

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211763

# 基于负荷均衡加载的电力系统分布式经济调度策略

刘春涛, 宋运忠

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003)

**摘要:** 在构建以新能源为主题的新型电力系统背景下, 电网面临以电动汽车为代表的电气化交通负荷剧增的巨大挑战。针对上述问题提出一种负荷均衡优化模型, 将负荷均衡后的集群电动汽车依次并入电网。然后应用多智能体一致性算法, 以发电机组的增量成本和集群电动汽车的增量效益作为一致性变量, 设计一种集群电动汽车参与电力系统经济调度的算法, 通过分布式优化方式解决经济调度问题。建立4种典型的仿真情景, 分别验证集群电动汽车分步参与电力系统分布式优化调度的有效性、对不同通信拓扑和功率约束情况的适用性以及分布式优化算法在集群电动汽车参与经济调度时“即插即用”的能力。在IEEE 39节点系统上进行算例仿真, 验证了策略的有效性。  
**关键词:** 负荷均衡; 集群电动汽车; 分布式优化; 经济调度

## Distributed economic dispatch strategy of a power system based on load balancing loading

LIU Chuntao, SONG Yunzhong

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** When building a new power system with the theme of new energy, the power grid is facing a huge challenge of a sharp increase in electrical traffic load represented by electric vehicles. To solve the above problem, a load balancing optimization model is proposed, one which integrates the aggregate electric vehicles after load balancing into the power grid in turn. Then, using a multi-agent consensus algorithm, the incremental cost of the generation unit and the incremental benefit of the aggregate electric vehicle are taken as the consistency variables, and an algorithm for the aggregate electric vehicle to participate in the economic dispatch of the power system is designed. The economic dispatch problem is solved by distributed optimization. Four typical simulation scenarios are established to verify the effectiveness of aggregate electric vehicles participating in distributed optimal dispatch of a power system step by step. The applicability of different communication topologies and power constraints and the ability of a distributed optimization algorithm to "plug and play" when aggregate electric vehicles participate in economic dispatch are also verified. Simulation results on IEEE 39-bus system verify the effectiveness of the strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61340041 and No. 61374079).

**Key words:** load balancing; aggregate electric vehicles; distributed optimization; economic dispatch

## 0 引言

随着能源危机和环保意识的增强, 可再生能源发电在电网中的比例迅速增长<sup>[1-4]</sup>。间歇性强的新能源和用电负荷占比不断增高意味着经济调度的不确定性变量增加, 使得电力系统运行方式日益复杂多变, 这将导致更加频繁的发电和需求不平衡, 传统上通常改变发电量跟踪负荷波动实现系统平衡, 这

种策略成本高且效率低。

负荷调度作为发电调度的补充能够在紧急情况下提供快速响应, 是平衡新能源间歇发电的一种重要手段<sup>[5-8]</sup>。而电动汽车作为内燃机的替代品, 因为对环境友好受到各国政府的广泛重视。随着电动汽车的日益普及, 将成为电网中一种新的分布式储能系统, 为实现负荷调度创造了有利的条件。电动汽车具有良好的可控性, 通过建立有效的优化调度模型, 根据电力系统运行状况改变电动汽车的充放电功率可以响应电力系统调度从而降低运行成本<sup>[9-10]</sup>。研究表明, 交通电气化与低碳发电相结合, 可以带

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61340041, 61374079); 河南省自然科学基金项目资助(182300410112)

来环境、健康和经济效益,同时支撑电力系统稳定运行<sup>[11-12]</sup>。电网与电动汽车的双向互动可以保持电能质量,节约运营成本,并增强弹性使电网达到动态平衡<sup>[13-16]</sup>。另一方面,这一潜力也伴随着诸多的挑战,电动汽车普及率和电动汽车充电容量的增加对配电网产生了负面影响,其大规模随机接入电网可能增加负载侧的不确定性,使配电网设备过载,从而缩短其寿命。因此电动汽车无序并网将对电力系统产生不可忽视的影响,将给电网的运行管理带来新的挑战<sup>[17-19]</sup>。建立有效的运行策略,挖掘电动汽车的灵活调控能力,在避免电动汽车给电网带来不利影响的同时,可以促进电网与电动汽车在规划、建设、运行等层面的深度融合<sup>[20]</sup>。

V2G 技术的发展为电动汽车参与电力系统运行调度架起了桥梁。然而,单台电动汽车功率小、容量低,用户的行为呈现不确定性,直接控制难度极大<sup>[21]</sup>,而且单个电动汽车的充电率和充电需求几乎不会对输电网产生可测量的影响。但规模化的电动汽车整体充放电功率满足一定的变化规律,因而研究人员提出了电动汽车聚合商的概念<sup>[22]</sup>。通过聚合大量碎片化的电动汽车形成具有一定数量的集群电动汽车(aggregate electric vehicles, AEVs),从而构建一种新型商业运行主体。集群电动汽车在聚合商的统一调控下参与经济调度<sup>[23-25]</sup>,提高电动汽车充放电管理水平,不仅有利于配电网的运行,还可以支持系统频率调节、负载跟踪等服务<sup>[26]</sup>。

传统上一般采用集中控制策略解决经济调度问题<sup>[27]</sup>,集中控制策略需要一个集中的基础设施来收集和所有集群电动汽车的信息,并集中优化其充电性能。这不是一个简单的任务,随着电动汽车规模的增加,无法以集中控制的方式有效解决。因此,实际电网中解决电动汽车调度问题的集中式方法在计算上具有挑战性。近年来随着分布式优化算法的发展,其在电力系统中的应用越来越广泛,例如文献<sup>[28]</sup>中利用分布式控制方案解决柔性负荷并网的经济调度问题,效果显著。电动汽车作为一种特殊的柔性负荷,不但可以消耗电能,还可以向电网传输能量,具有主动调控能力。因此,在电动汽车普及率不断增加的影响下,协调分散资源以实现经济调度的目标是很有价值的。在分布式配置中,每个智能体只需要知道自己和邻居的信息,就能够对频率变化提供快速响应。

