

电动汽车充电站滤波方案研究

环保性能好且能源效率高的电动汽车是未来汽车行业的发展趋势，而电动汽车充电站带来的谐波问题将影响配电网电能质量。首先分析了充电机的谐波产生机理及谐波特性，考虑到无源滤波方案成本低廉、易于推广，针对某充电机的实测谐波电流数据，详细分析了三种滤波方案，并开展仿真分析，为解决电动汽车充电站谐波抑制问题提供参考。

柳春芳 梁唐杰 梁辉平 陈安明/佛山电力设计院有限公司



柳春芳/高级工程师

能源与环境已成为当前全球最为关注的问题，环保性能好且能源效率高的电动汽车成为未来汽车行业的发展趋势^[1]。电动汽车充电站是电动汽车能源补给的基础设施^[2]，2009年以来，中国政府密集出台了鼓励电动汽车及相关行业发展的政策措施，企业对电动汽车的研发和产业化投入显著增强^[3]，很多省份已经开始规划建立电动汽车充电站。目前充电站运营带来的谐波问题已引起电网规划和运行管理人员的广泛关注^[4]。

文献[5-8]提出用有源电力滤波器（APF）来治理电动汽车充电机引起的谐波。APF是一种用于动态抑制谐波、补偿无功的新型电力电子装置，能够对大小和频率都变化的谐波以及变化的无功进行补偿。APF虽然可以动态治理谐波，滤波效果好，但是其容量小，不能大量补偿无功。文献[9]提出APF和SVC综合补偿系统来治理电动汽车充电站的电能质量，可以解决APF容量小的问题，但是技术难度大、成本高。

文献[10-11]采用无源滤波器解决充电站的谐波问题，依据实测的充电机谐波电流，选择一组5次和7次单调谐滤波器加一组高通滤波器来滤除谐波。无源滤波

器兼顾充电站谐波和无功补偿问题^[10]，其设计简单、成本低廉^[12]且容易推广。

本文首先分析了充电机的谐波产生机理及谐波特性，并依据无源滤波器设计原理，针对充电机的实测谐波电流数据，详细分析了三种滤波方案，建立基于ETAP软件的仿真分析，为电动汽车充电站采取谐波抑制措施提供参考。

充电机谐波特性

目前广泛使用的充电机^[13-16]是不控整流设备+高频变压器隔离DC/DC变换器，其中不控整流设备常采用6脉整流。这种充电机的优点为直流侧电压纹波小、高频隔离、动态响应快且体积小；缺点为电网侧电流谐波大、交换效率低。此类充电机的主要谐波特性如下。

