高技术通讯 2024 年 第 34 卷 第 11 期:1211-1223

doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2024.11.008

含时变电动汽车集群虚拟惯量支持的电网频率安全调度①

凌 锋② 王力成③

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

摘 要 电动汽车的快速发展为解决可再生能源高渗透率电网频率稳定问题提供了新的解决方案。本文首先建立了含电动汽车集群的电力系统双层调度策略。第 1 层为固定时间间隔下的周期性优化调度。调度人员根据当前电力系统整体运行状态在每个调度周期分别为发电机组和电动汽车集群制定最优运行点和虚拟惯量支撑任务,从而提高系统频率稳定性及运行经济性。第 2 层为电动汽车集群内部的实时协同控制。本文采用鲁棒动态一致性算法为当前时刻在网的电动汽车公平地分配虚拟惯量响应功率,从而使开放式的时变电动汽车集群实现对上层调度指令的无偏差响应(虚拟惯量支撑任务)。仿真实验验证了本文所提策略能够有效利用电动汽车集群的虚拟惯量响应,提高系统运行的经济性和稳定性以及电动汽车集群整体虚拟惯量响应能力的稳定性。

关键词 开放式系统;电动汽车;一次调频;鲁棒动态一致性算法

风、光等可再生能源发电单元对传统同步机的逐步替换,不仅导致了电源侧功率波动的增加,还显著减少了电力系统的整体转动惯量水平,从而极大影响了电网的频率稳定性[1]。与此同时,随着再电气化在交通领域的持续深入,传统燃油汽车正在被具有良好环保特性的电动汽车加速替换。根据公安部数据,截至 2022 年 6 月底,我国的新能源汽车保有量已达到 1 001 万辆,预计将在 2040 年实现乘用汽车全面电气化。随着具备移动储能特性的电动汽车蓬勃发展,新能源高渗透率电网的频率调节及其稳定控制有了新的选择。

电动汽车辅助调频方法可分为独立响应和聚合(集群)响应。独立响应一般由电动汽车根据自身的本地测量信息独立决策其响应功率及响应容量,如下垂控制及其改进方法[2-4]等。但是缺少协同调度,难以定量评估电动汽车整体频率响应能力,无法为电网频率控制提供确定的辅助服务。因此,部分学者引入聚合器刻画电动汽车集群的整体响应行为,实现电动汽车的定量聚合响应[5-6]。

然而,电动汽车用户的随机使用行为会直接改变电动汽车的在网状态、电池荷电状态以及充放电功率,并由此进一步影响电动汽车集群整体的对外响应能力。为此,已有学者通过统计学方法,如蒙特卡洛法[7-10]等来描述电动汽车集群的随机行为,并应用于集群的协同控制之中。部分研究进一步强化电动汽车的社会属性,即引入交通属性[11]、用户行为[12]等提高概率模型的精度。然而社会属性本身具有不确定性,电动汽车个体状态预测依旧可能出现偏差。相反,文献[13-15]利用不确定集等方法得到所有可能的集群情况进行鲁棒优化,摆脱对社会属性的依赖,但过于保守,经济性较差。因此,文献[16-18]结合实时补偿与预测调度,以解决预测与实际不符的问题。

上述策略侧重于优化电动汽车调度容量,并未充分考虑电动汽车对电力系统频率动态特性的影响。电动汽车集群能够通过模拟惯量响应等辅助服

① 国家自然科学基金青年科学基金(52007170)和浙江省自然科学基金(LY22E070007)资助项目。
② 男,1998 年生,硕士生;研究方向:主动配电网的运行与优化,分布式控制算法;E-mail:845659232@qq.com。
③ 通信作者,E-mail:wanglicheng@zjut.edu.cn。
(收稿日期:2023-02-08)

务改善频率动态特性[19]。依据不同技术，现有的惯量响应策略主要包括基于导数技术[20-22]、转子速度变化率、频率变化率、摆动方程模型、功频响应模型和虚拟同步机模型的虚拟惯量控制策略[20]。文献[23,24]采用基于虚拟同步机的控制方法，设计了电动汽车虚拟惯量响应策略。但其惯量响应功能易受到系统中功率变化的影响[25-26]且难以结合优化策略。目前，相关工作主要聚焦于电动汽车个体惯量响应过程稳定性的研究。

综上所述，电动汽车集群虚拟惯量响应参与电网频率控制的研究仍处于起步阶段。现有的虚拟惯量响应策略大多仅侧重于电动汽车自身响应的最优控制，而尚未与电力系统优化调度充分结合。此外，电动汽车集群作为时变的动态系统，在缺少协同控制的情形下，集群的整体对外响应能力不稳定，由此造成的辅助服务响应偏差将会显著削弱电网调度的安全性和经济性。为解决上述问题，本文设计了含电动汽车集群的电网频率安全优化调度策略，实现了对电动汽车虚拟惯量支撑与机组运行点的统一调控。在此基础上，为对抗由电动汽车随机离/入网行为导致的集群动态变化，提出了一种鲁棒动态一致性算法来实时分配不同电动汽车的虚拟惯量响应功率，从而最终在时变集群中实现对上层调度指令的无偏差响应。

1　含电动汽车集群的电力系统优化调度

1.1　算法整体架构

含电动汽车集群的电力系统一次调频控制模型如图 1 所示。其中，r_k 为第 k 台发电机的速度下垂特性；T_k^a、T_k^b 分别为发电机 k 调速器和汽轮机组的时间常数；ΔP_l、H_G、D分别代表系统的扰动功率、发

