

DOI: 10.7667/PSPC161814

电动汽车交流充电桩谐波分析及谐波抑制研究

周娟, 任国影, 魏琛, 樊晨, 毛海港

(中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 交流充电桩是家用电动汽车主要的能源供给设施, 利用车载式充电机为动力电池充电。随着电动汽车充电站日益增多, 其产生的谐波污染也越来越严重。搭建了单相车载式充电机的完整模型, 详细分析了其谐波特点和充电机台数变化对谐波含量的影响。针对充电桩的谐波问题, 将有源电力滤波技术应用到交流充电桩中。在所搭建的仿真模型中, 针对单相车载式充电机的负载特性, 采用传统PI控制与重复控制相结合的复合控制方法, 新型交流充电桩有效地抑制了车载式充电器谐波, 提高电网侧电能质量。

关键词: 交流充电桩; 单相有源电力滤波器; 谐波; 电动汽车; 重复控制; PI控制

Harmonic analysis of electric vehicle AC charging spot and research on harmonic restriction

ZHOU Juan, REN Guoying, WEI Chen, FAN Chen, MAO Haigang

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: AC charging spot, a major energy supply facility for electric vehicles, uses on-mounted charger to power the battery of household electric cars. The harmonic pollution of electric vehicle chargers is increasing rapidly as the scale of electric vehicle charging stations enlarge. This paper builds a model of single-phase vehicular charger. Besides, it analyzes the harmonic characteristics in detail. The influence on grid harmonic by the changes in the number of charging stations is analyzed. In view of the harmonic problem of charging spot, the active power filter technology is applied to the AC charging spot. In the simulation model, based on the load characteristics of single-phase vehicular charger, the traditional PI control and repetitive control are combined, which can improve the quality of the grid side power and reduce the influence of harmonics on electric energy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407184).

Key words: AC charging spot; single-phase active power filter; harmonic; electric vehicles; repetitive control; PI control

0 引言

随着环境污染和能源紧缺问题日益严峻, 传统燃油汽车因能源消耗大、对环境污染严重, 发展受到越来越多的限制^[1]。电动汽车作为新兴的交通工具在近年得到快速的发展, 其全部或部分采用电力作为驱动系统的动力来源, 在环保、清洁、节能等方面具有明显优势^[2]。电动汽车的充电装置主要包括直流充电机和交流充电机两种形式^[3]。直流充电机功率较大(100 kW左右), 充电时间短, 但体积较大, 一般安装在专门的电动汽车充电站内^[4]。交流充电桩采用220 V单相供电, 利用车载式充电机为动力电池充电, 一般功率较小(10 kW左右), 充电

时间较长, 因体积小、占地少, 可广泛地分布在城市的各个角落^[4]。

国家电网公司现行标准中明确规定交流充电桩的功能, 并未考虑到车载式充电机的谐波对电网的影响^[5]。随着交流充电桩的广泛应用, 车载充电机将会是新的谐波源, 影响着电网的电能质量和稳定性^[6], 谐波的存在也影响到交流充电桩计量系统的准确性和通信系统的稳定性^[7]。

目前对车载充电机谐波治理的研究成果还较少。文献[8]利用概率统计学大数定律和中心极限定理研究电动汽车充电站的谐波特性, 但需要足够大的充电机样本数据; 文献[9]利用建立了三相桥式不控整流充电机、脉波整流充电机、脉宽调制整流充电机的仿真模型充电站仿真模型, PWM整流桥构成的充电机控制复杂、成本高, 因此使用较少; 在

文献[10]中,不仅分析了充电站谐波电流特性,同时还提出了电动汽车充电站谐波的工程算法;文献[11]通过对比时域和频域模型,分析电动汽车充电产生的谐波;文献[12]通过建立不同充电场景,研究了电动汽车充电对电网负荷平衡带来的影响;文献[13]通过建立纯电动汽车高频充电机的一般等效模型的方法研究充电站谐波,但现阶段 PWM 整流桥充电机和不可控 12 脉波整流桥充电机使用都较少。

有源电力滤波器可以根据负载状况灵活调节补偿容量,能对谐波进行有效抑制,是解决供电系统电能质量的一个有效方法^[14]。电能计量装置是按 50/60 Hz 标准的正弦波设计,供电电压或负荷电流中的谐波成分会影响感应式电能表的正常工作。对于谐波源用户,其电能表的读数为负载消耗基波电能减去小部分谐波电能^[15],故负载电流含有谐波却反而少交电费;而线性负荷用户处电能表的读数是该负载消耗的基波电能再加上部分谐波电能,后者不但受用电设备性能变坏的影响,还要多交电费^[15]。因此,抑制谐波还可以减少谐波对电能计量与计费系统的影响,保证充电通信系统的稳定性。