1) 谐波次数主要为 $6A \pm 1$ ($A=1, 2, 3, \dots, N$)次，并且谐波次数越高，谐波幅值越小。

2) 在充电过程中，单台充电机在变压器一次侧产生的电流总谐波畸变率在27%~30%之间，一般维持在29.8%左右。

实际上，青岛薛家岛充电站就是使用的6脉冲不控整流+高频变压器隔离DC/DC变换器，充电机的实测电流谐波含量如表1所示，充电机谐波电流波形如图1所示。

表1 实测青岛薛家岛充电站充电机谐波电流含量

谐波次数/次	5	7	11	13	THD
实测谐波电流含有率(%)	25.1	11.9	9.2	5.1	31.0

本文将使用青岛薛家岛充电站充电机的谐波电流参数作为仿真时充电机产生的谐波电流。

关键词/Keywords

电动汽车充电站·
充电机·
谐波·
无源滤波器·

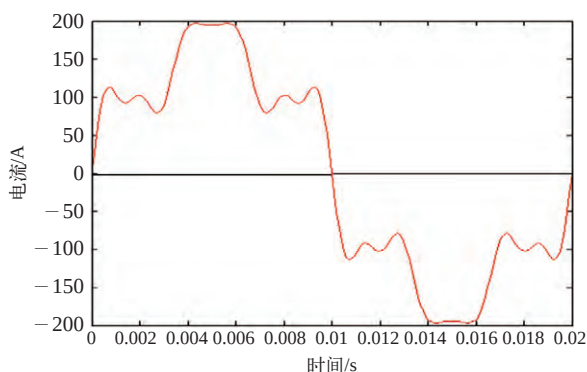


图1 青岛薛家岛充电桩充电机电流波形图

基于ETAP软件的充电桩建模

ETAP软件是电力电气分析、电能管理的综合分析软件系统,在ETAP中可以对电力系统进行潮流分析、谐波分析等操作。ETAP潮流分析计算母线电压、支路功率因数、电流和整个电力系统的潮流。ETAP谐波分析模拟不同电力系统设备的频率特性,计算指定母线和支路的谐波次数。

充电站由110 kV高压电网先经过110/10 kV变压器 T_1 ,再经过10/0.4 kV变压器 T_2 供电。充电机的谐波电流参照青岛薛家岛充电桩的实测充电机谐波电流含量,充电机的额定参数:输入交流额定功率120 kV·A,输入额定电压400 V,额定功率因数0.9,输出直流电压300~500 V,最大输出电流200 A,最大输出功率100 kW。基于ETAP软件的充电站模型及仿真分析如图2所示。

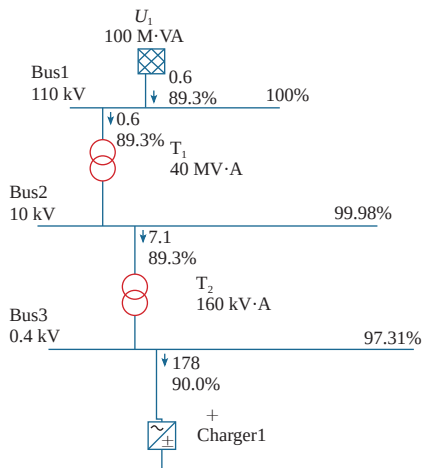


图2 充电桩ETAP模型

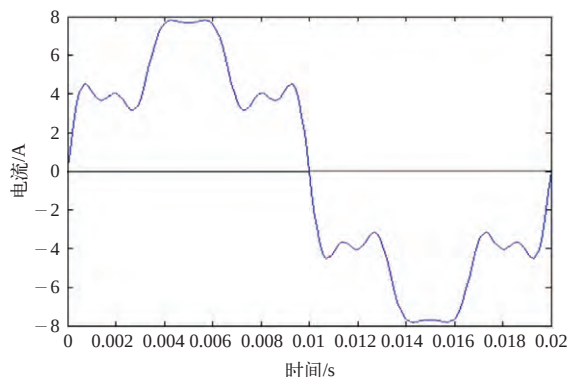
根据潮流分析结果可知,10 kV母线侧功率因

数为0.893,不满足功率因数指标要求。

开展谐波分析,得到变压器 T_2 高压侧的谐波电流含量如表2所示,变压器 T_2 高压侧的谐波电流波形如图3所示。

表2 变压器 T_2 谐波电流含量

谐波次数/次	5	7	11	13
谐波电流与基波电流的比例 (%)	24.5	12.5	8.7	5

图3 变压器 T_2 谐波电流波形图

滤波方案设计

为抑制谐波水平满足国标限值标准,本文讨论无源滤波方案设计^[17-18]。考虑到无源滤波器的无功补偿作用,首先计算出系统需要补偿的总无功容量,然后再按照一定的原则分配到设计的各调谐支路及高通滤波支路上,最后根据无源滤波器的无功补偿容量与支路参数的关系计算出相应的电容、电感,再结合滤波器的品质因数便可以计算出各支路电阻值。

变压器 T_2 高压侧功率因数为0.893,不满足功率因数指标要求。考虑将充电站专线变压器进线端功率因数从0.89提高到0.97以上。假设计算滤波器参数时使用的无功补偿容量为 Q_C ,则实际无源滤波器的无功补偿容量为

$$Q_{\text{Filter}} = \frac{V^2}{X_C - X_L} = \frac{n^2}{n^2 - 1} Q_C < Q_C \quad (1)$$

