

# 电动汽车充电系统的有源滤波方法研究

郭 鹏, 袁 榕, 张小辉

(国网江苏省电力公司如东县供电公司, 江苏 南通 226400)

**摘 要:** 随着电动汽车产业的发展, 其充电系统规模也日益庞大, 充电系统的非线性负载特性使得电网中存在大量的谐波, 消耗了大量的无功, 不利于节能减排和电网的稳定运行。有源电力滤波器被公认为是一种有效动态抑制谐波、动态补偿无功功率的新型电力电子装置。本文将从电动汽车充电系统谐波特性入手, 研究适合充电系统谐波补偿的拓扑结构、谐波检测算法并进行了仿真, 分析论证了方法的可行性和有效性。

**关键词:** 电动汽车充电系统, 谐波, 有源滤波, 滑窗积分

## 0 引言

随着电动汽车行业的飞速发展, 其充电系统规模日益庞大, 根据《电动汽车科技发展“十二五”专项规划》到 2015 年将在超过 20 个大中型城市及其周边区域建设超过 40 万个充电桩、2000 个以上的换电站网络来推动电动汽车的大规模商业化, 满足电动汽车能源供给需求<sup>[1]</sup>。考虑到电动汽车充电负荷的随机性, 注入电网的谐波也呈随机性变化, 且当前大部分充电站采用的是二极管整流, 随着无源非线性器件的使用, 电网中注入了大量谐波, 电压、电流波形严重畸变, 对电网的安全稳定造成很大隐患。随着充电系统规模的逐步扩大, 其产生的谐波不容忽视, 因此对电动汽车充电系统谐波进行有效治理, 不仅可以保证电网的稳定运行, 提高供电可靠性, 还能节能减排, 具有重要的经济效益和社会效益<sup>[2]</sup>。

## 1 电动汽车充电系统谐波特性分析

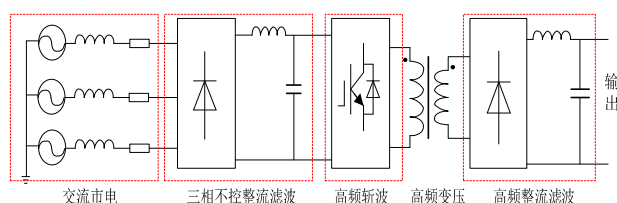


图 1 充电桩主电路拓扑结构图

一般情况下, 充电桩的主电路拓扑结构图如图 1 所示, 充电桩是三相交流市电经过三相不可控整流二极管整流, 将交流市电转换成 6 脉波的直流电

(AC/DC 变换), 经过 LC 平波滤波后, 输出较为平滑的直流电, 为了减小充电机的体积, 采用全桥电路将直流电斩波, 得到高频的交流方波, 然后经过电压器将该高频交流方波变压, 然后经过高频整流及滤波输出, 得到电动汽车车载电池所需要的电压。

一个充电站通常由多个充电桩组成并联接入到电网中, 由于充电桩均是采用的二极管不可控整流桥实现 AC 到 DC 的变换, 因此, 在电网侧会产生较大的谐波电流, 文献[3]推导出网侧电流的谐波含量主要为  $6k \pm 1 (k=1, 2, \dots, n)$  次谐波。谐波对电网的危害较大, 会在电路系统中产生额外的损耗、引起通信系统故障、机械振动和电力系统继电保护装置误动作, 供电网络越大, 其产生的危害也越大, 因此需要对其进行抑制。

## 2 有源滤波谐波治理

### 2.1 谐波治理策略

目前, 用以抑制谐波的策略大体上有两大类: 一是分流或抵消的方法, 包括无源电力滤波器 (Passive Power Filter-PPF) 和有源电力滤波器 (Active Power Filter-APF); 二是改造谐波源的方法, 即采用多重化技术或 PWM 变换技术提高整流器的功率因数, 使其尽量不产生谐波, 且电流和电压同相位。第二种方法对谐波抑制来说是一种积极的对策, 但对于电力系统大量存在的非线性负载, 其经济成本过高, 因此当前大多采用被动补偿的方

