

基于虚拟电机的 V2G 新型充放电控制策略*

周建萍, 胡成奕, 茅大钧, 邓玉君, 叶剑桥, 方乐
(上海电力大学 自动化工程学院, 上海 200090)

摘要: 为了提高电动汽车车辆到电网(V2G)的稳定性, 增强其友好互动, 设计了一种新型电动汽车 V2G 充放电模型, 并提出了基于虚拟电机的电动汽车 V2G 充放电控制策略。电动汽车 DC 接口采用虚拟直流电机控制, 电网 AC 接口采用虚拟同步电机控制。与传统 V2G 结构相比, 在两侧接口处采用隔离型双向 DC/DC 变换器连接。在此基础上, 对于虚拟直流电机的参数整定, 根据电动汽车初始电池荷电状态(SOC)确定阻尼系数以决定电动汽车组的功率分配, 并根据 SOC 的变化实时调节虚拟惯量以提高电动汽车参与电网频率调节的能力。在不同电网状态下对具有不同初始 SOC 的电动汽车采用所提控制策略进行仿真测试, 结果表明, 该策略能够在兼顾电动汽车用户需求的同时, 有效协调 V2G 功率双向流动, 并减少并网点谐波电流, 进而维持电网稳定运行。

关键词: 电动汽车; 车辆到电网; 虚拟电机; 荷电状态

中图分类号: U 469.72 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)02-0097-07

doi: 10.12177/emca.2019.155

Novel Charging and Discharging Control Strategy of V2G Based on Virtual Machine*

ZHOU Jianping, HU Chengyi, MAO Dajun, DENG Yujun, YE Jianqiao, FANG Le
(College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to improve the vehicle-to-grid (V2G) stability and enhance the friendly interaction between electric vehicle and power grid, a new type of V2G charging and discharging model for electric vehicle is designed. An electric vehicle V2G charging and discharging control strategy based on virtual machine is proposed. The DC interface of electric vehicle is controlled by the virtual DC machine. The AC interface of grid connection is controlled by the virtual synchronous machine. Compared with the traditional V2G structure, an isolated bidirectional DC/DC converter is used to connect the two side interfaces. On this basis, for the setting of virtual DC machine parameters, the damping coefficient is determined according to the initial state of charge (SOC) of each electric vehicle to determine the power distribution of electric vehicle group. The virtual inertia is adjusted in real time according to the change of SOC to improve the ability of electric vehicle to participate in grid frequency regulation. The simulation test of electric vehicles with different initial SOC is carried out under different grid conditions. The simulation results show that the strategy can effectively coordinate the two-way power flow between electric vehicle and power grid while taking into account the needs of electric vehicle users, and reduce the harmonic current of the grid-connected point, thus maintaining stable operation of power grid.

Key words: electric vehicle; vehicle-to-grid (V2G); virtual machine; state of charge (SOC)

收稿日期: 2019-11-15; 收到修改稿日期: 2019-12-27

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61275038); 上海市“科技创新行动计划”地方院校能力建设专项项目(19020500700)

作者简介: 周建萍(1978—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为分布式发电与微电网技术。

胡成奕(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为能源互联网关键控制技术。

0 引言

随着电动汽车的市场规模逐步扩大,2014 年以来,中国先后出台了多项政策,以支持电动汽车及充电设施的发展与建设。规模化电动汽车能够充当分布式移动储能,作为电网和可再生能源的缓冲^[1]。灵活控制电动汽车的充放电功率,可实现电动汽车参与负荷曲线削峰填谷、电网频率调节、平抑分布式发电(DG)波动^[2-3]。

在电动汽车车辆到电网(V2G)技术的研究中,双向 DC/AC 和 DC/DC 变换器拓扑结构有利于在电动汽车和电网之间进行功率交互^[4-5]。文献[6]提出一种新型双向感应电能传输(IPT)技术的 V2G 系统。文献[7]提出将电动汽车分组进行充放电以参与电网频率调节(FR)。

电动汽车在充放电过程中缺乏惯性和阻尼,因此电动汽车入网会一定程度地影响电网的稳定性。利用虚拟电机技术对电网天然友好的优势,使 AC/DC 接口具备惯量和阻尼特性,有利于维护电网的稳定^[8]。文献[9-10]研究了应用在分布式发电中的虚拟同步发电机。文献[11]研究了应用在储能中的虚拟直流电机。在对电动汽车充放电控制技术的研究中:文献[12-14]的电网侧均采用虚拟同步电机控制的 DC/AC 变换器,文献[12-13]的电动汽车接口仅采用双环控制的 DC/DC 变换器。然而,在大功率系统中非隔离型 DC/DC 变换器缺乏安全性,文献[14]的电动汽车快充接口采用了双环控制的高频隔离 DC/DC 变换器,但无法进行电网交互。