本文利用集群电动汽车的灵活调控能力,以发电机组的增量成本(incremental cost, IC)与集群电动汽车的增量效益(incremental benefit, IB)作为一致性

变量,提出一种分布式优化调度策略,利用集群电动汽车的灵活调控能力解决电力系统经济调度问题。然而集群电动汽车同时并网会对电网产生严重的冲击,激发对系统不利的模态,为避免负荷资源的浪费,降低集群电动汽车并网的成本损耗,本文提出一种集群电动汽车负荷均衡的优化模型,将集群电动汽车的负荷需求均衡为3个部分依次并入电网。根据现实生活中可能出现的情况建立不同的仿真情景,在IEEE 39节点系统上进行算例仿真,验证了所提分布式控制策略的实用性。

## 1 图论与一致性算法

### 1.1 图论

设无向图 $(V, E)$ 表示电力网络的拓扑结构图,其中 $V$ 是节点集, $E \subseteq V \times V$ 是所有智能体之间的边集。 $A = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 表示邻接矩阵,矩阵的元素 $a_{ij}$ 是指顶点 $i, j$ 之间边的权重。 $N_i$ 表示顶点 $i$ 的邻居顶点的集合, $d_i$ 称为顶点 $i$ 的度,即 $d_i = |N_i|$ 。定义 $A$ 的元素 $a_{ij}$ 为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1/d_i & j \in N_i \\ 0 & j \notin N_i \end{cases} \quad (1)$$

### 1.2 一致性算法

定义线性系统的一致性算法如式(2)所示。

$$\dot{\mathbf{x}}_i = -\sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i - x_j) \quad (2)$$

该一致性算法的矩阵形式为

$$\dot{\mathbf{x}} = -\mathbf{L}_n \times \mathbf{x} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{L}_n$ 为网络拓扑结构图的 $n \times n$ 阶拉普拉斯矩阵; $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 。

电力系统的拓扑结构图中,考虑到信息通信技术支持集群电动汽车与发电机组之间的双向通信,则状态特性可以表示为

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \sum_{j=1}^n a_{ij}(x_j(k) - x_i(k)) \quad (4)$$

矩阵 $A$ 为行随机矩阵,式(4)可简化为

$$x_i(k+1) = \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j(k), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

## 2 集群电动汽车(AEVs)的充放电模型

与可控负载类似,电动汽车作为一种重要的需求侧响应资源,如果没有对电动汽车行为的约束和管理,配电网将会出现集中供电和峰值负荷。因此,对电动汽车的充放电进行有序引导,可以参与经济调度、提升电网运行效益<sup>[29]</sup>。例如,电动汽车作为

一种小型分布式移动储能系统,在一定程度上是可控的。通过 V2G 技术和智能电网技术,可根据要求存储和输送电能。存储在电动汽车中的电能可用于调节电网频率,优化可再生能源的利用,甚至用于补偿波动的可再生能源发电来优化电力系统运行。文献[30]提出了一种平衡策略,即聚合商协调电动汽车参与电网经济调度,将节约的成本分配给用户,以提升电动汽车车主参与电力系统经济调度的积极性。

为了在配电网中采用充放电控制策略来协调电力系统最优经济调度,以充分利用电动汽车灵活的充放电特性和分布式发电系统的发电特性。本节以电动汽车市场中主流的锂电池为例,分析集群电动汽车的充放电特性。为研究方便,系统稳定时近似认为集群电动汽车的充电过程中功率恒定。当系统频率在额定值时,电动汽车以  $P_{Vj,max}/2$  的功率进行充电<sup>[13]</sup>。

在充电阶段,集群电动汽车作为负荷参与电网经济调度,消耗发电机组的输出功率。将电动汽车充电限制在非高峰时段可以提高现有发电机组的利用率。

$$P_{Vj} = \begin{cases} P_{Vj,max} & D_c \Delta f > P_{Vj,max} \\ P_{Vj,max}/2 & |\Delta f| \leq f_0 \\ D_c \Delta f & D_c \Delta f \leq P_{Vj,max} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P_{Vj}$  为第  $j$  个电动汽车的需求功率;  $P_{Vj,max}$  为集群电动汽车最大需求功率;  $D_c$  为调差系数与等值调差系数的比值;  $\Delta f$  为频率偏差量;  $f_0$  为调频死区最大值的绝对值。

在集群电动汽车放电阶段,功率约束为

$$P_{Vj} = \begin{cases} k_d \Delta f & k_d \Delta f \geq P_{Vj,min} \\ P_{Vj,min} & k_d \Delta f < P_{Vj,min} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P_{Vj,min}$  为集群电动汽车最小需求功率;  $k_d$  为放电频率响应系数。

因此,集群电动汽车参与电力系统经济调度时充放电功率  $P_{Vj}$  需要满足式(8)的约束条件。

$$P_{Vj,min} \leq P_{Vj} \leq P_{Vj,max} \quad (8)$$

式中,  $P_{Vj,min}$  和  $P_{Vj,max}$  分别为集群电动汽车的需求功率下限和上限。在单向充电模式下,集群电动汽车仅吸收能量满足通勤需求,因此  $P_{Vj}$  始终为正值。本文同时考虑集群电动汽车的充电和放电,放电时  $P_{Vj} < 0$ , 反之,  $P_{Vj} > 0$ 。充电/放电功率的限制如式(8)所示。为了验证所提经济调度策略的有效性,文中仅考虑了电动汽车充放电的功率需求,没

