

面向主动配电网的电动汽车充放电功率控制技术

韩华春¹, 丁昊², 黄地¹, 吕振华¹

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211106)

摘要:电动汽车 V2G 系统不仅能实现对电池的充放电功能, 还能发挥三相电压型 PWM 变流器的四象限运行功能, 为电网提供双向可控的有功功率和无功功率, 实现平抑电网负荷波动、削峰填谷等功率调节功能。本文针对 V2G 系统的并网功率控制, 分析了电动汽车 V2G 系统拓扑结构, 并提出基于比例反馈积分 (PFI) 的功率控制方法, 实现 V2G 系统并网电流指令的精确跟踪; 与常规的比例积分 (PI) 控制进行了对比分析, 通过 PSIM 仿真平台验证了该 PFI 控制方法的有效性。

关键词:电动汽车; V2G; 比例反馈积分; 功率控制

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)04-0008-06

0 引言

主动配电网的建设依托于大规模间歇式可再生能源并网运行控制、电网与充放电设施互动、智能配用电等关键技术的发展^[1-3]。在主动配电网中, 需要对电动汽车这种不确定性较大的负荷进行主动控制, 引导电动汽车进行有序充放电, 使得电网可以较好地消纳电动汽车。V2G 系统^[4-6]是实现电动汽车与电网能量互动的接口, 合理高效的充放电控制对于蓄电池安全健康、电网稳定运行有着至关重要的影响。

V2G 系统变流器并网运行时通常控制为电流源, 其控制目标是快速响应功率指令, 调节并网功率。HUTSON C^[7]研究了电动汽车与电网之间的功率双向流动问题, 指出电动汽车充放电带来的负荷变化对电网发电和调度有重要的影响。文献[8]通过电力电子设备将电动汽车与电网相互连接实现能量在二者之间的双向交换, 证明了电动汽车和电网之间进行能量双向流动的可能性。文献[9, 10]提出了考虑电动汽车运行不确定性的电动汽车分布式储能充放电控制策略, 通过与分布式储能控制中心的信息交互, 实现了与电网的能量双向交换, 提高了可再生能源发电的可调度性。文献[11]以平抑负荷波动为目的, 提出了一种智能充放电控制策略, 并分析了电动汽车 V2G 技术减小家庭负荷波动的情况。文献[12]对3辆容量均为 80 A·h 的电动汽车采用 V2G 技术平抑某一区域的电网负荷进

行了仿真分析, 通过对电动汽车的充放电控制进一步缩小了电网峰谷差。文献[13-15]提出了自治分布式 V2G 频率下垂控制策略, 入网电动汽车就地测量电网频率并根据频率偏差控制其充放电功率, 为系统提供调频服务。

本文研究了电动汽车 V2G 系统并网功率下的控制策略, 提出了基于比例反馈积分 (PFI) 的电流控制方法, 根据功率和电流的对应关系生成指令电流, 实现 V2G 系统并网电流指令的精确跟踪。

1 电动汽车 V2G 系统结构

电动汽车充放电装置是电动汽车与交流电网之间能量转换的纽带, 其拓扑结构直接影响充放电系统控制策略的制定。电动汽车 V2G 系统的拓扑结构如图 1 所示。

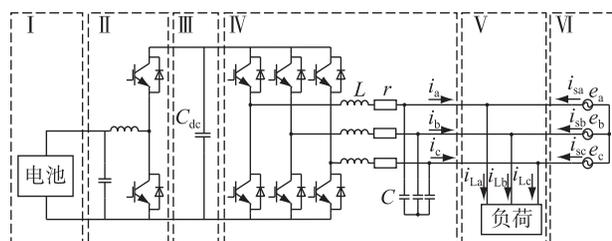


图 1 电动汽车 V2G 系统拓扑

Fig.1 Topology structure of V2G system

I 为电动汽车动力电池组, 可作为负荷吸收电网电能, 也可作为储能单元向电网反馈电能; II 为双向 DC/DC 变换器, 主要进行电池侧直流电压的升降变换, 使其能够适应更宽范围的电动汽车动力电池端电压; III 为直流母线电容, 是双向功率交换的纽带; IV 为双向 AC/DC 环节, 采用电压源型脉冲宽度调制 (PWM) 变流器, 实现交流与直流的双向转

