

# 一种电动汽车入网的实时仿真及测试平台

孙诚骁, 张硕

(1. 上海科梁信息工程股份有限公司, 上海 200233)

**摘要:** 伴随着新能源汽车的普及, 电动车入网技术 (V2G 技术) 的关注度不断提高。如何对于电动汽车入网的特点进行仿真研究, 如何在前期对控制策略进行实时测试, 是亟待解决的关键问题。本文针对 AC/DC 结合 DC/DC 结构的充放电控制器, 提出一种充放电控制策略。并设计完整的实时硬件在环仿真平台对充放电控制器进行开发测试。该平台包括电网到电池的仿真模型, 可模拟整个 V2G 的充放电过程。此外该模型还能够模拟电网故障、电池故障。以测试控制器的故障处理能力。该平台具有通用性, 为 V2G 控制器开发测试提供便利。

**关键词:** V2G; 充放电控制器; 硬件在环; 故障仿真

## A Real-time Simulation and Testing Platform for Vehicle to Grid

Sun Cheng-xiao, Zhang Shuo

(Shanghai KeLiang Information Tech. & Eng. Co., Ltd, Shanghai 200233, China)

**ABSTRACT:** With the widely application of new energy car, the technology of V2G (Vehicle to Grid) had attracted large attention. The key technology of V2G was the construction of the mathematical model and the charging/discharging strategy. This paper designed a structure of V2G topology based on AC/DC and DC/DC, and developed its control strategy. Then a real-time system was built at the aim of simulation, developing and testing charging and discharging controller. This system included the simulation model of V2G. It can simulate the whole process of charging and discharging at normal status as well as fault status. So the system had the ability of fault simulation which was not allowed in reality. This system can provide a convenient platform for development and testing engineers.

**KEY WORDS:** V2G, charging and discharging controller, hardware in loop, fault simulation

中图分类号: TM71; 文献标识码: B

## 0 引言

V2G (Vehicle to grid 的简称, 电动汽车入网) 技术就是将电动汽车电池中多余的电量返还给电网。这样在汽车闲置的时候, 可以将多余的电能还给电网做年能调度, 削峰填谷。随着电动车的普及, V2G 技术已经成为新的研究热点。目前的汽车充电桩只能给汽车充电, 不支持给电网馈电。如果要实现 V2G 技术的推广和运用, 电动汽车入网的仿真、充放电策略的开发和测试是其研究的关键技术。

本文首先分析了充放电机的工作原理及充放特点, 建立充放电机的数学模型, 并设计了一种充放电控制器的控制策略。然后, 本文基于实时仿真概念搭建了一套充放电控制器硬件在环测试平台, 基于 MATLAB/Simulink 建立仿真测试模型, 模拟真实电网到电池的拓扑结构, 通过 RT-LAB 软件完成模型的实时化。同时, 本文在测试模型中设计了

配电网不同位置不同类型的故障状态, 可以对充放电机控制器的故障鲁棒性进行测试。

本文所搭建的仿真测试平台, 能够完成充放电控制器进行快速设计及验证, 避免涉及真实电网、充放电机、电池等大规模电力设备, 节省开发成本及时间。

## 1 V2G 建模

电动车充放电机通常由一个 AC/DC、和一个双向 DC/DC 构成, 其结构如下图所示:

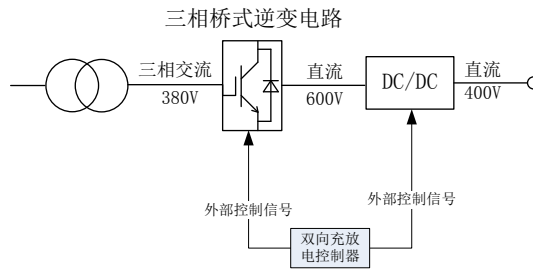


图 1 V2G 充放电结构

Fig1 The structure of V2G.