有必要考虑电动汽车所需的能量。

传统的电动汽车运行方式为电网到车辆(G2V)模式,电动汽车作为分布式电池储能系统在适当的充电站充电,具有和普通负载相同的行为,从电网中获取电能。在车辆到电网(V2G)模式下运行是电动汽车的另一种选择,在需要时作为存储设备和备用电源向电网供电,或调节充电速率以响应峰值负荷需求,提高了电力基础设施的可持续性和弹性,有助于负荷均衡。此外,如果允许电动汽车在高峰负荷时向电网注入电能,发电机组的发电计划将更加稳定,有利于提高电网的可靠性。

### 3 分布式经济调度策略

在我国,电动汽车已经成为电力市场的未来参与者,特别是为电力系统提供辅助服务。然而,从技术和经济角度来看,配电网的运行和设计面临着诸多挑战,只有设计合理且协调良好的电动汽车并网运行策略,才能提高充放电管理水平,真正实现其价值,为系统带来可观的经济效益和环境效益。

本节介绍了一种分布式优化策略,每个发电机组和集群电动汽车根据邻居的 IC 或者 IB 来更新自己的 IC 或者 IB。选择一个“主发电机组”和“主集群电动汽车”决策是否增大或减小全局的 IC 和 IB。通过分布式经济调度策略获得集群电动汽车的调度潜力,以维持电力系统安全稳定运行。此外,聚合商根据集群电动汽车参与调度所带来的经济效益最小化电动汽车充电成本,激励车主遵循聚合商的调度安排,寻找电力系统的最优调度点,以获得最大的经济效益<sup>[31]</sup>。因此,电动汽车的有序充放电行为可以有效降低运行成本,提高电网的运行效率和稳定性。

发电机组传统的经济调度目标模型是与燃料成本和有功功率输出相关的二次多项式方程。假设发电成本函数为

$$C_i(P_{Gi}) = \alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2 \quad i \in S_G \quad (9)$$

集群电动汽车的用电效益函数为<sup>[32]</sup>

$$B_j(P_{Vj}) = a_j + b_j P_{Vj} + c_j P_{Vj}^2 \quad j \in S_V \quad (10)$$

式中:  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 、 $\gamma_i$  分别为发电成本函数的系数;  $a_j$ 、 $b_j$ 、 $c_j$  分别为集群电动汽车用电效益函数的系数;  $P_{Gi}$  为第  $i$  个发电机组的输出功率;  $S_G$ 、 $S_V$  分别为发电机组和集群电动汽车的集合。

为了提高电动汽车的管理水平,降低相关成本,提出了一种以发电机组的发电成本最小和集群电动汽车用电效益最大为目标的优化调度模型。通过对集群电动汽车的充放电功率进行调度调整,以最小

成本满足功率平衡约束,使经济效益最大化。下面介绍优化调度模型,用于实现这一目标。

$$\max \sum_{j \in S_V} B_j(P_{V_j}) - \sum_{i \in S_G} C_i(P_{G_i}) \quad (11)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in S_V} P_{V_j} - \sum_{i \in S_G} P_{G_i} = 0 \quad (12)$$

$$P_{G_i, \min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i, \max} \quad i \in S_G \quad (13)$$

$$P_{V_j, \min} \leq P_{V_j} \leq P_{V_j, \max} \quad j \in S_V \quad (14)$$

式中,  $P_{G_i, \max}$  和  $P_{G_i, \min}$  分别表示输出功率的上下限。

忽略不等式约束,将优化问题利用拉格朗日乘子法求解,可以转化为

$$\min F = - \sum_{j \in S_V} B_j(P_{V_j}) + \sum_{i \in S_G} C_i(P_{G_i}) + \lambda (\sum_{j \in S_V} P_{V_j} - \sum_{i \in S_G} P_{G_i}) \quad (15)$$

对  $P_{G_i}$ 、 $P_{V_j}$  和  $\lambda$  求偏导得到最优性条件<sup>[33]</sup>,即

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial P_{G_i}} = \frac{\partial C_i}{\partial P_{G_i}} - \lambda = 0 & i \in S_G \\ \frac{\partial F}{\partial P_{V_j}} = -\frac{\partial B_j}{\partial P_{V_j}} + \lambda = 0 & j \in S_V \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = \sum_{j \in S_V} P_{V_j} - \sum_{i \in S_G} P_{G_i} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

由上述的最优性条件可以得到式(17)。

$$\frac{\partial C_1}{\partial P_{G_1}} = \frac{\partial C_2}{\partial P_{G_2}} = L = \frac{\partial C_m}{\partial P_{G_m}} = \frac{\partial B_1}{\partial P_{V_1}} = \frac{\partial B_2}{\partial P_{V_2}} = L = \frac{\partial B_g}{\partial P_{V_g}} \quad (17)$$

式中:  $m$  表示发电机组数目;  $g$  表示集群电动汽车的数目。由以上分析可知 IC 和 IB 相等时是优化问题的最优解,因此经济调度问题可以通过每个机组的增量成本和每个集群电动汽车的增量效益相等来解决。

在该一致性算法中,发电机组的 IC 与集群电动汽车的 IB 的定义分别如式(18)和式(19)所示。

$$I_{C_i} = \frac{\partial C_i(P_{G_i})}{\partial P_{G_i}} = \lambda_i \quad i \in S_G \quad (18)$$

$$I_{B_j} = \frac{\partial B_j(P_{V_j})}{\partial P_{V_j}} = \lambda_j \quad j \in S_V \quad (19)$$

结合式(5)的一致性算法,选择 IC 与 IB 作为一致性变量,则“从发电机组”的 IC 更新公式为

$$\lambda_{i,c}(k+1) = \sum_{l=1}^n a_{il} \lambda_l(k) \quad i \in S_G \quad (20)$$