收稿日期: 2017-02-08; 修回日期: 2017-04-01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2016YFB0101800);

国网江苏省电力公司科技项目 (5210EF15001H)

换; V 为三相负载; V_I 为电网电压。

电动汽车在主动配电网中可作为分布式储能单元,在电网需要的时候反向馈电,并且基于电压源型 PWM 变流器的四象限运行,接受电网有功、无功功率指令,是电动汽车与电网能量双向互动的关键。电动汽车 V2G 拓扑中, VSC 与 Buck/Boost 变换器仅能量流动方向一致,控制相互独立。

2 基于 PFI 的电流跟踪控制

2.1 电流内环 PFI 控制器

V2G 系统变流器电流内环的控制目标是使输出电流高精度跟踪给定电流,减少瞬态跟踪时间,实现快速与精确跟踪^[16]。

电动汽车 V2G 系统在实际运行环境中,受电网自身容量、结构和负载特性的影响,普遍存在电网电压畸变等非理想现象,特别是在局部微电网和距离电力主干网较远的终端^[17]。当电网电压出现畸变等现象时,传统的比例积分(PI)控制策略的控制性能就会变差。基于此,采用基于 PFI 控制器的电流跟踪控制,如图 2 所示。

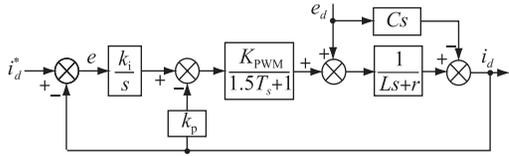


图 2 d 轴电流环 PFI 控制器

Fig.2 d-axis current loop PFI controller

图 2 中: T_s 为采样周期; K_{PWM} 为 PWM 等效增益,忽略开关器件的损耗及死区效应等,可认为 $K_{PWM}=1$; 惯性环节 $1/(1.5T_s+1)$ 近似表示信号采样延迟和 PWM 控制的小惯性特性。

d 轴输入电流可表示为:

$$i_d(s) = i_d^* \cdot \frac{k_i}{s(Ls+r)(1.5T_s+1) + (k_p s + k_i)} + e_d \cdot \frac{s(1.5T_s+1) - Cs^2(1.5T_s+1)(Ls+r)}{s(Ls+r)(1.5T_s+1) + (k_p s + k_i)} \quad (1)$$

式(1)中第一项为 d 轴电流参考值产生,第二项为 d 轴的电网电压扰动所产生。无论比例增益 k_p 取何值,只要系统稳定且积分系数 $k_i \neq 0$,则在 $s \rightarrow j\omega 0$ 处有:

$$i_d(s) = i_d^* \cdot \frac{k_i}{k_i} + e_d \cdot 0 = i_d^* \quad (2)$$

由式(2)可以看出,当参考值 i_d^* 为直流量时,电流内环可以完全无差地跟踪 i_d^* ,而且能完全消除电

网电压造成的扰动。

d 轴电流内环的闭环传递函数 $G_{r_pfi}(s)$ 为:

$$G_{r_pfi}(s) = \frac{i_d(s)}{i_d^*(s)} = \frac{k_i}{s(Ls+r)(1.5T_s+1) + (k_p s + k_i)} \quad (3)$$

对应的电流内环开环传递函数 $G_{ro_pfi}(s)$ 为:

$$G_{ro_pfi}(s) = \frac{k_i}{s(Ls+r)(1.5T_s+1) + k_p s} \quad (4)$$

考虑到系统的抗扰性能,忽略电流内环等效时间常数 T_s 的影响,式(4)可写成如下形式:

$$G_{r_pfi}(s) = \frac{k_i/L}{s^2 + [(k_p+r)/L]s + k_i/L} \quad (5)$$

由式(5)算得电流内环的阻尼比 ξ 和自然振荡频率 ω_n 为:

$$\begin{cases} \xi = \frac{(k_p+r)/L}{2\sqrt{k_i/L}} \\ \omega_n = \sqrt{k_i/L} \end{cases} \quad (6)$$