文献[15]介绍了对于电压等级较高的大功率动力电池单元可使用双有源桥式隔离型双向 DC/DC 变换器(BDC)拓扑,但未详细研究其在 V2G 中的应用。

综上所述,大部分文献没有重视对电动汽车充放电接口控制的研究,并且没有分析虚拟电机控制中虚拟参数对电动汽车充放电的影响。为此,本文提出了一种基于荷电状态(SOC)信号调节的虚拟电机控制的电动汽车 V2G 充放电控制策略。首先,建立基于虚拟电机控制的电动汽车 V2G 充放电系统的整体模型;其次,考虑不同电动汽车的初始 SOC 和变化情况,引入 SOC 信号调节虚拟直流电机参数;最后,利用 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建电动汽车 V2G 充放电模型,验证了所提策略的可行性和有效性。仿真结果表明:该策略可实现电动汽车和电网间的功率双向流动,并且可获得更好的动态性能。

1 V2G 结构及控制原理

1.1 电动汽车 V2G 结构

在未来可再生电力能源传输与管理系统的(FREEDM system)的框架上,设计了电动汽车 V2G 充放电系统^[16]。基于虚拟电机的 V2G 充放电系统拓扑结构如图 1 所示。电网连接的 AC 接口采用基于虚拟同步电机控制的双向 DC/AC 变换器,电动汽车连接的 DC 接口采用基于虚拟直流电机控制的双向 DC/DC 变换器,两侧则通过隔离型双向 DC/DC 变换器连接,实现电动汽车和电网的双向功率流动控制。

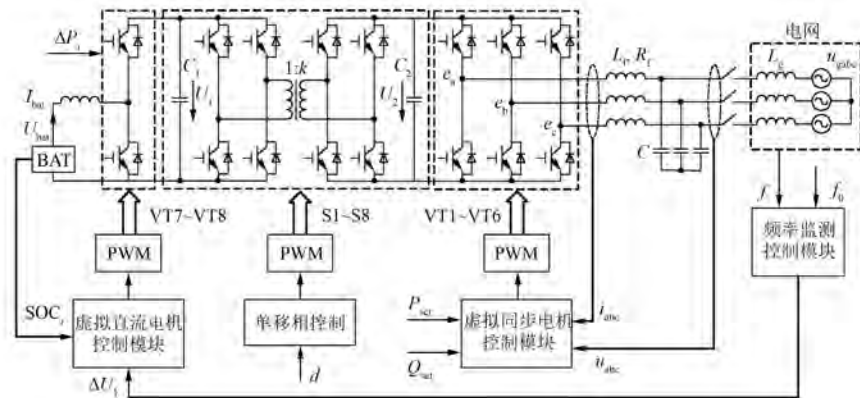


图 1 基于虚拟电机的 V2G 新型充放电系统拓扑结构

图 1 中, u_{gabc} 为电网三相电压, L_g 为电网侧电感, L_f 、 R_f 、 C 分别为滤波电感、电阻和电容, u_{abc} 为 LC 滤波器端电压, e_a 、 e_b 、 e_c 为 DC/AC 变换器交流三相电压, i_{abc} 为交流三相电流; U_1 、 U_2 为隔离 DC/DC 变换器输入、输出电压, C_1 、 C_2 为输入、输出电容, k 为高频变压器变比, d 为移相占空比; U_{bat} 为电动汽车动力电池端电压, i_{bat} 为输出电流; f_0 为电网频率 f 的参考值, ΔU_1 为频率监测模块输出的电压偏差值; SOC_{*i*} 为第 i 台电动汽车的电量初始值, P_{set} 、 Q_{set} 为充放电功率的设定值, ΔP_i 为根据电网频率波动响应的第 i 台电动汽车充放电功率, 规定正方向为从电动汽车传输至电网。

电动汽车 V2G 充放电控制系统步骤如下:

(1) 将电网频率和参考频率输入频率监测控制模块, 输出电动汽车直流侧的电压偏差量;

(2) 将直流侧电压偏差量输入虚拟直流电机控制模块, 根据每台电动汽车的 SOC 调节虚拟直流电机控制模块中的虚拟参数, 输出电动汽车所需的最佳充电量和允许的最佳放电量;

