

# 电动汽车充换电站参与电网 AGC 功率分配的成本一致性算法

李清,张孝顺,余涛,瞿凯平,郑炜楠,刘前进

(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640)

**摘要:**搭建电动汽车充换电站参与电网自动发电控制(AGC)功率分配的框架,并建立其优化数学模型。在此基础上,提出电动汽车参与 AGC 功率分配的成本一致性算法。智能体间采用虚拟一致性变量作为一致性交互计算信息,同时以真实一致性变量确定电动汽车的 AGC 功率,提高算法的应用灵活性。某电网模型仿真结果表明:成本一致性算法可以减少电网调节成本,提高区域电网的控制性能标准,且能有效实现电动汽车参与电网 AGC 功率分配的自律调频。

**关键词:**电动汽车;电动汽车充换电站;成本一致性算法;自动发电控制;自律调频

**中图分类号:**U 469.72

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.03.011

## 0 引言

电力系统调频主要通过自动发电控制 AGC (Automatic Generation Control) 技术实现。AGC 通过维持电力系统发电与负荷实时平衡,保证了电力系统的频率质量和安全运行。随着大规模的间歇性电源接入电网,系统安全和经济运行对其调频和旋转备用容量提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。当大量的电动汽车 EV (Electric Vehicle) 接入电网 V2G (Vehicle to Grid) 时,利用电动汽车为系统提供调频等辅助服务是目前研究的热点。

随着电池设备成本的降低、充放电技术水平的进步、充电基础设施标准体系的逐步完善以及政府扶持政策陆续出台,电动汽车的普及成为一种必然的发展趋势<sup>[2]</sup>。当大量电动汽车接入电网时,电网中的电动汽车既是负荷,从电网汲取电能,也可以作为放电单元,向电网提供电能。现有的研究表明,利用电动汽车这种双向能量传输模式为电力系统提供调频服务是一项较有发展前景的 V2G 商业运营模式<sup>[3]</sup>。文献<sup>[1]</sup>指出,与传统的发电机组相比,电动汽车参与调频具有调频时延很短、调频成本较低,且快速准确响应调频指令等优势;文献<sup>[4]</sup>提出电动汽车代理的概念,对大量电动汽车实施集群性调度,以满足电网调频容量的需求,同时验证了电动汽车参与调频的可行性。因此,可通过控制大规模电动汽车充放电的行为,使其为系统提供调频等辅助服务,以有效地平滑电网负荷波动和消纳过剩的间歇性

能源<sup>[1,5]</sup>。

公交车、出租车充换电站采用换电模式,是应对电动汽车规模化发展的一种较为合理的商业模式。对于充换电站而言,其管理的蓄电池数量较大,则调频容量很大,可作为一个独立的电动汽车代理参与调频服务<sup>[6]</sup>。当多个充换电站参与系统二次调频时,有 2 个关键步骤:将电动汽车集中控制中心总功率指令  $\Delta P_{EV}$  分配给各个充换电站;将充换电站的功率指令分配给站内各个电池。

目前,有关电动汽车参与系统调频的研究工作较少,主要集中在电动汽车充换电站内部各电动汽车 AGC 功率分配的研究。文献<sup>[7]</sup>考虑了调频价格、充电成本以及充电需求等因素,提出电动汽车充换电站利益最大化的分配模型;文献<sup>[8]</sup>将电动汽车参与调频的公平性代替电动汽车充换电站的利益最大化作为目标,提出各种公平分配电动汽车充放电功率的优化算法。为了避免电池过充或过放,文献<sup>[1]</sup>提出按荷电状态(SOC)的比例分摊法分配调频功率指令。

然而,以上研究都没有涉及电动汽车充换电站之间的 AGC 功率分配。目前,按可调容量的比例分配(PROP)算法将总功率指令  $\Delta P_{EV}$  平均分配到各个电动汽车充换电站是最简单实用的方法。计及各个电动汽车充换电站属于不同的代理商,参与系统调频的成本不同,则按可调容量的平均分配法并不能使得电网的调频成本最小。此外,该方法是以集中控制的方式将电动汽车总功率指令  $\Delta P_{EV}$  分配给各个电动汽车充换电站,需要实时采集各电动汽车充换电站的信息,当参与系统调频的电动汽车充换电站规模增大时,会出现通信堵塞等问题。

为了适应智能电网从集中式向兼顾“分布自治”和“集中协调”的分布集中式发展的趋势,文献<sup>[9]</sup>搭

收稿日期:2016-11-08;修回日期:2017-11-11  
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013-CB228205);国家自然科学基金资助项目(51477055)  
Project supported by the National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228205) and the National Natural Science Foundation of China(51477055)

建了一种分散自治的智能发电控制框架,并结合多智能体协同一致性算法,有效解决了区域互联电网 AGC 功率分配的分散自治问题,但未涉及电动汽车作为分布式电源参与系统调频。一致性算法是在一个多智能体网络中,通过智能体与相邻智能体相互协作使得所关心的变量达到一致的方法,已广泛应用于编队控制<sup>[10]</sup>、无人机控制<sup>[11]</sup>、群集<sup>[12]</sup>等领域。因此,本文提出将一致性算法应用于各个充换电站的 AGC 功率分配过程。为了避免电池过充或过放,延长电池使用寿命,本文采用按 SOC 的比例分摊法<sup>[1]</sup>来求解充换电站内部的 AGC 功率再分配过程。最后,本文利用海南电网模型进行仿真和测试。

## 1 电动汽车充换电站参与 AGC 功率分配的架构和数学模型

### 1.1 电动汽车充换电站辅助调频架构

电动汽车充换电站参与 AGC 功率分配的框架如图 1 所示,其主要由电网调度中心、电动汽车集中控制中心、电动汽车充换电站以及电动汽车电池构成。



图 1 电动汽车充换电站参与 AGC 功率分配的框架

Fig.1 Framework of electric vehicle charging stations participating in AGC power allocation

