

计及电动汽车实时可控能量动态变化的负荷频率控制

张 谦¹, 李 晨¹, 周 林², 王 众¹, 李春燕¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 国网重庆市电力公司江津供电分公司, 重庆 402200)

摘要: 电动汽车(EV)可控能量的时变性对其参与系统调频有重要影响。以我国 4 种类型 EV 的行驶规律为基础, 结合 EV 状态转换特性, 模拟计算各类 EV 的可控数量; 在此基础上, 计算 EV 初始储能和 EV 实时可控能量; 最后建立计及 EV 实时可控能量动态变化的负荷频率控制模型。仿真结果表明: 所提考虑交通属性的 EV 实时可控能量模型更加符合 EV 参与系统频率调整的规律, 能有效抑制系统频率变化; 在相同电池总能量下, 电动私家车在各类型 EV 中, 参与系统调频的时段最长, 实时可控能量最多, 调频效果最好。

关键词: 电动汽车; 可控能量; 负荷频率控制; 动态变化; 行驶规律; 车网互动

中图分类号: TM 761; U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.032

0 引言

随着节能减排与低碳经济政策的推行, 风电、太阳能等可再生能源将在电网中占据较大比重。可再生能源出力具有较强的波动性, 这给电力系统的频率稳定带来巨大挑战。电力系统调频过程中, 传统机组由于爬坡率高、响应速度慢, 无法及时调整可再生能源间歇性波动带来的频率变化。为此, 大规模储能等技术开始应用于电网系统调频。其中, 电动汽车(EV)的大规模发展使其自身具有参与系统频率调整的潜力。技术层面上, EV 与电网互动(V2G)技术的不断进步使得这种潜力更具有可行性。

目前国外学者分别从技术^[1-2]、调频效果^[3]和经济效益^[4-5]三方面开展了 EV 参与电力系统调频的研究。文献[1]将具有电能双向流动能力的电力电子设备应用于 EV, 并将其接入电网, 验证了 EV 利用 V2G 技术参与电网频率调整的可行性。文献[3]指出调频服务给 EV 用户带来的利润大于电池的成本, 具有良好的发展前景。文献[6]提出了 EV 参与系统频率一次调整的方法, 通过利用频率下垂特性的控制方法来完成系统调频的要求。V2G 技术的进步使得 EV 可以通过调整充放电功率, 起到抑制因风能、太阳能等间歇性能源接入电网带来的频率波动的作用^[7-10]。联合 EV 和可控负荷参与系统频率的二次调整也成为新的研究方向^[11]。

国内学者的研究多集中于 EV 充放电策略^[12]、调度模型^[13]及其充电站的规划^[14]。调频方面的研究还处于起步阶段, 文献[15]在考虑了 EV 电池模型的基础上, 建立了 EV 参与负荷频率控制(LFC)的模型, 研究了其控制作用和系统动态响应的效果, 最

后指出 EV 作为一种储能设备, 通过 V2G 技术可快速地响应系统扰动, 提高系统频率的稳定性。文献[16]根据 EV 运行具有分散性的特点, 研究了 EV 通过网络化控制的方法参与电网频率调整; 针对包含 EV 及风电的两区域互联系统, 设计了最优 H_{∞} -PID 混合控制器, 从而提高了整个系统的鲁棒性。文献[17-19]提出了可调度容量的概念, 但弱化了 EV 的交通属性。

然而, 目前国内外学者在进行 EV 实时可控能量研究时, 简化了各类型 EV 的交通属性及其状态转换特性, 导致各时段参加调频的 EV 实时可控能量计算不准确。而实时可控能量的准确性直接影响调频效果。基于此, 本文在分析我国 4 种类型 EV 行驶规律的基础上, 结合 EV 接入电网的状态转换特性, 模拟计算 EV 可控数量和初始储能; 在此基础上, 计算 EV 实时可控能量动态特性, 建立计及 EV 实时可控能量动态变化的负荷频率控制模型, 分析不同类型 EV 实时可控能量对其参与系统调频的影响。

1 EV 交通属性的状态转换

1.1 EV 的行驶规律

汽车用户的使用习惯不会因车辆性质由燃油动力车变为电动力车而发生显著变化^[20]。因此, 本文假定 4 种类型 EV 在工作日的行驶规律, 与目前传统汽车的行驶规律相似^[21]。各类 EV 在工作日的行驶规律如下: 电动公交车的行驶时间为 05:30—23:00, 闲置时间为 23:00 至次日 05:30; 电动公务车的行驶时间为 07:00—18:00, 闲置时间为 18:00 至次日 07:00; 电动出租车在 24 h 模式下行驶时间为 00:00—02:00、05:00—11:30、14:30—24:00, 闲置时间为 02:00—05:00、11:30—14:30, 在 12 h 模式下行驶时间为 00:00—02:00、04:00—11:30、14:00—24:00, 闲置时间为 02:00—04:00、11:30—14:00; 电动私家车从家出发去工作单位的时间为 07:30—08:30, 到达工作

收稿日期: 2017-03-31; 修回日期: 2017-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51507022)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51507022)

单位的时间为 08:00—09:00,下班后直接回家的时间为 17:00—18:30,下班后直接回家到家的时间为 17:30—19:30,下班去娱乐后到家的时间为 21:00—22:30。