(3) 根据电动汽车所需的充放电功率, 得到虚拟同步电机控制模块的功率设定值, 并确定功率流动方向;

(4) 根据参考功率的设定值对电动汽车进行充放电控制, 实现对电网负荷的“削峰填谷”。

1.2 AC 接口控制策略

虚拟同步电机的基本方程为

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_d = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: J 为虚拟惯量; ω 为虚拟同步角速度; T_m 、 T_e 、 T_d 分别为机械转矩、电磁转矩和阻尼转矩; D 为与阻尼转矩相关的阻尼系数; ω_0 为电网同步角速度; δ 为功角。

虚拟同步电机控制模块框图如图 2 所示。

1.3 DC 接口控制策略

虚拟直流电机的电枢回路电动势平衡方程为

$$E_a = U_1 + I_a R_a \quad (2)$$

$$E_a = C_T \phi \omega \quad (3)$$

式中: E_a 为直流电机的电枢电动势; I_a 为电枢回路电流; R_a 为电枢回路等效电阻; C_T 为转矩系数;

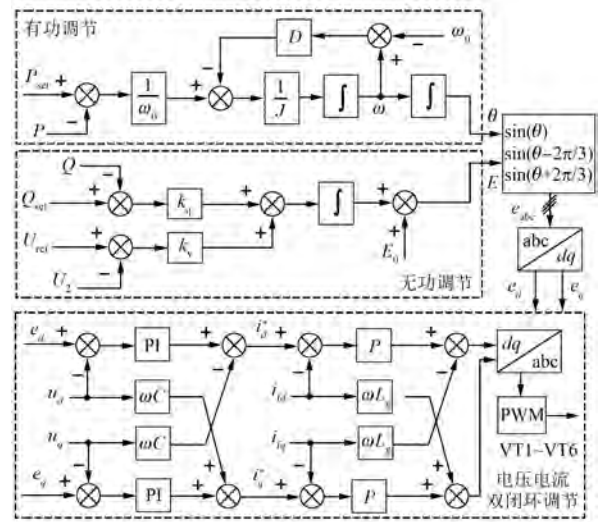


图 2 虚拟同步电机控制模块框图

ϕ 为磁通; ω 为直流电机角速度。

当电网处于高峰负荷时, 电网频率将降低; 当电网处于低谷负荷时, 电网频率将升高; 当电网频率波动时, 直流侧电压也相应波动。在频率监测控制模块中, 根据电网频率偏差提供电动汽车 DC 接口处的参考电压变化量^[17]:

$$\Delta U_1 = k_{vf} \Delta f = k_{vf} (f - f_0) \quad (4)$$

式中: k_{vf} 为调节系数; f_0 为电网频率 f 的参考值。

由电网频率偏差判断功率流动方向, 当 $\Delta f > 0$ 时, 电动汽车组充电, 给定有功功率设定值为负; 当 $\Delta f < 0$ 时, 电动汽车组放电, 给定有功功率设定值为正。

虚拟直流电机控制模块框图如图 3 所示。

1.4 隔离型双向 DC/DC 变换器

因为电动汽车的充电接口存在差异, 所以本文采用隔离型双向 DC/DC 变换器, 可实现电压等级变换和电气隔离, 并设定在功率控制模式, 两端口直流电压固定, 即可控制功率流动的大小和方向^[18-19]。

隔离变换器的平均传输功率可表示为

$$P = \frac{U_1 U_2}{2 f_s L_s k} d(1-d) \quad (5)$$

式中: U_1 、 U_2 为变换器输入电压和输出电压; f_s 为开关频率; L_s 为漏感。

考虑系统中能量双向流动, 采用结构完全对称的全控型 DC/DC 变换器, 从而允许电能双向传输。为了简化分析, 能量正向流动时取 $0 < d <$

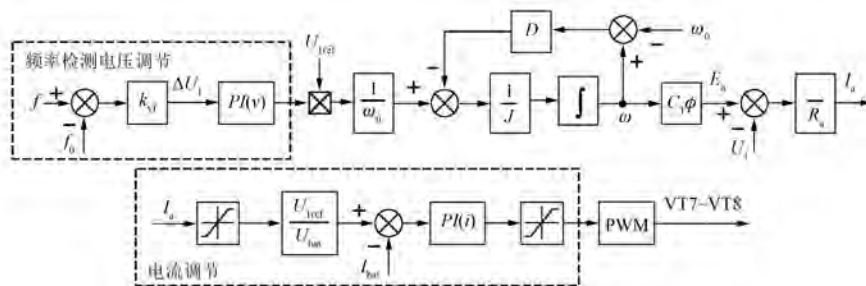


图3 虚拟直流电机控制模块框图

0.5, 此时 $P > 0$, 电动汽车放电; 能量反向流动时取 $-0.5 < d < 0$, 此时 $P < 0$, 电动汽车充电; 当 $d = \pm 0.5$ 时, 能量传输最大。若不考虑变换器的内部功率损耗, 则变换器的输出功率等于输入功率。