式来改善电网谐波。

## 2.2 APF 谐波治理原理

图 2 为并联型有源电力滤波器系统结构, 其中  $es$  表示电网电压, 负载为谐波源, 负载工作时产生谐波并消耗无功。该系统结构由主电路、驱动电路、谐波电流检测电路、电流跟踪控制电路组成<sup>[4]</sup>。其工作原理如下: 通过谐波检测算法对网侧电流进行谐波、无功指令电流的提取, 由电流跟踪控制电路对检测的指令电流跟踪控制, 通过 APF 产生一个相位完全与线网谐波电流相反且幅值相等的谐波电流, 使得 APF 接点前的电网电流接近正弦波, 降低谐波含量。与此同时, APF 的主电路 PWM 变流器根据补偿指令的变化时而工作在整流状态, 时而工作在逆变状态, 实现谐波补偿。

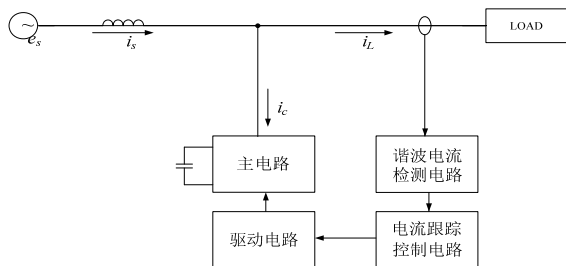


图 2 并联型有源滤波器系统结构

## 2.3 模块化 APF 谐波补偿

2002 年 Rainer Marquardt 提出可根据功率需求灵活配置模块数量的模块化多电平变流器<sup>[5]</sup>。该结构具有系统扩容方便、能缩短工程设计和加工周期、替代性强、便于系统维护、易于实现冗余控制和工作模式的特点。但模块内部任一电容电压都需独立控制, 控制系统复杂; 模块间的环流采用电感进行抑制, 若电感参数不一致, 系统中环流会增大开关器件的损耗。对于宽范围变化的负载, 变换器的效率会大打折扣。

针对电动汽车充电系统负载变化范围宽、容量变化范围大、波动频繁、大容量非线性的特点, 本文采用了将多个两电平 APF 进行并联的拓扑结构对电动汽车充电系统的谐波进行补偿, 由于两电平拓扑结构所能承受的直流侧电压的限制, 在高压大容量的使用场合, 需要通过变压器将 APF 接入到系统中, 这时, 谐波将会通过变压器注入到电网中, 实现电网谐波补偿, 该补偿装置具备较大的容量, 而且为了使得补偿设备具备较高的利用率, 便于控制的特点。