因此,实际无源滤波器为电网带来的无功补偿 Q_{Filter} 将小于计算滤波器参数时使用的无功补偿容量 Q_C 。故将 Q_C 设计为将变压器进线端功率因数从0.89提高到0.98时所需要的无功补偿容量,即30.37 kvar。

1. 方案一

为全面消除实测结果中的高次谐波,设计5次、7次、11次和13次单调谐滤波器。

按照无功功率分配原则

$$Q_n = \frac{I_n / n}{\sum_{n=2}^{\infty} I_n / n} Q_C \quad (2)$$

计算各次谐波的补偿容量,如下

$$Q_5 = \frac{I_5 / 5}{\sum_{n=5}^{13} I_n / n} Q_C = 19.18 \text{ kvar} \quad (3)$$

同理可求得

$$Q_7 = \frac{I_7 / 7}{\sum_{n=5}^{13} I_n / n} Q_C = 6.49 \text{ kvar} \quad (4)$$

$$Q_{11} = \frac{I_{11} / 11}{\sum_{n=5}^{13} I_n / n} Q_C = 3.2 \text{ kvar} \quad (5)$$

$$Q_{13} = \frac{I_{13} / 13}{\sum_{n=5}^{13} I_n / n} Q_C = 1.5 \text{ kvar} \quad (6)$$

对5次单调谐电路

$$X_C = \frac{kV^2}{Q_5} = 8.34 \Omega \quad (k \text{取} 1) \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{X_C \omega} = 381.6 \mu\text{F} \quad (8)$$

$$L = \frac{1}{n^2 \omega^2 C} = 1.06 \text{ mH} \quad (9)$$

$$R = \frac{X_n}{Q} = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{L}{C}} = 0.0017 \Omega \quad (\text{取} Q = 100 \text{ kV} \cdot \text{A}) \quad (10)$$

同理,可计算出7次、11次和13次单调谐滤波器的各元件参数如表3所示。

表3 方案一滤波支路参数

滤波支路	5次	7次	11次	13次
Q_n/kvar	19.18	6.49	3.2	1.5
$C/\mu\text{F}$	381.6	129.1	63.66	29.84
L/mH	1.06	1.60	1.32	2.01
R/Ω	0.0017	0.0035	0.0046	0.0082

2. 方案二

方案一滤波支路过多,考虑到变电站的5次、7次和11次谐波含量都在9%以上,13次谐波含量为5.1%,因此方案二中,仅使用5次、7次和11次单调谐滤波器支路以简化滤波器结构。

5次、7次单调谐滤波器的各元件参数与方案一相同,而11次单调谐滤波器无功容量补偿变为 $Q_{11} = (3.2 + 1.5) \text{ kvar} = 4.7 \text{ kvar}$ 。

同理,按照方案一的方法计算出11次单调谐滤波器的参数。方案二滤波支路参数如表4所示。

表4 方案二滤波支路参数

滤波支路	5次	7次	11次
Q_n/kvar	19.18	6.49	4.7
$C/\mu\text{F}$	381.6	129.1	93.51
L/mH	1.06	1.60	0.90
R/Ω	0.0017	0.0035	0.003

3. 方案三

为进一步简化滤波器结构,方案三设计5次单调谐滤波器支路和7次高通滤波器支路并联。

5次单调谐滤波器的各元件参数与方案一相同,而7次高通滤波器无功容量补偿为 $Q_7 = (6.49 + 3.2 + 1.5) \text{ kvar} = 11.19 \text{ kvar}$ 。

7次高通滤波器参数设计过程如下

$$X_C = \frac{kV^2}{Q_7} = 14.30 \Omega \quad (k \text{取} 1) \quad (11)$$

$$C = \frac{1}{X_C \omega} = 222.6 \mu\text{F} \quad (12)$$

$$L = \frac{1}{n^2 \omega^2 C} = 0.93 \text{ mH} \quad (13)$$

$$R = QX_n = Q \sqrt{\frac{L}{C}} = 2.044 \Omega \quad (\text{取} Q = 1) \quad (14)$$