2 SOC 调节虚拟参数控制策略

在直流接口控制的基础上, 通过电动汽车 SOC 调节虚拟参数, 以改进虚拟直流电机控制。因为每台电动汽车的初始 SOC 不同, 所以充放电功率限值不同。当电网频率发生变化时, 在不同充放电功率限值的影响下, 需要调节电动汽车接口处的虚拟参数 J 和 D 以维持系统的稳定运行。

2.1 电动汽车功率分配

虚拟直流电机控制的小信号模型, 如图 4 所示。

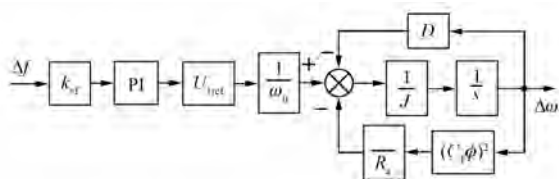


图4 虚拟直流电机控制的小信号模型

虚拟直流电机角速度偏差与电磁转矩偏差之间的传递函数可表示为

$$\frac{\partial T}{\partial \omega} = \frac{\partial \Delta P_i}{\omega \partial \omega} = \frac{\partial [(E_a - U_1) E_a]}{R_a \omega \partial \omega} = \frac{\partial [(C_T \phi \omega)^2 - U_1 C_T \phi \omega]}{R_a \omega \partial \omega} = \frac{(C_T \phi)^2}{R_a} \quad (6)$$

电网频率偏差 ∂f 与电动汽车充放电功率偏差 $\partial \Delta P_i$ 之间的传递函数为

$$G(s) = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f} = \frac{k_{vf}}{\omega_0} G_{PI}(s) G_{JD}(s) \frac{\partial P}{\partial \omega} = \frac{k_{vf} U_{1ref}}{\omega_0} \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \frac{G_{JD}(s)}{1 + G_{JD}(s) (C_T \phi)^2 / R_a} = \frac{k_{vf} U_{1ref}}{\omega_0} \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \frac{R_a}{(C_T \phi)^2 + (J s + D) R_a} \quad (7)$$

根据极值定理, 当 $s=0$ 时, $G(s) \propto \frac{1}{D}$, 即阻尼

系数 D 决定功率分配比例。当阻尼系数越小时所需电动汽车传输功率越大, 因此在电动汽车组中将根据每台电动汽车的初始 SOC 确定虚拟直流电机控制模块中的阻尼系数, 同时为确保电动汽车安全充放电, 给定平均充放电水平下的初始阻尼系数 D_0 。

2.2 SOC 调节虚拟惯量

当电网负荷波动时, 假设所需电动汽车组总充放电有功功率为 ΔP , 有 m 台电动汽车充电, n 台电动汽车放电, 则:

$$\Delta P = \sum \Delta P_i = \sum_m \Delta P_{\text{charge}} + \sum_n \Delta P_{\text{discharge}} \quad (8)$$

$$\begin{cases} (\text{SOC}_{\max} - \text{SOC}_0) S \propto \Delta P_{\text{charge}} \\ (\text{SOC}_0 - \text{SOC}_{\min}) S \propto \Delta P_{\text{discharge}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: ΔP_{charge} 为电动汽车所需的充电功率; $\Delta P_{\text{discharge}}$ 为电动汽车允许的放电功率; $\text{SOC}_{\max}$ 、 $\text{SOC}_{\min}$ 分别为电池安全限值的上下限; SOC_0 为电池初始荷电状态; S 为电动汽车动力电池的额定容量。

由式(9)可知, 电动汽车充放电功率和 SOC 变化阈值成正比。根据每台电动汽车动力电池初始 SOC, 进行充放电区域划分, 以避免过充过放, 有:

$$\text{SOC}_{\text{average}} = \frac{\text{SOC}_{\min} + \text{SOC}_{\max}}{2} \quad (10)$$

当 $\text{SOC}_{\min} < \text{SOC}_0 < \text{SOC}_{\text{average}}$ 时,属于充电区域;当 $\text{SOC}_{\text{average}} < \text{SOC}_0 < \text{SOC}_{\max}$ 时,属于放电区域;当 $\text{SOC}_0 = \text{SOC}_{\text{average}}$ 时,属于可充可放区域,需结合实际情况确定。