本文针对充电桩谐波问题,对单台交流充电桩及多台交流充电桩的谐波进行仿真分析,搭建车载充电机的完整模型,并分析其谐波特点。依据其谐波特性,将有源滤波技术应用到交流充电桩中,减少充电桩向电网的谐波注入。

1 单相车载充电机的电路拓扑及谐波分析

1.1 单相高频车载充电机的结构图

车载充电机输入为单相 AC220V,其典型电路拓扑如图 1 所示。220 V 单相交流电首先经过单相不控整流桥,滤波后提供给高频功率变换器,功率变换器经过 DC-DC 变换^[16]输出需要的直流,再次滤波后为纯电动汽车充电。

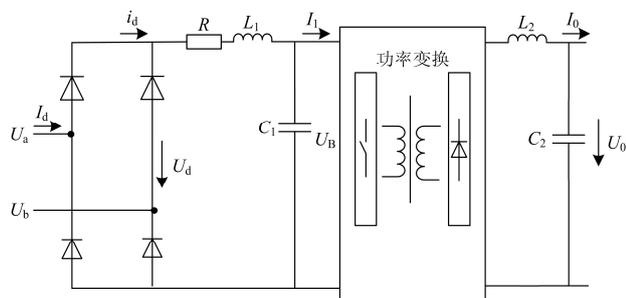


图 1 高频充电机的一般结构框图

Fig. 1 General structure diagram of high frequency charger

目前充电机主要采用两阶段充电法,第一阶段

是恒流充电(Constant Current charge, CC),第二阶段是恒压充电(Constant Voltage charge, CV)。充电开始阶段,电池的电动势和充电电压都较小,因而充电电流较大,必须控制充电电流使其保持在一个固定值左右。随着充电的时间延长,电池电动势和充电电压也不断增大,到电池允许的最大充电电压,即进入到恒压充电阶段,保持电池的充电电压不变,电池电动势仍然不断增大,电池的充电电流呈双曲线趋势不断下降,直至为零。如图 2 所示。

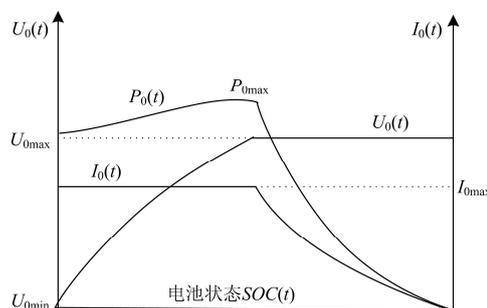


图 2 充电机充电参数典型曲线

Fig. 2 Typical curve of charging parameters of the charger

1.2 充电机的谐波分析

目前对于充电机的谐波分析,主要采用的是等效模型的方法^[10],如图 3 所示,对高频功率变换器建模采用等效模型,图中 e 为输入电压, R_c 为等效电阻, L 为滤波电感, C 为滤波电容, U_B 、 I_1 为经过 L 、 C 滤波后输出的电压、电流。设 P_1 为输入功率。电阻 R_c 的确定依据为

$$R_c = \frac{U_B}{I_1} = \frac{U_B^2}{P_1} \quad (1)$$

用 η 表示充电机的效率,在充电过程中变换不大,可将其视为常量,用 P_0 表示充电机的输出功率。则电阻 R_c 可表示为

$$R_c = \frac{\eta U_B^2}{P_0} = \frac{\eta U_B^2}{U_0 I_0} \quad (2)$$

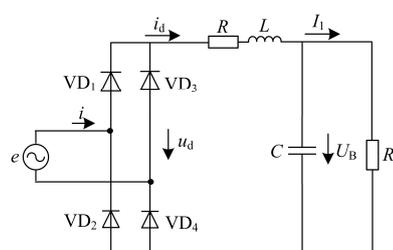


图 3 高频充电机等效模型

Fig. 3 Equivalent model of high frequency charger

由式(2)知,等效电阻 R_c 在工作过程中,随着功率的变化而发生变化。

忽略电网电压谐波, 设 $e = E_m \sin(\omega t + \theta)$ 。以二极管 VD_1 和 VD_4 开始导通的时刻为坐标原点, 则可得^[17]

$$i_d(\omega t) = \omega C E_m \left[y_1 \sin(\omega_d \omega t + \xi_1) e^{-\frac{\omega t}{\tau}} + y_2 \sin(\omega t + \xi_2) \right] \quad (3)$$

式中, $y_1 = A_1 / \omega \sqrt{LC}$; $y_2 = A_2 \sqrt{1 + 1/(\omega RC)^2}$; $\omega_d = \sqrt{1/(\omega \sqrt{RC})^2 - 1/(2\omega RC)^2}$; $\tau = 2\omega RC$ 。