电网调度中心的主要职责是采集系统的频率偏差和联络线功率偏差,计算总的发电功率指令  $\Delta P_{\Sigma}$ , 并采用一定的优化算法将总的发电功率指令  $\Delta P_{\Sigma}$  分配给风光水火等 AGC 电源机组和电动汽车集中控制中心。

电动汽车集中控制中心是电动汽车和电网互动的桥梁,保障了电动汽车和电网之间双向能量的流动<sup>[13]</sup>。一方面,它将各个电动汽车充换电站的单位调整电量的价格和实时的可调节容量等信息上传给电网调度中心,另一方面,它将电网调度中心下发的总功率指令  $\Delta P_{EV}$  分配给各个电动汽车充换电站。考虑到在电力市场环境下,电动汽车充换电站分属不同的代理商,在参与系统调频时单位调整电量的价格不同。则以电网公司的利益为出发点,不同电

动汽车充换电站之间应采用某种 AGC 功率分配策略使得电网公司调节成本最小,这是本文研究的重点。

电动汽车充换电站相当于一个电动汽车代理,对大规模的电动汽车电池实施集群性调度,以满足电网调频容量的需求。一方面,各个电动汽车电池将其接入电网的起始 SOC、额定充电功率、接入电网和离开电网的时间、当前的充电功率、当前的 SOC 上传到电动汽车充换电站控制中心,另一方面,电动汽车充换电站控制中心根据各电动汽车电池的 SOC、可调节容量等信息采取某种策略将电动汽车集中控制中心下发给它的功率指令分配给各个电动汽车电池。

### 1.2 电动汽车充换电站参与 AGC 功率分配的数学模型

在本文所提的电动汽车充换电站辅助调频的框架下,充换电站参与 AGC 功率分配过程中考虑了调节成本目标,其数学模型具体描述如下:

$$\begin{aligned} \min f &= \sum_{i=1}^n \sum_{w=1}^{W_i} C_{iw} \Delta P_{iw} \\ \text{s.t. } \Delta P_{EV\Sigma} &= \sum_{i=1}^n \sum_{w=1}^{W_i} \Delta P_{iw} \\ \Delta P_i &= \sum_{w=1}^{W_i} \Delta P_{iw} \\ \Delta P_{EV\Sigma} \Delta P_{iw} &> 0 \\ \Delta P_{iw}^{\min} &\leq \Delta P_{iw} \leq \Delta P_{iw}^{\max} \\ \text{SOC}_{iw}^{\min} &\leq \text{SOC}_{iw} \leq \text{SOC}_{iw}^{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $i=1, 2, \dots, n; w=1, 2, \dots, W_i; f$  为电动汽车参与系统调频总的调节成本目标;  $\Delta P_{EV\Sigma}$  为电网调度中心下发给电动汽车集中控制中心总的发电功率指令;  $C_{iw}$  为电动汽车充换电站  $i$  的第  $w$  个电池的调节成本系数,且假设在同一个电动汽车充换电站内各个电动汽车电池的调节成本系数是一样的;  $\Delta P_i$  为电动汽车充换电站  $i$  的发电功率指令;  $\Delta P_{iw}$  为分配给电动汽车充换电站  $i$  第  $w$  个电动汽车电池的发电功率指令;  $\Delta P_{iw}^{\max}, \Delta P_{iw}^{\min}$  分别为电动汽车充换电站  $i$  第  $w$  个电动汽车电池的调节容量上、下限;  $\text{SOC}_{iw}^{\max}, \text{SOC}_{iw}^{\min}$  分别为电动汽车充换电站  $i$  第  $w$  个电动汽车电池允许参与系统调频的上、下限;  $n$  为电动汽车充换电站的数量;  $W_i$  为电动汽车充换电站  $i$  的电动汽车电池总个数;第二个约束是为了避免电池反调现象,以减少不必要的调节费用和频繁调节,有利于延长电池的使用寿命。

在本文所提的含电动汽车充换电站的 AGC 功率分配架构下,电动汽车充换电站只会在保证自身充电需求和有一定收益的前提下才能响应电力公司的调频需求。在目前市场机制尚不完善的情况下,考虑到电动汽车充换电站和电网调度中心之间的信

息不对称,电动汽车充换电站可通过与电网调度中心谈判的方式参与系统调频从而获得一定的收益。此时充换电站作为提供调频服务的卖方,电网调度中心作为购买调频服务的买方,买卖双方可通过单对单谈判或者一对多谈判的方式,确定谈判成交价格 and 成交电量,其中成价格是双方谈判的侧重点,而成交电量约束一般比较轻松。为了在满足电动汽车充换电站经济效益的同时优化系统运行的经济性,文献[14]提出了电动汽车充换电站谈判报价策略和报价调整策略,在多轮谈判成功结束后买卖双方签订双方调频合同,其中合同中成交的调频价格即是充换电站的调节成本系数,其受充换电站调频容量收益、反向放电电能收益、充电成本和电池损耗成本等因素的影响。一般而言,充换电站调频容量和反向放电电能收益越大,则其调节成本系数越小;充换电站充电成本和电池损耗成本越小,则其调节成本系数越小。

在这种情况下,调节系数一般是确定的,出现不准确的可能也将很小。在采用成本一致性算法进行功率分配时,由于电动汽车参与调频时不存在爬坡约束,因此不准确的调节成本系数将不会影响 AGC 的动态响应性能。然而,由于调节成本系数的偏差,将会导致 AGC 总调节成本的变化。具体而言,当某充换电站的调节成本系数偏大时,其获得的功率指令就偏少,当其真实的调节成本系数在所有充换电站中明显处于较低的水平时,就会导致 AGC 总调节成本的增加,当该系数明显处于较高的水平时,则将导致 AGC 总调节成本的降低;当某充换电站的调节成本系数偏小时,其获得的功率指令就偏大,当其真实的调节成本系数在所有充换电站中明显处于较低的水平时,就会导致 AGC 总调节成本的减小,当该系数明显处于较高的水平时,则将导致 AGC 总调节成本的增加。