式中:  $\lambda_l(k)$  表示“从发电机组”的邻居节点  $l$  在  $k$  时刻的状态;  $a_{il}$  表示邻接矩阵  $\mathbf{A}$  中第  $i$  行、第  $l$  列中的元素;  $\lambda_{i,c}(k+1)$  表示“从发电机组”在  $k+1$  时刻的状态。

“从集群电动汽车”的 IB 更新公式为

$$\lambda_{j,c}(k+1) = \sum_{t=1}^n a_{jt} \lambda_t(k) \quad j \in S_V \quad (21)$$

式中:  $\lambda_t(k)$  表示“从集群电动汽车”的邻居节点  $t$  在  $k$  时刻的状态;  $a_{jt}$  表示邻接矩阵  $\mathbf{A}$  中第  $j$  行、第  $t$  列中的元素;  $\lambda_{j,c}(k+1)$  表示“从集群电动汽车”在  $k+1$  时刻的状态。

为了满足电力系统中的功率平衡约束式(12),用  $\Delta P$  表示集群电动汽车需求功率与发电机组输出功率之间的差值,如式(22)所示。

$$\Delta P = \sum_{j \in S_V} P_{V_j} - \sum_{i \in S_G} P_{G_i} \quad (22)$$

“主发电机组”的 IC 更新公式为

$$\lambda_{i,z}(k+1) = \sum_{f=1}^n a_{if} \lambda_f(k) + \varepsilon \Delta P \quad i \in S_G \quad (23)$$

式中:  $\lambda_f(k)$  表示“主发电机组”的邻居节点  $f$  在  $k$  时刻的状态;  $a_{if}$  表示邻接矩阵  $\mathbf{A}$  中第  $i$  行、第  $f$  列中的元素;  $\lambda_{i,z}(k+1)$  表示“主发电机组”在  $k+1$  时刻的状态;  $\varepsilon$  为收敛系数,与分布式优化算法的收敛速度有关。

“主集群电动汽车”的 IB 更新公式为

$$\lambda_{j,z}(k+1) = \sum_{s=1}^n a_{js} \lambda_s(k) + \varepsilon \Delta P \quad j \in S_V \quad (24)$$

式中:  $\lambda_s(k)$  表示“主集群电动汽车”的邻居节点  $s$  在  $k$  时刻的状态;  $a_{js}$  表示邻接矩阵  $\mathbf{A}$  中第  $j$  行、第  $s$  列中的元素;  $\lambda_{j,z}(k+1)$  表示“主集群电动汽车”在  $k+1$  时刻的状态。每个发电机组和集群电动汽车通过上述一致性协议,根据邻居节点的状态更新自己的状态,直至收敛到最优解。

由式(18)和式(19)可知

$$P_{G_i} = \frac{\lambda_i - \beta_i}{2\gamma_i} \quad i \in S_G \quad (25)$$

$$P_{V_j} = \frac{\lambda_j - b_j}{2c_j} \quad j \in S_V \quad (26)$$

由式(25)和式(26)可知,发电机组的功率约束和集群电动汽车的功率约束可以分别表示为

$$P_{G_i}(k) = \begin{cases} \frac{\lambda_i - \beta_i}{2\gamma_i} & P_{G_i, \min} \leq \frac{\lambda_i - \beta_i}{2\gamma_i} \leq P_{G_i, \max} \\ P_{G_i, \min} & \frac{\lambda_i - \beta_i}{2\gamma_i} \leq P_{G_i, \min} \\ P_{G_i, \max} & \frac{\lambda_i - \beta_i}{2\gamma_i} \geq P_{G_i, \max} \end{cases} \quad i \in S_G \quad (27)$$

$$P_{V_j}(k) = \begin{cases} \frac{\lambda_j - b_j}{2c_j} & P_{V_j,\min} \leq \frac{\lambda_j - b_j}{2c_j} \leq P_{V_j,\max} \\ P_{V_j,\min} & \frac{\lambda_j - b_j}{2c_j} \leq P_{V_j,\min} \\ P_{V_j,\max} & \frac{\lambda_j - b_j}{2c_j} \geq P_{V_j,\max} \end{cases} \quad j \in S_V \quad (28)$$

基于通信技术的发展, 能够实现电动汽车与电网之间的通信, 应用分布式优化算法解决集群电动汽车参与电力系统经济调度时的优化问题。具体的算法流程如图 1 所示。

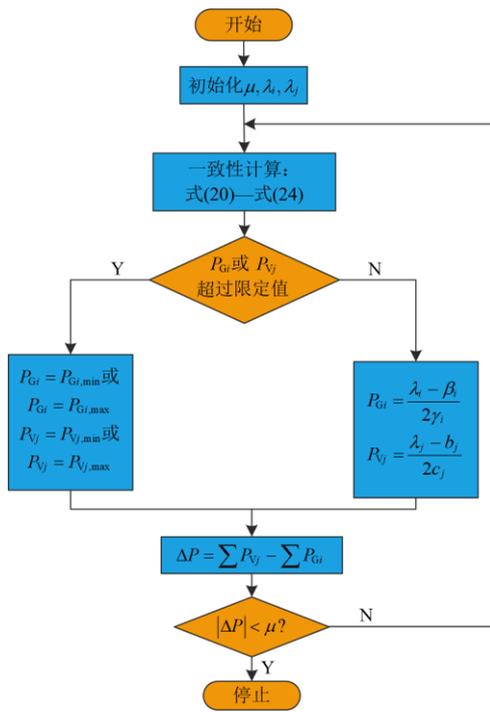


图 1 分布式优化算法流程图

Fig. 1 Flow chart of distributed optimization algorithm

#### 4 负荷均衡优化模型

在大规模集群电动汽车并网参与经济调度时, 往往会因为调度不均衡导致资源碎片现象, 造成集群电动汽车整体的成本损耗。因此设计能保证集群电动汽车负荷均衡的优化模型具有实际意义。将集群电动汽车负荷均衡后分步并入电网, 在减少集群资源碎片的同时降低了成本, 更加合理充分地利用集群负荷资源提高运行效率。本节利用方差的思想提出一种用于负荷均衡的非线性优化模型, 以集群电动汽车负荷均衡作为优化目标, 提高集群电动汽车在电网中的利用率, 寻求最优运行结构, 以降低系统的总运行成本。

