

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.06.026

电动汽车充电站谐波治理的仿真研究*

王新成,张有兵*,郑 谔,杨光豪
(浙江工业大学 信息工程学院,浙江 杭州 310023)

摘要: 针对电动汽车充电站所引起的谐波电流等电能质量问题,利用等效电阻的方法模拟研究了充电机的工作电流特性。在此基础上,建模了一个小区充电站,仿真分析了该充电站的谐波电流的特点,以及在最小等效电阻时所可达到的最大谐波电流。采用改变仿真时等效电阻值的方法,研究了电动汽车的撤出与接入所引起的谐波含量的突变特性。简单介绍了LC滤波器以及有源滤波器的工作原理,并设计了相应的滤波器参数。利用Simulink来仿真两者在充电站中的滤波实验,并观察对比了两者的滤波效果。研究表明,LC滤波器具备一定的滤波能力,相对来说,有源滤波器的滤波效果更好。同时针对谐波电流的突变特性,有源滤波器也有着不错的跟踪治理性能,这为电动汽车充电站的建设提供了一定的指导作用。

关键词: 电动汽车; 充电站; 谐波电流; LC滤波器; 有源滤波器; Simulink; 仿真

中图分类号: TP732; TM46 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)06-0746-04

Simulation on harmonic elimination of electric vehicle charging station

WANG Xin-cheng, ZHANG You-bing, ZHENG Xu, YANG Guang-hao
(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at solving the problems of harmonic currents generated by electric vehicle(EV) charging station, the characteristic of working current of the electric vehicle was studied, simulating the EV as an equivalent resistor. Based on this, a small EV charging station was simulated in a community to study the characteristic of the station's harmonic current. The largest harmonic was gotten during the simulation as the equivalent resistor was taken the minimum value. Meanwhile, harmonic variability was analyzed when the EV comes to charging or leave, by the way of changing the resistor's value. After that, LC power filter and active power filter(APF) were introduced and designed to compare the filtering effects. The experimental results indicate that APF has the better effect than the LC filter, and good tracking performance as the resistor's value changes suddenly. The conclusion can be a guiding suggestion for the construction of the future charging station.

Key words: electric vehicle(EV); charging station; harmonic current; LC power filter; active power filter(APF); Simulink; simulation

0 引 言

能源与环境的限制使电动汽车成为未来汽车工业的发展趋势^[1-2]。国家的《节能与新能源汽车产业发展规划(2012-2020年)》中,也提出在2020年前后电动汽车将成为市场的主导。电动汽车的推广必然伴随着充电站的普及,而充电站中的非线性负载一充电机会产生大量的谐波,污染电网^[3-5]。随着充电站的不

断建设,这种危害会越来越大,所以有必要对充电站产生的谐波进行研究与治理。

国内外已有大量的文章来研究电动汽车充电站的谐波问题。相关文献[6-8]对充电机进行了等效处理,并在此基础上对充电站进行仿真与计算谐波。有文献^[9-10]在考虑了电池充电时间以及电池初始充电状态(SOC)随机性的情况下,试图通过中心极限定理和蒙特卡罗方法来计算充电站所产生的谐波。目前关

收稿日期: 2012-10-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51207139);浙江省自然科学基金重点资助项目(Z1110893);浙江省自然科学基金资助项目(2011XZ003)

作者简介: 王新成(1986-),男,浙江杭州人,主要从事电能质量治理方面的研究。E-mail: kevin-new@163.com

通信联系人: 张有兵,男,教授,硕士生导师。E-mail: youbingzhang@zjut.edu.cn

于充电站谐波产生的研究已比较充分,但是研究如何去治理谐波的文献还是比较少。一般可采用的措施如下^[11]:增大充电机的滤波电感;增大整流装置的脉冲数;加装滤波装置。

本研究着重研究通过滤波器^[12-13](包括无源滤波器与有源滤波器(APF))来去除充电站所产生的谐波。考察不同情况下的充电站谐波特性,比较两种滤波器的滤波效果,可以发现无源滤波器可以实现更好的处理效果以及跟踪性能。

