

汽车充电桩(V2G)并网直流分量的抑制措施

程凌国, 杨志

(万邦数字能源股份有限公司南京研究院, 江苏 南京 210004)

摘要: 简述了汽车充电桩的并网发电(V2G)运行模式及三相逆变器产生直流分量的原因。并在此基础上引入谐振控制器(PR), 改进了三相逆变器双环控制结构, 从而抑制直流分量的生成。给出了样机测试结果, 证明了方案的有效性。

关键词: V2G; 三相逆变器; 直流分量; 谐振控制器; 抑制; 充电桩; 双环控制

Strategy for suppressing DC component in grid-connected vehicle charging pile

CHENG Lingguo, YANG Zhi

(Wanbang Digital Energy Co., Ltd. Nanjing Research Institute, Nanjing 210004, China)

Abstract: This paper briefly describes the vehicle-to-grid (V2G) operation mode of vehicle charging piles and the causes of DC component of three-phase inverter. On this basis, the resonant controller is added to improve the voltage and current dual-loop structure of three-phase inverter, so as to suppress the generation of DC component. The effectiveness of the scheme is proved by the successful application on the prototype.

Key words: vehicle-to-grid; three-phase inverter; DC component; resonant controller; suppressing; vehicle charging pile; dual-loop control

0 引言

化石燃料推动了工业的发展, 但也给环境造成了严重污染, 比如饱受诟病的汽车尾气排放问题。随着人类环保意识的提升加之石油能源的日渐枯竭, 动力能源的变革是大势所趋。

电动汽车具有零排放、效能高等优点, 使其成为节能、减排的有效途径。充电桩^[1-2]作为电动汽车的基础设施, 类似于加油站的加油机, 作用愈发重要。

燃油车通过加油机补充燃料, 电动汽车通过充电桩将电能储存在电池中, 这一功能正在朝着快速、大容量的方向发展。与此同时, 随着电动汽车的数量急剧增加, 车载电池存储的电能越来越巨大, 如果可以利用, 必将成为电网的又一能源补充。为此, 充电桩作为连接汽车电池与电网的桥梁, 放电功能(V2G)也被逐渐重视, 相关的标准也在逐步推进。

充电桩的功率模块是实现能量双向流动的主要部件, 充电时从电网获取能量, 放电时则将电池能量送入电网, 如图1所示。充电桩是能量双向流动的转换枢纽。

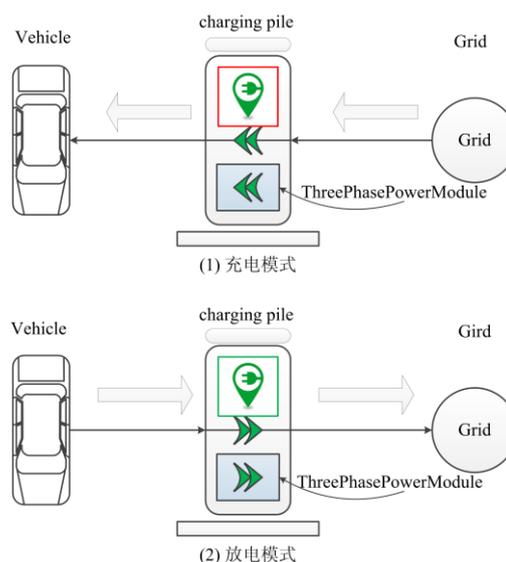


图1 充电桩充放电示意图

Fig. 1 Schematic diagram of charging and discharging of charging pile

而大容量的充电桩和电网对接一般是三相逆变器模块, 其拓扑结构如图2所示。

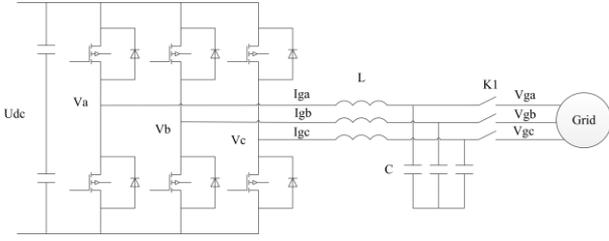


图 2 三相逆变器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three-phase inverter