当负荷发生扰动时,为使得调节成本更低的电动汽车充换电站承担更多的有功功率缺额或过剩,本文选取调节成本作为电动汽车充换电站之间的一致性状态变量,并采用无领导者且功率偏差共享模式的功率分配算法。为了避免电池过充或过放,减小对电动汽车电池使用寿命的影响,电动汽车充换电站内部采用 SOC 的比例分摊法<sup>[1]</sup>将电动汽车充换电站总的发电功率指令分配给各个电动汽车电池。

## 2 基于一致性算法的充换电站 AGC 功率分配策略

### 2.1 一致性算法

一致性算法是应用于多智能体的分散控制方法,通过智能体之间的信息交互从而使得网络的一致性

状态变量趋于一致。考虑到智能体之间的通信传输需要一定时间<sup>[15]</sup>,本文采用一阶离散一致性算法,其迭代公式可描述如下:

$$x_i[k+1] = \sum_{j=1}^n d_{ij}[k] x_j[k] \quad (2)$$

其中,  $x_i$  为第  $i$  个智能体的信息状态;  $d_{ij}[k]$  为行随机矩阵  $D = [d_{ij}] \in \mathbf{R}^{n \times n}$  在离散时刻  $k$  的第  $(i, j)$  项,定义如式(3)所示。

$$d_{ij}[k] = |l_{ij}| / \sum_{j=1}^n |l_{ij}| \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中,  $l_{ij}$  为多智能体网络拓扑图  $G$  的拉普拉斯矩阵  $L$  的元素,即可表示为式(4)。

$$l_{ii} = \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}, \quad l_{ij} = -a_{ij} \quad \forall i \neq j \quad (4)$$

其中,  $a_{ij}$  为图  $G$  的邻接矩阵的元素。

### 2.2 基于成本一致性算法的充换电站 AGC 功率分配

为了使调节成本更低的充换电站承担更多的功率扰动,本文选取成本作为一致性状态变量,则充换电站  $i$  的调节成本  $r_i$  为:

$$r_i = C_i \Delta P_i \quad (5)$$

其中,  $C_i$  为充换电站  $i$  的调节成本系数。

为了保证功率平衡,并且考虑所有电动汽车充换电站共同承担功率偏差,调节成本一致性变量  $r_i$  按如下公式更新:

$$r_i[k+1] = \begin{cases} \sum_{j=1}^n d_{ij}[k] x_j[k] + \gamma \Delta P_{\text{error}} / n & \Delta P_{\text{EV}\Sigma} > 0 \\ \sum_{j=1}^n d_{ij}[k] x_j[k] - \gamma \Delta P_{\text{error}} / n & \Delta P_{\text{EV}\Sigma} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\gamma$  为误差调节因子,  $\gamma > 0$ ;  $\Delta P_{\text{error}}$  为电动汽车集中控制中心总的发电功率指令与所有电动汽车充换电站总功率指令的偏差,定义如式(7)所示。

$$\Delta P_{\text{error}} = \Delta P_{\text{EV}\Sigma} - \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (7)$$

在一致性状态变量更新过程中,为了使功率偏差的绝对值逐渐减小,当  $\Delta P_{\text{EV}\Sigma}$  为正时,调节成本一致性变量  $r_i$  应逐渐增加,相反,当  $\Delta P_{\text{EV}\Sigma}$  为负时,调节成本一致性变量  $r_i$  应逐渐减小。

经过式(6)若干次迭代后,各电动汽车充换电站的调节成本将趋于一致,其收敛判据如下:

$$|\Delta P_{\text{error}}| < \varepsilon \quad (8)$$

其中,  $\varepsilon$  为各充换电站的最大允许功率误差,  $\varepsilon > 0$ 。

在不同电动汽车充换电站 AGC 功率分配过程中,当分配给某个电动汽车充换电站的功率指令超过其备用容量限值,即存在以下约束:

$$\Delta P_i = \begin{cases} \Delta P_i^{\max} = \sum_{w=1}^{W_i} \Delta P_{iw}^{\max} & \Delta P_i > \Delta P_i^{\max} \\ \Delta P_i^{\min} = \sum_{w=1}^{W_i} \Delta P_{iw}^{\min} & \Delta P_i < \Delta P_i^{\min} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $\Delta P_i^{\max}$ 、 $P_i^{\min}$  分别为电动汽车充换电站  $i$  备用容量的最大值和最小值。

此时,该电动汽车充换电站的调节成本也达到限值,如下所示:

$$r_i = r_i^{\max} = \begin{cases} C_i |\Delta P_i^{\max}| & \Delta P_i > \Delta P_i^{\max} \\ C_i |\Delta P_i^{\min}| & \Delta P_i < \Delta P_i^{\min} \end{cases} \quad (10)$$

### 2.3 虚拟一致性变量和真实一致性变量

当某个电动汽车充换电站的功率指令超过其备用容量限制时,为了解决文献[9]需要重新更新随机矩阵元素的问题,文献[16]提出了虚拟一致性变量和真实一致性变量的概念。虚拟一致性变量是多智能体网络中智能体与相邻智能体交互的信息,不考虑电动汽车充换电站容量的约束,直接依据式(6)和式(7)更新得到。而真实的一致性变量是反映电动汽车充换电站真实的状态,通过式(9)和式(5),即电动汽车充换电站实际分配的功率指令与相应的调节成本系数乘积得到,并有如下约束:

$$r_i^{\text{ac}} = \begin{cases} r_i^i & r_i^i < r_i^{\max} \\ r_i^{\max} & r_i^i \geq r_i^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

## 3 算法流程

如图 2 所示,本文所提的电动汽车参与系统 AGC 功率分配包括 2 个层次:电动汽车控制中心基于成本一致性算法将总功率指令  $\Delta P_{\text{EV}\Sigma}$  分配给各充换电站;在每个充换电站分配得到其功率指令时,采用 SOC 的比例分摊法<sup>[1]</sup>将其功率指令分配给各个电