网侧电流 i 的正半周与 i_d 相同, 而负半周与正半周镜像对称, 因此网侧电流仅含奇次谐波。由式(3)可知, i 的波形形状仅由 ωRC 和 $\omega \sqrt{LC}$ 决定, 而幅值与 $\omega C E_m$ 成正比。网侧电流 i 的表达式确定后, 对其进行傅氏分解, 可求得基波的有效值和初相角、各次谐波的有效值和电流总有效值的表达式^[17]。

一个充电周期内等效阻抗 R_c 是变化的, 所以负载电流的基波和各次谐波含量随之变化。在 Simulink 中搭建等效模型仿真, 图 4 为 5、7、11 次谐波幅值随充电时间变化曲线。

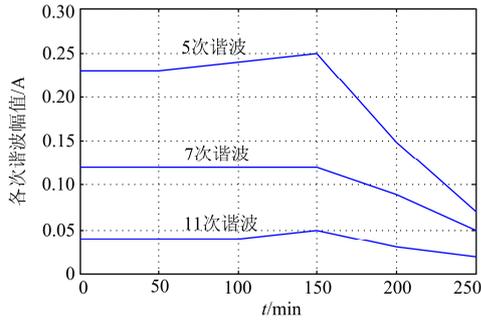


图 4 5、7、11 次谐波幅值变化曲线

Fig. 4 Changing curves of 5th, 7th, 11th harmonic amplitude

2 带有谐波补偿功能的单相车载充电器

2.1 带有谐波补偿功能的单相车载充电器模型

图 5 为带有谐波补偿功能的单相车载充电机的结构^[18], 图中忽略了支路的等效电阻^[19]。

L_1 、 L_2 表示支路的滤波电感, C_{dc} 表示直流母线电容, u_r 表示逆变器输出电压, 设直流侧电压为 V_{dc} , 得到单相并联型有源电力滤波器的数学模型为

$$\begin{cases} (L_1 + L_2) \frac{di_F}{dt} = u_r - u_s \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{dc} \end{cases} \quad (4)$$

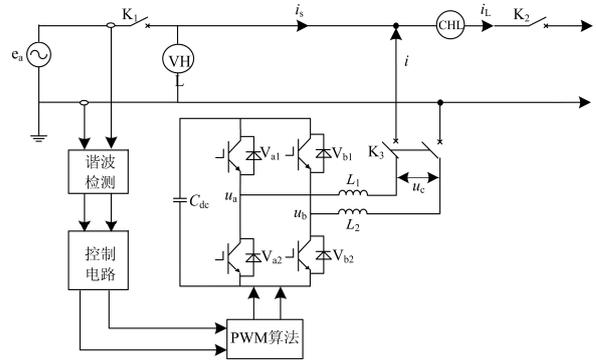


图 5 带有谐波补偿功能的单相车载充电器结构

Fig. 5 Structure of the single phase on-mounted charger with the function of harmonic compensation

设开关函数 S_i 的表达式为

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{上管导通下管关断} \\ 0 & \text{下管导通上管关断} \end{cases} \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

则有

$$u_r = (S_1 - S_2) \cdot V_{dc} \quad (6)$$

$$i_{dc} = (-S_1 + S_2) \cdot i_F \quad (7)$$

代入式(4), 整理可得

$$\begin{cases} (L_1 + L_2) \frac{di_F}{dt} = (S_1 - S_2) \cdot V_{dc} - u_s \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = (-S_1 + S_2) \cdot i_F \end{cases} \quad (8)$$

由数学模型可以看出, 输出电流 i_F 和直流侧电压 V_{dc} 是控制系统状态空间的两个状态变量, 对 S_1 、 S_2 进行控制可实现对输出电流和直流侧电压的控制, 从而实现直流侧电压的恒定和电流的谐波消除、无功补偿。

2.2 单相 APF 控制系统的设计

本系统采用双闭环控制, 在电压外环中, 对直流侧电压采用 PI 控制; 在电流内环中, 由于 PI 控制器对高频指令无法做到准确跟踪^[20], 根据内模原理, 要实现无静差跟踪和消除扰动影响控制环路内部必须包含外部输入信号的数学模型, 而 PI 控制器只含有常数和阶跃信号的 S 域模型, 只能对直流信号实现无静差跟踪。因此本文在 PI 控制的基础上加入重复控制(图 6), 实现补偿电流的跟踪控制。