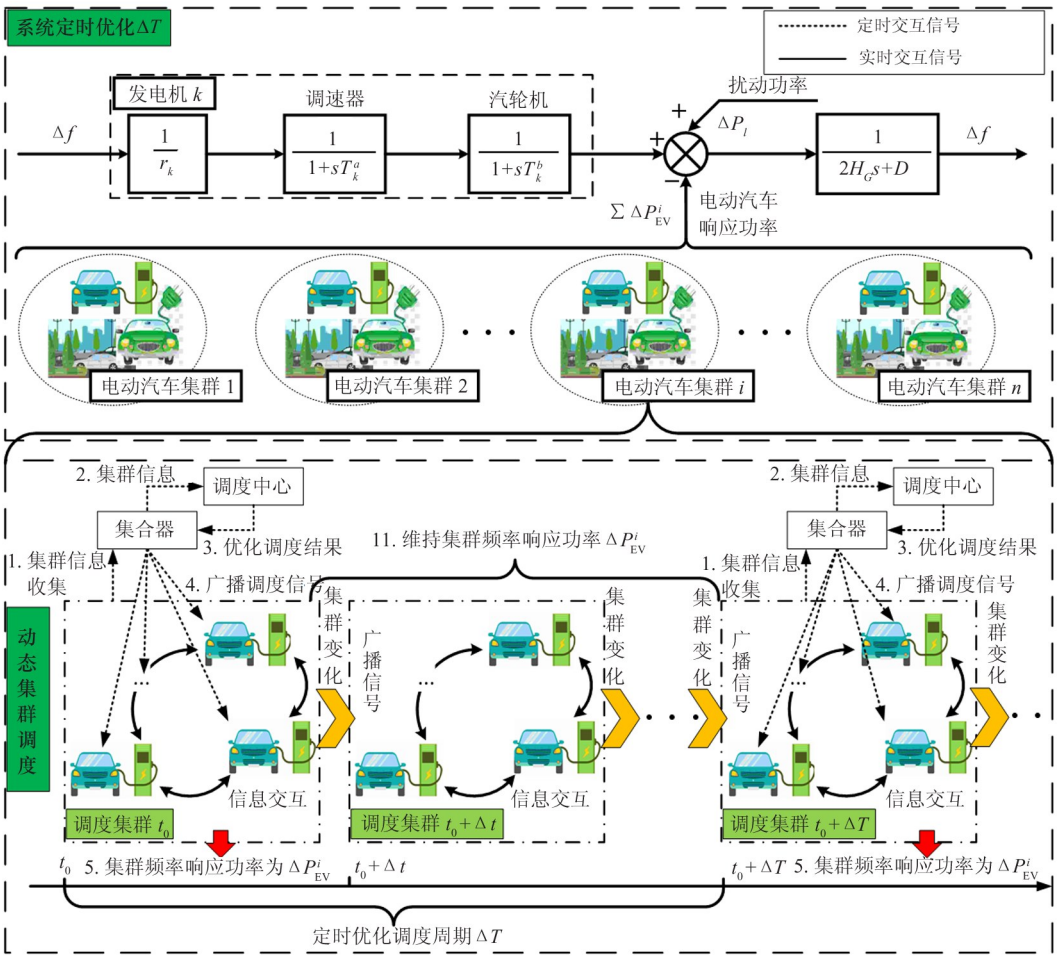


图 1　含开放式电动汽车集群电网调频系统

电机组惯性和负荷阻尼系数;Δf 为频率偏差;$\Delta P^{i}_{\mathrm{EV}}$ 为电动汽车集群 i 的频率响应功率。电动汽车集群能够通过响应频率变化调整自身充电功率来辅助发电机组调频。电动汽车集群辅助参与系统调频的策略可分为 2 层。

(1)第 1 层为固定时间间隔下的周期性优化调度。在传统发电机组间协同控制的基础上,本文将电动汽车集群提供的虚拟惯量也纳入到电网固定周期的优化调度之中。该优化调度每间隔固定时间如 5 min 执行一次,并根据当前电网状态合理调整发电机组的运行点和系统惯量水平,从而实现电力系统的安全经济运行。优化调度结果将通过广播传递给集群中的电动汽车。

(2)第 2 层为电动汽车集群内部的实时协同控制。由于受到用户随机行为的影响,参与电网辅助调频的电动汽车集群是一个始终处于动态变化之中的开放式系统。为滤除 2 次优化调度期间电动汽车集群的随机变化(如部分电动汽车的随机入网/离网)对执行调度任务的影响,本文设计了基于稀疏通讯的实时协同控制算法,使得电动汽车集群在随机用户行为影响下维持稳定的虚拟惯量服务。

本节主要阐述在电力系统整体协同控制视角下的电动汽车集群调度。通过集中式优化确定含一定数量电动汽车集群的电力系统所能接纳的最大风电出力变化量,以一定的电动汽车辅助服务应对风电的随机变化。而电动汽车集群在一致性算法的作用下,通过内部协调减弱甚至消除电动汽车在网状态、电池荷电状态以及充电功率变化等对整体响应能力的影响,维持系统稳定,即第 1 层调度策略。第 1 层通过优化获得的电动汽车调度指令将在第 2 层中执行,具体内容详见第 2 节。

1.2　虚拟惯量支撑与系统频率变化

通过基于电动汽车集群的虚拟惯量支撑,可以显著提高新能源高渗透率电网在低惯量场景下的运行稳定性。为简化电动汽车频率响应模型,采用文献[21]基于导数技术的虚拟惯量响应策略。

$$\Delta P^{ij}_{\mathrm{EV}} = H^{ij}_{vir}\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

其中,H^{ij}_{vir} 和 $\Delta P^{ij}_{\mathrm{EV}}$ 表示电动汽车集群 i 中电动汽车 j 的频率响应系数和频率响应功率,$\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t}$ 为系统频率变化率。

含电动汽车集群的电力系统频率 f 的动态变化过程可由摆动方程式(2)给出。

$$2H_G\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} = P_m - P_e - \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{s_i}\Delta P^{ij}_{\mathrm{EV}} \tag{2}$$

其中,P_m 为发电机组的机械功率;P_e 为发电机组的电磁功率;m 为电动汽车集群数量;s_i 为电动汽车集群 i 中电动汽车数量。将式(1)代入式(2)并整理后进一步可得:

$$2\left(H_G + \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{S_i}H^{ij}_{vir}/2\right)\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} = P_m - P_e \tag{3}$$

由式(3)可得,电动汽车在式(1)给出的响应策略下,能够为系统提供的虚拟惯量总和 H_{vir} 为

$$H_{vir} = \sum\nolimits_{i=1}^{m}\sum\nolimits_{j=1}^{s_i}H^{ij}_{vir}/2 \tag{4}$$

1.3　考虑虚拟惯量支撑的电网频率安全优化调度

在含电动汽车集群的电网中,电网运行人员不仅可以调整发电机组的运行点和旋转备用,还能通过购买一定量的由电动汽车集群提供的虚拟惯量来提高系统在低惯量运行场景下的频率稳定性。因此,电网整体运行成本为

$$\min_{P_k,R_k,H^i_{vir}}\sum_{i=1}^{m}lH^i_{vir} + \sum_{k=1}^{n}\left(a_kP_k^2 + b_kP_k + c_k + A_kR_k\right) \tag{5}$$

其中,P_k 为发电机 k 有功功率输出;R_k 为发电机 k 所提供的备用;$H^i_{vir} = \sum\nolimits_{j=1}^{s_i}H^{ij}_{vir}$ 为电动汽车集群 i 提供的虚拟惯量大小;a_k、b_k、c_k 为发电机 K 的运行价格参数;A_k 为发电机 k 的单位备用容量价格;l 为电动汽车集群提供单位虚拟惯量价格;n 表示发电机的数量。此外,系统在运行过程中还应满足如下约束。

(1) 功率平衡约束

$$\sum_{k=1}^{n}P_k = P_{\mathrm{Load,other}} + P^0_{\mathrm{Load,EV}} \tag{6}$$

式(6)要求系统在预想扰动发生前发电机组出力满足当前所有的负荷需求。其中,$P^0_{\mathrm{Load,EV}}$ 为电动汽车集群不考虑虚拟惯量支撑的基础充电功率之和;$P_{\mathrm{Load,other}}$ 为系统除电动汽车外所有负荷所需的

功率总量。

(2) 发电机约束

$$P_k^{\min} \leqslant P_k \leqslant P_k^{\max} \tag{7}$$

$$P_k^{\min} \leqslant P_k + R_k \leqslant P_k^{\max} \tag{8}$$

$$\sum_{k=1}^{n} R_k \geqslant P_l^{\max} \tag{9}$$

由于受到锅炉技术的限制,发电机需要将其输出功率始终限制在所允许的最大值 $P_k^{\max}$ 与最小值 $P_k^{\min}$ 之内。此外,所有发电机的旋转备用 $\sum_{k=1}^{n} R_k$ 应能完全补偿所有预想故障下的最大可能跌落功率 $P_l^{\max}$。

(3) 频率安全约束

$$0 \leqslant R_k \leqslant \frac{4G_k^{\max}\left(\sum_{k=1}^{n} H_k + \sum_{i=1}^{m} H_{vir}^{i}/2\right)\Delta f_{\max}}{P_l^{\max}} \tag{10}$$

$$\sum_{k=1}^{n} H_k + \sum_{i=1}^{m} H_{vir}^{i}/2 \geqslant \frac{P_l^{\max}}{2RoCoF_{\max}} \tag{11}$$

其中,$\Delta f_{\max}$ 为系统允许的最大频率变化量;$RoCoF_{\max}$ 为系统允许的最大频率变化率。在突发功率跌落 $P_l^{\max}$ 的情况下,电网的频率安全与系统惯量水平 $\sum_{k=1}^{n} H_k + \sum_{i=1}^{m} H_{vir}^{i}/2$、机组最大爬坡速率 $G_k^{\max}$ 密切相关。约束式(11)要求每台发电机在遇到突发大功率扰动事故时,其所承诺的旋转备用 R_k 必须要能够在系统频率跌落至最低点前完全释放。约束式(10)的详细推导参考文献[27]。约束式(11)要求电网在突发功率跌落 $P_l^{\max}$ 的情况下,其最大频率变化率不超过 $RoCoF_{\max}$。