当充放电电机工作在充电状态时: AC/DC 工作在整流模式。DC/DC 为平衡电池侧电压, 工作在降压斩波模式。此时的电路拓扑与充电桩基本相同。

当充放电电机工作在放电状态时: 电池将多余电能反馈给电网进行调度。DC/DC 工作在升压斩波状态, AC/DC 充当逆变器, 将直流转为三相交流并入电网。两种状态下, 需设计 AC/DC 的控制策略。

1.1 控制策略设计:

目前 AC/DC 变流器的控制策略应用最多的是基于坐标 dq 变换理论的双闭环 SVPWM 控制策略, 外环为电压环, 来维持直流电容端电压的稳定; 内环为电流环, 根据电压外环的输出指令来控制 dq 轴电流。网侧整流器在 dq 坐标系下的电压方程如下:

$$\begin{cases} u_d - u_{gd} = -Ri_d - L \frac{di_d}{dt} + \omega Li_q \\ u_q - u_{gq} = -Ri_q - L \frac{di_q}{dt} - \omega Li_d \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $u_d$ 、 $u_q$  分别为网侧变流器电压 dq 坐标系下的电压控制分量;  $u_{gd}$ 、 $u_{gq}$  为为电网电压的 d、g 分量, 其中,  $u_{gd} = 0$ ;  $R$ 、 $L$  为电抗器的电阻、电感;  $i_d$ 、 $i_q$  分别为网侧电流的 d、q 分量。

网侧整流器的有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  分别为:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} u_{gd} i_d \\ Q = \frac{3}{2} u_{gq} i_q \end{cases} \quad (2)$$

想要实现对  $P$ 、 $Q$  的独立控制, 只需要控制电网电流 dq 坐标系下的  $i_d$ 、 $i_q$  即可。

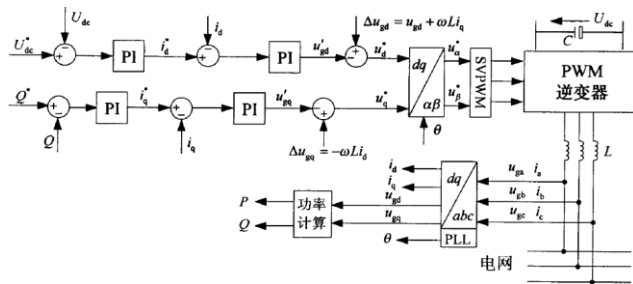


图 2 V2G 充放电控制策略  
Fig2 The control law of V2G

根据电池的充电特性, DC/DC 环节具备恒流控制以及恒压控制功能。充电时, 为满足锂电池充电特性, 保护电池性能。先采用恒流充电, 当电池前端电压到达阈值时, 再切换至恒压充电。当需要恒压控制时, 采用电池端电压外环和电流内环双环控制; 当需要恒流控制时, 省去电压外环, 用电池充电电流单环控制

放电时, 为简化模型, 考虑电池稳定输出状态, 采用恒流放电控制策略, 来维持电池端输出电流的稳定。在恒流放电时, AC/DC 换流器的控制策略与充电时类似, 来维持直流电容侧电压的稳定。

跟于上述理论, 采用 MATALB/Simulink 的 SimPowerSystem 工具包搭建电网-充电机-电池模型。

电网侧可采用 380V 三相交流电, 电池侧可采用多个并联锂离子动力电池包, 以仿真小型换电站。仿真模型如下:

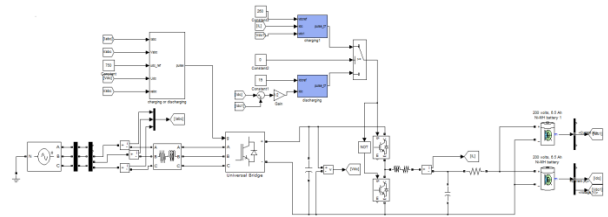


图 3 V2G Simulink 建模  
Fig3 The Simulink model of V2G

2 硬件在环平台

通过硬件在环仿真平台可以对控制器进行快速验证, 尤其对于电网供电、电池充放电等大功率场景, 可以实现状态复现、手动控制、极限及故障状态模拟、自动化测试等多种功能。

通常 HIL 系统要求仿真模型能够实时运行。本文采用 RT-LAB 作为实时仿真平台, 它支持将 Simulink 搭建的数学模型下载到具有实时系统的下位机中, 实时指的是模型仿真的运行时间与实际时间相吻合。这就要求模型在每个真实时间步长中, 需要完成输入到输出的全过程, 如图所示:



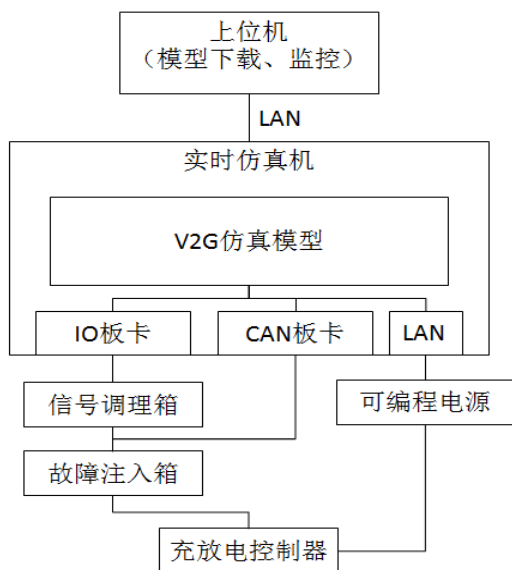
图 4 V2G Simulink 建模

**Fig4 The Simulink model of V2G**

这对计算机的性能及模型的优化能力提出了严格的要求。RT-LAB 通过其独有的分核计算技术, 将 Simulink 模型分配到不同的 CPU 中, 实现高速并行运算。

通过 OPAL-RT 公司提供的 RT-LAB 实时化仿真软件以及搭载实时操作系统的仿真机, 对 V2G 模型进行实时化处理, 使该模型能够实时模拟电网到电池、电池到电网的整个过程, 满足硬件在环测试的实时性要求。

本文搭建的 V2G 控制器 HIL 测试平台结构如下图所示:



**图 5 V2G HIL 测试台结构图**

**Fig5 The structure of V2G HIL test system**

如图 5 所示, V2G HIL 系统包含上位机、实时仿真机、信号线路设备以及充放电控制器四个部分。

上位机中运行 RT-LAB 软件, 作为模型搭建、编译、下载的工具。上一节中利用 Simulink/SimPowerSystem 建立的模型, 可以由 RT-LAB 软件实时化, 通过 TCP/IP 协议下载到实时仿真机中。

实时仿真机采用 Linux redhat 操作系统, 是仿真模型实时运行的平台。模型中可以对电网、充放电电机、电池等系统进行参数配置以满足不同实验场景要求, 模型的输出或输入信号由 IO 板卡、通讯板卡以及各类通讯接口进行信号传输。

信号线路设备可以对充放电控制器的信号进行调理或注入故障, 以满足测试要求。

充放电控制器可以是真实控制器, 也可以是快速原型机, 其中运行上一节设计的控制策略。

本文搭建的 HIL 系统设备如下:



**图 6 V2G 测试台架实物**

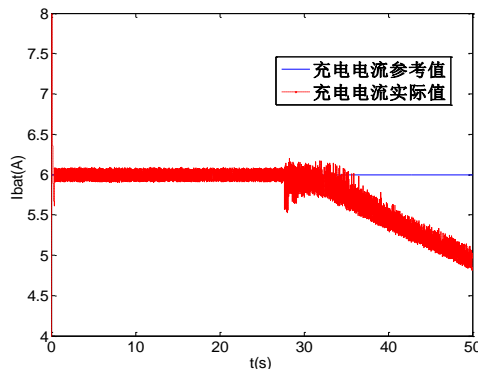
**Fig6 Scene of test bench**

进行硬件在环仿真实, 充放电控制器输出 IGBT 控制信号 (一般为 PWM 波) 对充放电电机种的 AC/DC 及 DC/DC 模块进行控制。这些信号通过仿真机中的 IO 板卡实时采集, 被采集到的信号被传入 V2G 模型中相应的模块, 此时模型就能模拟充电或者放电的情况。模型中计算得到的电流/电压信号再通过 IO 板卡发送给充放电电机控制器形成闭环控制。同时, 模型中还加入了 BMS 模拟模块, 可以仿真 BMS 与充放电电机控制器的通讯网络,

### 3 仿真结果:

#### 3.1 恒流恒压充电

电动汽车充放电电机以初始值为 20% 的 SOC 开始充电, 充电电流为 6A, 则充电电流与电池端电压仿真曲线如图所示。



**图 7 充电电流**

**Fig7 Charge current**

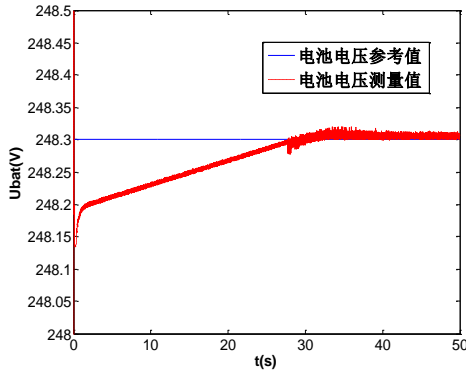


图 8 电池端电压(充电)