计算得:

$$\begin{cases} k_p = 2\xi\omega_n L - r \\ k_i = L\omega_n^2 \end{cases} \quad (7)$$

为了使电流内环获得较好的动、静态特性,设置系统的阻尼比 $\xi = 0.707$, $\omega_n = 300$ rad/s,将 ξ , ω_n 参考值代入式(7),即可设计出电流内环调节器的参数 k_p, k_i 。

在 PFI 调节器的设计中,根据上述方法可确定基本参数,但是实际应用中还需要通过适当的调整得到最佳调节参数 k_p, k_i ,以避免参数选择的盲目性。

2.2 电流内环 PFI 控制性能分析

基于 PFI 控制的电流内环控制器与传统 PI 控制器(如图 3 所示)的区别在于比例环节位置不同,PI 控制器在前向通道, PFI 控制器在反馈通道上。为验证基于 PFI 控制的电流内环控制方法的有效性,本节将 PFI 控制器与传统 PI 控制器进行比较分析。

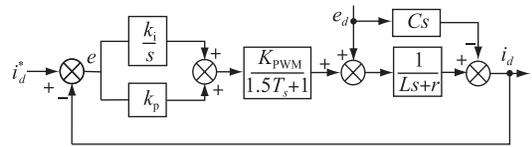


图 3 d 轴电流环 PI 控制器

Fig.3 d-axis current loop PI controller

由图 2 推导得到基于 PFI 控制器的扰动传递函数 $G_{d_pfi}(s)$ 和误差传递函数 $G_{e_pfi}(s)$ 。

扰动 e_d 到输出 i_d 的传递函数 $G_{d_pfi}(s)$:

$$G_{d_pfi}(s) = \frac{e_d(s)}{i_d(s)} = \frac{s(1.5T_s + 1) - Cs^2(1.5T_s + 1)(Ls + r)}{s(Ls + r)(1.5T_s + 1) + (k_p s + k_i)} \quad (8)$$

误差 e 到输出 i_d 的传递函数 $G_{e_pfi}(s)$:

$$G_{e_pfi}(s) = \frac{e(s)}{i_d(s)} = \frac{s(1.5T_s + 1)(Ls + r) + k_p s}{s(Ls + r)(1.5T_s + 1) + (k_p s + k_i)} \quad (9)$$

由图 3 可推导出基于 PI 控制器的闭环传递函数、扰动传递函数以及误差传递函数。

输入 i_d^* 到输出 i_d 的传递函数 $G_{r_pi}(s)$:

$$G_{r_pi}(s) = \frac{i_d^*(s)}{i_d(s)} = \frac{k_p s + k_i}{s(Ls + r)(1.5T_s + 1) + (k_p s + k_i)} \quad (10)$$

扰动 e_d 到输出 i_d 的传递函数 $G_{d_pi}(s)$:

$$G_{d_pi}(s) = \frac{e_d(s)}{i_d(s)} = \frac{s(1.5T_s + 1) - Cs^2(1.5T_s + 1)(Ls + r)}{s(Ls + r)(1.5T_s + 1) + (k_p s + k_i)} \quad (11)$$

误差 e 到输出 i_d 的传递函数 $G_{e_pi}(s)$:

$$G_{e_pi}(s) = \frac{e(s)}{i_d(s)} = \frac{s(Ls + r)(1.5T_s + 1)}{s(Ls + r)(1.5T_s + 1) + (k_p s + k_i)} \quad (12)$$

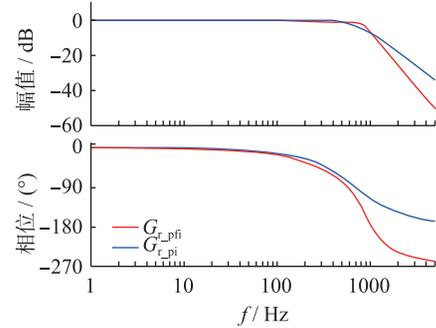
对以上 PFI 控制器和 PI 控制器的闭环传递函数、扰动传递函数、误差传递函数进行对比分析,可以看出:

(1) 闭环传递函数 $G_{r_pfi}(s)$ 和 $G_{r_pi}(s)$ 分母相同,即具有相同的极点,不同的是 PI 控制引入了零点 $(k_p s + k_i)$,当有阶跃输入时,比例和积分将同时起作用,会引起较大超调;而采用 PFI 控制时,积分先起作用比例后起作用,超调将会减小甚至消失。

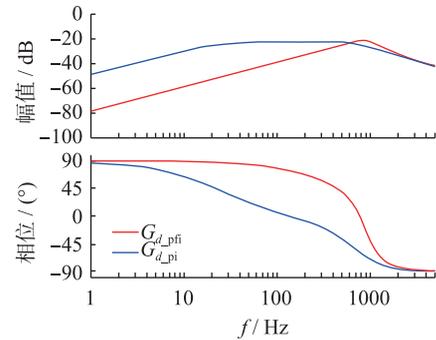
(2) 扰动传递函数 $G_{d_pfi}(s)$ 和 $G_{d_pi}(s)$ 相同,也就是说,如果选择相同的比例、积分增益,PFI 控制和 PI 控制的扰动抑制效果一致;但若分别调整比例、积分参数达到相同误差的情况下,PI 控制的扰动输出 $G_{d_pi}(s)$ 是 PFI 控制扰动输出 $G_{d_pfi}(s)$ 的 $(1 + k_p \cdot \frac{1}{Ls + r} \cdot \frac{1}{1.5T_s + 1})$ 倍,这说明了 PFI 控制对扰动的抑制能力要比 PI 控制强。

图 4 给出了两种控制器的传递函数曲线,通过

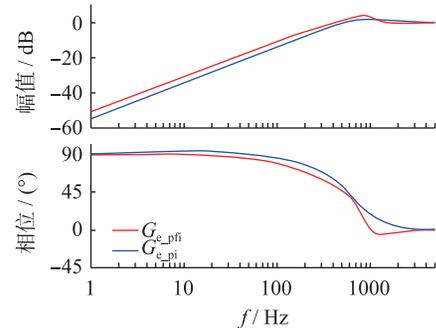
选择合适的比例、积分系数,可以使两种控制器的误差传递函数 $G_{e_pfi}(s)$ 、 $G_{e_pi}(s)$ (图 4c 所示)基本一致;此时,与 PI 控制器相比,PFI 扰动传递函数 $G_{d_pfi}(s)$ 在低频的衰减较大(图 4b 所示),与理论分析相同,说明了 PFI 控制对抑制的扰动能力比 PI 控制器强。



(a) 闭环传递函数



(b) 扰动传递函数



(c) 误差传递函数

图 4 PFI 控制器和 PI 控制器传递函数频域特性

Fig.4 Frequency domain characteristics of transfer function for PFI controller and PI controller

3 仿真分析

在仿真软件 PSIM9.0 中搭建了 V2G 系统变流器的仿真模型,仿真参数设置见表 1。标定 V2G 系统交流侧输出电流流入网侧方向为正。

在电网电压存在一定畸变(含 10% 的 5 次谐波,即电网电压 THD 为 10%)的情况下,采用所提出的 PFI 控制方法进行仿真,并与传统的 PI 控制器对比。

表 1 V2G 系统变流器主要参数

Table 1 Main parameters of converter in V2G system

主要参数	数值	主要参数	数值
滤波电感 L/mH	4	开关频率 f_s/kHz	10
滤波电容 $C/\mu\text{F}$	6	直流母线滤波电容 $C_{dc}/\mu\text{F}$	3300
交流侧等效内阻 r/Ω	0.5	直流母线电压 u_{dc}/V	700

图 5、图 6 为电网电压畸变情况下, V2G 系统的动态输出波形。仿真时间 $t=0.1\text{ s}$ 时给定功率指令为 $P_{\text{ref}}=-8\text{ kW}, Q_{\text{ref}}=6\text{ kvar}$ 。