(4) 电动汽车约束

$$0 \leqslant H_{vir}^{i} \leqslant H_{vir,\max}^{i} \tag{12}$$

$$\overline{SoC_{\Delta T}^{i}} = \overline{SoC_0^{i}} + \left(\frac{H_{vir}^{i} RoCoF_{\max}}{s_i} + P_{\text{Load,EV}}^{0}\right)\Delta T \tag{13}$$

$$\overline{SoC_{\Delta T}^{i}}, \overline{SoC_0^{i}} \in [0,1] \tag{14}$$

其中,$H_{vir,\max}^{i}$ 为电动汽车集群 i 所能提供的最大虚拟惯量;$\overline{SoC_0^{i}}$、$\overline{SoC_{\Delta T}^{i}}$ 分别为电动汽车集群 i 当前调度周期的初始平均 SoC 以及一个调度周期后的平均 SoC;ΔT 为 2 次调度的间隔时间。约束式(12)为电动汽车集群所能提供虚拟惯量的约束。约束式(13)和(14)要求电动汽车集群的荷电状态以及在虚拟惯量响应策略满功率响应的情况下充电一个定时调度周期后的荷电状态在[0,1]。

在电动汽车充电需求以及电网频率响应的双重要求下,电动汽车充电策略如下。

$$\begin{cases} P_{\text{EV}}^{ij} = P_{\text{EV},0}^{ij} + \Delta P_{\text{EV}}^{ij} \\ \left|\Delta P_{\text{EV}}^{ij}\right| \leqslant \Delta P_{\text{EV,max}}^{ij} \leqslant P_{\text{EV},0}^{ij} \\ \Delta P_{\text{EV,max}}^{ij} \geqslant 0 \end{cases} \tag{15}$$

其中,P_{EV}^{ij}、$P_{\text{EV},0}^{ij}$、$\Delta P_{\text{EV}}^{ij}$ 以及 $\Delta P_{\text{EV,max}}^{ij}$ 分别表示电动汽车集群 i 中电动汽车 j 的充电功率、不考虑虚拟惯量支撑的基础充电功率、频率响应功率以及最大可调度功率。此外,在频率响应公平性原则要求下,参与响应的电动汽车提供的响应功率应与其荷电状态 SoC 相关,如式(16)所示。

$$\begin{cases} \dfrac{\Delta P_{\text{EV}}^{iw}}{1 - SoC^{iw}} = \dfrac{\Delta P_{\text{EV}}^{iv}}{1 - SoC^{iv}} = \dfrac{\overline{\Delta P_{\text{EV}}}^{i}}{1 - \overline{SoC}^{i}} & \dfrac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \geqslant 0 \\ \dfrac{\Delta P_{\text{EV}}^{iw}}{SoC^{iw}} = \dfrac{\Delta P_{\text{EV}}^{iv}}{SoC^{iv}} = \dfrac{\overline{\Delta P_{\text{EV}}}^{i}}{\overline{SoC}^{i}} & \dfrac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} < 0 \end{cases} \tag{16}$$

其中,$\Delta P_{\text{EV}}^{iw}$ 与 $\Delta P_{\text{EV}}^{iv}$ 分别表示电动汽车集群 i 中电动汽车 w 和电动汽车 v 的频率响应功率;SoC^{iw} 与 SoC^{iv} 分别表示电动汽车集群 i 中电动汽车 w 和电动汽车 v 的荷电状态;$\overline{\Delta P_{\text{EV}}}^{i}$ 表示电动汽车集群 i 的平均频率响应功率;$\overline{SoC}^{i}$ 表示电动汽车集群 i 的平均 SoC。在式(16)的要求下,当 $\Delta f \geqslant 0$ 时,电动汽车充电功率增大,剩余容量较少的电动汽车负担较多的频率响应功率;当 $\Delta f < 0$ 时,电动汽车功率减小,剩余容量较多的电动汽车负担更多的频率响应功率。将式(15)与式(16)代入式(1)中并整理可得电动汽车集群 i 的虚拟惯量 H_{vir}^{i} 满足:

$$H_{vir}^{i} \leqslant \begin{cases} s_i \dfrac{\Delta P_{\text{EV,max}}^{i}}{RoCoF_{\max}}\left(1 - \overline{SoC}^{i}\right) & \dfrac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \geqslant 0 \\ s_i \dfrac{\Delta P_{\text{EV,max}}^{i}}{RoCoF_{\max}} \overline{SoC}^{i} & \dfrac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} < 0 \end{cases} \tag{17}$$

其中,$\Delta P_{\text{EV,max}}^{i}$ 表示电动汽车集群 i 中电动汽车的最大可调度功率(本文设定同一个集群中电动汽车种类相同)。在式(17)的要求下电动汽车充电功率能够同时满足系统频率安全约束和电动汽车充电功率

约束。

如图2所示,当 $\overline{SoC_0^i} > 0.5$ 时,相比于频率变化率大于0的情况,电动汽车集群在频率变化率小于0的情况下能够提供更多的虚拟惯量,并随着 $\overline{SoC_0^i}$ 的增大而增大。当 $\overline{SoC_0^i} < 0.5$ 时,则与之相反。这意味着电动汽车集群在调度过程中可能提供的虚拟惯量发生变化。为确保在一个调度周期内电动汽车集群能够提供稳定不变的虚拟惯量,电动汽车集群 i 的 H_{vir}^i 虚拟惯量被约束在图2的阴影区域内。因此,电动汽车集群 i 所能提供的最大虚拟惯量 $H_{vir,\max}^i$ 为

$$H_{vir,\max}^i = h_i \frac{\Delta P_{\mathrm{EV},\max}^i}{RoCoF_{\max}} \min(1 - \overline{SoC_0^i}, \overline{SoC_0^i}) \tag{18}$$

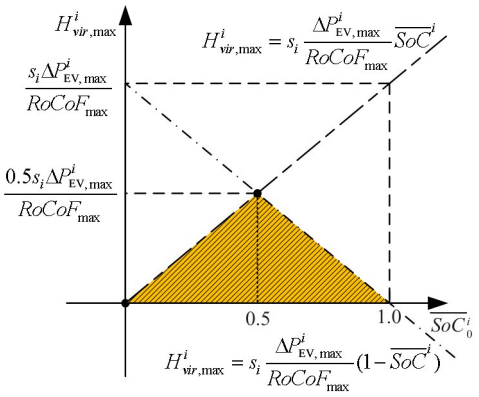


图2　电动汽车集群最大虚拟惯量区间

2　开放式电动汽车集群的协同控制

2.1　封闭式集群与开放式集群

传统协同控制算法通常将一个区域内的电动汽车看作一个封闭的群体,即群体内的电动汽车集合以及相应的通讯链路均在协同调度过程中保持不变。相应地,集群中任意电动汽车的状态更新规则为

$$\boldsymbol{x}(t+1) = \tilde{f}(\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{V}, \boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{u}(t)) \tag{19}$$

其中,$\boldsymbol{V}$ 与 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 分别表示不随时间变化的电动汽车集合与相应的通讯链路。式(19)表示在由 $\boldsymbol{V}$ 与 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 给出的固定集群及其通讯网络中,电动汽车在时变外界输入信号 $\boldsymbol{u}(t)$ 下通过算法 $\tilde{f}$,其状态变量将在第 t 步迭代中从 $\boldsymbol{x}(t)$ 变化为 $\boldsymbol{x}(t+1)$。

现实中的电动汽车集群是一个开放式的时变系统,即群体内的电动汽车集合以及相应的通讯拓扑在协同调度过程中均有可能发生变化。如图3所示,"开放式"集群中的电动汽车可以分别用以下3种状态来描述。