$$\min \sum_{y \in L} \left( \sum_{j \in S_V} P_{V_j}(0) x_{jy} - P_{V,\text{avg}} \right)^2 \quad (29)$$

$$\text{s.t.} \sum_{y \in L} x_{jy} = 1 \quad \forall j \in S_V \quad (30)$$

式中:  $x_{jy} = \begin{cases} 1 & \text{节点 } j \text{ 分配到集合 } y \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$ ;  $P_{V_j}(0)$  为第  $j$

个集群电动汽车的初始需求功率;  $P_{V,\text{avg}} = \left( \sum_{j \in S_V} P_{V_j}(0) \right) / y$ ,  $S_V = \{j = 1, 2, L, 19\}$  表示所有集群电动汽车的集合;  $L = \{y = 1, 2, 3, L\}$  为优化模型中的控制变量, 表示将所有集群电动汽车的需求功率均衡为  $y$  个部分。

本节建立的负荷均衡优化模型追求一种相对的均衡, 可以保证单个集群电动汽车的负荷资源得到充分利用, 从而最大化减少集群资源的碎片化程度, 提高网络的灵活性和可用性。将负荷均衡后的集群电动汽车分步并入电网, 既能减小对电网的冲击又能避免大量集群电动汽车同时并网激发对系统不利的模式, 使集群电动汽车的负荷资源利用更加充分, 减少成本损耗。

#### 5 仿真与分析

在改进的 IEEE 39 节点系统进行仿真分析, 验证集群电动汽车负荷均衡后分步参与电网经济调度的实用性。电力网络的通信拓扑如图 2 所示, 其中, 发电机组  $G_1 \sim G_{10}$  由通信节点 1—10 表示, 集群电动汽车 AVEs<sub>11</sub>—AVEs<sub>29</sub> 由通信节点 11—29 表示。参数设置如表 1 和表 2 所示。

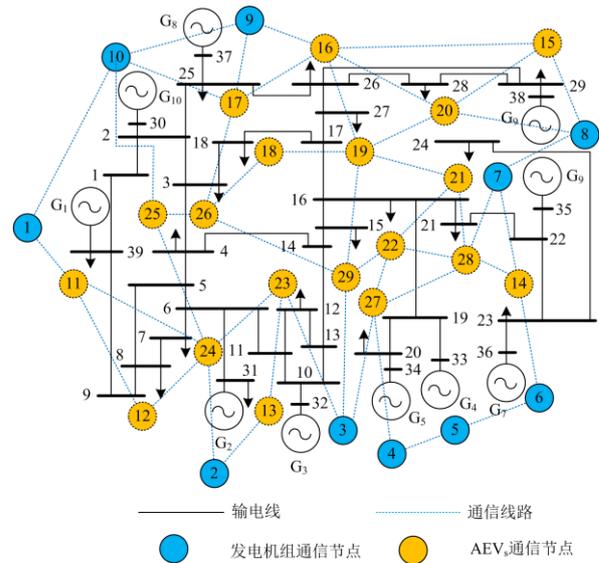


图 2 系统的通信拓扑(I)

Fig. 2 Communication topology of the system (I)

表 1 发电机组的参数

Table 1 Parameters of generator set

发电机组	$\beta_i$	$\gamma_i$	$P_{Gi}(0)$
G <sub>1</sub>	12.652	0.0064	136.880
G <sub>2</sub>	6.298	0.0112	215.950
G <sub>3</sub>	10.723	0.0100	108.050
G <sub>4</sub>	3.368	0.0096	125.570
G <sub>5</sub>	12.755	0.0105	234.560
G <sub>6</sub>	10.772	0.0032	240.750
G <sub>7</sub>	3.375	0.0021	45.620
G <sub>8</sub>	9.435	0.0065	236.480
G <sub>9</sub>	8.647	0.0078	75.600
G <sub>10</sub>	12.934	0.0049	169.290

表 2 集群电动汽车的参数

Table 2 Parameters of AEVs

AEVs	$b_j$	$c_j$	$P_{Vj}(0)$
AEVs <sub>11</sub>	24.765	-0.124	115.10
AEVs <sub>12</sub>	19.452	-0.056	156.77
AEVs <sub>13</sub>	27.360	-0.152	110.96
AEVs <sub>14</sub>	10.950	-0.084	78.45
AEVs <sub>15</sub>	15.276	-0.082	122.64
AEVs <sub>16</sub>	27.653	-0.221	79.28
AEVs <sub>17</sub>	28.356	-0.191	140.22
AEVs <sub>18</sub>	23.556	-0.169	87.58
AEVs <sub>19</sub>	21.429	-0.157	99.80
AEVs <sub>20</sub>	15.225	-0.070	123.83
AEVs <sub>21</sub>	27.560	-0.098	174.56
AEVs <sub>22</sub>	10.503	-0.083	74.82
AEVs <sub>23</sub>	22.943	-0.092	155.76
AEVs <sub>24</sub>	23.050	-0.095	138.30
AEVs <sub>25</sub>	26.250	-0.094	172.58
AEVs <sub>26</sub>	16.554	-0.348	30.98
AEVs <sub>27</sub>	23.475	-0.163	80.76
AEVs <sub>28</sub>	25.592	-0.124	128.73
AEVs <sub>29</sub>	15.780	-0.130	68.92