1 电动汽车充电机的谐波特性

1.1 充电机的充电特性

目前市场上使用的大功率高频充电机如图1所示。三相电源通过二极管组成的整流桥,并通过由电容电阻组成的滤波电路以及DC-DC功率变换器形成直流输入,给电动汽车充电。

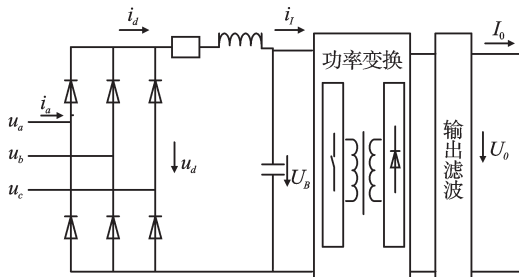


图1 大功率充电机的结构图

相对于工频周期来说,充电时间就显得很长。在一个至几个周期内,都可以认为充电机的输出电流和输出电压是恒定的直流。因此在低频范围内,可以用一个非线性电阻 R_c 来近似模拟高频率变换电路的等效输入阻抗^[14]。电阻的表达式^[15]为:

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

很显然,充电时,输出电压保持恒定,电阻 R_c 与输出功率 P_o 成反比。在整个充电过程中,等效电阻随输出功率的变化而发生变化。

1.2 充电机谐波仿真

由以上的分析可知,在研究充电机时可以进行等效处理,将功率变换器转换成一个可变电阻。这样通过Simulink仿真来研究充电站所产生的谐波,单台充电机的仿真模型如图2所示。它由整流桥、电感 L 、电容 C 以及可变电阻 R 所组成,结构简单,但可以比较好地模拟充电机。而时变电抗 R 的处理成了仿真的关键与难点。为此本研究对电阻处理问题采用了离散化思想,假设整个充电时间为270 min,这样可以在仿真时,每10 min取一个值,如此便可得到27个电阻 R 的值。根据每个电阻值仿真所得的谐波含量,就可以得

到每个时间点所对应的充电机所产生的谐波的特性。

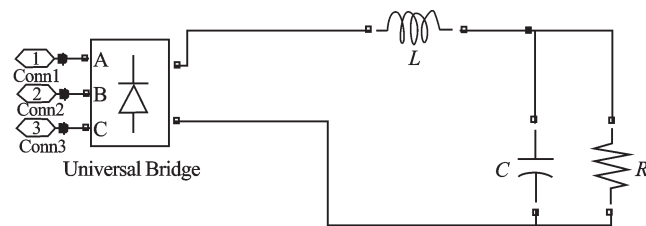


图2 充电机仿真模型

整个充电过程中,等效电阻连续变化,笔者求出每个点的谐波含量,进而描绘出整个充电过程中谐波电流的变化曲线如图3所示,其中设充电机的充电参数为 $L=1.5\text{ mH}$, $C=2\ 115\ \mu\text{F}$, $\eta=90\%$ 。单台充电时各次谐波电流的变化曲线如图3所示。由图3可知,谐波电流的变化是与电阻成反比的,所以当电阻最小时,各次谐波电流达到最大值。其中主要的谐波电流为5次与7次,其他奇次谐波含量还有11次与13次,主要是 $6K \pm 1$ 次谐波, $K=1,2,3 \dots$ 。

如图3所示,整个充电周期中电动机所产生的谐波是时变的。总的来说,各次谐波先是逐渐变大,大约在150 min时到达最大值,然后又逐渐变小。

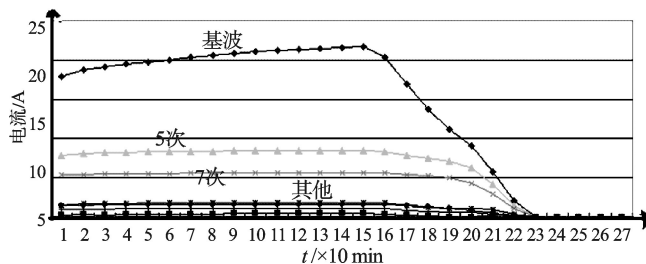


图3 单台充电时各次谐波电流的变化曲线

2 某小区充电站谐波仿真

2.1 小区充电站建模

假设某小区的电动汽车充电站由9台功率为15 kW的充电机组成。它需要的配电容量为 S_c ,即全部用电设备的用电负荷, S_c 计算方法如下:

$$S_c = S_1 + S_2 \quad (2)$$

式中: S_1 —动力用电负荷, S_2 —照明以及其他日常用电负荷。

根据经验, S_1 的估算式为:

$$S_1 = K \frac{NP}{\eta \cos \varphi} \quad (3)$$

式中: N —充电机数量,取9台; P —充电机最大输出功率,在此取15 kW; η —充电机的充电效率,取0.9; $\cos \varphi$ —充电机的功率因数,取0.85; K —充电机的同时系数,取0.7。