(1) 维持在网:即 t 时刻在网参与调度的电动汽车在 $t+1$ 时刻仍旧在网。此类电动汽车可用如下集合 $\boldsymbol{RC}(t)$ 表示

$$\boldsymbol{RC}(t) = \boldsymbol{V}(t+1) \cap \boldsymbol{V}(t) \tag{20}$$

其中,$\boldsymbol{V}(t)$ 与 $\boldsymbol{V}(t+1)$ 分别表示 t 时刻与 $t+1$ 时刻所有电动汽车的集合;而集合 $\boldsymbol{RC}(t)$ 则为集合 $\boldsymbol{V}(t)$ 与 $\boldsymbol{V}(t+1)$ 的交集。

(2) 退出调度:即 t 时刻在网参与调度的电动汽车在 $t+1$ 时刻离开集群退出调度。此类电动汽车可用如下集合 $\boldsymbol{DC}(t)$ 表示。

$$\boldsymbol{DC}(t) = \boldsymbol{V}(t) \backslash \boldsymbol{V}(t+1) \tag{21}$$

其中,集合 $\boldsymbol{DC}(t)$ 表示集合 $\boldsymbol{V}(t)$ 中除去与 $\boldsymbol{V}(t+1)$ 的交集后的剩余部分。

(3) 加入调度:即有集群外的电动汽车在 $t+1$ 时刻加入集群参与调度。此类电动汽车可用集合 $\boldsymbol{AC}(t)$ 表示为

$$\boldsymbol{AC}(t) = \boldsymbol{V}(t+1) \backslash \boldsymbol{V}(t) \tag{22}$$

其中,集合 $\boldsymbol{AC}(t)$ 表示集合 $\boldsymbol{V}(t+1)$ 中除去与 $\boldsymbol{V}(t)$ 的交集后的剩余部分。

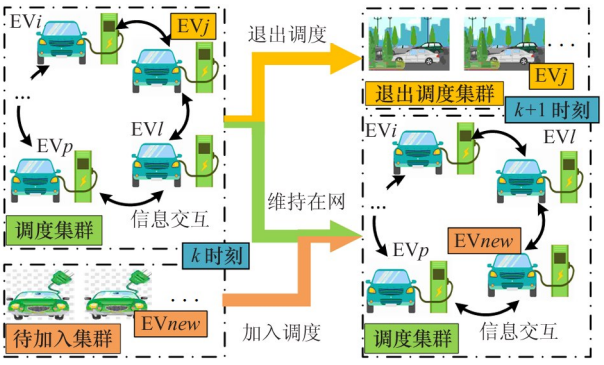


图3　开放式电动汽车集群状态变化

与此同时,连接各台电动汽车的通讯拓扑在本文的开放式系统中亦随时间的变化而变化。时变通讯拓扑 $\boldsymbol{G}(t)$ 可表示为

$$\boldsymbol{G}(t) = (\boldsymbol{V}(t), \boldsymbol{\varepsilon}(t), \boldsymbol{A}(t)) \tag{23}$$

其中，$\boldsymbol{V}(t)$ 如前所述为 t 时刻下的电动汽车集合，其第 i 个元素 $V^i(t)$ 代表第 i 台电动汽车；$\boldsymbol{\varepsilon}(t) \subseteq (\boldsymbol{V}(t) \times \boldsymbol{V}(t))$ 为 t 时刻下电动汽车集群的通讯链路集合；$\boldsymbol{A}(t) \in \boldsymbol{R}^{N(t)\times N(t)}$ 为 t 时刻下的邻接矩阵，用以描述电动汽车间通讯时的信息传递关系。令 $a_{ij}(t)$ 为 $\boldsymbol{A}(t)$ 在 t 时刻下的第 i 行 j 列元素，若 $a_{ij}(t) > 0$，则表示 $(V^i(t), V^j(t)) \in \boldsymbol{\varepsilon}(t)$，即第 i 辆电动汽车向第 j 辆电动汽车发送协同信息；若 $a_{ij}(t) = 0$，则表示 $(V^i(t), V^j(t)) \notin \boldsymbol{\varepsilon}(t)$，即电动汽车集群中第 i 辆电动汽车与第 j 辆电动汽车并未建立通讯链路。通过邻接矩阵 $\boldsymbol{A}(t)$ 可得开放式电动汽车集群通讯网络的时变拉普拉斯矩阵 $\boldsymbol{L}_t$，其 t 时刻下的元素满足：对角线元素 $L_t^{ii} = \sum_{i\neq j} a_{ij}(t)$；非对角线元素 $L_t^{ij} = -a_{ij}(t)$。

根据上述讨论，考虑在时变电动汽车集群和通讯拓扑的开放式系统中，由式(19)给出的传统封闭式协同控制算法将相应拓展为

$$x^i(t+1) = \begin{cases} \bar{f}^i(\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{V}(t), \boldsymbol{\varepsilon}(t), \boldsymbol{u}(t)) & i \in \boldsymbol{RC}(t) \\ \hat{u}^i(t+1) & i \in \boldsymbol{AC}(t) \end{cases} \tag{24}$$

其中，$x^i(t+1)$ 为第 i 台电动汽车在第 $t+1$ 时刻的状态变量；$\bar{f}^i \in \bar{f}$ 表示对应输出电动汽车 i 状态变量的协同控制算法。值得注意的是，对于在 t 时刻退出调度的电动汽车即 $i \in DC(t)$，其在 $t+1$ 时刻状态值不存在，因此其不在式(24)中体现；对于加入调度的电动汽车即 $i \in AC(t)$，式(24)中 $\hat{u}^i(t+1)$ 为初始化策略，用于对电动汽车进行状态值的初始化；而对于维持在网的电动汽车即 $i \in \boldsymbol{RC}(t)$，其在 $t+1$ 时刻的状态变量 $x^i(t+1)$ 则由 t 时刻的状态变量 $\boldsymbol{x}(t)$、通讯链路集合 $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ 以及输入 $\boldsymbol{u}(t)$ 在给定的算法 $\bar{f}^i$ 下获得。

2.2 基于一致性的时变电动汽车集群协同策略

通过将式(3)代入式(2)整理可得电动汽车集群内的响应功率分配情况，如式(25)所示。分析式(25)发现，电动汽车间的协同频率响应功率计算可分解为 2 部分：(1)计算电动汽车集群的荷电状态均值 $\overline{SoC^i}$；(2)计算电动汽车集群的频率响应系数均值 $\sum_{j=1}^{s_j} H_{vir}^{ij}/s_j$。

$$\Delta P_{\mathrm{EV}}^{ij} = \begin{cases} \dfrac{\sum_{j=1}^{h_j} H_{vir}^{ij}/s_j}{1-\overline{SoC^i}}(1-SoC^{ij})\dfrac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} & \dfrac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \geqslant 0 \\ \dfrac{\sum_{j=1}^{h_j} H_{vir}^{ij}/s_j}{\overline{SoC^i}} SoC^{ij}\dfrac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} & \dfrac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} < 0 \end{cases} \tag{25}$$

利用动态一致性算法可实时求解上述两均值，然而传统的动态一致性算法仅针对封闭集群，因此结合式(24)得到时变集群的动态一致性算法，并根据初始化需求定义其初始化策略。