1.2 EV 的状态转换特性

分析 EV 的交通属性可知, EV 状态分为行驶状态、充电状态、可控状态、空闲状态,状态转换见图 1。

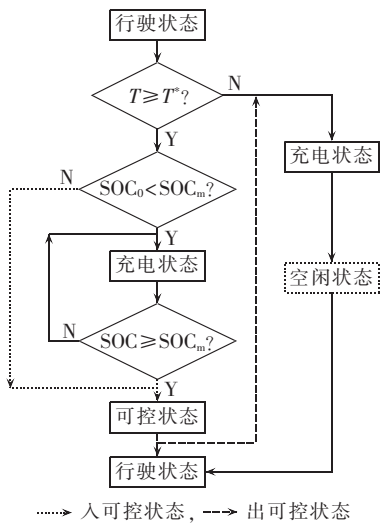


图 1 EV 的状态转换

Fig.1 State transition of EV

图 1 中, EV 仅在可控状态参与系统调频。EV 接入电网的时间 T 大于等于 EV 接入电网的最短时间 T^* , 即 $T \geq T^*$ 时, EV 将在这 4 种状态间进行转换。

a. 行驶状态。EV 脱离电网, 即处于行驶状态。

b. 充电状态。EV 接入电网, 若 EV 储能电池的荷电状态 SOC_0 未达到可参与系统调频的储能荷电状态 SOC_m , 则 EV 处于充电状态, 在此时间段内 EV 不接受调频任务。

c. 可控状态。EV 接入电网, 若 EV 储能电池的荷电状态 SOC_0 达到可参与系统调频的储能荷电状态 SOC_m , 则 EV 处于可控状态, 称为入可控状态, 接受调频任务。

此外, 处于可控状态的 EV 由于参与系统调频, 导致其荷电状态 $SOC < SOC_m$, 则 EV 由可控状态转为充电状态, 以保证 EV 在进入行驶状态前, 拥有足够高的储能。其中, EV 由可控状态转出称为出可控状态。

由于入可控状态和出可控状态属于临界状态, 故图 1 用不同线型来反映入可控状态和出可控状态与其他状态的转换关系。

d. 空闲状态。EV 接入电网既不充电也不参与系统调频, 即处于空闲状态, 如图 1 中虚框所示。

2 EV 可控数量的动态变化模型

区域内某一时刻的可控 EV 数量, 取决于可控

状态的 EV 数量, 如图 2 所示。在一天时间范围内, 随着 EV 状态的改变, 区域内可控 EV 数量将呈现动态变化。研究可控状态的改变, 就必须结合 EV 的行驶规律与状态转换特性来进行分析。由于目前国内 EV 还未普及, 仅在一些城市进行示范运营, 缺乏大量实际 EV 的运行数据, 故本文采用蒙特卡洛方法来模拟 EV 的运行情况。

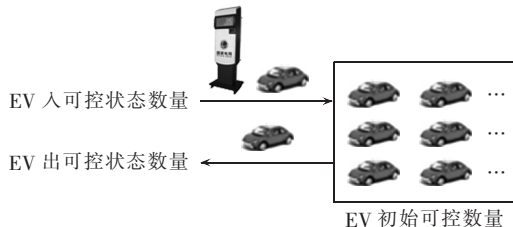


图 2 EV 可控数量示意图

Fig.2 Schematic diagram of controllable EV number

设起始时刻为 t_0 , 时刻 t_0 的初始可控 EV 数量为 N_0 。时刻 t 的可控 EV 数量 $N_c(t)$ 如式(1)所示。

$$N_c(t) = N_0 + N_{in}(t) - N_{out}(t) \quad (1)$$

其中, $N_{in}(t)$ 为时刻 t 入可控状态的累计 EV 数量; $N_{out}(t)$ 为时刻 t 出可控状态的累计 EV 数量。

$$N_{in}(t) = \sum_{t_i=t_0}^t N'_{in}(t_i) \quad (2)$$

$$N_{out}(t) = \sum_{t_i=t_0}^t N'_{out}(t_i) \quad (3)$$

其中, $N'_{in}(t_i)$ 为区域内每一时刻入可控状态的 EV 数量; $N'_{out}(t_i)$ 为区域内每一时刻出可控状态的 EV 数量。 $N'_{in}(t_i)$ 和 $N'_{out}(t_i)$ 可由 EV 接入/结束可控状态时刻表统计分析得到, 其各时刻的统计分析计算如下。

假设区域内 EV 接入电网的时刻为 t_1 , EV 充电达到可参与系统调频状态的时长为 T_2 , 由此可得 EV 进入可控状态的时刻 t_3 为:

$$t_3 = t_1 + T_2 \quad (4)$$

充电时长 T_2 的计算由 EV 储能电池特性和充电功率决定。储能电池特性包括电池种类和电池荷电状态 SOC。本文假设 EV 均采用锂离子电池, 由文献[22]可知锂离子电池充电功率 P_{ev} (单位为 kW) 和电池荷电状态 SOC 随充电时间 h (单位为 h) 的变化规律分别如下:

$$P_{ev} = \begin{cases} 29.25h & 0 \leq h \leq 0.222 \\ 6.5 & 0.222 < h < 4.43 \\ -11.4h + 57 & 4.43 \leq h \leq 5 \end{cases} \quad (5)$$

$$SOC = \begin{cases} 0.2143h \times 100\% & 0 \leq h < 4.43 \\ 0.4134\sqrt{h+0.85} \times 100\% & 4.43 \leq h \leq 5 \end{cases} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可以得出, EV 充电功率 P_{ev} 与电池荷电状态 SOC 的关系如式(7)所示。

$$P_{ev} = \begin{cases} 136SOC & 0 \leq SOC \leq 4.76\% \\ 6.5 & 4.76\% < SOC < 95\% \\ 66.69 - 66.7SOC^2 & 95\% \leq SOC \leq 100\% \end{cases} \quad (7)$$

考虑 P_{ev} 和 SOC 之间的函数关系及 SOC_0 与 SOC_m 的相对大小, 可得出 T_2 的计算式为:

$$T_2 = \begin{cases} \frac{(SOC_m - SOC_0)E_{ev}}{\eta_{ev} \cdot 136 \cdot SOC} & 0 \leq SOC_0 < 4.76\% \\ \frac{(SOC_m - SOC_0)E_{ev}}{\eta_{ev} \cdot 6.5} & 4.76\% \leq SOC_0 < SOC_m \\ 0 & SOC_0 \geq SOC_m \end{cases} \quad (8)$$