其中 U_{dc} 为直流母线电压； V_a, V_b, V_c 为逆变器输出电压； I_{ga}, I_{gb}, I_{gc} 为三相电感电流； V_{ga}, V_{gb}, V_{gc} 为三相电网电压； L 为滤波电感， C 为滤波电容， $K1$ 为并网继电器。

三相并网逆变器在 dq 坐标系下的控制方程为

$$\begin{aligned} L \frac{di_{gd}}{dt} &= V_d - V_{gd} + \omega L i_{gq} \\ L \frac{di_{gq}}{dt} &= V_q - V_{gq} - \omega L i_{gd} \end{aligned} \quad (1)$$

目前逆变器为了减小体积控制成本，前端一般不配置隔离变压器，这就给直流分量提供了入网条件，而直流分量进入电网会有一系列危害，比如使变压器波形畸变、电机转矩波动等，因此如何抑制进入电网的直流分量，成为了并网逆变器必须解决的问题之一。

本文在研究了直流分量的产生原因及常用的控制方案后，提出了一种抑制直流分量的方法，并在样机上测试，验证了方法的有效性。

1 直流分量的产生

理论上三相逆变器参考值中不含直流偏置，但实际上因为采样调理电路的零点漂移，数字控制环路的截断误差等^[3]，导致三相逆变器输出包含直流分量。如图 3 所示。T1 周期内波形上下对称，T2 周期内正半波附带了直流偏置，波形正负半波不对称，产生了直流分量。

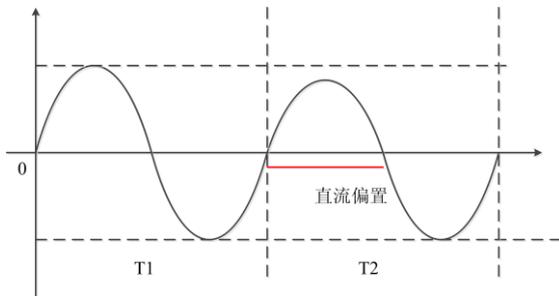


图 3 直流偏置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of DC bias

三相逆变器常在 dq 坐标系下采用双环控制策略，如图 4 所示。而当三相电流(图 2 中所示 I_{ga}, I_{gb}, I_{gc})中含有直流偏置 I_{dc} 时，使用公式(2)(3)(4)三相瞬时信号转换到 dq 坐标系，交流分量变为直流量 I_{gd}, I_{gq} ，直流偏置变成工频的交流量 I_{dc_d}, I_{dc_q} 。

$$I_{ga} = I_c \cos(\omega t) + I_{dc1}$$

$$I_{gb} = I_c \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + I_{dc2} \quad (2)$$

$$I_{gc} = I_c \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + I_{dc3}$$

$$\begin{bmatrix} I_{dc_d} \\ I_{dc_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dc1} \\ I_{dc2} \\ I_{dc3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} I_{dc_d} \\ I_{dc_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dc_d} \\ I_{dc_q} \end{bmatrix} \quad (4)$$

因此，传统的闭环控制环路(图 4)对采样造成的直流偏置调节能力较弱^[5]，不足以抑制出现的直流分量。有论文指出可以对直流分量单独控制，其思路为先滤取直流分量，然后增加 PI 环路叠加到原双环结构上。为了获取直流偏置，一般采用低通滤波器或带通滤波器^[8]，但得到的直流偏置在相位和幅值上都会有所减小。也有学者指出利用滑动平均法获取直流分量，但在频率波动时容易出现直流分量振荡问题^[7]，需要特殊方法处理。

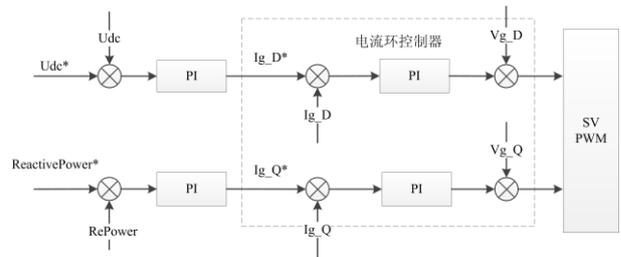


图 4 传统的双环控制示意图

Fig. 4 Traditional double-loop control diagram

2 比例谐振控制器

理想的比例谐振控制器(PR)传递函数:

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{K_r s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (5)$$

从其波特图(图 5)可以看出，在特定频率上有较高的增益，可以实现零稳态误差。

电网频率有一定的波动范围，为了获取抑制在 dq 坐标系下的直流分量，增加控制器带宽，设计了准 PR 控制器，传递函数如下。

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_r w_c s}{s^2 + 2w_c s + w_0^2} \quad (6)$$

其中, K_p 为比例增益, K_r 为谐振频率的增益, w_c 为控制器的带宽, w_0 为谐振角频率, 此处为电网工频对应的角频率。波特图如图 6。

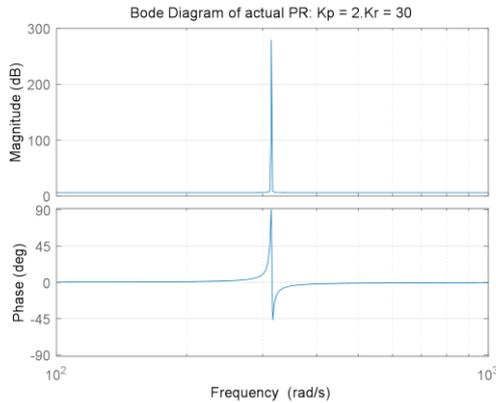


图 5 理想的 PR 控制器波特图

Fig. 5 Ideal PR controller Bode diagram

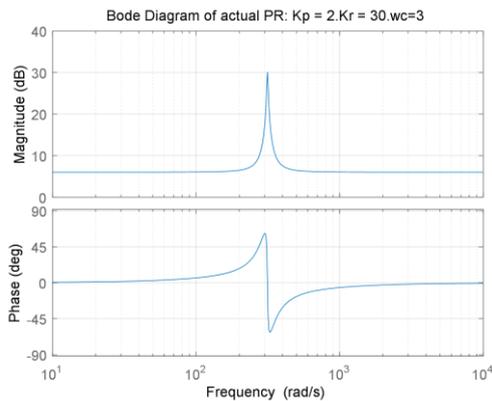


图 6 准 PR 控制器波特图

Fig. 6 Bode diagram of quasi-PR controller

在此基础上, 利用谐振控制器的特性, 稳态时直接获取直流分量, 改进设计了新的双环控制结构。

3 新型抑制直流分量的方案

3.1 改进的双环控制结构

本文提出的抑制交流电流中直流分量的策略如下:

(1) 不使用硬件采样或瞬时值滤波得到直流分量, 而是从 dq 坐标系下利用 PR 控制的特性抑制直流分量的产生。

(2) 将 PI+PR 的电流环优化为 PIR 的控制器。PIR 的传递函数为:

$$G_{PIR}(s) = K_p \left(1 + \frac{K_i}{s}\right) + \frac{2K_r w_c s}{s^2 + 2w_c s + w_0^2} \quad (7)$$