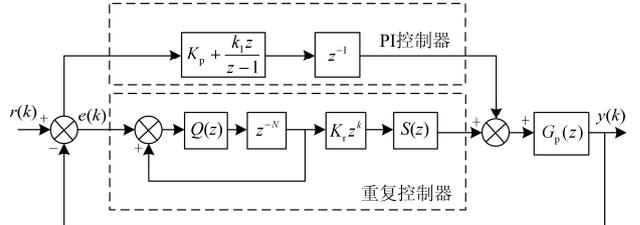


图 6 PI 控制+重复控制复合控制框图

Fig. 6 Control block diagram of PI+repetitive composite control

其中: $N=f_s/f_r$, f_s 为采样频率, f_r 为基波频率; K_r 为控制器增益, 可以调节稳定性与响应速度之间的矛盾; $S(z)$ 用来把控制对象中低频增益校正为 1, 使 K_r 的调整范围归一化^[21]; z^k 对被控对象控制延时进行补偿; 滤波器 $Q(z)$ 的选择将影响重复控制器的准确性和稳定性^[22]。 $Q(z)$ 的选取主要有两种: 1) 取接近于 1 的常数; 2) 如文献[22]中采用零相移 LPF, 表达式为

$$Q(z) = \frac{\sum_{i=0}^m \alpha_i z^i + \sum_{i=0}^m \alpha_i z^{-i}}{\alpha_0 + 2 \sum_{i=1}^m \alpha_i} \quad (9)$$

其中, α_0 、 α_i 为加权系数, 该滤波器的优点是不存在相移。本文重复控制中滤波器取 $Q(z)=(z^{-1}+2+z)/4$ 。

由图 6, 可得 PI+重复控制器的传递函数为

$$G(z) = (1 + z^{-1}D(z)G_p(z)) \left[z^N - \left(Q(z) - \frac{z^k K S(z) G_p(z)}{1 + z^{-1}D(z)G_p(z)} \right) \right] \quad (10)$$

其中, $D(z) = K_p + \frac{K_i z}{z-1}$ 为 PI 控制器的传递函数。

3 仿真验证

3.1 单台充电桩谐波分析

目前对于充电机的谐波分析普遍采用如图 3 的等效模型法。本文按照图 1 所示的高频充电机结构, 在 Matlab/Simulink 搭建充电机的整体模型, 仿真参数如表 1, 对充电机的不同充电阶段的谐波进行分析。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters	
参数	数值
输入电压有效值	220 V(RMS), 50 Hz
滤波电感 L_d	4 mH
滤波电容 C_d	3.3 μ F
滤波电感 L_0	1 mH
滤波电容 C_0	2.5 μ F
充电电压	250 V
充电电流	32 A
K_p	45
K_i	50
K_r	0.1

图 7 为整个充电阶段负载电流波形。在 0~0.8 s, 为恒流充电阶段; 在 0.8~1.8 s, 为恒压充电阶段。在恒流充电阶段, 负载电流逐渐增大达到峰值; 在恒压充电阶段负载电流趋于稳定。

在恒流充电阶段, 负载电流总畸变率(Total Harmonic Distortion, THD)不断变化, 在 0.8 s 时为 33.93%; 在恒压充电阶段, 电流总畸变率为 28.84%,

在恒压充电阶段负载电流的畸变率比恒流充电阶段小。负载电流中谐波主要为奇次谐波, 与理论分析一致。图 8 为恒流充电阶段负载电流波形及电流频谱图, 图 9 为恒压充电阶段负载电流波形及电流频谱图。

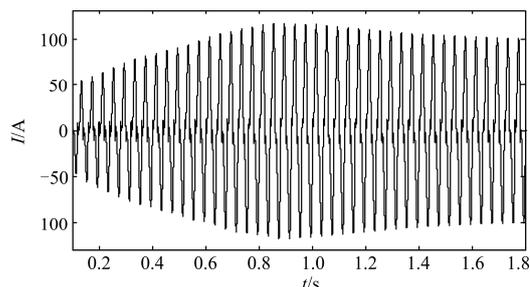
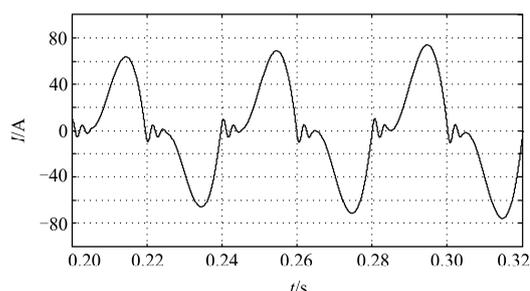
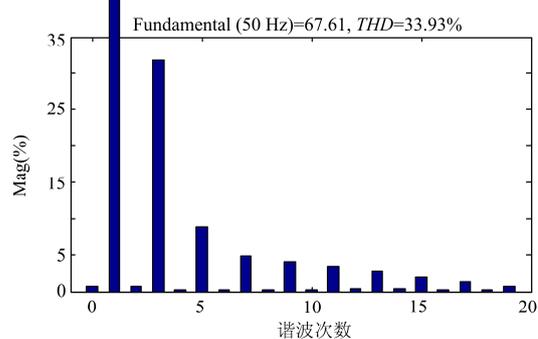