汽车电池。

## 4 算例研究

### 4.1 系统模型

根据文献[17],2015 年至 2020 年期间,我国优先建设公交、出租及环卫物流等超过 1.2 万座集中式充换电站,新增超过 480 万个分散式充电桩以满足公务车与私人乘用车的充电需求;其中公共服务领域的电动汽车优先采用换电模式。本文以海南电网负荷频率控制模型为基础,8 台 AGC 机组的参数如表 1 所示,以公交车充换电站参与系统调频为主,根据海南省 2015 年各市县的 GDP 排名,假设前 10 名的市县(海口、三亚、澄迈、儋州、琼海、万宁、文昌、东方、临高、陵水)各设一个大型的公交车充换电站 CS1—CS10,每个公交充换电站可同时为 120 辆公交车电池充电,且所有公交车电池的型号和参数一样,电池容量为 96 kW·h。其中 CS1—CS10 的通信拓扑如图 3 所示。根据上述提到的调节成本系数确定原则,并参考文献[14]中给出的电动汽车代理商期望的最低收益和期望的最高收益所对应的单位电量价格区间,文中由此设置了算例模型中 10 个充换电站的调节成本系数,如表 2 所示。考虑分时电价的影响,公交车每天充电 2 次,白天充电是为公交车补充充电,其充电时段是 10:00—16:30,额定充电功率为 135 kW,晚上充电是为统一集中充电,充电时段是 23:00 至次日 05:30,额定充电功率为 21 kW<sup>[18]</sup>。因此,可假设 CS1—CS10 参与系统 AGC 功率分配时总的可调容量每 15 min 变化一次,则一天形成 96 个断面,如图 4 所示<sup>[19]</sup>。其中某一断面下 CS1—CS10 的上调容量和下调容量如表 2 所示。

表 1 海南电网 AGC 机组参数统计表

Table 1 Parameters of AGC units in Hainan Power Grid

机组	类型	上调容量/MW	下调容量/MW	爬坡速率/(MW·min <sup>-1</sup> )	成本/[元·(MW·h) <sup>-1</sup> ]
G <sub>1</sub>	燃煤机组	70	-70	3.5	132.83
G <sub>2</sub>	燃煤机组	210	-210	10.5	127.64
G <sub>3</sub>	燃煤机组	735	-735	36.75	181.42
G <sub>4</sub>	LNG 机组	140	-140	14	226.78
G <sub>5</sub>	LNG 机组	60	-60	6	233.91
G <sub>6</sub>	水电机组	232	0	232	75.16
G <sub>7</sub>	水电机组	52	0	52	73.67
G <sub>8</sub>	水电机组	80	0	80	70.17

注:LNG 机组指燃液化天然气机组。

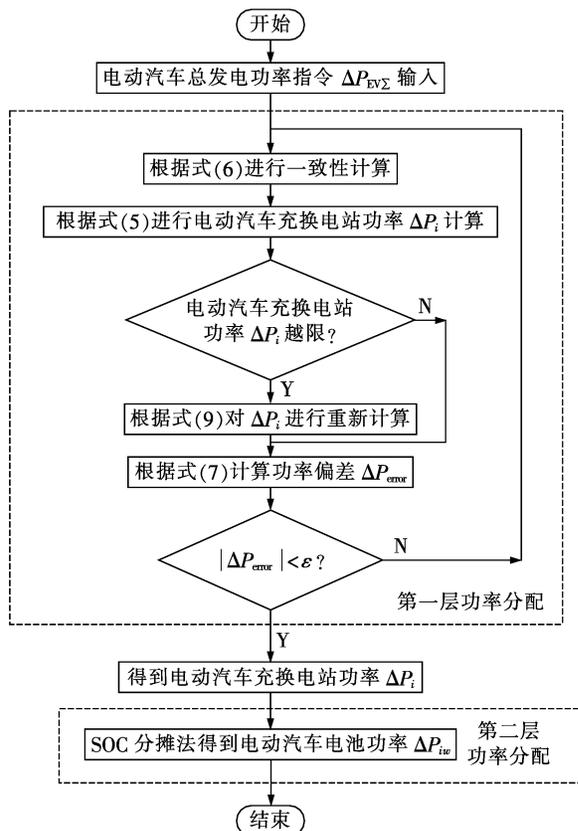


图 2 算法求解流程图

Fig.2 Flowchart of algorithm

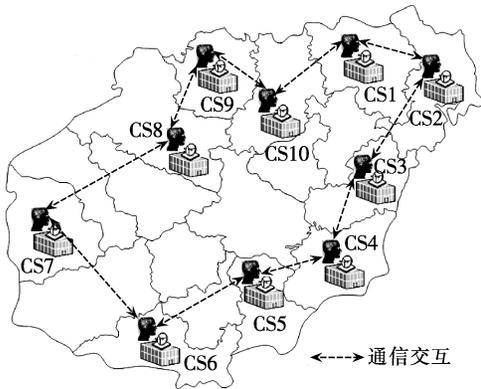


图 3 海南电网充换电站通信网络拓扑图

Fig.3 Topology of communication network of charging stations in Hainan Power Grid

表 2 各充换电站的调节成本系数和某断面可调容量

Table 2 Regulation cost coefficient and available power capacity of a section for different charging stations

充换电站	调节成本系数 $C_i$ / [元·(MW·h) <sup>-1</sup> ]	上调容量 / 下调容量 / MW	MW
CS1	77.44	3.0	2.5
CS2	65.12	4.2	3.6
CS3	82.30	6.3	5.8
CS4	78.08	3.2	2.6
CS5	96.51	4.8	4.3
CS6	83.27	1.8	1.4
CS7	95.94	2.8	2.2
CS8	92.02	1.5	1.2
CS9	68.04	2.4	2.0
CS10	70.93	5.0	4.4