方案三滤波支路参数如表5所示。

表5 方案三滤波支路参数

滤波支路	5次	7次
Q_n/kvar	19.18	11.19
$C/\mu\text{F}$	381.6	222.6
L/mH	1.06	0.93
R/Ω	0.0017	2.044

基于ETAP软件的滤波效果分析

将三种无源滤波器设计方案依次接入图2的0.4 kV母线侧，针对滤波器接入后的功率因数、谐波电流、谐波电压和总谐波畸变率等指标，讨论三种设计方案各自的特点。

1. 功率因数

根据ETAP潮流分析结果，三个方案均将10 kV母线侧的功率因数从0.893提高到了0.975。因此，三个方案均满足对无功容量补偿的设计要求。

2. 谐波电流

根据ETAP谐波分析结果，加入滤波器之后变压器T₂高压侧的谐波电流含量与加入滤波器之前对比，如表6所示。

表6 变压器T₂谐波电流含量

方案	谐波电流与基波电流的比例 (%)				谐波电流畸变率 (%)
	5次	7次	11次	13次	
滤波前	24.5	12.5	8.7	5	29.28
方案一	0.6	0.3	0.12	0.08	0.69
方案二	0.6	0.3	0.1	2.7	2.78
方案三	0.6	11.0	7.0	3.6	13.54

根据谐波电流含量，加入滤波器之后变压器T₂谐波电流波形图与加入滤波器之前对比如图4所示。

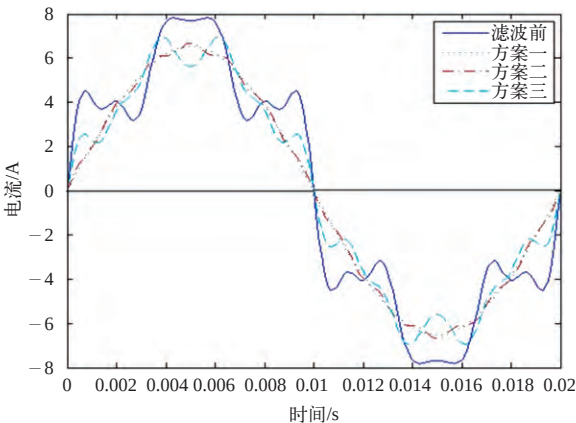


图4 变压器T₂谐波电流波形图

加入滤波器之后，三个方案的谐波电流频谱图与未开展滤波对比如图5所示。

由于方案一的设计全面考虑实测的谐波电流成分，达到最好的谐波电流抑制效果。

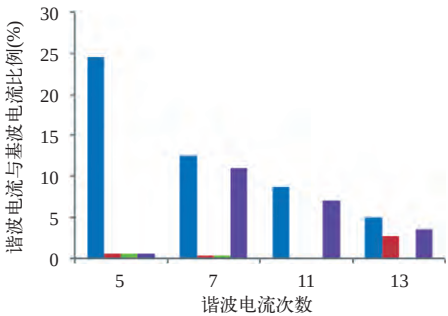


图5 变压器T₂谐波电流频谱图

3. 谐波电压

根据ETAP谐波分析得到，加入滤波器后，三种方案的0.4 kV母线处电压畸变与加入滤波器之前对比，如表7所示。

表7 0.4 kV母线电压畸变

方案	谐波电流与基波电流的比例 (%)				谐波电流畸变率 (%)
	5次	7次	11次	13次	
滤波前	4.2	3.0	4.6	3.4	7.705
方案一	0.094	0.074	0.062	0.054	0.145
方案二	0.094	0.074	0.05	1.7	1.705
方案三	0.09	2.5	3.4	2.2	4.760