其中, E_{ev} 为单辆 EV 的电池容量, 单位为 $kW \cdot h$; η_{ev} 为充电效率。如果假设放电功率和放电效率分别与充电功率和充电效率大小相同, 则也可称 P_{ev} 为单辆 EV 的充放电功率, 规定放电时为正, 充电时为负; η_{ev} 为充放电效率。

EV 结束可控状态时刻 t_4 包含 2 种状态转换情形: 第 1 种情形, EV 直接脱离电网, 由可控状态转为行驶状态; 第 2 种情形, EV 储能荷电状态 SOC 未满足车主出行前对 EV 的储能需求, EV 由可控状态转为充电状态, 在这种情形下, 采用快充方式, 以 EV 能接受的最大充电功率进行充电直到满足车主出行前对 EV 的储能需求。考虑时间裕度后, EV 的行驶出发时刻减去快充时长, 即可确定时刻 t_4 。

采用蒙特卡洛方法随机抽样 EV 接入电网的时刻 t_1 、接入电网的储能荷电状态 SOC_0 和结束可控状态的时刻 t_4 。不断模拟每辆 EV 的接入/结束可控状态, 最终得到区域内所有 EV 的接入/结束可控状态时刻表, 以进行 EV 可控数量计算。

3 计及 EV 实时可控能量动态变化的负荷频率控制模型

3.1 可控 EV 初始储能动态变化模型

根据前述各类 EV 的行驶规律和状态转换特性, 结合 EV 可控数量的动态变化模型, 可以确定可控 EV 的初始储能动态变化模型。

任意时刻 t , 区域内可控 EV 的初始总储能 $E_{c0}(t)$ 可由式(9)计算。

$$E_{c0}(t) = E_0 + E_{in}(t) - E_{out}(t) \quad (9)$$

其中, E_0 为时刻 t_0 可控 EV 初始储能, 单位为 $MW \cdot h$; $E_{in}(t)$ 为处于入可控状态的 EV 引起的储能增量, 单位为 $MW \cdot h$; $E_{out}(t)$ 为出可控状态的 EV 引起的储能减少量, 单位为 $MW \cdot h$ 。由于采用了文献[23]中的荷电状态同步控制方法, 可控状态下各 EV 电池的荷电状态均近似等于所有可控 EV 的平均荷电状态 $SOC_{AVG}(t)$ 。

$$E_0 = SOC_m N_0 E_{ev} / 1000 \quad (10)$$

$$E_{in}(t) = SOC_m N_{in}(t) E_{ev} / 1000 \quad (11)$$

$$E_{out}(t) = \frac{N_{out}(t)}{N_0 + N_{in}(t)} (E_0 + E_{in}(t)) \quad (12)$$

3.2 考虑负荷频率控制的 EV 实时可控能量动态变化模型

EV 作为负荷频率控制模型的新型调频模块, 通过充放电功率快速对频率振荡作出响应。长时间参

与系统负荷频率调整, EV 的瞬时充放电功率输出影响储能能量。同时, EV 自身储能的变化会反过来限制其充放电功率输出, 故计及负荷频率控制的 EV 实时可控能量计算时, 需要考虑参加调频时瞬时充放电功率带来的影响, 计算式如式(13)、(14)所示。

$$E_c(t) = E_{c0}(t) - E_{LFC}(t) = E_0 + E_{in}(t) - E_{out}(t) - E_{LFC}(t) \quad (13)$$

$$E_{out}(t) = \frac{N_{out}(t)}{N_0 + N_{in}(t)} (E_0 + E_{in}(t) - E_{LFC}(t)) \quad (14)$$

其中, $E_{LFC}(t)$ 为 $t_0 - t$ 时段可控 EV 参与系统调频引起的储能变化量, 单位为 $MW \cdot h$ 。

$$E_{LFC}(t) = \frac{1}{3600} \int_{t_0}^t \Delta P_{V2G}(\tau) d\tau \quad (15)$$

其中, $\Delta P_{V2G}(t)$ 为所有可控 EV 的总充放电功率变化量, 单位为 MW , 规定放电时为正, 充电时为负。从而可以计算出 $SOC_{AVG}(t)$ 为:

$$SOC_{AVG}(t) = E_c(t) / E_{all}(t) \quad (16)$$

其中, $E_{all}(t)$ 为区域内可控 EV 的总能量, 单位为 $MW \cdot h$, 可由式(17)计算。

$$E_{all}(t) = N_c(t) E_{ev} / 1000 \quad (17)$$

综上所述, 区域内 EV 实时可控能量动态模型如图 3 所示。

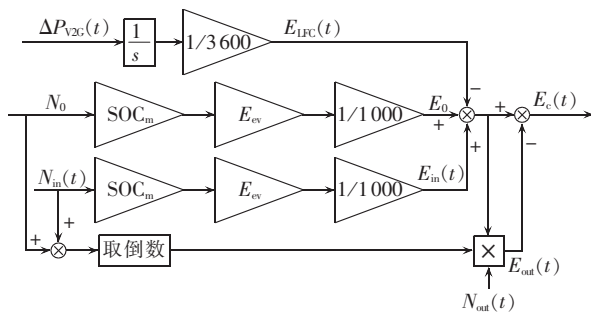


图 3 EV 实时可控能量动态模型

Fig.3 Dynamic model of real-time controllable EV energy

3.3 考虑功率和能量约束的 EV 调频出力

参与电力系统调频的可控 EV, 其电池荷电状态在 $[SOC_{min}, SOC_{max}]$ 范围内波动, 实时可控能量 $E_c(t)$ 也相应地在 $[E_{cmin}(t), E_{cmax}(t)]$ 范围内波动, 如式(18)所示。其中, $E_{cmin}(t)$ 和 $E_{cmax}(t)$ 分别为可控 EV 实时可控能量的下限和上限, 单位为 $MW \cdot h$ 。由 EV 状态转换特性可知, 当 EV 储能荷电状态 SOC 不小于 SOC_m 时, EV 才会进入可控状态, 故可控 EV 的 SOC_{min} 与 SOC_m 相等。