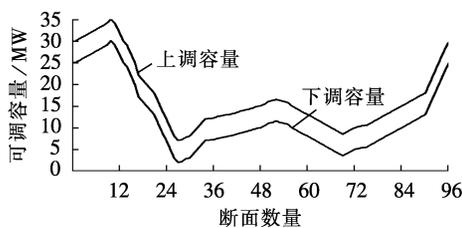


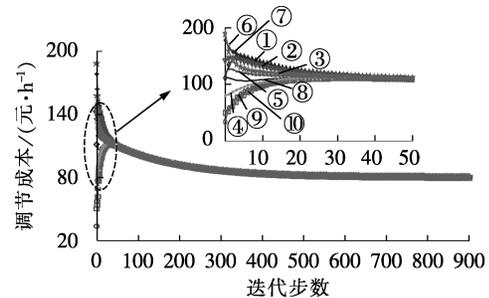
图 4 充换电站一天 96 个断面可调节容量

Fig.4 Available power capacity of charging stations for 96 sections per day

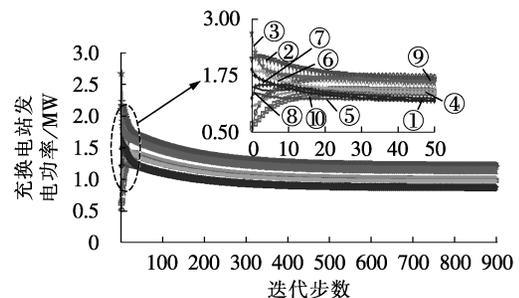
#### 4.2 离散一致性算法仿真研究

本文在上述模型和信息拓扑的基础上,根据表 2 所提供该断面时各充换电站的上下可调容量约束,以调节成本作为一致性变量,且以  $|\Delta P_{\text{error}}| \leq 0.01 \text{ MW}$  为收敛条件,误差调节因子  $\gamma$  取 0.5,当  $\Delta P_{\text{EV}\Sigma} = 10 \text{ MW}$  时,基于成本一致性算法的 10 个充换电站的 AGC 功率分配收敛过程如图 5 所示。

从图 5 可以看出,当迭代步数为 800 时,所有充换电站的调节成本一致性变量达到一致,各充换电站发电功率在同一时刻收敛,且均低于 1.5 MW,可见  $\Delta P_{\text{EV}\Sigma} = 10 \text{ MW}$  的情况下,所有充换电站的发电功率均没达到其上调容量限值,此时真实一致性变量的收



①  $r_1$ , ②  $r_2$ , ③  $r_3$ , ④  $r_4$ , ⑤  $r_5$   
⑥  $r_6$ , ⑦  $r_7$ , ⑧  $r_8$ , ⑨  $r_9$ , ⑩  $r_{10}$   
(a) 调节成本收敛过程



①  $\Delta P_1$ , ②  $\Delta P_2$ , ③  $\Delta P_3$ , ④  $\Delta P_4$ , ⑤  $\Delta P_5$   
⑥  $\Delta P_6$ , ⑦  $\Delta P_7$ , ⑧  $\Delta P_8$ , ⑨  $\Delta P_9$ , ⑩  $\Delta P_{10}$   
(b) 各充换电站发电功率收敛过程

图 5 调节成本一致性收敛过程 ( $\Delta P_{\text{EV}\Sigma} = 10 \text{ MW}$ )Fig.5 Consensus convergence process of regulation cost ( $\Delta P_{\text{EV}\Sigma} = 10 \text{ MW}$ )

敛过程与虚拟一致性变量一样,如图 5(a)所示。

图 6 是  $\Delta P_{\text{EV}\Sigma} = 25 \text{ MW}$  时调节成本一致性算法的收敛过程。从图中看出,随着迭代步数的增加,所有充换电站的虚拟调节成本一致性变量逐渐趋于一致;各充换电站的发电功率也收敛于一定值,由于上调容量的约束,其中部分充换电站的发电功率已达到限值如图 6(c)的 CS6、CS8 和 CS9;同时这 3 个充换电站的真实一致性变量也到限值,如图 6(b)所示。这表明了在引入虚拟一致性变量和真实一致性变量概念后,即使在真实一致性变量达到限值时,所有充换电站的虚拟一致性变量均可达到一致,因此智能体之间可通过对虚拟一致性变量的交互,以保证算法的收敛性。

#### 4.3 随机扰动仿真研究

为了研究电动汽车参与电网 AGC 功率分配的成本一致性算法在应用环境中的动态性能,本算例对海南电网施加周期为 1000 s、幅值不超过 150 MW (对应于海南全省日最大负荷<sup>[20-21]</sup>的 10%)的随机方波负荷扰动仿真,仿真时长 24 h;其中还引入遗传算法 GA(Genetic Algorithm)<sup>[22]</sup>、粒子群优化 PSO(Particle Swarm Optimization)<sup>[23]</sup>算法、群搜索优化 GSO(Group Search Optimizer)<sup>[24]</sup>算法、线性规划 LP(Linear Programming)及 PROP<sup>[25]</sup>算法与之相比较;此外,AGC 的控制周期为 9 s,电动汽车集中控制中心总功率指