根据文献[20]可知,SOC 越接近限值,虚拟电机的频率调节能力越小。又由式(1)可得:

$$\frac{T_m - T_e - D\Delta\omega}{J} = \frac{d\omega}{dt} \quad (11)$$

当虚拟惯量越小时,频率变化率越大。当用电负荷突增导致频率突降时,频率偏差 $\Delta\omega < 0$ 且 $|\Delta\omega|$ 达到最大,电动汽车开始放电,SOC 逐渐下降。此时,若处于 $\text{SOC}_{\min}$ 附近,可适当增大虚拟惯量以降低频率变化率,避免过放;若处于 $\text{SOC}_{\max}$ 附近,则不用考虑过放问题,可减小虚拟惯量以提高频率变化率,使频率偏差快速减小,恢复稳定。虚拟电机的频率调节能力与 SOC 调节能力相关,在 SOC 限值附近为了避免过充过放,且在 $\text{SOC}_{\text{average}}$ 时更多参与频率调节,因此为了保证充放电过程平衡,整个虚拟惯量的调节过程可用二阶方程 $J = F(\text{SOC})$ 表示,有:

$$\begin{cases} J_m = F(\text{SOC}_{\min}) = F(\text{SOC}_{\max}) \\ J_{\lim} = F(\text{SOC}_{\text{average}}) \end{cases} \quad (12)$$

则虚拟惯量 J 的调节表达式为

$$J = \frac{4(J_m - J_{\lim})}{(\text{SOC}_{\min} - \text{SOC}_{\max})^2} \text{SOC}^2(t) - \frac{8(J_m - J_{\lim})\text{SOC}_{\text{average}}}{(\text{SOC}_{\min} - \text{SOC}_{\max})^2} \text{SOC}(t) + \frac{(J_m - J_{\lim})\text{SOC}_{\text{average}}^2}{(\text{SOC}_{\min} - \text{SOC}_{\text{average}})^2} + J_{\lim} \quad (13)$$

式中: $J_{\lim}$ 为虚拟惯量极限值; J_m 为虚拟惯量,可取最大值。

由图 5 可知,充放电限制将影响电动汽车参与频率调节的能力,因此可根据电动汽车充放电过程中 SOC 的变化实时调节虚拟惯量。

3 仿真分析

为了验证本文所提基于虚拟电机的电动汽车 V2G 充放电控制策略的可行性和有效性,在 MATLAB/Simulink 仿真平台中搭建图 1 的模型进行仿真验证。虚拟电机控制主要参数如表 1 所示,IGBT 开关频率为 20 kHz,变压器变比 $k=8$ 。

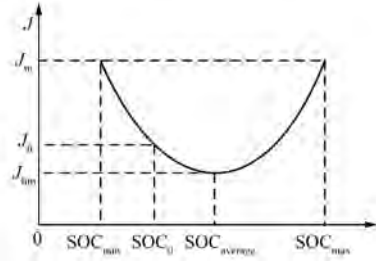


图 5 虚拟惯量变化曲线

表 1 虚拟电机控制主要参数

参数名称	参数值
电网参数	f_0/Hz 50
	L_g/mH 2.3
	L_f/mH 2
滤波参数	R_f/Ω 0.01
	$C_f/\mu\text{F}$ 1 500
虚拟交流电机参数	J 0.1
	D 20
虚拟直流电机参数	$C_T\Phi$ 5.1
	J_m 0.15
	$J_{\lim}$ 0.05
	D_0 25

3.1 充放电测试

电动汽车动力电池采用 Lead-Acid 电池,电池额定电压为 300 V,额定容量为 100 A·h,设电池初始 SOC_0 为 90%。 $t=0$ s 时,起动系统; $t=0.5$ s 时,设置 $P_{\text{set}}=-5$ kW, $Q_{\text{set}}=0$ kvar; $t=1.0$ s 时,设置 $P_{\text{set}}=0$ kW, Q_{set} 保持不变; $t=1.5$ s 时,设置 $P_{\text{set}}=5$ kW, Q_{set} 仍保持不变。