$$E_{cmin}(t) \leq E_c(t) \leq E_{cmax}(t) \quad (18)$$

$$E_{cmin}(t) = SOC_m N_c(t) E_{ev} / 1000 \quad (19)$$

$$E_{cmax}(t) = SOC_{max} N_c(t) E_{ev} / 1000 \quad (20)$$

当 $E_c(t) \geq E_{cmax}(t)$ 时, EV 只参与放电, 即:

$$\Delta P_{V2G}(t) = \begin{cases} \min \{ \Delta P_{ev}(t), P_{lim}(t) \} & \Delta P_{ev} > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

当 $E_c(t) \leq E_{cmin}(t)$ 时, EV 只参与充电, 即:

$$\Delta P_{V2G2}(t) = \begin{cases} \max \{ \Delta P_{ev}(t), -P_{lim}(t) \} & \Delta P_{ev} < 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

当 $E_{cmin}(t) < E_c(t) < E_{cmax}(t)$ 时, EV 输出功率为:

$$\Delta P_{V2G3}(t) = \begin{cases} \Delta P_{ev}(t) & |\Delta P_{ev}(t)| < |P_{lim}(t)| \\ P_{lim}(t) & \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

其中, $\Delta P_{ev}(t)$ 为系统分配给 EV 的调频出力, 单位为 MW; $P_{lim}(t)$ 为可控 EV 充放电功率的最大限值, 单位为 MW。

$$\Delta P_{ev}(t) = P_{dis}(t) K_{ev} \quad (24)$$

$$P_{lim}(t) = \frac{1}{1000} N_c(t) P_{ev} \eta_{ev} \quad (25)$$

其中, $P_{dis}(t)$ 由电力系统频率偏差信号 $\Delta f(t)$ 经 PI 控制所得; K_{ev} 为 EV 调频出力分配比例系数^[16]。

综上, EV 的输出功率 $\Delta P_{V2G}(t)$ 为:

$$\Delta P_{V2G}(t) = \begin{cases} \Delta P_{V2G1}(t) & E_c(t) \geq E_{cmax}(t) \\ \Delta P_{V2G2}(t) & E_c(t) \leq E_{cmin}(t) \\ \Delta P_{V2G3}(t) & E_{cmin}(t) < E_c(t) < E_{cmax}(t) \end{cases} \quad (26)$$

EV 参与系统频率调整的结构流程如图 4 所示。模型的输入包含 EV 入可控状态数量 $N_{in}(t)$ 和出可控状态数量 $N_{out}(t)$, 以及电力系统的频率偏差信号 $\Delta f(t)$, 模型的输出是区域内所有可控 EV 的响应功率 $\Delta P_{V2G}(t)$ 。由 EV 入可控状态数量和出可控状态数量可得到 EV 实时可控数量, 从而计算出 EV 的初始储能。由 EV 初始储能与 EV 调频出力的储能增量一起可计算出 EV 的实时可控能量。同时 EV 实时可控能量依据能量限制, 限制 EV 调频出力功率的大小, 确保 EV 储能维持在较高状态, 避免储能电池的过度充放电。

3.4 两区域负荷频率互联控制模型

负荷频率控制模型是电力系统调频的基本模

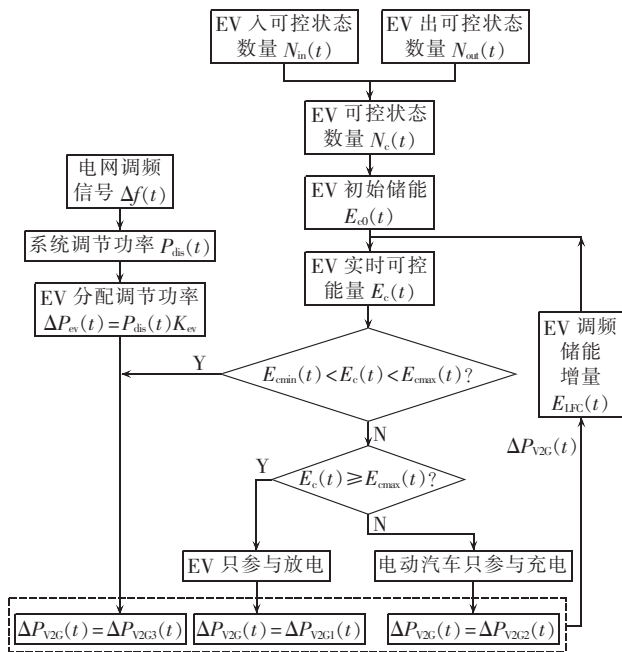


图 4 EV 调频出力流程图

Fig.4 Flowchart of EV power output for frequency regulation

型。本文以计及 EV 实时可控能量动态变化的两区域互联电力系统模型为基础, 如图 5 所示。风电随机波动和负荷扰动模型参见文献[24]。火电机组采用的是传统调频发电机组模型^[16], 发电机-负荷模型 $1/(Ms + D)$ 采用一阶传递函数来表示^[25], M 和 D 分别为发电机的惯性常数和负荷阻尼系数。EV 出力等效模块由图 4 所示的 EV 调频出力模型封装所得。 $1/(s + T_{delay})$ 表示系统控制和通信的延迟效应, T_{delay} 为系统延迟时间常数。两区域的负荷频率控制中心采用联络线频率偏差控制 TBC(Tie-line Bias Control)组