2.2.1 时变电动汽车集群一致性协同策略

(1) 时变电动汽车集群的荷电状态一致性

时变电动汽车集群的荷电状态一致性算法如式(26)~(28)所示。

$$\begin{aligned} x_{SoC}^{ij}(t+1) = {} & x_{SoC}^{ij}(t) - \alpha\delta[x_{SoC}^{ij}(t) - u_{SoC}^{ij}(t)] \\ & - \beta\delta\sum_{J\in N_k^{ij}}(x_{SoC}^{ij}(t) - x_{SoC}^{iJ}(t)) \\ & + \Delta u_{SoC}^{ij}(t),\ j \in \boldsymbol{RC}_i(t) \end{aligned} \tag{26}$$

$$x_{SoC}^{ij}(t+1) = u_{SoC}^{ij}(t+1),\ j \in \boldsymbol{AC}_i(t) \tag{27}$$

$$u_{SoC}^{ij}(t) = SoC^{ij}(t) \tag{28}$$

其中，α 和 β 为一致性算法的迭代参数；δ 为离散时间；$x_{SoC}^{ij}(t)$ 为 t 时刻下电动汽车集群 i 中电动汽车 j 的 SoC 一致性状态值；$u_{SoC}^{ij}(t)$ 为 t 时刻下电动汽车集群 i 中电动汽车 j 的荷电状态一致性过程输入信号；$SoC^{ij}(t)$ 为 t 时刻下电动汽车集群 i 中电动汽车 j 的荷电状态；$\Delta u_{SoC}^{ij}(k)$ 为 t 时刻下电动汽车集群 i 中电动汽车 j 的 SoC 变化量；$\boldsymbol{N}_k^{ij}$ 为 t 时刻下电动汽车集群 i 中电动汽车 j 的邻接电动汽车的集合；$\boldsymbol{RC}_i(k)$ 为 t 时刻下电动汽车集群 i 中的维持在网集群；$\boldsymbol{AC}_i(k)$ 为 t 时刻下电动汽车集群 i 的加入调度集群。式(26)为参与调度电动汽车 SoC 均值计算；式(27)为加入电动汽车初始化策略；式(28)表示电动汽车的荷电状态为均值计算的输入信号。

(2) 电动汽车集群的频率响应系数一致性

与电动汽车集群荷电状态一致性不同，频率响应系数一致性受到上层周期性优化结果指令的影响，其需要一个接受聚合器广播信号后电动汽车频率响应系数重置过程，该过程如式(29)所示。

$$\begin{cases} x_H^{ij}(t_0) = \dfrac{H_{vir,i}}{s_i} \\ u_H^{ij}(t) = \dfrac{H_{vir,i}}{s_i},\ t \in (t_0, t_0 + \Delta T)\ j \in \boldsymbol{OL}^i(t_0) \\ u_H^{ij}(t) = 0,\ t \in (t_0, t_0 + \Delta T)\ j \in \boldsymbol{NOL}^i(t_0) \end{cases} \tag{29}$$

其中,x_H^{ij} 为电动汽车集群 i 中电动汽车 j 的频率响应系数一致性状态变量;$u_H^{ij}(t)$ 为电动汽车集群 i 中电动汽车 j 的频率响应系数参考信号;$\boldsymbol{OL}^i(t_0)$ 为 t_0 时刻电动汽车集群 i 中被聚合器识别的电动汽车的集合;$\boldsymbol{NOL}^i(t_0)$ 为 t_0 时刻未被聚合器识别的电动汽车的集合(即 t_0 时刻后加入集群的电动汽车);t_0 为广播定时优化结果信息时刻;ΔT 为 2 次定时优化的时间间隔。在频率响应系数一致性计算的初始化过程中,聚合器利用已有数据,广播当前调度集群下的集群频率响应系数均值。该初始化策略避免了可能产生的调度信息拥塞问题。

电动汽车频率响应系数的总和受到电动汽车集群变化的影响。当属于集合 $\boldsymbol{OL}^i(t_0)$ 中的部分电动汽车离网时,若每辆电动汽车的相应系数保持不变,则集群对系统的整体频率响应能力减小。这将改变上层周期性优化调度中预设的系统状态,从而降低了电网的安全裕度。因此,需要为退出电动汽车增加响应信息转移策略,并设定适当的加入调度电动汽车初始化策略,从而维持动态电动汽车集群整体对外响应能力的恒定。电动汽车频率响应系数一致性算法如式(30)~(32)所示。

$$\begin{aligned} x_H^{ij}(t+1) = {} & x_H^{ij}(t) - \alpha\delta[x_H^{ij}(t) - u_H^{ij}(t)] \\ & - \beta\delta \sum_{J \in N_k^{ij}} (x_H^{ij}(t) - x_H^{iJ}(t)) \\ & + \Delta u_H^{ij}(t)\ j \in \boldsymbol{RC}_i(t) \end{aligned} \tag{30}$$

$$\begin{cases} x_H^{ij}(t+1) = 0 \\ u_H^{ij}(t_{AC}) = 0,\ t_{AC} \in (t+1, t_0 + \Delta T) \end{cases} \quad j \in \boldsymbol{AC}_i(t) \tag{31}$$

$$u^{J \in N(i)}(t+1) = u^{J \in N(i)}(t) + l_{ij}^H \quad j \in \boldsymbol{DC}_i(t) \tag{32}$$

其中,$\Delta u_H^{ij}(t)$ 为 t 时刻下电动汽车集群 i 中电动汽车 j 虚拟惯量参考信号的变化量;$l_{ij}^H = H_{vir,i}/(s_i \mid N_t^{ij} \mid)$,$\mid N_t^{ij} \mid$ 为 t 时刻下电动汽车集群 i 中电动汽车 j 邻接电动汽车的数量;$\boldsymbol{DC}_i(t)$ 为 t 时刻下电动汽车集群 i 的退出调度集群。对于任意在 t 时刻加入的电动汽车,式(31)将其 $t+1$ 时刻下平均惯量一致性状态初始化为 0。此外,式(31)令电动汽车在退出时根据在网的相邻电动汽车将其响应能力转移给其他电动汽车,确保电动汽车频率响应系数总和不变,维持集群对外频率响应能力的恒定。

2.2.2　电动汽车频率响应功率本地计算

根据式(25),通过时变电动汽车集群的荷电状态一致性状态和频率响应系数一致性状态可得到 t 时刻电动汽车荷电状态以及频率响应功率,如式(33)~(35)所示。

$$\begin{cases} \hat{x}_{\Delta P,ij}(t) = \dfrac{x_H^{ij}(t)(1 - SoC^{ij}(t))}{1 - x_{SoC}^{ij}(t)} & \dfrac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \geqslant 0 \\ \hat{x}_{\Delta P,ij}(t) = \dfrac{x_H^{ij}(t) SoC^{ij}(t)}{x_{SoC}^{ij}(t)} & \dfrac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} < 0 \end{cases} \tag{33}$$

$$\Delta P_{\mathrm{EV},ij}(t) = \hat{x}_{\Delta P,ij}(t) \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \tag{34}$$

$$SoC^{ij}(t+1) = SoC^{ij}(t) + \frac{(\Delta P_{\mathrm{EV}}^{ij}(t) + P_{\mathrm{EV},0}^{ij})\delta}{E_{ij}} \tag{35}$$

其中,$P_{\mathrm{EV},0}^{ij}$ 为电动汽车集群 i 中电动汽车 j 的固定充电功率。式(33)为任意状态下电动汽车集群 i 中电动汽车 j 的频率响应系数大小;式(34)为电动汽车的频率响应功率;式(35)为电动汽车的荷电状态,用于下一个时刻的集群内一致性协同。

2.3　电动汽车集群通讯网络及其重组方法

本文设计通讯网络结构如图 4 所示。聚合器根据第1层固定时间间隔下的周期性优化调度结果,

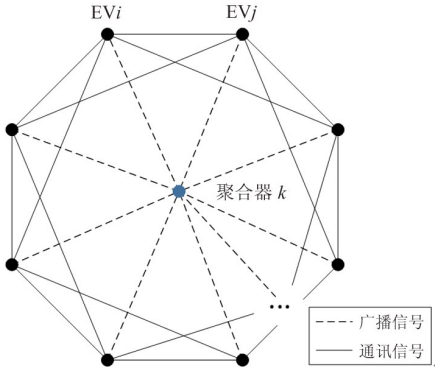
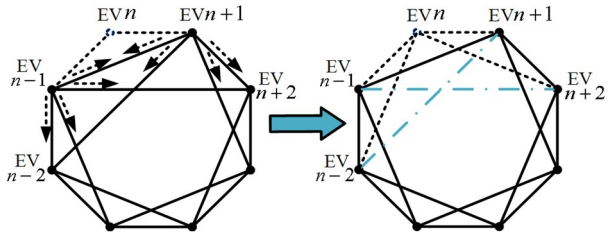