三种方案接入后，0.4 kV母线侧谐波电压畸变率均小于5%的国标要求。

4. 有功功率损耗

根据ETAP潮流分析的结果，计算得到三个方案有功功率损耗的结果如表8所示。

表8 有功功率损耗

方案	有功功率损耗/W
方案一	1.804
方案二	1.805
方案三	524.6

方案三虽然结构简单可以节约投资，但是投入运行后滤波器的发热损耗较高。

结束语

本文根据实测的青岛薛家岛充电桩的谐波数据，设计了三种基于无功功率补偿法的无源滤波器组合方案，通过对三种方案的仿真分析，得出如下结论。

1) 三种滤波器设计方案都能很好兼顾充电桩

的无功补偿容量要求。

2) 方案一设计四条单调谐滤波支路, 虽然滤波效果从理论上针对性最好, 但投资成本高, 维护困难。

3) 方案二考虑到滤波器结构简化, 只针对谐波含量高的成分设计滤波支路, 针对本文的实测数据, 滤波效果较好。

4) 方案三只有两条滤波支路, 投资成本最低, 最方便管理。同时, 在配电网中还含有其他高次谐波的情况下, 本方案的优势更加明显。

参考文献

- [1] 阮辉平. 中国电动汽车产业发展研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
- [2] 辛华. 低碳经济与电动汽车发展: 趋势与对策 [J]. 开放导报, 2009 (5): 31-35.
- [3] 辛凤影, 王海博. 电动汽车发展现状与商业化前景分析 [J]. 国际石油经济, 2010 (7): 20-24, 93-94.
- [4] 陈清泉, 孙逢春, 祝嘉光. 现代电动汽车技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002: 2-16.
- [5] 杜学龙, 刘志珍, 王建, 等. 电动汽车充电站谐波抑制方法的对比分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2012 (19): 139-143, 149.
- [6] 张秉良, 孙玉田, 李建祥, 等. 电动汽车充/换电设施的谐波特性及治理措施 [J]. 低压电器, 2012 (15): 44-49.
- [7] 徐挺挺. 电动汽车充电站的谐波治理 [J]. 上海电力, 2011 (3): 272-274.
- [8] 尹春杰, 张倩, 刘振, 等. 电动汽车充电站供电

系统无功补偿与谐波治理 [J]. 电力电子技术, 2011 (12): 63-65.

- [9] 薛红录, 吴青峰, 党存禄. 电动汽车充电站的谐波治理与无功补偿 [J]. 低压电器, 2013 (20): 52-55, 61.
- [10] 周正杰. 电动汽车充电站的谐波抑制方法研究 [J]. 沿海企业与科技, 2011 (10): 36-39.
- [11] 李均强, 高亚静, 赖一峰. 电动汽车充电站及谐波治理仿真研究 [J]. 江西电力职业技术学院学报, 2011 (4): 5-11.
- [12] 毕向阳, 朱凌. 无源滤波器的设计及仿真研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2008 (5): 22-25, 53.
- [13] 朱世盘, 刘峰, 李从洋. 电动汽车对城市配电网的影响和谐波分析 [J]. 华东电力, 2012, 40 (5): 836-839.
- [14] 陈新琪, 李鹏, 胡文堂, 等. 电动汽车充电站对电网谐波的影响分析 [J]. 中国电力, 2008 (9): 31-36.
- [15] 杜学龙. 电动汽车充电站谐波特性及抑制 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [16] 黄梅, 黄少芳, 姜久春. 电动汽车充电机 (站) 接入电力系统的谐波分析 [J]. 北京交通大学学报, 2008, 32 (5): 85-88.
- [17] 韩其国, 陈林, 章坚民. 基于实测谐波数据的无源滤波器设计及仿真 [J]. 机电工程, 2010 (9): 92-95.
- [18] 刘建戈, 李晓凤. 低压无源滤波器的设计 and 应用 [J]. 电气应用, 2006 (11): 67-70.

(收稿日期: 2014-07-18) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告