利用上述负荷均衡优化模型将 19 个集群电动汽车分成 3 个部分依次并入电网，其中，通过优化求解工具 Yalmip 描述负荷均衡模型，然后调用 Gurobi 进行求解，得到集群电动汽车 AVEs<sub>11</sub>、AVEs<sub>16</sub>、AVEs<sub>17</sub>、AVEs<sub>24</sub>、AVEs<sub>26</sub>、AVEs<sub>27</sub> 和 AVEs<sub>28</sub> 为第 1 部分，AVEs<sub>12</sub>、AVEs<sub>13</sub>、AVEs<sub>14</sub>、AVEs<sub>18</sub>、AVEs<sub>20</sub> 和 AVEs<sub>23</sub> 为第 2 部分，AVEs<sub>15</sub>、AVEs<sub>19</sub>、AVEs<sub>21</sub>、AVEs<sub>22</sub>、AVEs<sub>25</sub> 和 AVEs<sub>29</sub> 为第 3 部分。

针对上述模型同时考虑现实情况建立 4 种情景

进行仿真分析：情景 1 验证负荷均衡后的集群电动汽车分步参与电力系统分布式经济调度的可行性；情景 2 在集群电动汽车全部并网后，通过减少通信拓扑图中的通信线路，验证该策略可以适用于不同的通信拓扑；情景 3 对集群电动汽车需求功率和发电机组输出功率施加限制，该分布式控制方案依然能够有效应对；情景 4 验证该分布式调度策略下集群电动汽车“即插即用”的能力。

情景 1：验证集群电动汽车负荷均衡后分步参与电力系统分布式最优经济调度策略的有效性。在进行分布式优化调度时，选择 G<sub>1</sub> 为“主发电机组”，AVEs<sub>11</sub> 为“主集群电动汽车”。根据“主发电机组”和“主集群电动汽车”决策是否增大或减小全局 IC 和 IB。其中采样步长设置为 0.02 s，收敛系数  $\varepsilon = 0.005$ 。

由图 3 可知，负荷均衡后的集群电动汽车分步并网时，每一步并网的集群电动汽车都能在分布式优化调度策略下迅速收敛到最优值，即在满足所有

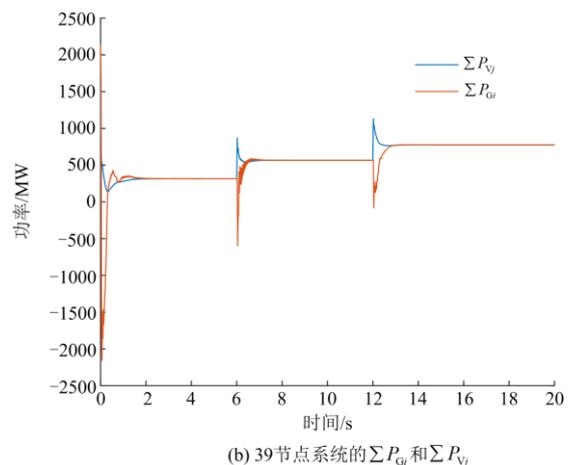
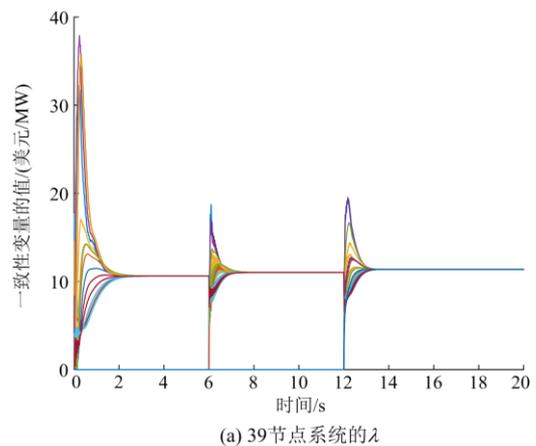


图 3 系统变量的仿真曲线(I)

Fig. 3 Simulation curve of system variables (I)



将集群电动汽车 AEV<sub>S29</sub> 重新并网运行, 仿真结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 在  $t=20\text{s}$  时, 集群电动汽车 AEV<sub>S29</sub> 退出电网运行, 系统达到一个新的最优运行值, 此时  $\lambda^*=11.34$  美元/MW; 在  $t=27\text{s}$  时, 集群电动汽车 AEV<sub>S29</sub> 重新并网, 系统重新收敛到 AEV<sub>S29</sub> 退出电网运行前的最优值, 即  $\lambda^*=11.36$  美元/MW。

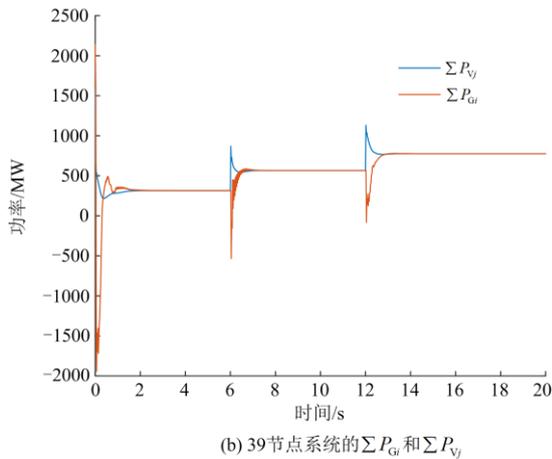
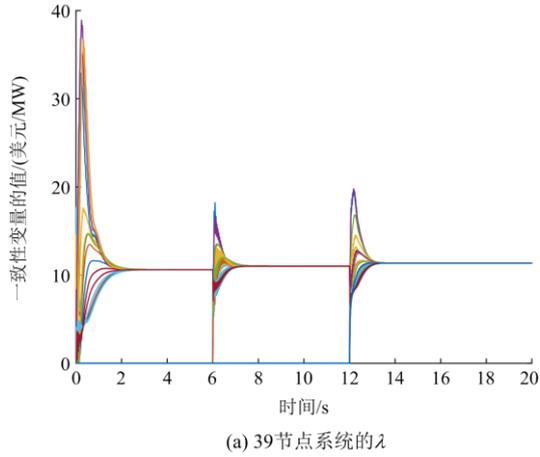