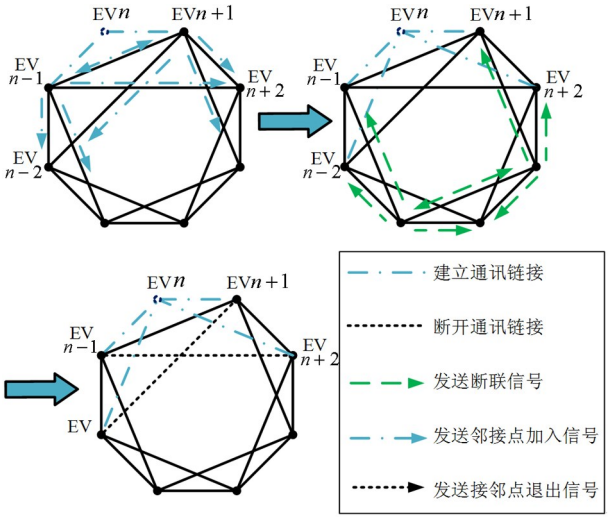
图 4　电动汽车集群调度通讯网络结构

向集群 i 内所有电动汽车广播调度决策，同时根据应答信息收集当前在线电动汽车数量 h、集群荷电状态均值 $\overline{SoC^i}$ 以及单台电动汽车最大可提供的频率响应功率 $\Delta P^i_{\mathrm{EV,max}}$，为下一周期的系统优化调度提供数据基础。而在 2 次上层广播指令间，电动汽车集群通过环状通讯链路进行实时信息交互。

随着开放式集群中电动汽车的随机驶离驶入，电动汽车协同控制所依赖的通讯网络也需要相应地进行重构，以维持必要的联通性和网络出度。因此，本文针对开放式集群的电动汽车随机驶离/驶入场景，分别设计了能够维持网络出度不变的通讯网络重组方法，如图 5(a)和图 5(b)所示。在图 5 中，无箭头点划线表示新建立的通讯连接，无箭头虚线表示原有的通讯连接被断开。



(a) EV 退出网络重构



(b) EV 加入网络重构

图 5　通讯网络重构方法

根据本文的通讯网络重构规则，当有电动汽车退出集群时，该电动汽车向其所有邻接电动汽车广播消息，从而使邻接电动汽车断开与离网电动汽车的通讯链接。邻接电动汽车收到广播信息后，搜寻同样收到广播信号的其他电动汽车，并建立新的通讯联系(维持已有的通讯联系)，从而重新构建起如图 5(a)所示的具有相同出度的通讯网络。类似地，根据通讯网络现有的出度，新加入集群的电动汽车寻找任意两邻接电动汽车，这 2 辆电动汽车向其所有的邻接电动汽车广播信息，并与收到 2 个广播信号的电动汽车一同与入网电动汽车建立通讯联系。而仅收到一个广播信号的电动汽车向其邻接电动汽车发送具有车辆标号的断联信号作为标识。在下一次通讯时，具有不同断联信号的电动汽车间通讯链接断开。此时，重建了与通讯原网络相同出度的通讯网络，如图 5(b)所示。

根据上述内容，在本文所提的网络重组以及控制策略下，系统能够接受任意时刻下电动汽车集群的变化，并且逐步消除集群变化带来的影响，以提供稳定的辅助服务。本文将通过仿真验证所提算法对于时变电动汽车集群辅助能力稳定控制以及增强系统频率稳定能力的有效性。

3　实验仿真

本文选取如图 6 所示的 35 台发电机组五区域系统作为测试算例，同时系统允许的最大频率偏差为 ±0.5 Hz。在该系统中，传统可调度机组总装机容量为 11 750 MW，新能源总装机容量为 5 900 MW。电动汽车集群中共有 20 000 辆电动汽车，每辆电动汽车的基准充电功率为 10 kW。本文结合电动汽车集群虚拟惯量响应考虑频率稳定性约束对电网进行优化调度。传统机组装机容量、爬坡速率、发电成本

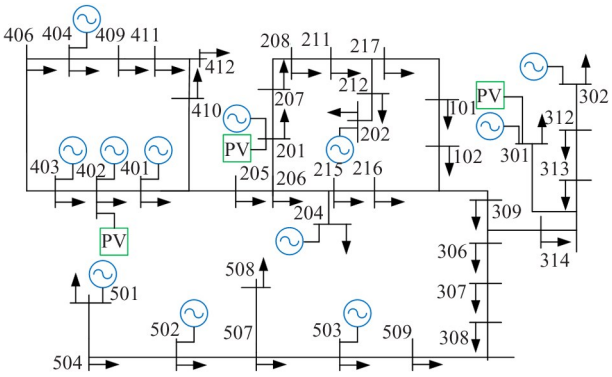


图 6　系统网络架构图

以及调频备用成本参数配置如表 1 所示。新能源发电机组在 201、301、401 的装机数量和容量分别为 3 台 500 MW、4 台 950 MW 以及 2 台 300 MW。同时系统中含有 7 个电动汽车集群,每个电动汽车集群中含有 20 000 台电动汽车,同时每台电动汽车的充电功率均为 10 kW。

表 1　传统同步机组参数配置

发电机类型	机组接入点	数量	装机容量/MW	最大爬坡速率/(MW·min^{-1})
1	201	1	900	28.48
2	202	3	500	6.03
3	203	3	500	5.75
4	204	4	600	6.90
5	302	1	800	10.13
6	401	3	400	5.06
7	403	3	400	4.82
8	404	3	300	3.45
9	501	1	600	7.59
10	502	3	200	2.30
11	503	1	150	1.81

本节优化求解于 Matlab R2016a 编译环境下,采用 Yalmip 优化工具建模,调用 Cplex 求解器求解。并基于优化结果在 Matlab/SIMULINK 时域仿真平台上搭建用户隐私保护要求下的含电动汽车电网一次调频模型进行仿真验证。在系统运行开始时进行一次定时优化。集群内一致性算法迭代参数 $\alpha = 0.2$,$\beta = 1.7$, 迭代间隔 $\delta = 0.1$。

3.1　不同渗透率电动汽车对电网经济性影响分析

本文所设计场景的电动汽车渗透率,即电动汽车占负荷总量的比例为11.67%。根据表2可以得出,在负荷总量在 12 000 MW 的情况下,电动汽车集群通过虚拟惯量提高系统稳定性,从而提高系统消纳新能源的能力,以此降低电网运行成本。

表 2　11.67%渗透率电动汽车集群系统优化结果

是否含有电动汽车集群	500 WM 风机出力/MW	950 WM 风机出力/MW	300 WM 风机出力/MW	成本/元
否	485.24	485.24	300	194 780
是	500.00	546.27	300	168 849
风机使用增加	3.04%	12.58%	0.00%	/

在本文所提的优化调度策略下,电动汽车渗透率的增加能够降低电网运行成本。如表 3 所示,在电网负荷为 12 000 MW 的情况下,随着电动汽车渗透率提高,系统中可调度的虚拟惯量总量逐步提高,消纳新能源的能力提高。

表 3　不同电动汽车渗透率系统的优化结果

电动汽车渗透率/%	虚拟惯量总量/(MWs·Hz^{-1})	500 WM 风机出力/MW	950 WM 风机出力/MW	300 WM 风机出力/MW
1.17	45.218 0	485.24	485.24	300
5.83	226.089 8	500.00	513.26	300
11.67	452.179 7	500.00	546.27	300

值得注意的是,电网整体运行的经济性同时与未达到出力上限的新能源发电机组数量有关。随着不可满发新能源发电机组数量的减少,电动汽车集群渗透率增加对提高电网运行经济性的效率降低。同时,对于新能源使用率的提高能力与系统发电机爬坡速率有关。在系统爬坡能力较高的情况下,相同渗透率的电动汽车集群能够提高更多新能源渗透率。

