

# 基于 V2G 技术的电动汽车充电站建模及控制策略

黄秋燕, 杨志

(星星充电, 江苏 常州 213000)

**摘要:** 随着电动汽车普及率的提高, 利用 V2G 技术使电动汽车参与电网调峰调频成为可能。基于 V2G 技术, 首先对电动汽车充电站进行建模, 其次探究其控制策略及优势。

**关键词:** 充电站; 调峰调频; V2G; 充放电控制策略

## Modeling and control strategy of EV charge and discharge station based on V2G

HUANG Qiuyan, YANG Zhi

(Start Charge, Changzhou 213000, China)

**Abstract:** With the increasing popularity of electric vehicles, V2G technology makes it possible for electric vehicles to participate in power grid peak-modulation. Based on V2G technology, this paper first conducts modeling for EV charge stations and explores its control strategies and advantages.

**Key words:** charge station; peak and frequency adjustment; V2G; control strategy of charging and discharging

## 0 引言

我国对 V2G 技术的研究起步相对较晚, 研究主要集中在 V2G 技术带来的经济效益及运营模式, 充电站的选址规划, 对 V2G 技术的建模以及参与电网的各类应用的研究一般都基于小型系统, 大型 V2G 系统的建模分析和控制策略研究较少<sup>[1]</sup>, 因此, 本文主要研究基于 V2G 系统的电动汽车充电站的建模及其控制策略。

## 1 V2G 系统基本结构与建模

V2G 充放电机可以实现电动汽车电能与电网电能的双向流动, 基本拓扑为双向 AC/DC 变换器与双向隔离 DC/DC 变换器组成。

V2G 充电站的结构有共直流母线结构与共交流母线结构, 共交流母线更方便灵活, 共直流母线节省成本<sup>[2-4]</sup>。

### 1.1 AC/DC 拓扑结构及建模

AC/DC 变换器已研发和使用多年, 具有多种不同的类型, 通常可以分为单相和三相, 按照电路结构不同可以分为全桥和半桥电路。三相 PWM 整流器在大功率场合中应用较多, 通过合理的控制方式, 其功率因数可以接近 1, 本文选择三相电压源新

PWM 作为充电机前级 AC/DC 拓扑, 如图 1 所示。

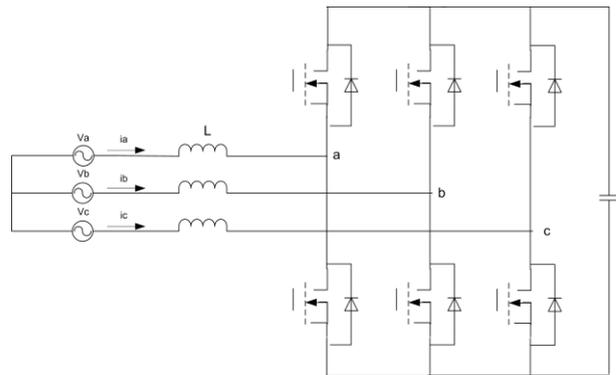


图 1 三相电压源型 PWM 整流器主电路拓扑

Fig. 1 Main circuit topology of three-phase voltage source PWM rectifier

由基尔霍夫定律, 根据电路拓扑可得微分方程<sup>[5]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} = -\frac{r_L}{L} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

变换到同步旋转坐标系下:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & \omega & -\frac{1}{L} & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ -\omega & -\frac{r}{L} & 0 & -\frac{1}{L} & 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_d \\ u_q \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

令导数项为零, 且使电网电压合成的通用矢量  $V$  与  $d$  轴方向重合, 进一步得到稳态控制方程<sup>[6]</sup>:

$$\begin{cases} u_d = v_d + \omega Li_q \\ u_q = -\omega Li_d \end{cases} \quad (3)$$

目前广泛使用双闭环 PI 调节控制策略搭建控制框图, 如图 2 所示

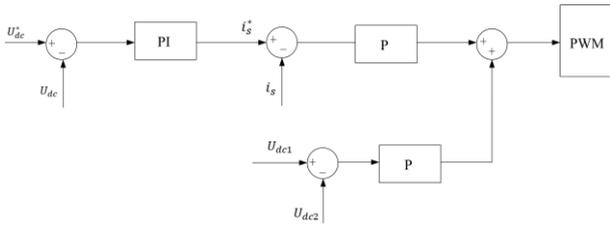


图 2 三相电压源型 PWM 整流器控制框图

Fig. 2 Control block diagram of three-phase voltage source PWM rectifier

## 1.2 DC//DC 拓扑结构及建模

双向 DC//DC 拓扑采用 CLLC 谐振变换器拓扑, 不仅可以实现能量双向流动, 同时可以通过 ZVS 技术, 消除开关管开通损耗, 主电路拓扑如图 3 所示。