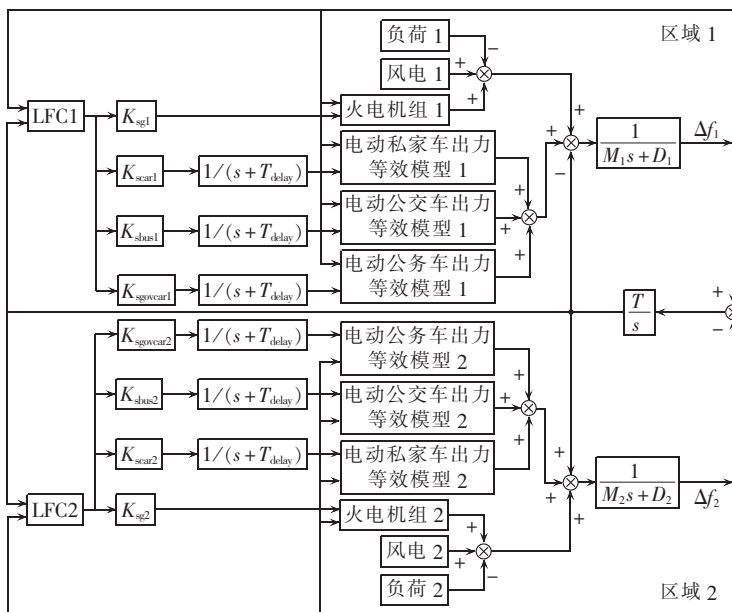


图 5 计及 EV 实时可控能量动态变化的两区域互联系统模型

Fig.5 Two-area interconnected power system model considering dynamic change of real-time controllable EV energy

合 TBC-TBC 的控制模式^[26],并考虑了区域控制偏差 ACE(Area Control Error)的计算延时,通过 PI 控制器,根据文献[27]中的模型得到负荷频率控制信号。负荷频率控制信号按照一定的比例分配给各区域中的传统调频机组和各类 EV,其中 K_{sg} 、 K_{ev} (K_{scar} 、 K_{sbus} 和 $K_{sgowcar}$) 分别为传统调频机组和各类 EV 的分配比例系数^[16]。

4 算例仿真

本文以工作日一天 24 h 为周期,分析各类型 EV 实时可控能量动态变化时,对含风电的双区域互联系统稳定性的影响。由 1.1 节中 EV 行驶规律可知,电动出租车由于工作日整天基本处于运营状态,休息时间短,不适合参与系统频率调整,故本文算例只考虑电动私家车、电动公务车和电动公交车 3 种类型 EV。且由蒙特卡洛随机抽样获取第 2 节中各类型 EV 的相关数据。本文假设整个电力系统的基准容量为 10 000 MV·A,基准频率为 50 Hz。系统模型的仿真参数和 EV 的仿真参数分别如表 1 和表 2 所示。其中网络诱导延时指系统调频网络拓扑数据传输过程的延时。

表 1 系统仿真参数

Table 1 System parameters for simulation

参数名称	参数值	
	区域 1	区域 2
发电机惯性常数 M	6.23 s	5.77 s
负荷阻尼系数 D	0.87	1.23
调速器速度调节系数 R	0.12	0.08
调速器时间常数 T_g	0.23 s	0.27 s
汽轮机时间常数 T_{ch}	0.56 s	0.45 s
频率偏差因子 B	4.89	5.12
ACE 计算时间常数 T_{ACE}	2 s	2 s
网络诱导延时	0.1 s	0.1 s
联络线同步系数 T	2 s	2 s

表 2 各类 EV 的参数

Table 2 Parameters of different EV types

参数名称	参数值		
	电动公交车	电动公务车	电动私家车
充放电效率 η_{ev}	0.95	0.95	0.95
充放电功率 P_{ev}	39 kW	6.5 kW	6.5 kW
充放电频率响应系数 K_{ev}	10	10	10
电池容量 E_{ev}	180 kW·h	30 kW·h	30 kW·h
系统延迟时间常数 T_{delay}	1 s	1 s	1 s
SOC _{max}	90%	90%	90%
SOC _m	10%	10%	50%

4.1 算例 1:不同模型下 EV 调频出力分析对比

为了证明本文所建 EV 实时可控能量动态模型的有效性,将 EV 的荷电状态和调频出力与文献[17]进行对比。情景 1 为文献[17]的算法算例,情景 2 为本文的实时可控能量模型算例。本算例以单区域系统频率模型为基础,系统其他参数如表 1、表 2 所示,

其中 $K_{sg}:K_{scar}=0.2:0.8$ 。该系统中,参与频率调节控制的电动私家车数量为 50 000 辆。对比结果如图 6 和图 7 所示(图 7 中 EV 出力为标么值)。