图 6 系统变量的仿真曲线(III)

Fig. 6 Simulation curve of system variables (III)

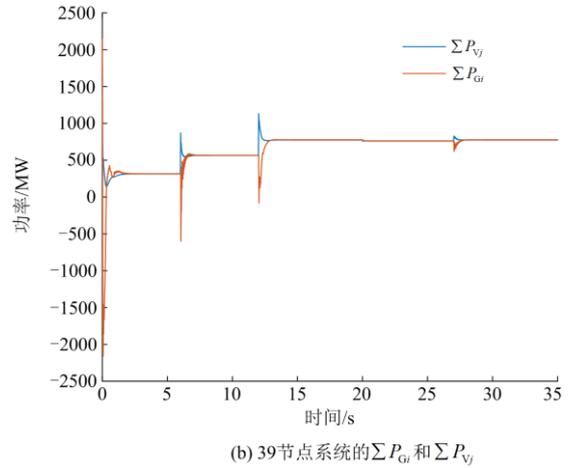
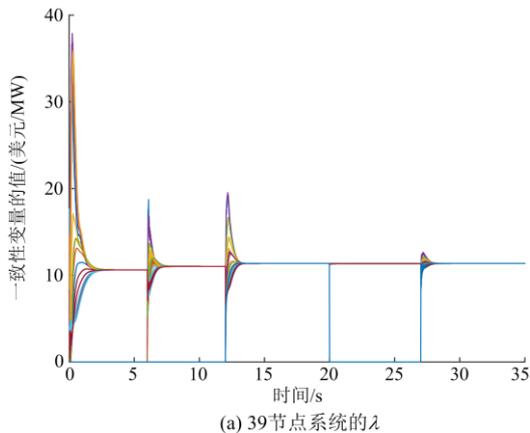


图 7 系统变量的仿真曲线(IV)

Fig. 7 Simulation curve of system variables (IV)

仿真分析表明集群电动汽车进行负荷均衡后分步参与电力系统分布式优化调度时可以满足“即插即用”的操作。

由仿真分析可知, 本文提出的集群电动汽车参与电力系统经济调度模型可以实现最优经济调度, 验证了集群电动汽车灵活充放电特性和优化调度策略的有效性。在该分布式控制策略下, 电网与电动汽车可以快速实现协同优化调度, 同时防止大量电动汽车无序充放电造成的拥堵, 保证系统运行的安全稳定。

### 6 结论

目前, 电动汽车是最受欢迎的清洁交通工具, 其快速发展给电力系统带来了严峻的挑战。但是电动汽车具有灵活调控能力, 合理并网可以有效解决经济调度问题。在上述问题的基础上, 本文提出一种集群电动汽车进行负荷均衡的优化模型, 接着利用分布式优化算法, 将负荷均衡后的集群电动汽车分步并入电网解决电力系统经济调度问题。为了证明所提方法的有效性, 针对不同情况建立仿真情景, 仿真分析表明集群电动汽车负荷均衡后分步参与电力系统优化调度具有很好的收敛性, 而且可以满足集群电动汽车参与经济调度时“即插即用”的要求, 在应对通信网拓扑结构多变的情况时具有较好的性能, 能够提高可再生能源的入网水平以及电网的经济效益和环境效益, 对构建新型电力系统具有一定的意义。

### 参考文献

[1] LUND H. Large-scale integration of optimal combinations of PV, wind and wave power into the electricity supply[J].