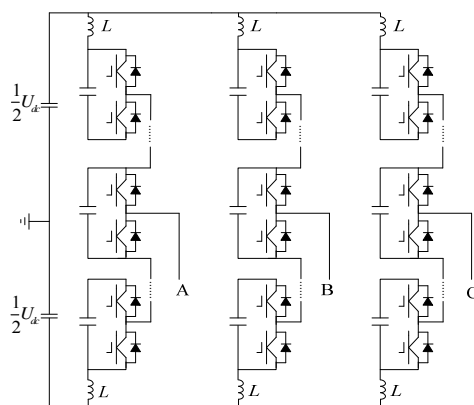


图 3 模块化多电平变流器

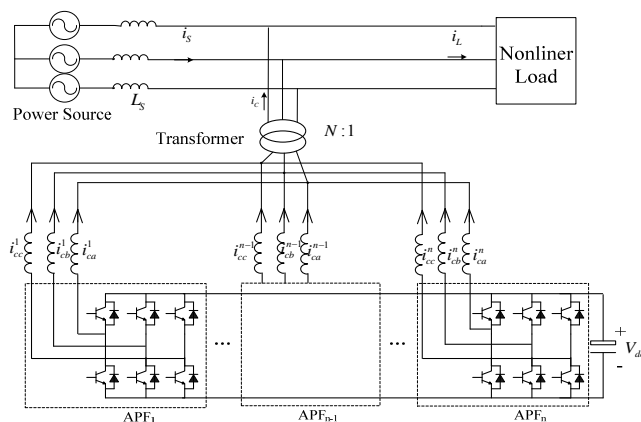


图 4 两电平多模块 APF 系统拓扑

和普通并联型 APF 的工作原理一样, 多两电平模块并联的变流器产生一个谐波电流, 用来抵消非线性负载的谐波电流即可, 不同的是, 由于负载容量变化范围宽, 当需要大容量输出时, 每个模块均分所需的谐波电流, 共同承担补偿工作; 当补偿容量较小时, 通过冗余控制, 选择  $N$  个模块中的其中几个模块满足补偿需求; 当所有模块的补偿能力不能满足补偿需求时, 每个模块按照最大的补偿能力输出。其基本补偿原理可由式 (1) 表示。

$$\begin{cases} i_L = i_s + i_c \\ i_L = i_{Lf} + i_{Lh} \\ i_c = i_{Lh} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_c^n \end{cases} \quad (1)$$

## 3 基于滑窗积分的谐波检测算法

对于任何一个正弦信号, 当其幅值、初相和频率确定后, 即可确定该信号, 在传统的 ip-iq 谐波检测算法基础上<sup>[6]</sup>, 本文提出了一种基于滑窗积分的谐波检测新方法。该算法通过构造负载电流中的基

波电流分量，来间接实现谐波指令电流的提取，其基本思路：由于负载电流中绝大部分分量是基波电路，通过对负载电流求取有效值，以此作为基波电流的幅值，同时利用锁相环获取基波电流相位，从而即可构造出基波电流。理论上，可以根据锁相环获取负载电流单位基波分量的相位或者线网电压的基波分量，分别来检测谐波电流指令或者谐波指令与无功电流指令之和，实现纯谐波补偿或者谐波与无功电流的同时补偿。通常情况下，电网中电压信号畸变程度远远要小于三相电流信号，几乎接近正弦。因此利用锁相环(PLL)获取电网电压的基波相位信息，可得到更加准确的相位信息，其检测原理如下图 5 所示。

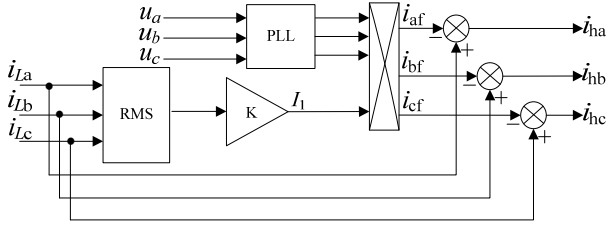


图 5 基于滑窗积分的谐波检测算法

利用 PLL 获取负载电流基波分量的单位正弦

信号  $i_{1f}$  为：

$$i_{1f} = \sqrt{2}(I_1 + I_e) \sin \omega t \quad (2)$$

获取的谐波电流指令信号  $i_h$  为：

$$i_h(t) = \sqrt{2} \sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} (-1)^k I_n \sin(n\omega t - \varphi_n) + \sqrt{2}(I_1 \cos \varphi_1 - I_1 - I_{error}) \sin \omega t - \sqrt{2} I_1 \sin \varphi_1 \cos \omega t \quad (3)$$

此时，不仅检测出了电网中的谐波电流，同时也检测出了电网中的基波无功电流，即可以实现网侧单位功率因数。

#### 4 仿真与分析

利用 Matlab/Simulink 建立了仿真模型，仿真参数的设置如表 1 所示，采用三相三线不可控整流桥整流，加 LC 滤波后带纯电阻作为非线性负载，0.2s 时突加负载。