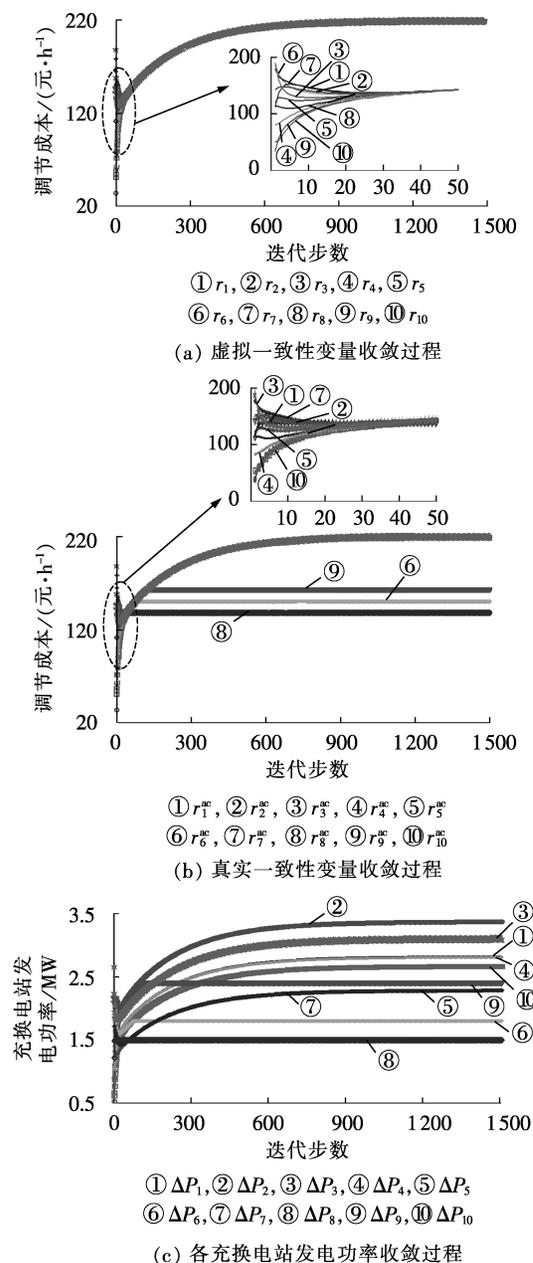


图 6 调节成本一致性收敛过程 ( $\Delta P_{EV\Sigma} = 25 \text{ MW}$ )

Fig.6 Consensus convergence process of regulation cost ( $\Delta P_{EV\Sigma} = 25 \text{ MW}$ )

令  $\Delta P_{EV\Sigma}$  是以整个控制区域电网内所有 AGC 机组的调节费用和最大爬升时间的线性加权最小化作为目标,基于 GA 离线静态优化得到的。

为了进一步研究电动汽车参与电网调频对电网

控制性能的影响,分别用燃煤机组  $G_3$ 、水电机组  $G_6$  替代电动汽车进行仿真对比,即电动汽车集中控制中心总功率指令  $\Delta P_{EV\Sigma}$  全部由燃煤机组  $G_3$  或者水电机组  $G_6$  承担。

图 7 给出的是海南电网随机方波负荷扰动下成本一致性算法的功率跟踪和频率偏差曲线(0~3 h)。从图中可发现:①PI 控制器下发的总功率指令  $\Delta P_{\Sigma}$  能较好地跟踪负荷扰动,机组实际总输出基本也与负荷扰动相匹配;②电网在经受负荷扰动后产生的频率偏差在合理的范围内,且都能较快地恢复到理想值。以上说明了成本一致性算法在不同充换电站分配的可行性。

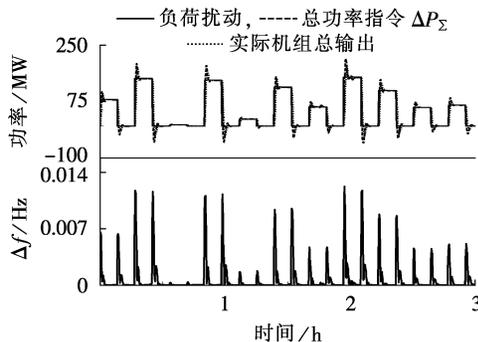


图 7 丰水期随机方波负荷扰动仿真

Fig.7 Load disturbance simulation with stochastic square pulse in wet season

表 3 给出了不同算法下电动汽车参与海南电网调频时互联电网控制性能标准指标和调节费用,其中  $|\Delta f|$ 、 $|ACE|$  分别为频率偏差  $\Delta f$  和区域控制误差(ACE)在 24 h 内的均值;CPS1 为考核值 24 h 内的均值;CPS2、CPS 为 24 h 内考核合格率百分数;成本为 24 h 所有机组的总调节成本。从表中可以得到如下结论。①成本一致性算法的 CPS 指标和 GA、PSO、GSO 以及 PROP 等集中式算法的比较接近,这进一步表明成本一致性算法可为电动汽车参与电网 AGC 功率分配分散控制提供了一种可行的方法;由于成本一致性算法是利用智能体局部信息的交互使得一致性变量趋于一致,且对优化模型的依赖性较强,因此与 GA、PSO、GSO 以及 LP 等集中式算法相比,总调节成本稍高一些;但随着充换电站规模变大,以上所提的集中式算法存在计算速度慢、寻

表 3 不同算法下丰水期海南电网试验指标统计表

Table 3 Statistics of test indexes of Hainan Power Grid in wet season for different algorithms

算法	$ \Delta f /\text{Hz}$	$ ACE /\text{MW}$	CPS1/%	CPS2/%	CPS/%	成本/万元
成本一致性算法	$9.0017 \times 10^{-4}$	0.5176	199.9767	100	100	10.94
GA	$9.0018 \times 10^{-4}$	0.5177	199.9767	100	100	10.91
PSO	$9.0014 \times 10^{-4}$	0.5176	199.9767	100	100	10.92
GSO	$9.0014 \times 10^{-4}$	0.5176	199.9767	100	100	10.89
LP	$9.2019 \times 10^{-4}$	0.5723	199.9747	100	100	10.73
PROP	$9.0014 \times 10^{-4}$	0.5176	199.9767	100	100	10.95

优效果差等问题,较难满足 AGC 实时控制的 4~16 s 时间尺度要求,而成本一致性算法仍具有收敛时间短、寻优效果稳定等优点,更适合工程应用。②与其他智能算法相比,LP 算法是传统的优化算法,在可行域中能找到唯一明确的最优解,因此总调节成本最低。③PROP 算法采用基于可调容量的固定比例分配,缺乏优化目标,因此在所有的算法中总调节成本最高。

表 4 给出了以上几种算法的运行时间比较统计。从表中可以发现:①在所有算法中,GA 运行时间最长,难以满足 AGC 4~16 s 控制时间尺度要求,因此其只能求解静态优化,除 GA 之外的其他算法都可求解 AGC 功率动态分配在线优化;②与 PSO、GSO、LP 等算法相比,成本一致性算法平均运行时间更短,更适合求解大规模电动汽车充换电站参与调频 AGC 功率分配问题;③PROP 算法虽运行时间最短,但无法提升经济性能指标。