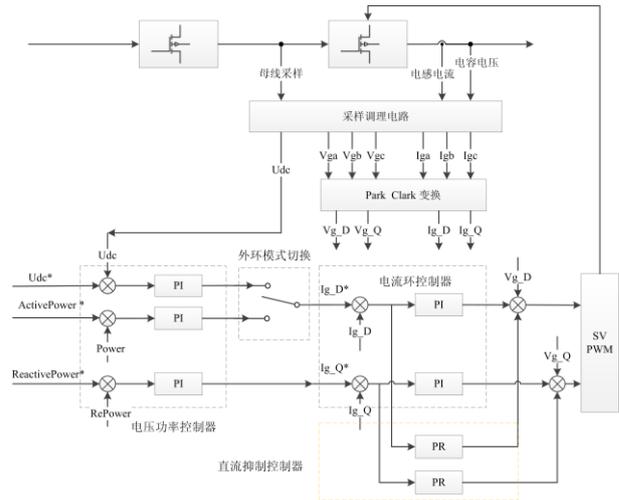


图 7 新型双环控制框图

Fig. 7 Block diagram of new double-loop control

其中, k_i 为积分系数, 波特图如图 8 所示, 可见在 dq 坐标系下提高了对工频的直流分量增益。

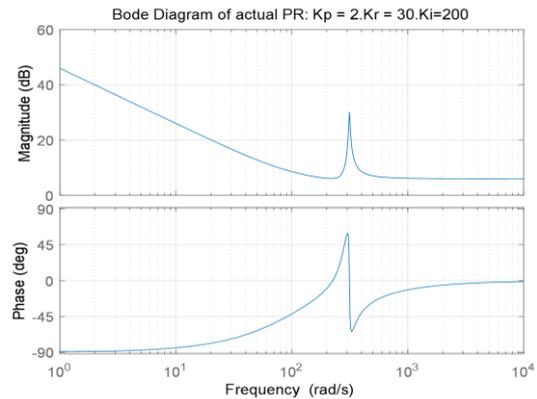


图 8 PIR 控制器波特图

Fig. 8 PIR controller Bode diagram

(3) 对 PR 控制器输出限幅处理, 提高安全性。

3.2 实验结果

按照上述分析设计了控制器, 实验在一台充电桩 10 kW 逆变器模块上进行, 母线电压 700 V, 输出电压 380 V/50 Hz。12 位 A/D 转换器, 开关频率 50 kHz。

图 9 为未加入直流分量抑制, 采用传统双环控制时测试随功率增大的直流分量情况。可见随着功率的增大, 注入电网的直流电流越来越大。

图 10 为加入谐振控制器后的直流分量测试情况, 可见随着功率的增大, 直流电流有所增加, 但

都在 40 mA 以下,之所以无法降为 0,主要受 AD 转换器的精度影响。

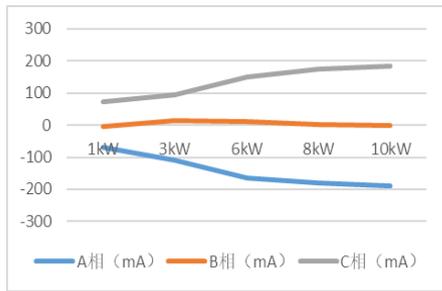


图 9 传统双环控制下的直流分量

Fig. 9 DC component under conventional double-loop control

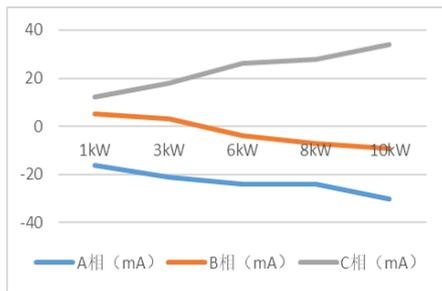


图 10 改进后双环控制下的直流分量

Fig. 10 Improved DC component under double-loop control

4 结语

(1) 充电桩通过三相并网逆变器可以实现电动汽车通过向电网反送电能。

(2) 通过加入谐振控制器,可以提高逆变器双环控制结构的直流分量抑制性能。

实验结果表明,该方法对直流分量的抑制效果较好,可以满足工程需要。

参考文献

- [1] 陆濛洲, 罗印升, 宋伟. 电动汽车直流充电桩控制系统的设计与实现[J]. 电子科学技术, 2017, 4(4): 101-107
LU Mengzhou, LUO Yinsheng, SONG Wei. The design and implementation of control system for electric vehicle direct current charging spot[J]. Electronic Science & Technology, 2017, 4(4): 101-107
- [2] 王旭, 齐向东. 电动汽车智能充电桩的设计与研究[J]. 机电工程, 2014, 31(3): 393-396.
WANG Xu, QI Xiangdong. Research and design of electric car intelligent charging pile[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(3): 393-396.
- [3] 王宝诚, 郭小强, 梅强, 等. 无变压器非隔离型光伏并

网逆变器直流注入控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 23-28.