图 7 负载电流波形

Fig. 7 Waveform of load current



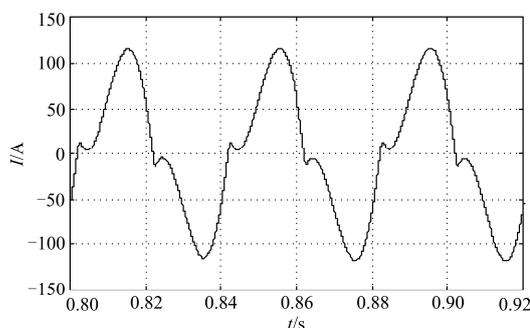
(a) 恒流充电阶段负载电流波形



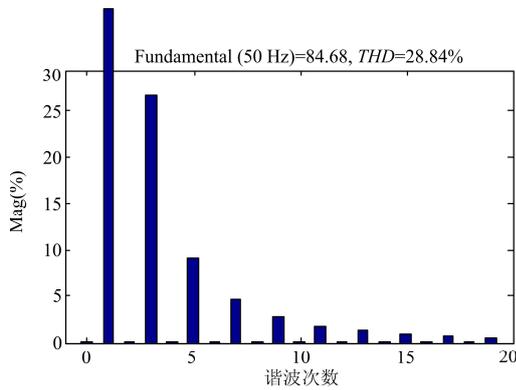
(b) 恒流充电阶段负载电流频谱图

图 8 恒流充电阶段负载电流波形及电流频谱图

Fig. 8 Waveform and spectrum of load current in constant current charging phase



(a) 恒压充电阶段负载电流波形



(b) 恒压充电阶段负载电流频谱图

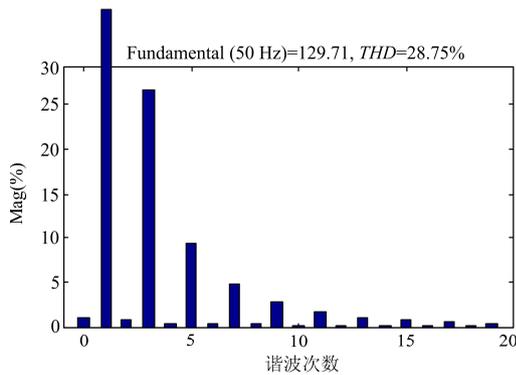
图 9 恒压充电阶段负载电流波形及电流频谱图

Fig. 9 Waveform and spectrum of load current in constant voltage charging phase

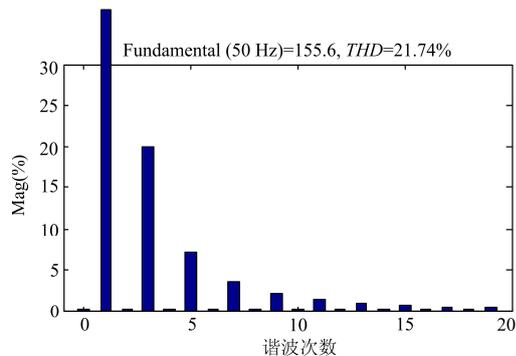
3.2 多台充电桩谐波分析

当多台充电机同时工作时，充电机输出功率发生变化时，输入电流的某一次谐波的幅值和相角都将发生变化，输出不同功率的充电机，其产生的同次谐波会发生相互抵消的现象，尤其是对于高次谐波，从而使得充电站的电流总谐波畸变率降低。

由图 10 可以得出，两台充电机同时工作时，



(a) 两台充电机恒流充电阶段负载电流频谱图



(b) 两台充电机恒压充电阶段负载电流频谱图

图 10 两台充电机恒流、恒压充电阶段负载电流频谱图

Fig. 10 Waveform and spectrum in constant current and constant voltage charging phases of two charging machines

负载电流 THD 比单台充电机工作时降低，恒流充电阶段负载电流 THD 由 33.93% 降为 28.75%；恒压充电阶段负载电流 THD 由 28.84% 降为 21.74%。

在充电机的台数分别为 1、2、3、5、7 时，搭建仿真模型，分析负载电流的谐波畸变率，如表 2 所示。随着充电机台数的增加，谐波畸变率逐渐降低。在刚开始充电时，充电机处于恒流充电阶段，负载电流不断增大，负载电流 THD 也逐渐增大，待负载电流达到峰值后负载电流 THD 也达到最大值。

表 2 补偿前谐波畸变率随充电机台数的变换

Table 2 THD rate with the change of charging machines

before compensation		
充电机台数	$THD_{max}(\%)$	$THD_{min}(\%)$
1	32.5	28.95
2	27.4	10.38
3	14.52	8.5
5	9.24	7.61
7	5.74	3.3

3.3 基于 PI+重复控制的 APF 补偿效果分析

根据单台充电机的仿真结果，负载电流谐波电流有效值的最大值为 26.6 A，由公式(11)可得：

$$S = uI_c = 220 \text{ V} \times 26.6 \text{ A} = 5.852 \text{ kVA} \quad (11)$$