- Renewable Energy, 2006, 31(4): 503-515.
- [2] ZHAO L, YU R Y, WANG Z, et al. Development modes analysis of renewable energy power generation in North Africa[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 237-246.
- [3] 钱振宇, 王泉, 魏建民, 等. 考虑削减方法和最大化接纳能力的新能源准入容量柔性优化模型[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 35-39, 60.  
QIAN Zhenyu, WANG Quan, WEI Jianmin, et al. Flexible optimization model for new energy access capacity considering the method of electricity reduction and maximum acceptance[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 35-39, 60.
- [4] 王念, 张靖, 李博文, 等. 自动发电控制研究综述[J]. 电测与仪表, 2020, 57(21): 1-8.  
WANG Nian, ZHANG Jing, LI Bowen, et al. Research review of automatic generation control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(21): 1-8.
- [5] 王珂, 姚建国, 姚良忠, 等. 电力柔性负荷调度研究综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 127-135.  
WANG Ke, YAO Jianguo, YAO Liangzhong, et al. Survey of research on flexible loads scheduling technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 127-135.
- [6] 赵玉, 徐天奇, 李琰, 等. 基于分时电价的电动汽车调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 92-101.  
ZHAO Yu, XU Tianqi, LI Yan, et al. Research on electric vehicle scheduling strategy based on time-shared electricity price[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 92-101.
- [7] 犹锋, 张华鲁, 石杰, 等. 基于云边协同技术的柔性负荷聚合调控系统设计[J]. 供用电, 2021, 38(12): 64-73.  
YOU Feng, ZHANG Hualu, SHI Jie, et al. Design of flexible load aggregation regulation system based on cloud edge collaboration technology[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(12): 64-73.
- [8] 陈培育, 宋杰, 陈嘉栋, 等. 含海水淡化负荷的多源多荷系统日前优化调度策略研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 310-316.  
CHEN Peiyu, SONG Jie, CHEN Jiadong, et al. Optimized day-ahead dispatching strategy of multisource and multiload system with desalination load[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 310-316.
- [9] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.  
WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.
- [10] 黄伟, 叶波. 综合能源系统环境下电动汽车分群优化调度[J]. 电力建设, 2021, 42(4): 27-39.  
HUANG Wei, YE Bo. Optimal scheduling of electric vehicle clusters in integrated energy system[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(4): 27-39.
- [11] 陈明强, 高健飞, 畅国刚, 等. V2G 模式下微网电动汽车有序充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 141-148.  
CHEN Mingqiang, GAO Jianfei, CHANG Guogang, et al. Research on orderly charging strategy of micro-grid electric vehicles in V2G model[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 141-148.
- [12] DANDREA R, DULLERUD G E. Distributed control design for spatially interconnected systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 48(9): 1478-1495.
- [13] 周萌, 吴思聪. 基于 V2G 技术的微电网调频控制策略研究[J]. 东北电力技术, 2019, 40(9): 23-26.  
ZHOU Meng, WU Sicong. Research on frequency regulation of microgrid based on V2G technology[J]. Northeast Electric Power Technology, 2019, 40(9): 23-26.
- [14] KEMPTON W, TOMI J. Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 268-279.
- [15] HUANG Z, FANG B, DENG J. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 48-55.
- [16] 贺玉环, 杨秀媛, 陈麒宇, 等. 电动汽车智能充放电控制与应用综述[J]. 发电技术, 2021, 42(2): 180-192.  
HE Yuhuan, YANG Xiuyuan, CHEN Qiyu, et al. Review of intelligent charging and discharging control and application of electric vehicles[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(2): 180-192.
- [17] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127-131.  
GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [18] BOULANGER A G, CHU A C, MAXX S, et al. Vehicle electrification: status and issues[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6): 1116-1138.
- [19] 王睿, 高欣, 李军良, 等. 基于聚类分析的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020,

- 48(16): 37-44.  
WANG Rui, GAO Xin, LI Junliang, et al. Electric vehicle charging demand forecasting method based on clustering analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 37-44.
- [20] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10.  
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.
- [21] DARABI Z, FERDOWSI M. Aggregated impact of plug-in hybrid electric vehicles on electricity demand profile[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(4): 501-508.
- [22] BESSA R J, MATOS M A. Economic and technical management of an aggregation agent for electric vehicles: a literature survey[J]. European Transactions on Electrical Power, 2011, 22(3): 334-350.
- [23] 孙玲玲, 高赐威, 谈健, 等. 负荷聚合技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 159-167.  
SUN Lingling, GAO Ciwei, TAN Jian, et al. Load aggregation technology and its applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 159-167.
- [24] CAKMAK R, ALTA S H. A novel billing approach for fair and effective demand side management: appliance level billing[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 121(1): 1-13.
- [25] 蒋怡静, 于艾清, 黄敏丽. 考虑用户满意度的电动汽车时空双尺度有序充电引导策略[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 122-130.  
JIANG Yijing, YU Aiqing, HUANG Minli. Coordinated charging guiding strategy for electric vehicles in temporalspatial dimension considering user satisfaction degree[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 122-130.
- [26] 刘超然, 苏小林, 阎晓霞, 等. 电动汽车辅助调峰的经济调度策略研究[J]. 电气自动化, 2019, 41(6): 11-13.  
LIU Chaoran, SU Xiaolin, YAN Xiaoxia, et al. Research on economic dispatch strategy for ancillary peak load regulation of electric vehicles[J]. Electrical Automation, 2019, 41(6): 11-13.
- [27] ANDREA R D, DULLERUD G E. Distributed control design for spatially interconnected systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(3): 1478-1495.
- [28] 谢俊, 陈凯旋, 岳东, 等. 基于多智能体系统一致性算法的电力系统分布式经济调度策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 112-117.  
XIE Jun, CHEN Kaixuan, YUE Dong, et al. Distributed economic dispatch based on consensus algorithm of multi agent system for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 112-117.
- [29] 程杉, 杨堃, 魏昭彬, 等. 计及电价优化和放电节制的电动汽车充电站有序充放电调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 1-8.  
CHENG Shan, YANG Kun, WEI Zhaobin, et al. Orderly charging and discharging scheduling of an electric vehicle charging station considering price optimization and discharge behavior control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 1-8.
- [30] 侯慧, 柯贤彬, 王成智, 等. 区域电动汽车协调优化的充放电策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 648-654.  
HOU Hui, KE Xianbin, WANG Chengzhi, et al. Coordinated optimization strategy for electric vehicles' charging and discharging in different regions[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 648-654.
- [31] 李能学. 基于需求响应的大用户负荷调度及效益分析[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.  
LI Nengxue. The load scheduling for users based on demand response and benefit analysis[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.
- [32] 谢俊, 陈星莺, 廖迎晨, 等. 激励性输配分开电力市场竞价机制的建模[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 25-31.  
XIE Jun, CHEN Xingying, LIAO Yingchen, et al. Research on modeling the incentive bidding mechanism for transmission and distribution separated electricity markets[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 25-31.
- [33] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

收稿日期: 2021-12-27; 修回日期: 2022-03-15

作者简介:

刘春涛(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化与控制; E-mail: 158444015@qq.com

宋运忠(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂系统的分析与控制。E-mail: songhpu@126.com

(编辑 周金梅)