3.2　含电动汽车集群电力系统频率动态特性

本节在所提出的场景下,对电动汽车集群内部的协同调度情况进行仿真。因电动汽车集群间的入网和离网概率不同,本文假设每个电动汽车集群在 1 min 离开的电动汽车数量不超过 20 辆。同时当电动汽车完成充电需求时,自动从调度网络中脱离。本节仿真时间为 60 s,第 30 s 时系统出现大功率扰动,即为最大出力发电机故障脱落。仿真结果如图 7所示。由图 7 可知,电动汽车集群能够有效提高系统频率稳定性,在上移频率最低点的同时,能够使系统频率更快地达到一次调频稳定点。

3.3　电动汽车集群协同算法鲁棒性分析

在 3.2 小节的基础上分析电动汽车集群整体对外响应能力以及鲁棒动态一致性协同算法的鲁棒性,仿真结果如图 8 ~ 10 所示。

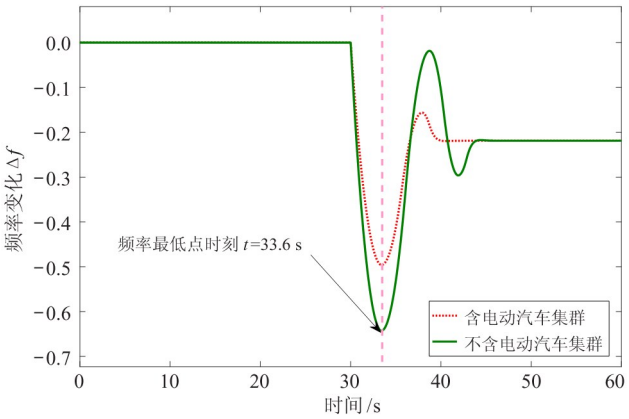
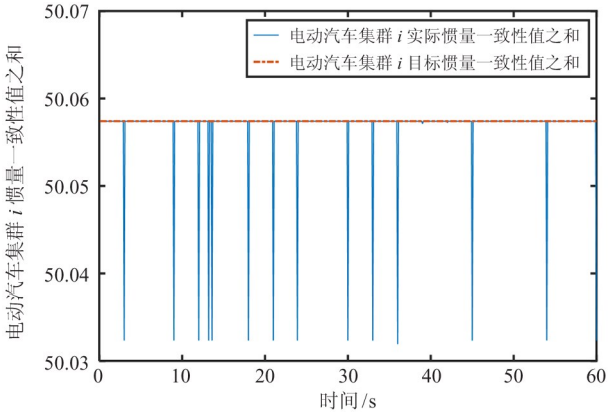
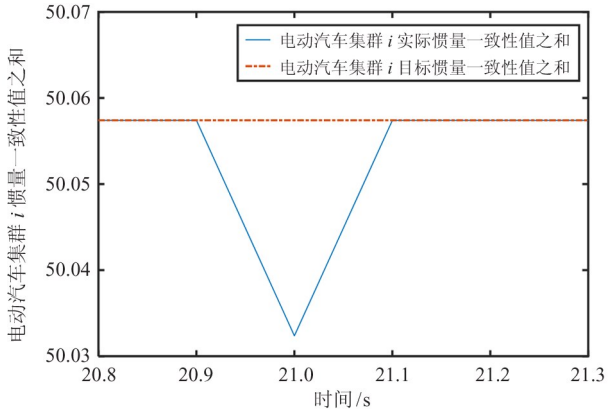


图 7　系统频率变化



(a) 电动汽车集群 i 虚拟惯量一致性值和



(b) 电动汽车集群 i 第 21 s 前后惯量一致性值之和状态变化

图 8　电动汽车集群 i 虚拟惯量一致性值之和变化情况

电动汽车的随机入网、离网过程主要影响电动汽车协同的一致性状态之和。由于入网初始化，在电动汽车入网时不影响集群响应能力，仅需重新建立一致性。由于动态一致性算法的内部迭代规律，当电动汽车退出时，其一致性值总和将发生变化。如图 8(a)所示，本文所提策略能够在虚拟惯量一致性值总和变化后将其恢复。由图 8(b)可得，当电动汽车惯量一致性状态之和出现变化后，在下一次迭代时恢复。所提策略的虚拟惯量一致性值总和的恢复具有一定的滞后性，滞后时间为一个迭代周期。

电动汽车的退出与加入调度同时影响了电动汽车内部虚拟惯量的一致状态。为消除单台电动汽车退出/加入对于系统的影响，本文引入开放式框架并结合鲁棒动态一致性算法实施电动汽车内部协同策略。图 9 为电动汽车集群 i 中，某一电动汽车退出一段时间后，又重新驶入一辆电动汽车加入调度过程中的一致性状态变化情况。由此可得，电动汽车驶离后其一致性协同算法输入信号能够由邻接电动汽车快速补偿并重新收敛到新的一致性状态。该补偿滞后一个迭代周期。而加入调度的电动汽车一致性状态由 0 逐步收敛到新的一致性状态。值得注意的是，电动汽车的退出/加入导致实际一致性状态与目标一致性状态存在一定误差。这是动态一致性算法本身存在的误差所决定的，受到通讯网络等因素的影响。

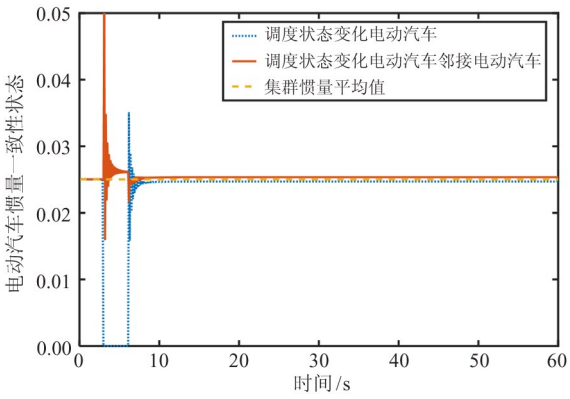
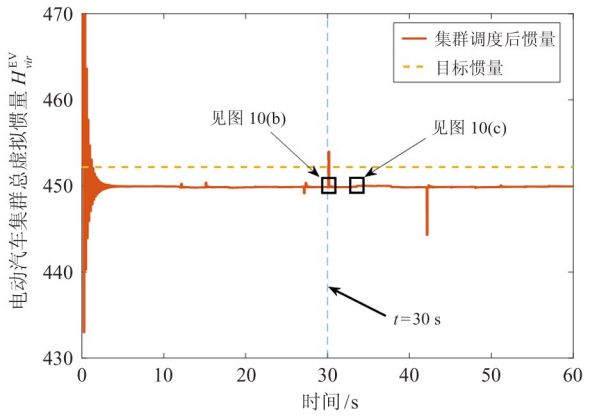


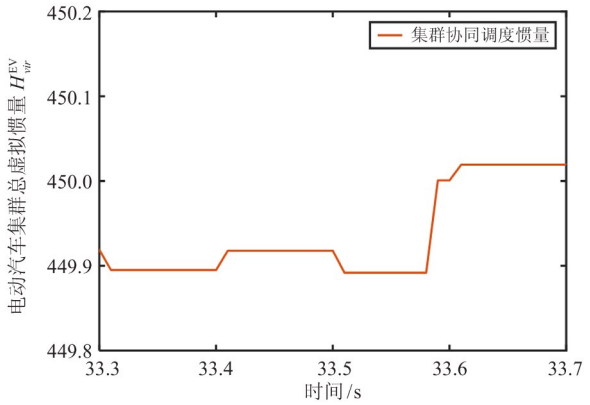
图 9　电动汽车集群 i 中单台电动汽车虚拟惯量一致性值鲁棒性

如图 10(a)所示，在电动汽车集群虚拟惯量协同响应的过程中，其所提供的虚拟惯量并非一个固定的值。其变化情况主要分为 2 种。(1)如图 10(b)所示，在仿真时间 33.6 s 左右时，频率变化率在正值与负值切换，电动汽车集群虚拟惯量响应变化。这是由于式(33)在求解电动汽车惯量响应功率时，受到动态一致性算法的误差影响，导致式(33)中两