考虑补偿电流的过载系数及电网电压的波动范围来估计 APF 的容量，所以本系统选择的 APF 的容量为 6 kVA。

在 Matlab/Simulink 中搭建了单相 APF 系统仿真模型进行分析。APF 主电路结构如图 5 所示，负载为单相交流充电机，表 3 为仿真参数。谐波检测环节采用 i_p-i_q 法^[17]，采用 SPWM 调制策略^[23]获取开关信号，补偿电流控制策略采用 PI+重复控制。

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

参数	数值
电网电压有效值	220 V(RMS), 50 Hz
直流侧电压	400 V
APF 进线电感	4 mH
进线电感等效电阻	0.1 Ω
负载进线电感	1 mH
采样频率	10 kHz
开关频率	10 kHz

图 11 给出了采用 PI+重复控制时，补偿电流跟踪波形图，图中，实线条 i_c^* 为谐波指令电流，虚线条 i_c 为补偿电流。仿真结果表明，所设计的 PI+重复控制器参数合理，较好地实现了补偿电流的跟踪控制。

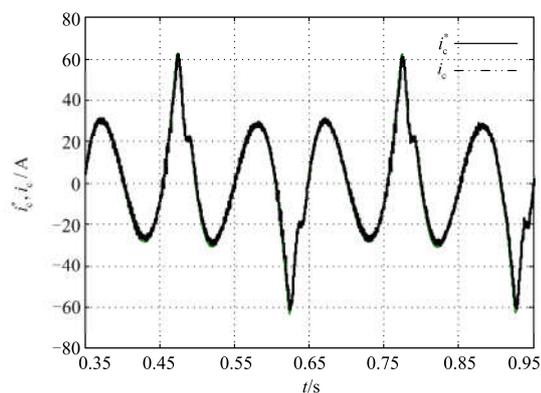
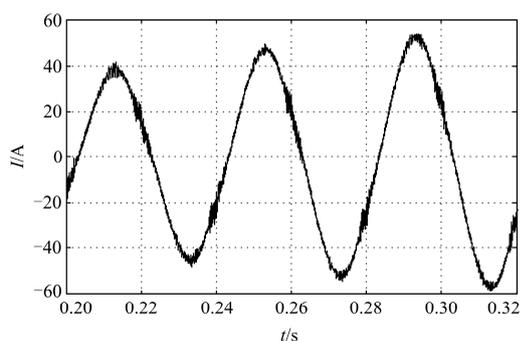


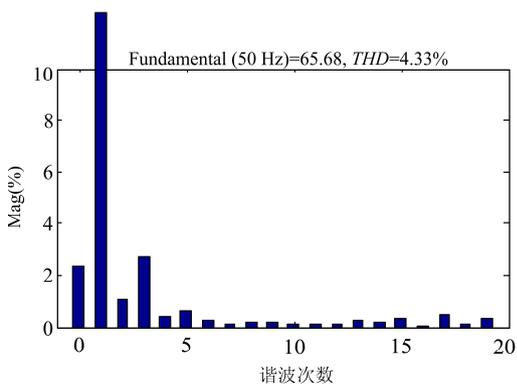
图 11 负载电流跟踪波形图

Fig. 11 Tracking waveform of the load current

单相充电机经 APF 补偿后电网电流波形及电网电流频谱图如图 12、图 13 所示, 恒流充电阶段和恒压充电阶段 THD 分别为 4.33%、2.74%。仿真结果表明所设置的 APF 能较好地补偿充电机产生的谐波, 参数设置合理, 补偿效果较好。

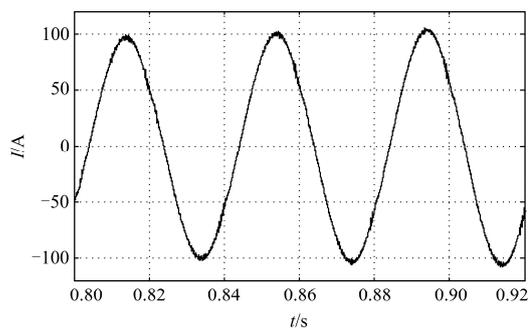


(a) 恒流充电阶段补偿后电网电流波形

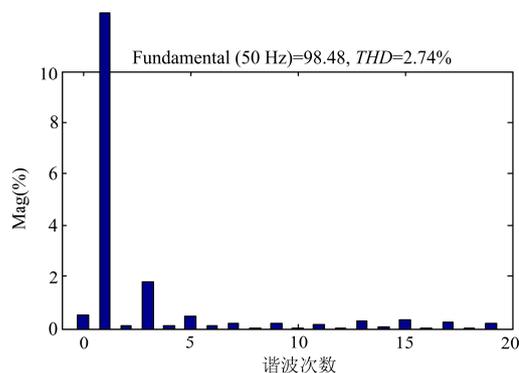


(b) 恒流充电阶段补偿后电网电流频谱图

图 12 单台恒流阶段补偿后电网电流波形及频谱图
Fig. 12 Waveform and spectrum of source current after compensation in constant current charging phases of one charging machine