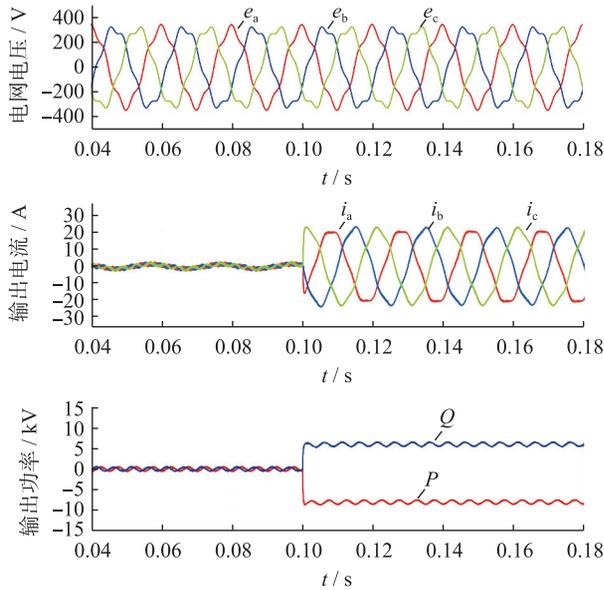


图 5 电压畸变时并网功率跟踪波形 (PI 控制器)

Fig.5 Grid connected power waveform under voltage distortion (PI controller)

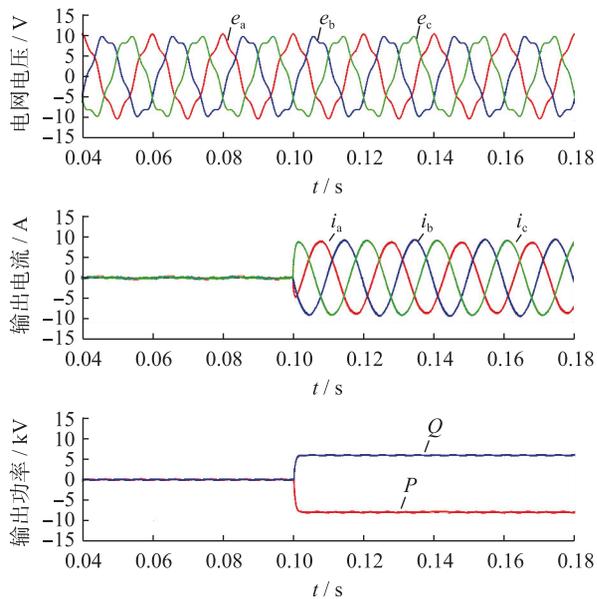


图 6 电压畸变时并网功率跟踪波形 (PFI 控制器)

Fig.6 Grid connected power waveform under voltage distortion (PFI controller)

结合表 2 给出的三相输出电流 THD 值,可以看出,电网电压畸变时,基于 PI 控制的电流谐波含量较大,其 THD 为 4.84%、4.58%、4.62%,而且并网功率值有明显的波动;而 PFI 控制时并网电流质量好,功率波动小,说明采用 PFI 控制时可有效抑制电网波动对并网电流的影响。

表 2 电网电压畸变时并网电流 THD

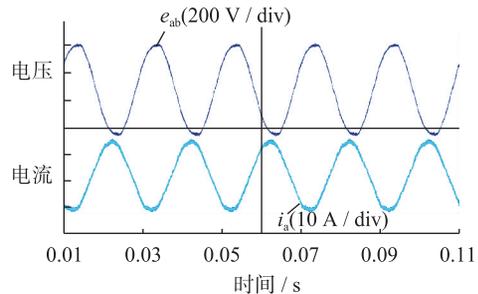
Table 2 Grid current THD in grid voltage distortion %

控制方法	A 相电流	B 相电流	C 相电流
PI 控制	4.84	4.58	4.62
PFI 控制	1.57	1.46	1.43

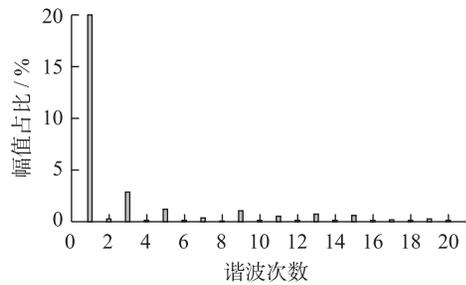
4 实验验证

采用本文提出的 PFI 控制器对 V2G 系统进行并网功率控制实验,并在微电网公共点电压畸变情况下与传统 PI 控制器进行对比分析。

图 7、图 8 为微电网公共点电压畸变 ($THD=3.61\%$) 情况下, V2G 系统响应并网功率指令的稳态输出波形,实验中,给定功率指令为 $P_{\text{ref}}=-2.7\text{ kW}, Q_{\text{ref}}=2.7\text{ kvar}$ 。