目前描述谐振变换器增益函数的方法主要有三种, 分别是基波等效法(FHA)、仿真分析法以及时

域分析法。为简化谐振变换器设计过程、提高变换器转换效率, 一般需保证流过高频变压器上的电流波形具有良好的正弦度, 本文采用基波等效分析法进行分析。CLLC 谐振变换器基波等效电路模型如图 4 所示<sup>[7]</sup>。

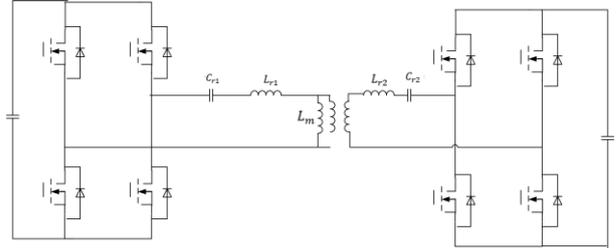


图 3 CLLC 谐振变换器的电路结构

Fig. 3 Circuit structure of CLLC resonant converter

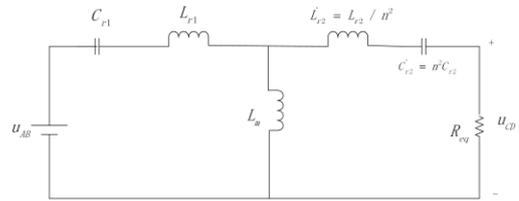


图 4 CLLC 谐振变换器的基波等效模型

Fig. 4 Fundamental equivalent model of CLLC resonant converter

定义如下阻抗:

$$\begin{cases} Z_1 = j\omega_s L_{r1} + 1/(j\omega_s C_{r1}) \\ Z_2 = j\omega_s L_{r2} + 1/(j\omega_s C_{r2}) \\ Z_m = j\omega_s L_m \end{cases} \quad (4)$$

可求得该谐振变换器基波简化电路传递函数为:

$$H(j\omega_s) = \frac{\omega_s L_m R_{eq}}{(\omega_s L_{r1} - \frac{1}{\omega_s C_{r1}} + \omega_s L_m) R_{eq} + j \left[ \omega_s^2 (L_{r1} + L_2) L_m + \omega_s^2 L_{r1} L_2 - \frac{L_m + L_2}{C_{r1}} - \frac{L_m + L_{r1}}{C_2} + \frac{1}{\omega_s^2 C_{r1} C_2} \right]} \quad (5)$$

定义归一化频率为

$$\omega_n = \frac{\omega_s}{\omega_r} \quad (6)$$

特征阻抗值为

$$Z_r = \sqrt{L_{r1} / C_{r1}} \quad (7)$$

品质因数为

$$Q = \frac{Z_r}{R_{eq}} \quad (8)$$

励磁电感与谐振电感比:

$$k = \frac{L_m}{L_{r1}} \quad (9)$$

副边等效电容与原边谐振电容比为

$$g = \frac{C_{r2}}{C_{r1}} \quad (10)$$

通过化简可得 CLLC 谐振型变换器的增益  $M$  表达式为<sup>[8]</sup>

$$M(\omega_n) = \|H(j\omega_n)\| = \frac{1}{\sqrt{(Q/k)^2 \left[ a\omega_n - \frac{b}{\omega_n} + \frac{c}{\omega_n^3} \right]^2 + \left( 1 + \frac{1}{k} - \frac{1}{k\omega_n^2} \right)^2}} \quad (11)$$

CLLC 谐振变换器采用电压环和电流环双环竞争控制, 如图 6 所示, 电压环和电流环各自经过 PI

控制器得到闭环输出量，通过比较电压环和电流环的闭环输出量来得到开关频率。

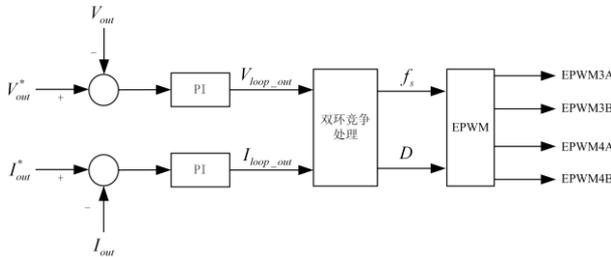


图 6 CLLC 谐振变换器的控制框图

Fig. 6 Control block diagram of CLLC resonant converter

## 2 V2G 参与电网调峰的控制策略

V2G 充电站主要针对电网高峰负荷进行调峰，通过模拟负荷曲线来进行，同时将发电成本、充电成本、用户响应程度、用户收益等作为优化目标，根据参与 V2G 的车辆数目计算合理的充换电时序<sup>[9-11]</sup>。