WANG Baocheng, GUO Xiaoqiang, MEI Qiang, et al. DC injection control for transformerless PV grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36): 23-28.

- [4] 关雅娟, 邬伟杨, 郭小强. 微电网中三相逆变器孤岛运行控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 52-60.
GUAN Yajun, WU Weiyang, GUO Xiaoqiang. Control strategy for three-phase inverters dominated microgrid in autonomous operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(33): 52-60.
- [5] 蒋俊祁, 袁小平. 三相无隔离并网逆变器差模直流分量抑制[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(1): 132-137.
JIANG Junqi, YUAN Xiaoping. Differential DC component suppression in three-phase non-isolated connected inverter[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(1): 132-137.
- [6] 吴雷, 徐鹏. 三相并网逆变器直流分量瞬时抑制策略研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(2): 56-59.
WU Lei, XU Peng. Study of DC component instantaneous suppression for three-phase grid-connected inverter[J]. Power Electronics, 2016, 50(2): 56-59.
- [7] 陈增禄, 施杰, 温宗周, 等. 高精度宽频带逆变器输出直流漂移控制的一种新方法[J]. 电工技术学报, 2005, 20(12): 69-75.
CHEN Zenglu, SHI Jie, WEN Zongzhou, et al. A novel scheme of output DC drift control in wide-band high-precision inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(12): 69-75.
- [8] 吴彬, 揭贵生, 王恒利, 等. 无隔离三相逆变器两种直流分量抑制策略对比[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(6): 60-64.
WU Bin, JIE Guisheng, WANG Hengli, et al. Comparison between two strategies for suppressing DC bias in three-phase inverter without output transforms[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(6): 60-64.
- [9] 刘邓, 刘军, 陶忠正, 等. 比例积分与比例谐振对单相逆变器控制的研究与仿真[J]. 电气工程学报, 2015, 10(10): 64-68.
LIU Deng, LIU Jun, TAO Zhongzheng, et al. Proportional integral and proportional resonant on the research and simulation of single-phase inverter control[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(10): 64-68.
- [10] 张代润, 王玉. 并网逆变器的网压前馈准比例谐振控制方式研究[J]. 电器与能效管理技术, 2014(15): 51-56.
ZHANG Dairun, WANG Yu. Research on grid voltage

- feed-forward and quasi proportional resonant control scheme for grid-connected inverter[J]. *Electrical Energy Management Technology*, 2014(15): 51-56.
- [11] 阮俊, 王恒利. 三相逆变器输出直流分量的抑制[J]. *电器与能效管理技术*, 2015(15): 41-45.
RUAN Jun, WANG Hengli. Eliminating output DC component in three phase inverter[J]. *Electrical Energy Management Technology* 2015(15): 41-45.
- [12] 阳习党, 王恒利. 双环控制三相逆变器输出直流分量分析与控制[J]. *电力电子技术*, 2014, 48(7): 45-47.
YANG Xidang, WANG Hengli. Analysis and control for DC bias in three-phase inverter based on dual-loop[J]. *Power Electronics*, 2014, 48(7): 45-47.
- [13] 陈良亮, 肖岚, 胡文斌. 逆变器输出电压直流分量产生原因与抑制方法[J]. *电力电子技术*, 2003, 37(5): 27-29.
CHEN Liangliang, XIAO Lan, HU Wenbin. Reasons and restraining methods for DC bias in inverter output voltage[J]. *Power Electronics*, 2003, 37(5): 27-29.
- [14] 龚文明, 孟岩峰, 胡书举, 等. 一种应用PIR控制器的双馈风力发电机组电流谐波抑制方法[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(9): 95-103.
GONG Wenming, MENG Yanfeng, HU Shuju, et al. A method with PIR controller for the elimination of harmonic currents in a DFIG based wind power system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(9): 95-103.

收稿日期: 2020-09-11

作者简介:

程凌国(1985—), 男, 工程师, 万邦数字能源股份有限公司。E-mail: yc1820@126.com