(a) 微电网电压及 V2G 输出电流



(b) V2G 输出电流频谱

图 7 V2G 系统功率响应实验波形 (PI 控制器)

Fig.7 Power dispatching experimental waveform of V2G system based on PI controller

对比图 7 和图 8 可以看出,电网电压畸变时, V2G 系统在两种控制器作用下的输出电流都存在畸变,但是畸变程度不同,其 PI 控制器下输出电流 i_a 的 THD 为 3.35%,而采用 PFI 控制器的 THD 为 2.25%。由图 7(b)、图 8(b) 可以看出,相对于 PI

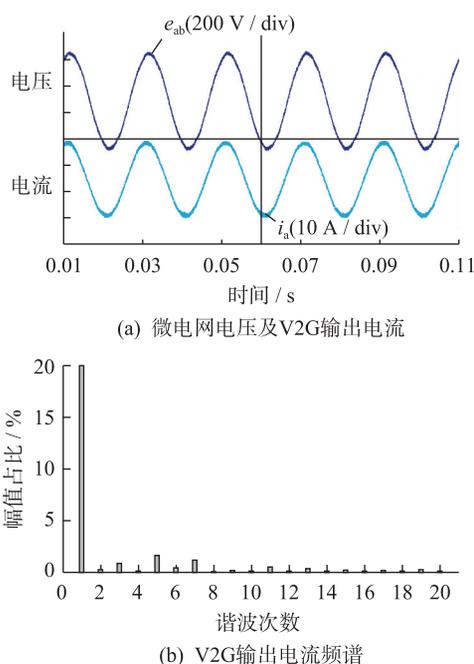


图8 V2G系统功率响应实验波形(PFI控制器)

Fig.8 Power dispatching experimental waveform of V2G system based on PFI controller

控制器,采用PFI控制器的输出电流3次谐波含量明显减小。采用PFI控制器的并网电流波形质量相对PI控制器较好一些,能够有效抑制并网电压畸变等波动造成的影响。

由于实验条件限制,若是网侧电压达到仿真中畸变效果,PFI控制器比PI控制器抑制网侧电压波动等优势效果会更明显。

5 结语

本文研究了面向主动配电网的电动汽车V2G系统并网功率模式下的控制策略,基于给定的功率指令,根据功率和电流的对应关系生成指令电流,并提出基于PFI的电流控制算法,实现V2G系统并网功率的精确跟踪;在PSIM仿真平台上搭建了V2G系统变流器模型并进行仿真验证,通过与常规的PI控制进行了对比分析,本文所提出的PFI控制器能够快速跟踪电流指令,并且在网侧电压畸变时,输出电流也能不受影响,输出较好的正弦电流波形。

参考文献:

[1] 李作锋,黄奇峰,杨世海,等.适应新型电力供需的多元化友好互动体系研究[J].江苏电机工程,2016,35(5):1-5.
LI Zuofeng, HUANG Qifeng, YANG Shihai, et al. Multi-target compounded AGV scheduling system modeling and application in electric power metering Calibration [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(5): 1-5.

[2] 王云,刘东,李庆生.主动配电网中柔性负荷的混合系

统建模与控制[J].中国电机工程学报,2016,36(8):2142-2150.

WANG Yun, LIU Dong, LI Qingsheng. Modeling and control of flexible load based on hybrid system in active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2142-2150.