### 2.1 目标函数及约束条件

$$\min F = \sum_{j=1}^{24} (P_{Lj} - P_{arv} - \sum_{i=1}^n P_{ij})^2 \quad (12)$$

$$P_{arv} = \sum_{i=1}^{24} P_{Lj} / 24$$

其中：n 为电动汽车数量； $P_{ij}$  为电动汽车 i 在时刻 j 与电网的交换功率； $P_{Lj}$  为时刻 j 的负荷功率。

约束条件：

充电电流最大值： $1/3I_{IN}$ ；电动汽车放电电流最大值： $2I_{IN}$ ；实际容量  $Q_N$ ：寿命不低于电池容量的 20%；用户设定离开时的容量最低限值；电动汽车可用时间。

### 2.2 优化算法

V2G 参与调峰就是通过目标函数寻找最优解从而得出最优化的电动汽车充放电策略，目前研究较多的智能算法有粒子群优化算法和遗传算法<sup>[12]</sup>。

1) 粒子群优化算法。粒子群算法是一种进化计算技术，原理是一种不断迭代的优化计算技术，此类算法通过鸟类群体觅食的行为展开迭代，从一个解开始不断迭代，最终找到最优解，此算法通过目标函数也就是其适应度去判断寻优解的优良程度。

2) 遗传算法。遗传算法是一种基于生物界规律和自然遗传机制的并行搜索算法。其主要特征是群体间的搜索方法以及群体中个体信息的交换。在智能充放电策略中，遗传算法的校验位正好用来代替新能源汽车的充放电状态，有效地选择和交叉方法可以减少基因遗漏，增强全局收敛性和运算速率。

## 3 结论

本文首先介绍了充电站的系统结构，对充电机的 AC/DC 和 DC//DC 分别建模以及提出了各部分的控制策略，基于 V2G 参与电网调峰构建了优化函数及约束条件，最后对比了两种优化算法的特点。未来随着电动汽车普及率的提升，V2G 模式下电动汽车参与电网控制将会广受关注，也会出现更多新的问题有待解决。

### 参考文献

- [1] 陆海, 周晓, 龚康. 电动汽车 V2G 在含光伏的配电网中的应用及经济性研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(9): 27-34.  
LU Hai, ZHOU Xiao, GONG Kang. The application and economic study of V2G in distribution network with PV[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(9): 27-34.
- [2] 胡泽春, 宋永华, 许智威, 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.  
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.
- [3] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127-131.  
GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [4] 李慧玲, 白晓民. 电动汽车充电对配电网的影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 38-43.  
LI Huiling, BAI Xiaomin. Impacts of electric vehicles charging on distribution grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 38-43.
- [5] 岳思, 李艳. 电动汽车充电模式及方式浅析[J]. 通信电源技术, 2012, 29(2): 38-40.  
YUE Si, LI Yan. Analysis of electric vehicle charging modes and methods[J]. Telecom Power Technologies, 2012, 29(2): 38-40.
- [6] 刘威. 电动汽车非车载充电机功率模块的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [7] MA Y, ZHANG B, ZHOU X, et al. An overview on V2G strategies to impacts from EV integration into power system[C] // 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), May 28-30, 2016, Yinchuan, China: 2895-2900.
- [8] 黄启程. 宽范围输入谐振双向 DC/DC 变换器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

- [9] OTA Y, TANIGUCHI H, NAKAJIMA T, et al. An autonomous distributed vehicle-to-grid control of the grid-connected electric vehicle[C] // 2009 International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), December 28-31, 2009, Peradeniya, Sri Lanka: 414-418.
- [10] 高赐威, 吴茜, 薛飞, 等. 换电模式下电动汽车电池组需求规划[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1783-1791.  
GAO Ciwei, WU Xi, XUE Fei, et al. Demand planning of electric vehicle battery pack under battery swapping mode[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1783-1791.
- [11] 刘东奇, 王耀南, 申永鹏. 基于 T-S 模糊控制器的电动汽车 V2G 智能充电站控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 206-214.
- LIU Dongqi, WANG Yaonan, SHEN Yongpeng. Research of V2G smart charging station control strategy using T-S fuzzy controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 206-214.
- [12] 李婉璐. 电动汽车 V2H 能源管理与优化系统[J]. 黑龙江电力, 2012, 34(1): 78-80.  
LI Wanlu. Electric vehicles V2H energy management and optimization system[J]. Heilongjiang Electric Power, 2012, 34(1): 78-80.

---

收稿日期: 2020-09-11

作者简介:

黄秋燕(1986—), 女, 通信作者, 硕士, 研究方向为电动汽车充放电技术。E-mail: qiuyan.huang@wbst