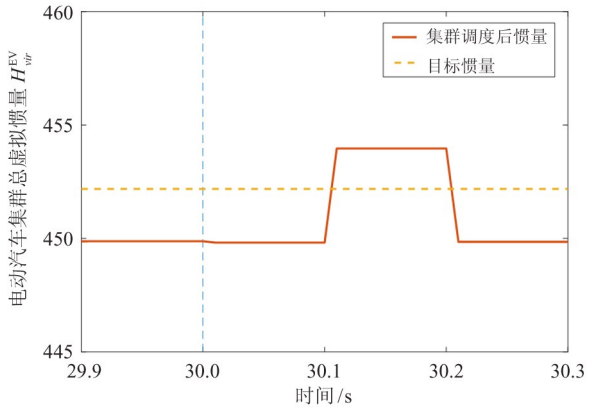
公式的计算结果具有一定的误差。(2)如图 10(c)所示,在仿真时间 30.1 s 时,由于电动汽车集群变化引发集群重建虚拟惯量一致性状态,导致集群虚拟惯量波动。同样地,在一次迭代周期后集群整体虚拟惯量恢复至原先值。电动汽车荷电状态一致性求解过程与虚拟惯量一致性过程相似,本文不再赘述。由上述分析可知,电动汽车集群对外整体响应能力变化时,经过一次迭代周期即可恢复,具备较强的鲁棒性。



(a) 电动汽车集群总虚拟惯量



(b) 频率变化率符号变化时集群虚拟惯量变化



(c) 集群变化时集群虚拟惯量变化

图 10　电动汽车集群虚拟惯量变化情况

4　结　论

本文考虑了电动汽车频率响应的动态特性,并结合电网运行优化策略,利用电动汽车集群辅助调频并优化电力系统运行成本。同时通过“开放式”系统下的动态一致性算法协调电动汽车集群内的虚拟惯量,公平分配电动汽车间的虚拟惯量响应功率,并且能够有效应对电动汽车随机入网以及离网。相对于基于统计学的方法,本方法的适应性较强,能够移植到其他类似的场景下使用。在上层优化中,电动汽车集群的惯量由集群荷电状态均值决定,难以完全挖掘电动汽车辅助调频能力。今后将在协同算法以及改善电动汽车惯量响应策略等方面开展研究,以充分发挥电动汽车集群辅助调频能力。

参考文献

[1] 张子扬,张宁,杜尔顺,等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1):1-25.

[2] ALMEIDA P M R, LOPES J A P, SOARES F J, et al. Electric vehicles participating in frequency control: operating islanded systems with large penetration of renewable power sources[C]// 2011 IEEE PES Trondheim PowerTech: The Power of Technology for a Sustainable Society. Trondheim, Norway: IEEE, 2011:1-6.

[3] LIU H, HU Z C, SONG Y H, et al. Decentralized vehicle-to-grid control for primary frequency regulation considering charging demands[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013,28(3):3480-3489.

[4] LIU H, HU Z C, SONG Y H, et al. Vehicle-to-grid control for supplementary frequency regulation considering charging demands[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015:30(6):3110-3119.

[5] HAN S, 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.

[6] KAUR K, KUMAR N, SINGH M. Coordinated power control of electric vehicles for grid frequency-support:

MILP-based hierarchical control-design[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019,10(3):3364-3373.

[7] ALIABADI S F, TAHER S A, SHAHIDEHPOUR M. Smart deregulated grid frequency control in presence of renewable energy-resources by-EVs charging control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(2):1073-1085.

[8] FALAHATI S, TAHER S A, SHAHIDEHPOUR M. Grid secondary frequency control by optimized fuzzy control of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(6):5613-5621.

[9] 王若谷,陈果,王秀丽,等. 计及风电与电动汽车随机性的两阶段机组组合研究[J]. 电力建设, 2021,42(8):63-70.

[10] 周建力,乌云哪,董昊鑫,等. 计及电动汽车随机充电的风-光-氢综合能源系统优化规划[J]. 电力系统自动化, 2021,45(24):30-40.

[11] 郑远硕,李峰,董九玲,等. “车-路-网”模式下电动汽车充放电时空灵活性优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2022,46(12):88-97.

[12] 胡俊杰,马文帅,薛禹胜,等. 基于 CPSSE 框架的电动汽车聚合商备用容量量化[J]. 电力系统自动化, 2022,46(18):46-54.

[13] YAO E X, WONG V W S, SCHOBER R. Robust frequency regulation capacity scheduling algorithm for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016,8(2):1-14.

[14] LIU W J, CHEN S B, HOU Y H, et al. Trilevel mixed integer optimization for day-ahead spinning reserve management of electric vehicle aggregator with uncertainty [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022,13(1):613-625.

[15] PORRAS Á, FERNÁNDEZB, MORALES R J M, et al. An efficient robust approach to the day-ahead operation of an aggregator of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020,11(6):4960-4970.

[16] MEHBOOB N, RESTREPO M, CAÑIZARES C A, et al. Smart operation of electric vehicles with four-quadrant chargers considering uncertainties[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019,10(3):2999-3009.

[17] 吴洲洋,艾欣,胡俊杰. 需求侧灵活性资源参与调频辅助服务的备用优化与实时调度[J]. 电力系统自动化, 2021,45(6):148-157.

[18] 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.

[19] HOSSEINIPOUR A, HOJABRI H. Virtual inertia control of PV systems for dynamic performance and damping enhancement of DC microgrids with constant power loads [J]. IET Renewable Power Generation, 2018,12:430-438.

[20] JAFARI H, MOGHADDAMI M, OLOWU T O, et al. Virtual inertia-based multipower level controller for inductive electric vehicle charging systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(6): 7369-7382.

[21] RAKHSHANI E, RODRIGUEZ P. Inertia emulation in AC/DC interconnected power systems using derivative technique considering frequency measurement effects[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3338-3351.

[22] SOCKEEL N, GAFFORD J, PAPARI B, et al. Virtual inertia emulator-based model predictive control for grid frequency regulation considering high penetration of inverter-based energy storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020,11(4):2932-2939.

[23] DHINGRA K, SINGH M. Frequency support in a microgrid using virtual synchronous generator based charging station[J]. IET Renewable Power Generation, 2018,12(9):1034-1044.

[24] 刘其辉,逯胜建. 参与微电网调频的电动汽车虚拟同步机充放电控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018,42(9):171-179.

[25] WU H, RUAN X B, YANG D S, et al. Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016,63(7):4292-4303.

[26] WANG F, ZHANG L J, FENG X Y, et al. An adaptive control strategy for virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5):5124-5133.

[27] CHAVEZ H, BALDICK R, SHARMA S. Governor rate-constrained OPF for primary frequency control adequacy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1473-1480.

Network frequency security scheduling with virtual inertia support of time-varying electric vehicle clusters

LING Feng, WANG Licheng

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

The rapid development of electric vehicles provides a new solution to the problem of frequency stability of power grid with high permeability of renewable energy. In this paper, a two-layer scheduling strategy for electric vehicle cluster is established. The first layer is periodic optimization scheduling under fixed time interval. According to the overall running state of the current power system, the scheduler sets the optimal running point and the virtual inertia support task for the generator set and the electric vehicle cluster respectively in each dispatching cycle, so as to improve the frequency stability and operation economy of the system. The second layer is the real-time collaborative control inside the electric vehicle cluster. In this paper, the robust dynamic consistency algorithm is used to fairly allocate the virtual inertia response power to the electric vehicles on the network at the current time, so that the open time-varying electric vehicle cluster can realize the unbiased response to the upper-level scheduling instruction (virtual inertia support task). Finally, simulation results show that the proposed strategy can effectively utilize the virtual inertia response of the electric vehicle cluster, improve the economy and stability of the system operation, as well as the stability of the whole virtual inertia response capability of the electric vehicle cluster.

Key words: open multi-agent system, electric vehicle, primary frequency modulation, robust dynamic consensus algorithm