- [3] 杨永标,黄莉,徐石明.电动汽车换电商业模式探讨[J].江苏电机工程,2015,34(3):19-24.
YANG Yongbiao, HUANG Li, XU Shiming. A discussion on battery-swapping commercial mode of electric vehicles [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(3): 19-24.
- [4] KEMPTON W, TOMIC J. Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue [J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 268-279.
- [5] KEMPTON W, DHANJU A. Electric vehicles V2G: storage for large scale wind power [J]. Windtech International, 2006, 2(1): 18-21.
- [6] LIU H, NING H, ZHANG Y, et al. Role-dependent privacy preservation for secure V2G networks in the smart grid [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2014, 9(2): 208-220.
- [7] HUTSON C, VENAYAGAMOORTHY G K, CORZINE K A. Intelligent scheduling of hybrid and electric vehicle storage capacity in a parking lot for profit maximization in grid power transactions [C] // IEEE, 2008: 1-8.
- [8] BROOKS A N. Vehicle-to-grid demonstration project: Grid regulation ancillary service with a battery electric vehicle [EB/OL]. (2002-12-10). <http://arb.ca.gov/research/apr/past/01-313.pdf>.
- [9] 李志伟,赵书强,刘应梅.电动汽车分布式储能控制策略及应用[J].电网技术,2016,40(2):442-450.
LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LIU Yingmei. Control strategy and application of distributed electric vehicle energy storage [J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 442-450.
- [10] 鲍谚,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. 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.
- [11] METS K, VERSCHUEREN T, De TURCK F, et al. Exploiting V2G to optimize residential energy consumption with electrical vehicle (dis)charging [C] // Smart Grid Modeling and Simulation (SGMS). IEEE First International Workshop on, 2011: 7-12.
- [12] 张丽,王媚,杜成刚,等.一种V2G充放电控制策略算法应用[J].华东电力,2010,38(11):1675-1677.
ZHANG Li, WANG Mei, DU Chenggang, et al. Application of an algorithm of control strategy for charging & discharging system based on V2G [J]. East China Electric Power, 2010, 38(11): 1675-1677.
- [13] 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.
- [14] OTA Y, TANIGUCHI H, NAKAJIMA T, et al. Autonomous distributed V2G (vehicle-to-grid) considering charging request and battery condition [C] // Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe). IEEE PES, 2010: 1–6.
- [15] OTA Y, TANIGUCHI H, NAKAJIMA T, et al. Autonomous distributed vehicle-to-grid for ubiquitous power grid and its effect as a spinning reserve [J]. Journal of International Council on Electrical Engineering, 2011, 1(2): 214–221.
- [16] 程军照,李澎森,吴在军,等. 微电网下垂控制中虚拟电抗的功率解耦机理分析[J]. 电力系统自动化,2012,36(7): 27–32.
- CHENG Junzhao, LI Pengshen, WU Zaijun, et al. Analysis of power decoupling mechanism for droop control with virtual inductance in a microgrid[J]. Automation of Electric Power System, 2012, 36(7): 27–32.
- [17] IVANOVIC Z, VEKIC M, GRABIC S, et al. Wide bandwidth power flow control algorithm of the grid connected VSI under unbalanced grid voltages [C] // 13th International Power Electronics and Motion Control Conference. Poznan Poland, 2008: 1957–1962.

作者简介:



韩华春

韩华春(1988—),女,山东济宁人,博士,工程师,从事电动汽车V2G技术、新能源并网关键技术研究工作(E-mail: 598543427@qq.com);

丁昊(1987—),男,江苏盐城人,工程师,从事电力系统与保护、电网项目管理等工作(E-mail: dingh1@js.sgcc.com.cn);

黄地(1989—),男,江苏启东人,博士,从事热力系统仿真、新能源并网关键技术工作(E-mail: andy_rl@msn.com);

吕振华(1988—),男,山东潍坊人,工程师,从事新能源发电并网、电能质量分析工作(E-mail: 517480859@qq.com)。

Electric Vehicle Power Control Strategy for Active Distribution Network

HAN Huachun¹, DING Hao², HUANG Di¹, LYU Zhenhua¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch, Nanjing 211106, China)

Abstract: V2G system can provide two-way controllable active power and reactive power into the power grid, realize the load fluctuation and stabilize the power grid peak power regulation function. This paper focuses on the power control of the V2G system in the grid-connected mode. The main circuit structure of the V2G system is introduced. To tracking current instructions precisely, the proportion feedback integral control method is proposed. The effectiveness of the proposed control strategy is verified by simulation and experiment results.

Key words: electric vehicle; V2G; proportional feedback integral; power control

(编辑 刘晓燕)