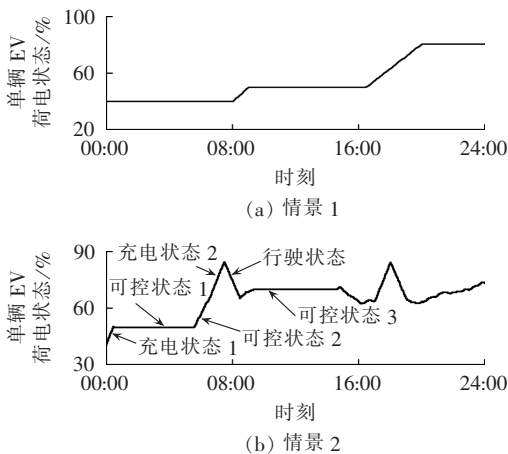


图 6 2 种情景下单辆 EV 荷电状态对比

Fig.6 Comparison of SOC between two scenes for single EV

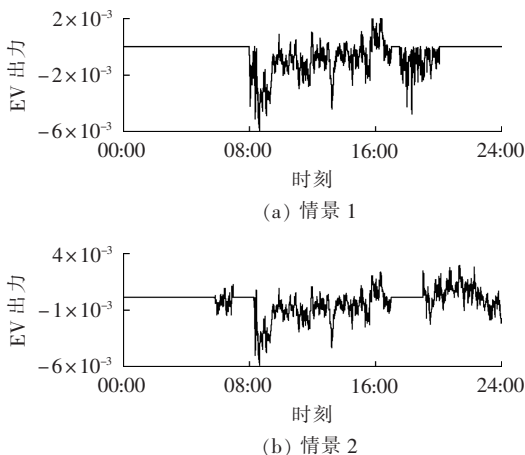


图 7 2 种情景下 EV 调频出力对比

Fig.7 Comparison of EV power output for frequency regulation between two scenes

由图 6 和图 7 可知,情景 1 中 EV 出力为 0 对应 EV 的荷电状态保持不变。EV 在开始参与调频后,首先工作于充电状态,充电至荷电状态达到 50%后进入 V2G 工作模式,EV 通过充放电参与频率调整,工作一段时间后再转入充电状态直至离开。

情景 2 中 EV 接入电网时,假设其荷电状态为 40%。图 6(b)中,充电状态 1 指接入电网时 EV 的荷电状态未达到入可控状态储能荷电状态要求 SOC_m,需转入充电状态直至荷电状态达到 50%,此阶段内 EV 不参与调频,出力为 0;可控状态 1 表明进入可控状态后,频率偏差信号决定 EV 放电参与频率调整,荷电状态可能低于 SOC_m,为保持 EV 处于可控状态,维持荷电状态为 50%,在此阶段,EV 不参与调频,出力为 0;可控状态 2 表明 EV 参与频率调整,在调频过程中,荷电状态增加,EV 维持在可控状态;充电状

态 2 为了满足车主上班需求,06:30—07:30 时段 EV 由可控状态转为充电状态,荷电状态增加至 85%,在此阶段,EV 不参与调频;07:30—08:30 时段 EV 脱离电网,转入行驶状态,荷电状态下降,调频出力为 0。之后 EV 停止行驶重新接入电网,由于荷电状态维持在较高状态,直接转为可控状态 3,出力参与系统调频。

由上述分析可得,本文考虑交通属性的实时可控能量模型,EV 参与频率调整时段更多;在工作日各时段,EV 根据自身不同运行状态,适时地参与系统调频,更加符合 EV 自身的交通行驶属性,更具有可行性。

4.2 算例 2:不同类型 EV 调频出力分析

为了比较不同类型 EV 对系统频率调整的影响,假设 4 种情景进行比较。情景 1,电动私家车数量为 12 000 辆;情景 2,电动公交车数量为 2 000 辆;情景 3,电动公务车的数量为 12 000 辆;情景 4,18:00—23:00 时段有 12 000 辆电动公务车参与调频,23:00 至次日 05:30 时段有 2 000 辆电动公交车参与调频,其余时段有 12 000 辆电动私家车参与调频。各情景移动储能电池总能量均为 $12\,000 \times 30 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。情景 4 中各类型 EV 电池总能量仍为 $12\,000 \times 30 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。算例以图 5 所示两区域互联系统模型为基础,传统机组与 EV 的比例为 0.8:0.2。EV 可控数量和不同情景下能量对比如图 8 所示。

工作日单区域可控 EV 数量的动态变化如图 8(a)所示。由图 8(a)可见,由于采用统一调度,电动公交车和电动公务车仅在部分时段接入电网参与系统调频;电动私家车可控数量最多,最有潜力参与系统调频。能量曲线与图 8(a)所示的数量曲线总体趋势大体一致,但由于 EV 通过充放电参与调频,两曲线又略显不同。情景 1、2、3 的 EV 初始储能能量和实时可控能量分别如图 8(b)—(d)所示,未计 V2G 表示 EV 初始储能,计及 V2G 表示 EV 实时可控能量。对比可知,计及 V2G 的实时可控能量比初始储能能量的波动幅度大。这是由于参与频率调整后,EV 的实时可控能量随着频率的变化不断变化。

情景 1 在 07:30—09:30 和 17:00—23:00 时段,对应 EV 用户上班、下班和休闲娱乐活动,电动私家车初始储能和实时可控能量随着可控数量的变化而出现较大起伏;其余时段,电动私家车的实时可控能量维持在 $300 \text{ MW}\cdot\text{h}$ 左右。情景 2 中电动公交车实时可控能量在 23:00 开始增加直至次日 05:30 跃变为 0。情景 3 中电动公务车实时可控能量在 18:00 开始增加,在次日 06:00 跃变为 0。

图 9 为 4 种情景下的系统频率偏差。由图 9 可知,各情景下计及 V2G 比未计及 V2G 的系统频率偏差幅度均有所减小;情景 1—4 情况下 EV 实时可控

