAVOUDI A, et al. Distributed cooperative control of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 2288-2303.

[23] KE S, YANG J, LU Z H, et al. Consistency collaboration control strategy based on adaptive virtual inertia in multiple charging stations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 39(2): 896-913.