(a) 恒压充电阶段补偿后电网电流波形



(b) 恒压充电阶段补偿后电网电流频谱图

图 13 单台恒压阶段补偿后电网电流波形及频谱图
Fig. 13 Waveform and spectrum of source current after compensation in constant voltage charging phases of one charging machine

3.4 多台充电桩谐波补偿

对多台充电桩同时运行时, 对其进行谐波补偿。两台充电机同时运行时, 补偿后的负载电流频谱图如图 14 和图 15 所示, 负载电流经补偿后的谐波畸变率分别为 3.02%和 1.52%, 由仿真结果表明补偿效果较好。

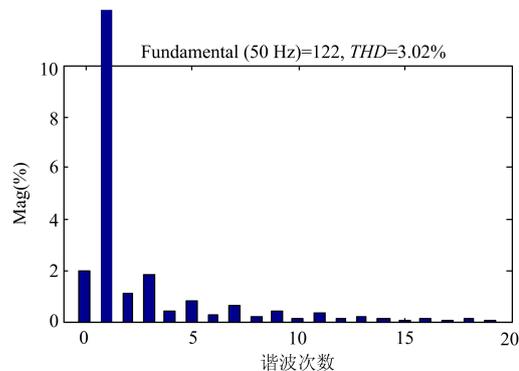


图 14 两台恒流阶段补偿后电网电流频谱图

Fig. 14 Spectrum of source current after compensation in constant current charging phases of two charging machines

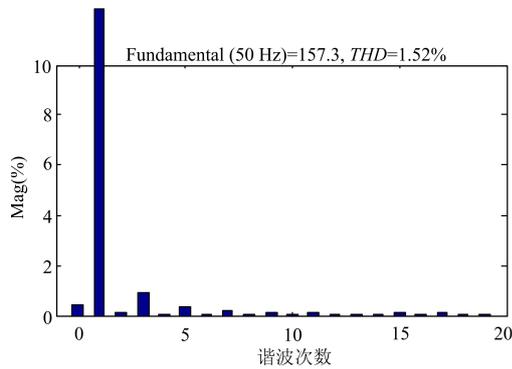


图 15 两台恒压阶段补偿后电网电流频谱图

Fig. 15 Spectrum of source current after compensation in constant voltage charging phases of two charging machines

对多台并联的充电机进行谐波补偿，其补偿后的效果如表 4 所示，补偿后的负载电流谐波畸变率均小于 5%。

表 4 谐波畸变率随充电机台数的变换

Table 4 THD rate with the change of charging machines after compensation

充电机台数	补偿后 $THD_{max}(\%)$	补偿后 $THD_{min}(\%)$
1	4.44	1.87
2	3.48	0.81
3	3.56	0.7
5	1.7	0.54
7	1	0.64

通过仿真验证，本文所设计的有源电力滤波器，可以较好地补偿谐波单相车载充电机产生的谐波，不仅可以提高电网电能质量，还可减少谐波对电能计量与计费系统的影响。

4 结论

本文针对单相交流充电机，搭建其仿真模型，分析其在不同的充电阶段谐波的特点；分析了单台及多台充电桩的谐波特点，并针对其谐波，设计了一种单相 APF 滤波装置。通过理论分析和仿真验证，得出以下结论：

1) 单相交流充电机的谐波主要为奇次谐波，在不同的充电阶段谐波的畸变率不同。在恒流充电阶段，负载电流逐渐增大，负载电流畸变率也逐渐增大；在恒压充电阶段，负载电流畸变率比恒流充电阶段大。