当电动汽车 V2G 根据功率设定值在进行充放电时,电网频率变化如图 6 所示,由于充放电功率传输速度快,电网频率波动范围小且波动时间短。图 7 所示为交流接口输出的有功功率和无功功率,有功功率根据设定值平滑变化, $t=0.5$ s 时电网给电动汽车充电,AC 接口输出功率为负; $t=1$ s 时不充电也不放电,AC 接口输出功率为零; $t=1.5$ s 时电动汽车向电网放电,AC 接口输出功率为正。图 8 所示为电动汽车动力电池 SOC 变化,电动汽车充电时 SOC 上升,电动汽车放电时 SOC 下降。

图 9 所示为电动汽车充放电过程中的并网点

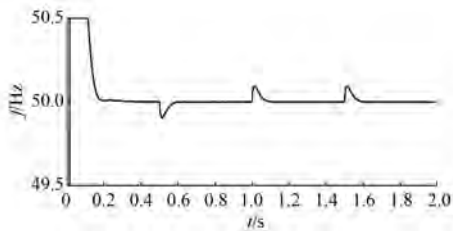


图6 电网频率变化

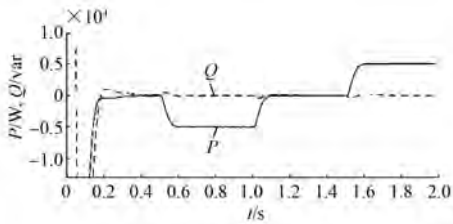


图7 AC接口输出的有功功率和无功功率

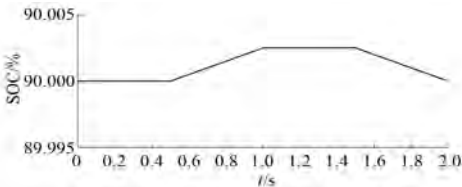


图8 动力电池 SOC 变化

电流 FFT 分析图。在虚拟电机控制下,参考频率下的并网点电流谐波总畸变率(THD)为 1.52%,谐波含量低。因此,采用隔离双向 DC/DC 变换器能有效改善并网点的电能质量,进一步体现了本文所提控制策略的优越性。

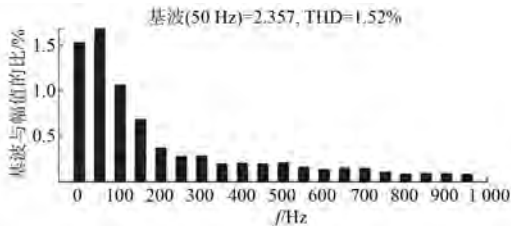


图9 并网点电流 FFT 分析图

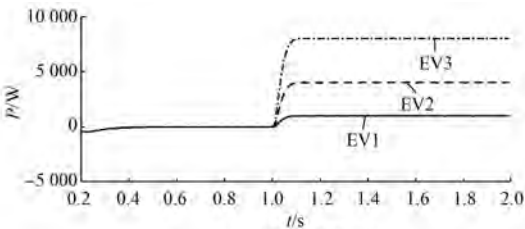
3.2 削峰填谷测试

电动汽车参与电网频率波动响应主要体现在上调功率和下调功率。以 3 台电动汽车 EV1、EV2、EV3 构成 V2G 充放电系统,初始 SOC 分别为 30%、60%、90%,并设置电池 SOC 的安全范围为 20%~100%。当 $t=0.2\text{ s}$ 时,起动系统;当 $t=$

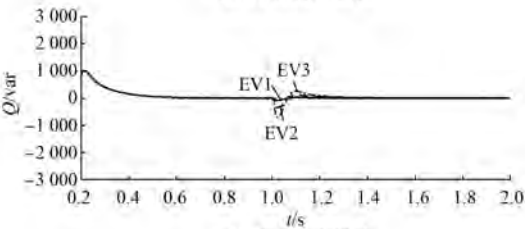
1.0 s 时,控制电动汽车充放电,并设置充放电功率上下限值 $P_{\max}=10\text{ kW}$ 和 $P_{\min}=1\text{ kW}$ 。

运行工况 1:电网高峰。

设置电网频率 $f=49.90\text{ Hz}$,将电动汽车组接入电网,测得电动汽车充放电功率如图 10 所示。由于 EV1 的初始 SOC 较小,在电网高峰时,以低功率进行放电;EV2 的初始 SOC 处于平均值,以中等功率进行放电;EV3 的初始 SOC 较大,以高功率进行放电。3 台电动汽车向电网传输的无功功率均设置为零。虚拟电机参数变化如图 11 所示。