表 1 仿真参数设置

参数	预设	参数	预设
$U_{ab}$	380 V	$C_{APF}$	2200 $\mu$ F
$U_{dc}$	750 V	采样周期	80us
$L$	1.5 mH	$f_s$	12.5 kHz
NonlinearLoad	4 $\Omega$	Load Varied	8/3 $\Omega$

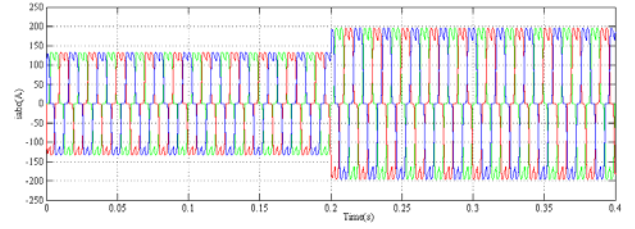
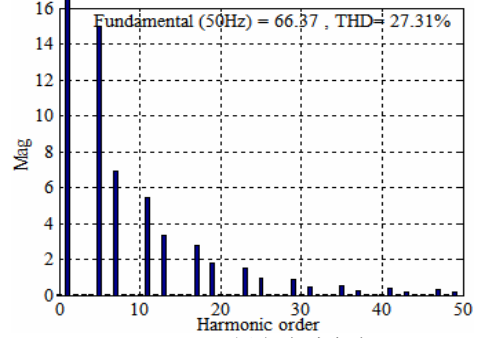
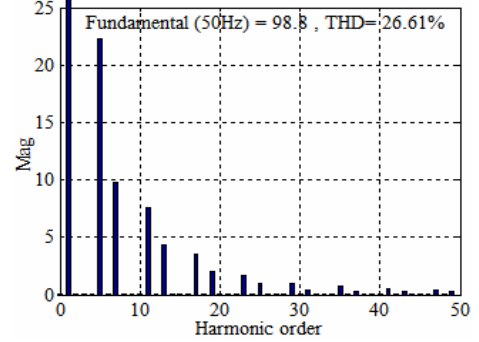


图 6 补偿前电网侧三相电流波形



(a) 0~0.2s 网侧电流畸变率



(b) 0.2~0.4s 网侧电流畸变率

图 7 补偿前 FFT 分析

由于传统 ip-iq 谐波检测法已被验证完全可行，可作为参照组来判定所采用模型和检测算法是否可行。

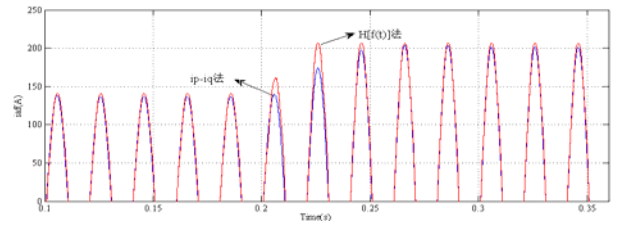


图 8 两种方法检测的基波电流

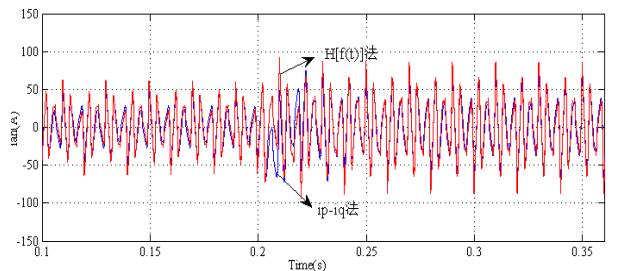


图 9 两种方法检测到的 A 相谐波电流

由图 8、图 9 仿真结果可得：所采用算法提取的基波电流波形基本上与 ip-iq 算法一致，算法的可行性得到验证；从响应速度来看，所采用的算法比传统 ip-iq 算法好，率先趋于稳定。