2) 多台充电机同时运行，谐波不是各次的累积，其产生的同次谐波会发生相互抵消的现象，尤其是对于高次谐波。

3) 本文设计的基于 PI 控制+重复控制的有源电

力滤波器，参数设计合理，可以较好地补偿谐波。

参考文献

- [1] 王璟, 王利利, 郭勇, 等. 计及电动汽车的微电网经济调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 111-117.
WANG Jing, WANG Lili, GUO Yong, et al. Microgrid economic dispatch method considering electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 111-117.
- [2] DHARMAKEERTHI C H, MITHULANANTHAN N, SAHA T K. Modeling and planning of EV fast charging station in power grid[J]. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2012, 59(5): 1-8.
- [3] KUPERMAN A, LEVY U, GOREN J, et al. Modeling and control of a 50 kW electric vehicle fast charger[C] // IEEE, 2010: 188-192.
- [4] 张允, 陆佳政, 李波. 利用有源滤波功能的新型电动汽车交流充电桩[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 150-156.
ZHANG Yun, LU Jiazheng, LI Bo. New electric vehicle AC charge spots using active power filter[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 150-156.
- [5] NB/T 33002-2010 电动汽车交流充电桩技术条件[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [6] 刘敏, 周晓霞, 陈慧春, 等. 采用三相不可控整流充电机的电动汽车充电站谐波放大效应分析与计算[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 36-43.
LIU Min, ZHOU Xiaoxia, CHEN Huichun, et al. Analysis and calculation on harmonic amplification effect of electric vehicle charging station using three-phase uncontrolled rectification charger[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 36-43.
- [7] ZHOU N, WANG J, WANG Q, et al. Measurement-based harmonic modeling of an electric vehicle charging station using a three-phase uncontrolled rectifier[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 6(3): 1332-1340.
- [8] 卢艳霞, 张秀敏, 蒲孝文. 电动汽车充电站谐波分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(3): 51-54.
LU Yanxia, ZHANG Xiumin, PU Xiaowen. Harmonic study of electric vehicle chargers[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(3): 51-54.
- [9] 李娜, 黄梅. 不同类型电动汽车充电机接入后电力系统的谐波分析[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 170-174.
LI Na, HUANG Mei. Analysis on harmonics caused by

- connecting different types of electric vehicle chargers with power network[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 170-174.
- [10] 黄梅, 黄少芳. 电动汽车充电桩谐波的工程计算方法[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 20-23.
HUANG Mei, HUANG Shaofang. A harmonic engineering calculation method for electric vehicle charging station[J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 20-23.
- [11] MEYER J, MULLER S, SCHEGNER P, et al. Comparison of methods for modeling electric vehicle chargers for harmonic studies[C] // Power Systems Computation Conference, 2016.
- [12] DENHOLM P. Evaluation of utility system impacts and benefits of optimally dispatched plug-in hybrid electric vehicles (revised)[C] // Related Information: Supercedes, July, 2006.
- [13] 牛利勇, 姜久春, 张维戈. 纯电动公交车充电桩谐波分析的模型方法[J]. 高技术通讯, 2008, 18(9): 953-958.
NIU Liyong, JIANG Jiuchun, ZHANG Weige. A simulation model for analysis of current harmonics generated by charging stations for electric buses[J]. High Technology Letters, 2008, 18(9): 953-958.
- [14] 周末, 王果, 常文寰, 等. 适于电气化铁路的三相两臂混合有源补偿研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 100-104.
ZHOU Mo, WANG Guo, CHANG Wenhuan, et al. Study on hybrid active compensation based on three-phase two-leg inverter for electrification railway[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 100-104.
- [15] 罗亚桥, 胡翀. 谐波对电能计量的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 130-132.
LUO Yaqiao, HU Chong. Analysis of harmonic effect on electric energy meter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 130-132.
- [16] RAHMAN M H, XU L, YAO L Z. Protection of large partitioned MTDC Networks Using DC-DC converters and circuit breakers two-leg inverter for electrification railway[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 1-9.
- [17] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [18] 李鹏, 蒋晓明, 黄俊华, 等. 并联型APF补偿容性非线性负载不稳定机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 55-60.
- LI Peng, JIANG Xiaoming, HUANG Junhua, et al. Instability mechanism study of shunt active filter in compensation of capacitive nonlinearity load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 55-60.
- [19] 吴敬兵, 罗安, 徐先勇, 等. MRAC方法及在单相并联APF中的应用[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 507-512.
WU Jingbing, LUO An, XU Xianyong, et al. MRAC method and its application to single phase shunt active power filter[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 507-512.
- [20] 乔鸣忠, 夏益辉, 梁京辉, 等. 基于重复-PI的复合控制应用于并联有源滤波器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 54-59.
QIAO Mingzhong, XIA Yihui, LIANG Jinghui, et al. Research on PI control based compound controller applying to shunt active filter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 54-59.
- [21] 张兴, 汪杨俊, 余畅舟, 等. 采用PI+重复控制的并网逆变器控制耦合机理及其抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5287-5295.
ZHANG Xing, WANG Yangjun, YU Changzhou, et al. Mechanism of the control coupling and suppression strategy using PI and repetitive control in grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5287-5295.
- [22] XU Mingxia, XU Dehong, LIN Ping, et al. Understanding repetitive control and resonant control[C] // 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2012: 621-627.
- [23] 宋文胜, 冯晓云. 一种单相三电平SVPWM调制与载波SPWM内在联系[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 131-138.
SONG Wensheng, FENG Xiaoyun. Relationship between single phase three-level SVPWM and carrier SPWM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 131-138.

收稿日期: 2016-10-31; 修回日期: 2016-12-26

作者简介:

周娟(1976-),女,博士,教授,从事电能质量控制、电力电子技术与应用的研究与教学工作; E-mail: zhjcumt@126.com

任国影(1992-),女,通信作者,硕士研究生,研究方向为电能质量控制。E-mail: guoyingren@163.com

(编辑 张爱琴)