表 5 给出了无电动汽车参与时海南电网控制

表 5 丰水期无电动汽车参与时海南电网试验指标统计表

Table 5 Statistics of test indexes of Hainan Power Grid in wet season, without electric vehicles participating in AGC power allocation

场景	$ \Delta f /\text{Hz}$	$ \text{ACE} /\text{MW}$	CPS1/%	CPS2/%	CPS/%	成本/万元
燃煤机组 $G_3$ 代替电动汽车	$9.8239 \times 10^{-4}$	0.5199	199.9753	100	100	11.73
水电机组 $G_6$ 代替电动汽车	$9.3228 \times 10^{-4}$	0.5209	199.9762	100	100	11.13

利于提升电网的 CPS 指标和经济性能指标。

## 5 结论

本文搭建了电动汽车充换电站参与电网 AGC 功率分配的数学优化模型,并提出了一种基于成本一致性算法的电动汽车充换电站 AGC 功率分配方法,该方法有如下特点。

a. 为电动汽车参与电网 AGC 功率分配分散控制提供了一种可行的方法。在引入虚拟一致性变量和真实一致性变量后,成本一致性算法可灵活应用于电动汽车的 AGC 功率分配问题,同时,由于算法具有分布计算及简便更新规则等特点,可以有效实现电动汽车充放电的自律调频。

b. 成本一致性算法以调节费用作为一致性状态变量,使调节费用更少的充换电站承担更多的功率扰动,可以减少电网的调频成本,并提高区域电网的控制性能标准。

## 参考文献:

[1] 张立岩,赵俊华,文福拴,等. 基于线性矩阵不等式的电动汽车网络化鲁棒控制[J]. 电力系统自动化,2013,37(20):54-62. ZHANG Liyan,ZHAO Junhua,WEN Fushuan,et al. Networked robust control of electric vehicles based on linear matrix inequalities[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(20):54-62.

表 4 不同算法运行时间比较表

Table 4 Comparison of running times among different algorithms

算法	运行时间/s		
	平均值	最小值	最大值
成本一致性算法	0.0075	0.0068	0.0106
GA	18.8779	15.7479	22.8251
PSO	1.2999	1.4223	2.2543
GSO	1.4430	1.1774	1.5026
LP	0.4365	0.0107	0.8518
PROP	$3.8404 \times 10^{-5}$	$7.1426 \times 10^{-4}$	0.0014

性能标准指标和总调节费用。从表 3 和表 5 的对比中可发现:①由于电动汽车电池无爬坡约束、调频时延小且响应速度快,有电动汽车参与调频比无电动汽车参与时仿真效果更好,这表明了电动汽车参与电网 AGC 功率分配有助于减少区域控制偏差,抑制负荷波动;②由于水电机组比火电机组时延小、爬坡速率大,电动汽车集中控制中心总功率指令  $\Delta P_{EV\Sigma}$  全部由水电机组  $G_6$  承担比全部由燃煤机组  $G_3$  承担的仿真效果更好,这也凸显了水电参与电网调频有

[2] 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):1-9,30. GUO Jianlong,WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):1-9,30.

[3] 杨甲甲,赵俊华,文福拴,等. 含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):92-102. YANG Jiajia,ZHAO Junhua,WEN Fushuan,et al. Development of bidding strategies for virtual power plants considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(13):92-102.

[4] HAN S,SEZAKI K. Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2010,1(1):65-72.

[5] 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. YU Dayang,SONG Shuguang,ZHANG Bo,et al. Synergistic dispatch of PEVs charging and wind power in Chinese regional power grids[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):24-29.

[6] 姚伟锋,赵俊华,文福拴,等. 集中充电模式下的电动汽车调频策略[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):69-76. YAO Weifeng,ZHAO Junhua,WEN Fushuan,et al. Frequency regulation strategy for electric vehicles with centralized charging[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(9):69-76.

[7] HAN S,HAN S H,SEZAKI K. Design of an optimal aggregator for vehicle-to-grid regulation service[C]//Innovative Smart