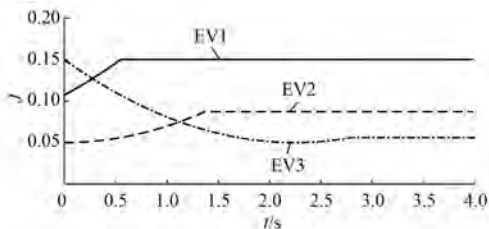


(a) 有功功率输出

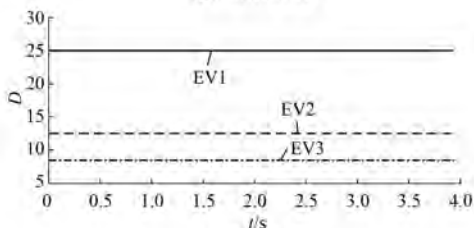


(b) 无功功率输出

图10 电网高峰时电动汽车组功率协调输出



(a) 虚拟惯量 J



(b) 阻尼系数 D

图11 电网高峰时虚拟电机参数变化

由图 11 可知,在放电过程中,首先根据电动汽车的初始 SOC 确定阻尼系数的值并分配功率,

再根据分配情况设置电动汽车传输功率。当传输功率突增时, EV1 可放电量较小, 虚拟惯量增加以避免过放; EV3 可放电量充足, 虚拟惯量减小以更多参与电网频率调节, 使系统快速进入稳态。

运行工况 2: 电网低谷。

设置电网频率 $f = 50.10 \text{ Hz}$, 将电动汽车组接入电网, 测得电动汽车充放电功率如图 12 所示。

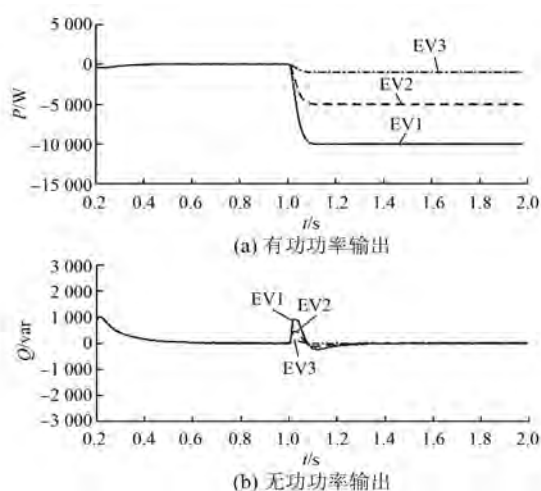


图 12 电网低谷时电动汽车组功率协调输出

与工况 1 相比, 由于 EV1 的初始 SOC 较小, 在电网低谷时, 以高功率进行充电; EV2 的初始 SOC 处于平均值, 以中等功率进行充电; EV3 的初始 SOC 较大, 以低功率进行充电。3 台电动汽车向电网传输的无功功率均设置为零。

虚拟电机参数变化情况与工况 1 分析类似, 如图 13 所示。

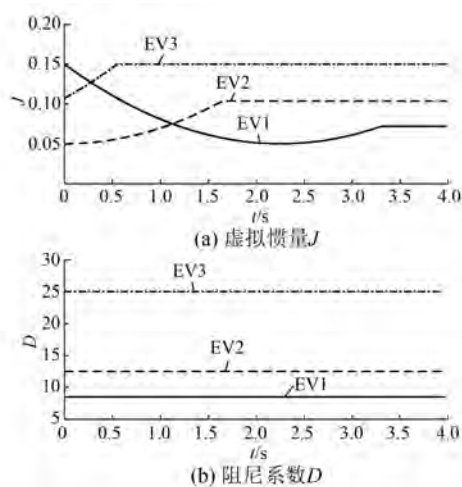


图 13 电网低谷时虚拟电机参数变化

4 结 语

随着能源互联网的发展, 电动汽车是未来汽车能源动力系统发展的主要方向之一。本文在设计新型电动汽车 V2G 模型的基础上, 提出了一种基于虚拟电机的电动汽车 V2G 充放电控制策略。仿真结果验证了所提控制策略的可行性和有效性, 得出如下结论:

(1) 通过控制电动汽车组的充放电功率实现了对电网负荷的削峰填谷。

(2) 在虚拟直流电机控制中, 根据每台电动汽车的初始 SOC 确定阻尼系数, 决定电动汽车组的功率分配, 再根据 SOC 变化实时调节虚拟惯量避免过充过放, 以提高电动汽车参与电网频率调节能力。

(3) AC、DC 接口通过隔离型双向 DC/DC 变换器连接, 并在接口处采用虚拟电机控制, 能更高效地应对电网负荷波动, 减少并网点谐波电流, 提高电网稳定性, 对于加强能源互联网的互动性有一定的参考意义。