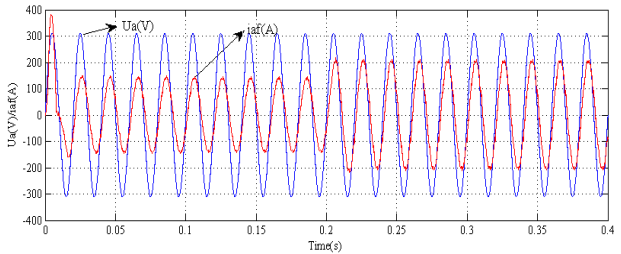
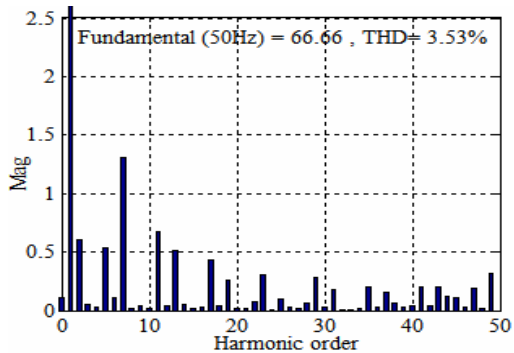
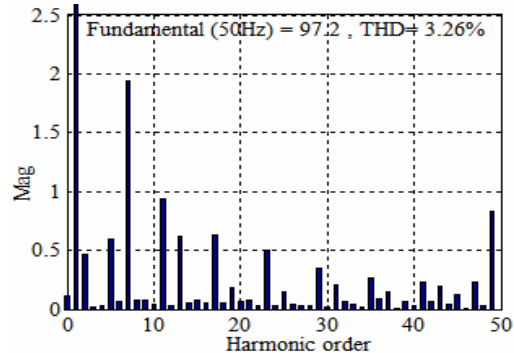


图 10 补偿谐波 A 相电流、A 相电压波形



(a) 0~0.2s



(b) 0.2s~0.4s

图 11 补偿谐波 A 相电流 FFT 分析

从图 10、图 11 可以看出，在采用基于滑窗积分的谐波检算法获得谐波指令信号后，经过补偿，网侧电流得到极大的改善，畸变率大幅降低。

## 5 结论

电动汽车充电桩交流侧的主要谐波为  $6k \pm 1$  次，非线性负载会消耗大量的无功功率，随着电动汽车产业的不断发展，若不对谐波加以治理，将会对电网的安全运行造成严重的威胁。本文对电动汽车充电系统谐波补偿的 APF 相关问题进行了研究，选择了两电平多模块 APF 作为补偿电网谐波的拓扑结构，并提出了基于滑窗积分的谐波检测方法，通过仿真分析证明有源滤波可以有效治理电动汽车充电系统的谐波问题。

### 参考文献：

- [1] W.R.M.《电动汽车科技发展“十二五”专项规划》发布[J]. 军民两用技术与产品,2012(05): 5.
- [2] M.De Nigris, I.Gianinoni,S.Grillo, S.Massucco,F.Silvestro. Impact Evaluation of Plug-in Electric Vehicles (PEV) on Electric Distribution Networks[C] //Harmonics and Quality of Power (ICHQP)' 2010 14th International Conference, 2010,Sept., Bergamo. IEEE: 2010:1-6.
- [3] 黄少芳. 电动汽车充电桩（站）谐波问题的研究[D]. 北京: 北京交通大学,2008.
- [4] 魏学良,程婷. 谐波治理设备在供电系统中的应用[J]. 国外电子测量技术,2015(01):80-83.
- [5] 郑丹. 并联型电力有源滤波器的谐波检算及控制策略研究[D].北京:北京交通大学,2008.
- [6] 鞠建永. 并联有源电力滤波器工程应用关键技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学,2009.

### 作者简介：

郭 鹏（1989-），男，江苏如东人，硕士研究生，助理工程师，现从事电压合格率和用电可靠性工作。