- Grid Technologies (ISGT). Gaithersburg, USA: IEEE, 2010: 1-8.
- [8] ESCUDERO-GARZÁS J J, GARCÍA-ARMADA A, SECO-GRANADOS G. Fair design of plug-in electric vehicles aggregator for V2G regulation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(8): 3406-3419.
- [9] 张孝顺, 余涛. 互联网 AGC 功率动态分配的虚拟发电部落协同一致性算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3750-3759. ZHANG Xiaoshun, YU Tao. Virtual generation tribe based collaborative consensus algorithm for dynamic generation dispatch of AGC in interconnected power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3750-3759.
- [10] 张博, 罗建军, 袁建平. 一种基于信息一致性的卫星编队协同控制策略[J]. 航空学报, 2010, 31(5): 1004-1013. ZHANG Bo, LUO Jianjun, YUAN Jianping. A satellite formation cooperative control strategy based on information consensus[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(5): 1004-1013.
- [11] 贾方超, 姚佩阳, 马方方, 等. 快速一致性控制算法下的多 UAV 分布式协同控制[J]. 电光与控制, 2014, 21(5): 11-18. JIA Fangchao, YAO Peiyang, MA Fangfang, et al. Distributed cooperative control for multi-UAV based on fast consensus control algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(5): 11-18.
- [12] LEE D, SPONG M W. Stable flocking of multiple inertial agents on balanced graphs[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(8): 1469-1475.
- [13] 黄媛, 刘俊勇, 陈并锐, 等. 计及电动汽车入网的负荷频率控制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 24-28. HUANG Yuan, LIU Junyong, CHEN Jingrui, et al. Load frequency control considering vehicle to grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 24-28.
- [14] 刘伟佳, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电动汽车参与电力系统优化调度的谈判策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 192-200. LIU Weijia, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Negotiation strategies for participation of electric vehicles in power system optimal dispatching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 192-200.
- [15] 吕振宇, 吴在军, 窦晓波, 等. 基于离散一致性的孤立直流微网自适应下垂控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4397-4407. LÜ Zhenyu, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. An adaptive droop control for the islanded DC microgrid based on discrete consensus algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4397-4407.
- [16] ZHANG X, YU T, YANG B, et al. Virtual generation tribe based robust collaborative consensus algorithm for dynamic generation command dispatch optimization of smart grid[J]. Energy, 2016, 101: 34-51.
- [17] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 电动汽车充电基础设施发展指南(2015—2020年)[EB/OL]. (2015-10-09)[2016-01-10]. [http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201511/t20151117\\_758762.html](http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201511/t20151117_758762.html).
- [18] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 换电模式下电动汽车电池充电负荷建模与有序充电研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 1-10. LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Study on charging load modeling and coordinated charging of electric vehicles under battery swapping modes[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 1-10.
- [19] 董云先, 吴奎华, 吴奎忠, 等. 电动汽车充电模式对区域电网负荷特性的影响[J]. 山东电力技术, 2013(2): 32-36. DONG Yunxian, WU Kuihua, WU Kuizhong, et al. Electric vehicle load characteristic analysis and impact of regional power grid[J]. Shandong Electric Power, 2013(2): 32-36.
- [20] 翁国庆, 黄飞腾, 张有兵, 等. 电动公交汽车电池集群参与海岛微网能量调度的 V2G 策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 31-37. WENG Guoqing, HUANG Feiteng, ZHANG Youbing, et al. V2G strategy for energy dispatch of island microgrid with EBBG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 31-37.
- [21] 陈刚, 赵旋宇. 海南联网 AGC 控制策略研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(5): 54-57. CHEN Gang, ZHAO Xuanyu. Research on AGC control method of Hainan interconnection[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(5): 54-57.
- [22] GÜNGÖR V C, SAHIN D, KOC AK T, et al. Smart grid technologies: communication technologies and standards[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(4): 529-539.
- [23] 郁磊, 史峰, 王辉, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 101-107.
- [24] 刘华臣, 王锡淮, 肖健梅, 等. 基于群搜索算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 93-99. LIU Huachen, WANG Xihuai, XIAO Jianmei, et al. Reactive power optimization based on group search optimizer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 93-99.
- [25] 高阳, 陈世福, 陆鑫. 强化学习研究综述[J]. 自动化学报, 2004, 30(1): 86-100. GAO Yang, CHEN Shifu, LU Xin. Research on reinforcement learning technology: a review[J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(1): 86-100.

#### 作者简介:



李清

李清(1991—),女,广东湛江人,硕士,主要研究方向为电力系统优化运行与控制(E-mail: qingli1991@sina.com);

张孝顺(1990—),男,广东潮州人,博士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行与控制(E-mail: xszhang1990@sina.cn);

余涛(1974—),男,浙江宁波人,教授,博士,主要研究方向为复杂电力系统的非线性控制理论和仿真(E-mail: taoyu1@scut.edu.cn);

瞿凯平(1993—),男,江苏泰州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行与控制(E-mail: 13560361373@163.com);

郑炜楠(1992—),男,广东汕头人,硕士研究生,主要研究方向为配网自动化及节能理论相关(E-mail: 1340868763@qq.com);

刘前进(1967—),男,湖北黄冈人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统可靠性分析(E-mail: qjliu@scut.edu.cn)。

(下转第 95 页 continued on page 95)

## A novel topology of $n+1$ hybrid modular multilevel converter and its control strategy

MIAO Huiyu<sup>1</sup>, MEI Jun<sup>1</sup>, ZHANG Chenyu<sup>2</sup>, ZHENG Jianyong<sup>1,3</sup>, MEI Fei<sup>3,4</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

3. Jiangsu Key Laboratory of Smart Grid Technology and Equipment, Zhenjiang 212000, China;

4. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** A novel topology of  $n+1$  HMMC (Hybrid Modular Multilevel Converter) is proposed for medium voltage application occasions. A full-bridge submodule is added to the traditional modular multilevel converter with  $n$  submodules in one arm, so that the capacitor voltage is controlled by half of half-bridge submodule, and the output voltage level increases from  $n+1$  to  $2n+3$ . The proposed strategy employs a hybrid modulation mode which can decrease the losses of HMMC submodule and guarantee steady-state operational condition for HMMC. Due to the difference in capacitor voltage between half-bridge submodule and full-bridge submodule, a capacitor precharge method is adopted and a model of submodule capacitor voltage is built, based on which a control strategy of submodule capacitor voltage balance is further proposed. Simulative results with MATLAB/Simulink validate the effectiveness and correctness of the proposed topology and control strategy.

**Key words:** hybrid modular multilevel converter; hybrid modulation; submodule capacitor voltage balance; capacitor precharge

.....  
(上接第 87 页 continued from page 87)

## Cost consensus algorithm of electric vehicle charging station participating in AGC power allocation of grid

LI Qing, ZHANG Xiaoshun, YU Tao, QU Kaiping, ZHENG Weinan, LIU Qianjin

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

**Abstract:** A framework of electric vehicle charging station participating in the AGC power allocation of grid is constructed and its optimal mathematical model is established, based on which, a cost consensus algorithm of electric vehicle charging station participating in AGC power allocation is proposed. In order to improve the application flexibility of algorithm, the virtual consensus variables are taken as the information of consensus interactive calculation among agents while the actual consensus variables are adopted to determine the AGC power of electric vehicle. Simulative results of a power grid model show that, the proposed algorithm can reduce the regulation costs and enhance the AGC performance of power grid, and can also effectively achieve autonomous frequency regulation of electric vehicles participating in AGC power allocation.

**Key words:** electric vehicles; electric vehicle charging station; cost consensus algorithm; automatic generation control; autonomous frequency regulation