Fig8 Voltage of battery(Charging)

在本仿真实验中, 规定电池充电为正方向。

在电动汽车充电初始阶段以 6A 的充电电流进行恒流充电, 在此过程中, 电池端电压不断增大; 当电池端电压达 248.3V 后, 进行恒压充电。电池端电压维持稳定而充电电流不断降低。因此, 充放电机实现了先恒流再恒压的充电方式。

### 3.2 恒流放电

此时, 充放电机的 SOC 设置为 60%, 放电电流为 19A, 则电池放电电流与端电压仿真曲线如图所示。

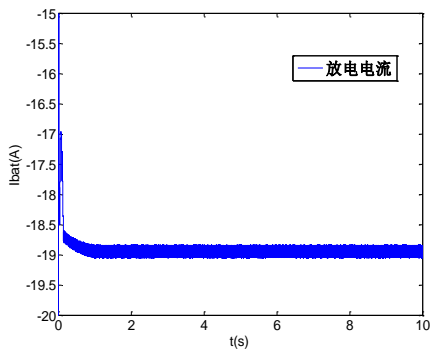


图 9 放电电流

Fig9 Discharge current

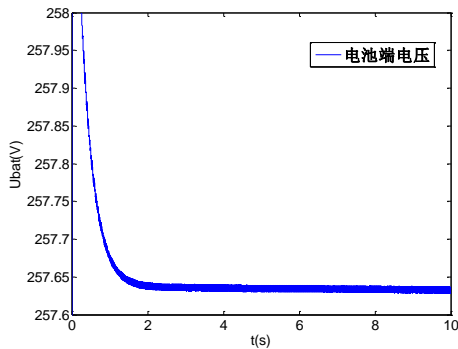


图 10 电池端电压(放电)

Fig10 Voltage of battery(Discharging)

当充放电机以 19A 的电流进行恒流放电时, 电池端电压逐渐下降。充放电机实现了恒流放电功能。

### 4 故障模拟:

本文搭建的 V2G HIL 仿真系统还具备模拟故障的能力。故障类型包括网侧故障、电池侧故障、信号线路故障及控制器故障。以网侧故障为例, 作如下实验:

10KV 配电网如图所示, 110KV/10KV 变压器容量为 31.5MVA, 10KV/0.4KV 变压器容量为 1MVA; 所有线路为架空线路, AB、BC、DE 线路长 1km, CD、AF、FG 线路长 2km, 其中, 线路参数为:

$$R = 0.27\Omega / km, L = 1.1mH / km, C = 12.74\mu F / km$$

在各个线路节点接入 (0.3+j0.3) MVA 的负荷; 并网点 PCC (Point of Common Coupling) 接入额定容量为 60kW 的 BSS, 由 10 台额定容量为 6kW 的充放电机组成。