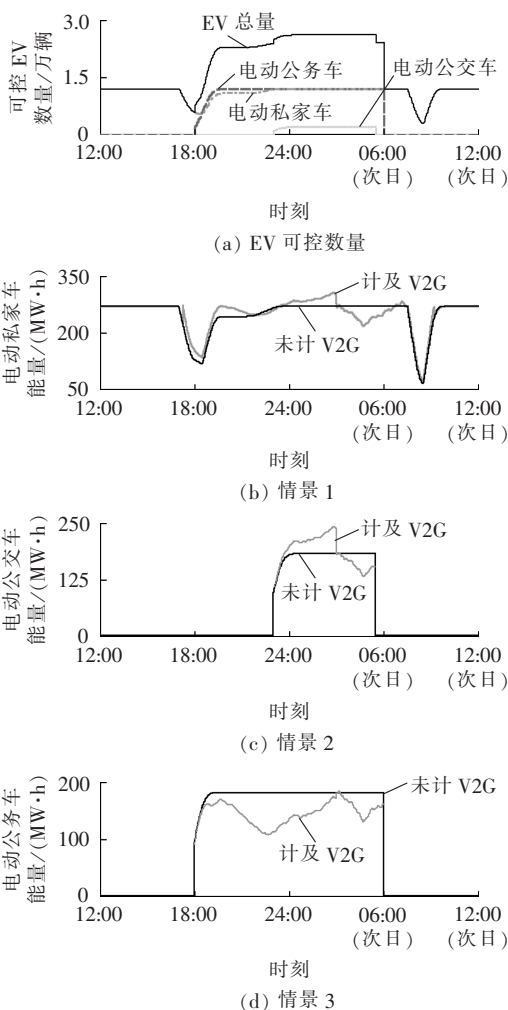


图 8 EV 可控数量和能量对比

Fig.8 Comparison of controllable EV number and energy

能量参与调频后系统频率偏差的均方根值分别为 0.0106 Hz、0.01202 Hz、0.01153 Hz、0.0112 Hz。综合图 8 与图 9 可见,相同电池总能量下,相对统一调度的电动公务车和公交车而言,电动私家车参与系统调频的时段最长。电动公交车仅在 23:00 至次日 05:30 可参加调度,电动公务车仅在 18:00 至次日 06:00 可参加调度。由于私家车车主出行习惯不同,电动私家车群体在整个工作日时段内均有参与调频的可能性。此外,电动私家车实时可控能量最多,23:00 至次日 05:30 时段,电动私家车实时可控能量超出电动公交车能量的均方根值为 $46.42 \text{ MW}\cdot\text{h}$;18:00 至次日 06:00 时段,电动私家车实时可控能量超出电动公务车能量的均方根值为 $124.14 \text{ MW}\cdot\text{h}$,该时段电动私家车的调频效果最为突出。情景 4 调频效果与前 3 种情景相应时段调频效果相同。系统频率的调节效果比情景 1 稍差,但比其他 2 种情景好。故调动电动公交车和公务车参与调频时,可结合不同类型 EV 可参与调频的时段不同,优化分配方案。

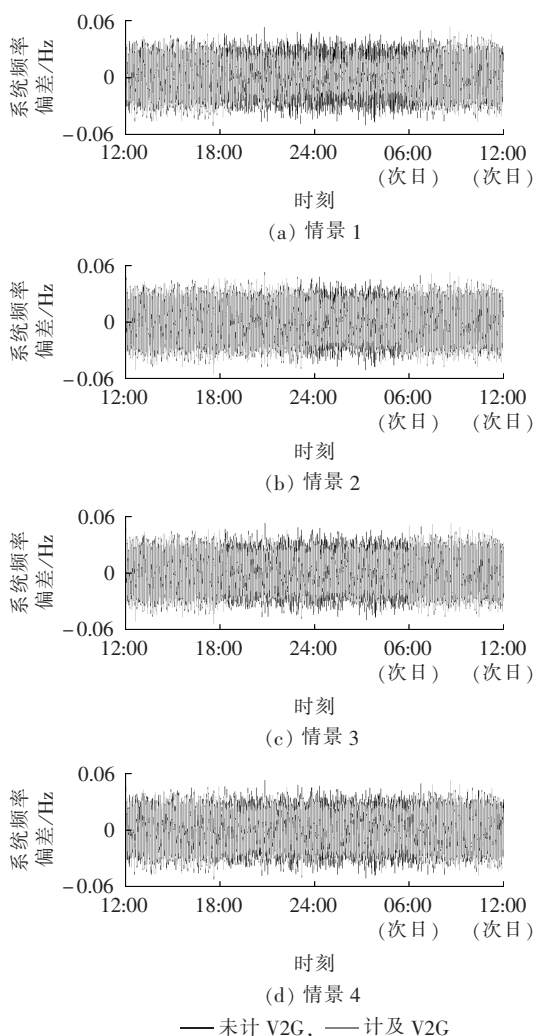


图 9 不同情景系统频率偏差对比
Fig.9 Comparison of system frequency deviation among four scenes

5 结论

EV 的基本属性是作为人们使用的一种商品。因此, EV 的利用必须考虑到用户使用的随机性问题。而只有处于可控状态的 EV 才能响应系统调频控制信号, 向电网提供调频服务。本文研究 EV 的实时可控能量动态特性, 建立了计及 EV 实时可控能量动态变化的系统频率控制模型, 对不同情景不同类型 EV 参与负荷频率控制的效果进行分析。通过算例仿真可以得到以下结论。

a. 本文提出的 EV 实时可控能量模型充分考虑交通属性, 更加符合 EV 参与频率调整的规律。

b. 系统频率上升时, 可控 EV 响应充电, EV 实时可控能量增加; 系统频率下降时, 可控 EV 响应放电, EV 实时可控能量减少。

c. 在相同电池总能量下, 相对电动公务车和电动公交车而言, 电动私家车参与系统调频的时段最长, 实时可控能量最多, 调频效果最好; 在调度电动

公交车和公务车参与调频时, 可结合不同类型 EV 可参与调频的时段不同, 优化分配方案。

参考文献:

- [1] BROOKS A. Vehicle-to-grid demonstration project: grid regulation ancillary service with a battery electric vehicle[R]. San Dimas, CA, USA: AC Propulsion, Inc, 2002.
- [2] OTA Y, TANIGUCHI H, NAKAJIMA T, et al. Autonomous distributed V2G (Vehicle-to-Grid) satisfying scheduled charging[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 559-564.
- [3] KEMPTON W, TOMIĆ J. Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 280-294.
- [4] HAN S, HAN S, SEZAKI K. Economic assessment on V2G frequency regulation regarding the battery degradation[C]//IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. Washington, DC, USA: IEEE, 2012: 1-6.
- [5] TOMIĆ J, KEMPTON W. Using fleets of electric-drive vehicles for grid support[J]. Journal of Power Sources, 2007, 168(2): 459-468.
- [6] LIU H, HU Z, SONG Y, 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.
- [7] 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.
- [8] MARKEL T, KUSS M, DENHOLM P. Communication and control of electric vehicles supporting renewables: preprint[R]. Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2009.
- [9] DATTA M, SENJYU T. Fuzzy control of distributed PV inverters/energy storage systems/electric vehicles for frequency regulation in a large power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 479-488.
- [10] VACHIRASRICIRIKUL S, NGAMROO I. Robust controller design of heat pump and plug-in hybrid electric vehicle for frequency control in a smart microgrid based on specified-structure mixed H_2/H_∞ control technique[J]. Applied Energy, 2011, 88(11): 3860-3868.
- [11] GALUS M D, KOCH S, ANDERESSON G. Provision of load frequency control by PHEVs, controllable loads, and a cogeneration unit[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4568-4582.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 朱永胜, 王杰, 瞿博阳, 等. 含电动汽车的电力系统动态环境经济调度[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 16-23.
- [15] ZHU Yongsheng, WANG Jie, QU Boyang, et al. Dynamic environmental and economic dispatch of power system with EVs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 16-23.
- [16] 陈静鹏, 艾芊, 肖斐. 基于用户出行需求的电动汽车充电站规划[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 34-39.
- [17] CHEN Jingpeng, AI Qian, XIAO Fei. EV charging station plan-

- ning based on travel demand[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 34-39.
- [15] 黄媛, 刘俊勇, 陈井锐, 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.
- [16] 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, 70.
- 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, 70.
- [17] 鲍彦, 贾利民, 姜久春, 等. 电动汽车移动储能辅助频率控制策略的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 115-126.
- BAO Yan, JIA Limin, JIANG Jiuchun, et al. Research on the control strategy of electric vehicle mobile energy storage in ancillary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 115-126.
- [18] 张聪, 张祥文, 夏俊荣, 等. 电动汽车实时可调度容量评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 99-106.
- ZHANG Cong, ZHANG Xiangwen, XIA Junrong, et al. Research on estimation of electric vehicles real-time schedulable capacity[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 99-106.
- [19] 何晨颖, 耿天翔, 许晓慧, 等. 利用电动汽车可调度容量辅助电网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 134-140.
- HE Chenying, GENG Tianxiang, XU Xiaohui, et al. Research on grid frequency regulation using schedulable capacity of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 134-140.
- [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, 25.
- HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10, 25.
- [21] 北京交通发展研发中心. 北京市交通发展年度报告[EB/OL]. (2014-10-30) [2016-10-16]. <http://www.bjtrc.org.cn/JGJS.aspx?id=5.2&Menu=GZCG>.
- [22] QIAN K, ZHOU C, ALLAN M, et al. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 802-810.
- [23] SHIMIZU K, MASUTA T, OTA Y, et al. A new load frequency control method in power system using vehicle-to grid system considering users' convenience[C]//17th Power System Computation Conference. Stockholm, Sweden; [s.n.], 2011: 1-8.
- [24] SHINJI T, SEKINE T, AKISAWA A, et al. Reduction of power fluctuation by distributed generation in micro grid[J]. Electrical Engineering in Japan, 2008, 163(2): 22-29.
- [25] VACHIRASRICIRIKUL S, NGAMROO I. Robust LFC in a smart grid with wind power penetration by coordinated V2G control and frequency controller[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 371-380.
- [26] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 103.
- [27] TAKAGI M, YAMAJI K, YAMAMOTO H. Power system stabilization by charging power management of plug-in hybrid electric vehicles with LFC signal[C]//Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. Dearborn, MI, USA: IEEE, 2009: 822-826.

作者简介:



张 谦

张 谦(1980—),女,四川内江人,副教授,博士,主要从事电力市场与电力系统安全经济运行、电动汽车与电网互动技术等方面的研究(E-mail: zhangqian@cqu.edu.cn);

李 晨(1992—),男,河南焦作人,硕士研究生,主要从事电动汽车与电网互动技术研究;

周 林(1986—),男,重庆人,硕士研究生,主要从事电动汽车与电网互动技术研究;

王 众(1994—),男,四川雅安人,硕士研究生,主要从事电动汽车与电网互动技术研究;

李春燕(1975—),女,重庆人,副教授,博士,主要从事电力系统分析与计算、电力市场、需求响应、智能用电等方面的研究。

Load frequency control considering dynamic change of real-time controllable EV energy

ZHANG Qian¹, LI Chen¹, ZHOU Lin², WANG Zhong¹, LI Chunyan¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Jiangjin Power Supply Branch Company, State Grid Chongqing Power Company, Chongqing 402200, China)

Abstract: The time-varying characteristic of controllable EV(Electric Vehicle) energy has significant effect on its participation in the system frequency regulation. Based on the driving rules of four EV types in China, the controllable EV numbers of four EV types are calculated according to their state transition characteristics, based on which, the initial EV energy storage and real-time controllable EV energy are calculated. A load frequency control model considering the dynamic change of real-time controllable EV energy is established. Simulative results show that, the proposed real-time controllable EV energy model considering the traffic attribute of EV more conforms to the law of its participation in the frequency regulation and effectively suppresses the system frequency variation; and with the same total battery energy, the private EV type has the longest participating period, the most real-time controllable energy and the best frequency regulation effect among four EV types.

Key words: electric vehicles; controllable energy; load frequency control; dynamic change; driving rules; vehicle-to-grid