【参考文献】

- [1] 刘晓飞, 张千帆, 崔淑梅. 电动汽车 V2G 技术综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 121.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] SHARMA A, SHARMA S. Review of power electronics in vehicle-to-grid systems[J]. Journal of Energy Storage, 2019.
- [5] 吴凯, 程启明, 李明, 等. 具有 V2G 功能的电动汽车快速充放电方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 30.
- [6] MADAWALA U K, THRIMAWITHANA D J. A bidirectional inductive power interface for electric vehicles in V2G systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4789.
- [7] ZHANG Q, LI Y, LI C, et al. Grid frequency regulation strategy considering individual driving demand of electric vehicle [J]. Electric Power Systems Research, 2018, 163: 38.

(下转第 110 页)

- displacements of a nine-phase permanent-magnet-synchronous motor with unbalanced AC winding structure[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3660.
- [3] 匡晓霖, 徐金全, 黄春蓉, 等. 六相永磁同步电机驱动控制方式[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(7): 1361.
- [4] 吴公平, 黄守道, 饶志蒙, 等. 新型 $N \times 3$ 相永磁同步电机的特性分析及其预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 1171.
- [5] 刘胜, 郭晓杰, 张兰勇. 六相永磁同步电机新型单向滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(10): 10.
- [6] 汪丹妮, 罗建, 马鸿泰, 等. 永磁同步电机转矩脉动抑制方法[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(4): 15.
- [7] 詹宇声, 祝后权, 周贵厚. 斜槽对永磁同步电机径向激振力波及振动的影响[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(5): 36.
- [8] 薛诚, 宋文胜, 武雪松, 等. 考虑去磁效应的五相永磁同步电机优化开关表直接转矩控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5774.
- [9] ZHAO W, CHENG M, JI J, et al. Design and analysis of a new fault-tolerant linear permanent-magnet motor for maglev transportation applications[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3): 2185209.
- [10] CINTRON-RIVERA J G, FOSTER S N, STRANGAS E G. Mitigation of turn-to-turn faults in fault tolerant permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(2): 465.
- [11] 刘国海, 宋成炎, 徐亮, 等. 基于 SVPWM 的五相永磁同步电机两相开路故障容错控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 23.
- [12] 王凌波, 闫震, 周扬忠. 五相永磁同步电机缺两相容错型直接转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(10): 58.
- [13] 谢德馨, 阎秀恪, 张奕黄, 等. 旋转电机绕组磁链的三维有限元分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 143.
- [14] 肖玉坤, 戴正文, 邹琳, 等. 永磁电机交、直轴电感特性有限元分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(9): 1196.
- [15] 刘平宙, 方丹, 王兆岩. 静态场永磁同步电机交直轴电感的有限元分析[J]. 微电机, 2013, 46(8): 24.
- [16] 成涛, 合烨, 陈小安, 等. 基于有限元的异步型电主轴电机电磁场分析和参数优化[J]. 机械, 2013, 40(2): 1.
- ~~~~~
- (上接第 103 页)
- [8] 盛万兴, 刘海涛, 曾正, 等. 一种基于虚拟电机控制的能量路由器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3541.
- [9] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668.
- [10] FRACK P F, MERCADO P E, MOLINA M G, et al. Control strategy for frequency control in autonomous microgrids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 1046.
- [11] 张辉, 谭树成, 肖曦, 等. 具有直流电机特性的储能接口变换器控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 119.
- [12] 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.
- [13] 刘东奇, 钟庆昌, 王耀南, 等. 基于同步逆变器的电动汽车 V2G 智能充放电控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 544.
- [14] 吕志鹏, 梁英, 曾正, 等. 应用虚拟同步电机技术的电动汽车快充控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4287.
- [15] 雷志方, 汪飞, 高艳霞, 等. 面向直流微网的双向 DC-DC 变换器研究现状和应用分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 137.
- [16] HUANG A. FREEDM system-a vision for the future grid[C]//IEEE PES General Meeting, 2010.
- [17] 周建萍, 张纬舟, 王涛, 等. 含 V2G 的直流微网电压分层控制策略[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 19.
- [18] 赵钰彬, 赵兴勇, 陆维, 等. 基于双重移相控制的直流微电网双主动全桥 DC/DC 变换器[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 60.
- [19] 赵彪, 宋强, 刘文华, 等. 用于柔性直流配电的高频链直流固态变压器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4295.
- [20] 胡超, 张兴, 石荣亮, 等. 独立微电网中基于自适应权重系数的 VSG 协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 516.