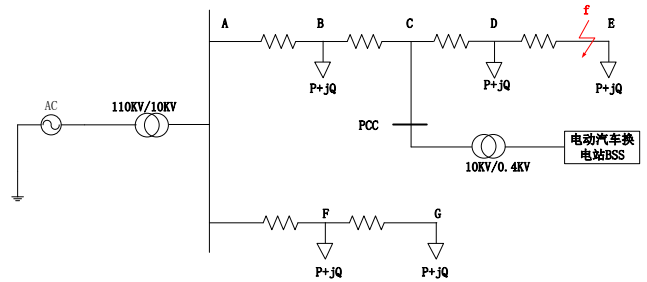


图 11 10KV 配电网结构

Fig11 The structure of 10KV power distribution network

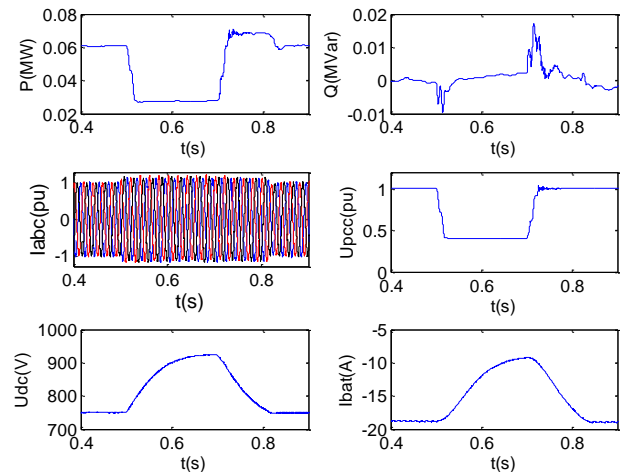


图 12 三相短路仿真结果

**Fig12 The result of three phase short-circuit**

当配电网的 f 处发生三相短路故障时, PCC 并网点电压跌落幅度较大。在电网电压跌落过程中, 由于 AC/DC 变流器有限定电流值为 1.1pu, 则其传输功率能力下降, PCC 并网点电流无法再增大, 则此时, BSS 可被看作一个恒流源, 因而输出功率随着电压的跌落而大幅降低。由于输出功率下降, DC/DC 对于电池端放电电流控制性能降低, 则放电电流下降。

另外, 在 AC/DC 变流器传输功率能力下降时, 导致其对于直流电容电压的控制性能也发生下降, 因而在电网电压跌落的动态过程中, 直流电容电压幅值升高, 多余能量被直流电容吸收。

在 0.7s 时故障结束瞬间, PCC 点电压恢复至 1pu, 而直流侧多余能量回馈电网, 导致有剩余有功功率出现, PCC 点电流仍然为限定值。在故障结束后, 直流电压以及电池放电电流的控制性能恢复, 直流电容电压以及电池放电电流逐渐恢复稳定, 同时, PCC 点电流恢复稳定, 配电网恢复稳定。

## 5 结论

本文基于电动汽车入网的发展趋势, 提出一种基于 Simulink 的 V2G 建模方法, 并考虑其充放电控制策略。利用实时仿真及硬件在环测试理论搭建了一套 V2G HIL 系统, 为 V2G 拓扑仿真、测试、充放电控制器开发、测试提供了便利。

本文提出的充放电控制策略在正常工作及电网故障时均能够较好地模拟出真实情况。采用 AC/DC+DC/DC 的方式, 实现电池充、放电控制。

本文设计的硬件在环测试平台, 可以实时模拟电网及电池运行状态, 对充放电控制器进行测试。不仅可以减少控制器开发的迭代周期, 还可以对一些故障情况、极限情况作模拟, 避免在真实电网电池等高压环境下做测试, 保障测试安全性。

## 参考文献

- [1] 王鑫. V2G 锂离子电池充放电控制器的研究[D]. 北京交通大学, 2014.
- [2] 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.
- [3] Clement-Nyns K, Haesen E, Driesen J. The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, 25(1):371-380.

- [4] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2013(3):140-148.
- [5] 胡泽春, 占恺峤, 徐智威, 等. 电动汽车与电网互动的关键问题分析与展望[J]. *电力建设*, 2015, 36(7):6-13.
- [6] 张颖达. 换电站 V2G 运行对配电网故障特征的影响及其控制策略[D]. 华北电力大学, 2014.
- [7] 谭伟, 邱华静, 邹毅军. SSN 算法在大型风电系统实时仿真中的应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2014(5):98-103.
- [8] 贾紫蕊. 基于 V2G 技术的双向 AC-DC 变换器及其关键技术研究[D]. 浙江大学, 2014.
- [9] 吕晓峰. 基于 V2G 技术的双向 DC-DC 变换器的研究[D]. 浙江大学, 2013.
- [10] 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):30-34.
- [11] 刘辉, 魏岩岩, 汪旻, 等. 电动汽车入网一次调频控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015(23):90-95.
- [12] Ma Y, Cruden A, Infield D. A Matlab simulator for electric drive vehicle to grid implementation[C]// *Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on*. 2010:1097 - 1101.
- [13] 薛松, 袁越, 傅质馨, 等. 考虑电动汽车入网技术的电力系统机组组合研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013(10):86-92.
- [14] 连湛伟, 石欣, 克潇, 等. 电动汽车充换电站动力电池全寿命周期在线检测管理系统[J]. *电力系统保护与控制*, 2014(12):137-142.
- [15] 南金瑞, 孙逢春, 王建群, 等. 纯电动汽车电池管理系统的设计及应用[J]. *清华大学学报自然科学版*, 2007, 47(s2):1831-1834.

收稿日期: 2016-12-

作者简介:

孙诚骁 (1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为汽车电控系统开发  
[rexyost@live.cn](mailto:rexyost@live.cn)

张硕 (1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及自动化。  
[shuo.zhang@keliangtek.com](mailto:shuo.zhang@keliangtek.com)