通过计算可知,这个充电站的动力电量为

123.5 kW。同时,假设小区的照明及其他日常用电负荷为20 kW。这样整个充电站的用电负荷为143.5 kW。在选取变压器时还要考虑留有余量,所以变压器的容量可取200 kW。变压器高压侧进线是10 kV,低压侧为400 V。小区充电站的示意图如图4所示,它由三相电源、变压器以及若干并联的充电机组成。

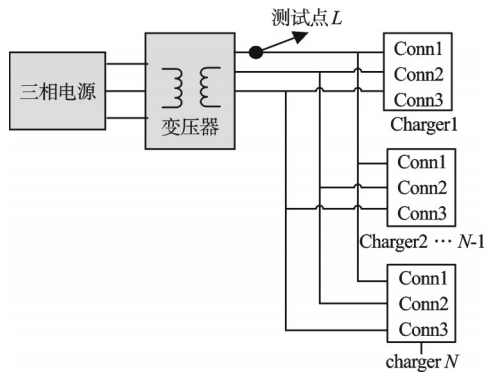


图4 小区充电站的示意图

2.2 小区充电站最大谐波含量仿真

从充电机扩展到充电站,需要注意的是充电站的谐波并非各个充电机谐波电流的简单叠加,其中的同次谐波会发生相互抵消的现象,从而使充电站的总谐波电流降低。为了仿真整个充电站工作时的最大谐波电流,一种可行的处理方式就是将所有充电机并联且同时开始工作。这样在电阻最小时(大约充电时间是150 min时),整个充电站的谐波电流会达到最大。显然在设计充电站时,考虑谐波治理的情况,滤波器的参数选择应满足此时的情况。

本研究在 Matlab/Simulink 环境下搭建充电站的仿真模型。已知充电机的谐波电流大小与等效电阻成反比,为了计算充电站的最大谐波,取等效电阻的最小值,即 26.59Ω 。经过仿真可以得到图4中测试点L处电流的波形图如图5(a)所示,由于负载是对称的,只考察一相即可。各次谐波电流的具体值如表1所示。

表1 A相各次谐波电流

名称	5次	7次	11次	13次	17次
有效值	33.2	10.6	6.6	4.5	2.1
含量/(%)	24.48	7.83	4.86	3.35	1.55

充电站谐波情况与单台充电机类似如表1所示,谐波含量主要集中在5次与7次,而其他次的谐波比较少,甚至可以忽略不计。这个时候考察的谐波是某一个时刻谐波含量状态,同时也是最大的谐波含量。最大谐波含量的求取,给定了整个充电站电流畸变的界限,这为充电站谐波治理的设计提供了一个依据。

2.3 小区充电站谐波含量突变性的仿真

在一个充电周期中,充电站所产生的谐波含量是时变的。导致谐波含量不断变化的原因是充电机输出

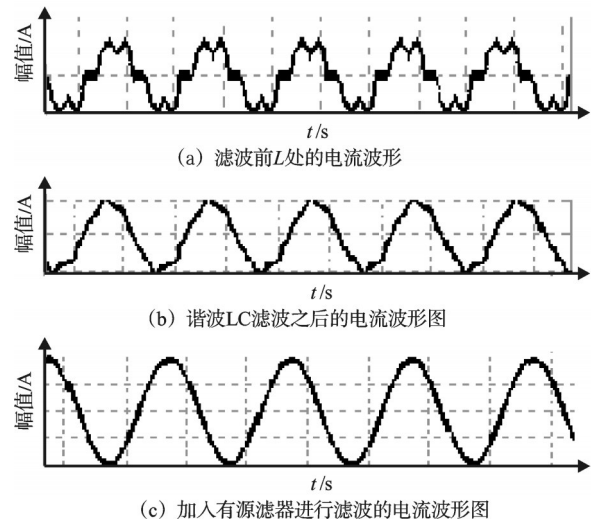


图5 滤波前、后L处电流波形

功率的不断变化,在仿真中则意味着等效电阻的时变。

在现实生活中,充电站发生的其他情况也会导致谐波含量的突变。电动汽车充电中途的撤出会导致谐波含量的降低,新电动汽车的接入充电则会导致谐波含量的突然升高。本研究拟采取改变等效电阻的方式来仿真谐波含量的突变。

具体方式如下:保留9台充电机,令开始时刻等效电阻为 30Ω ; 0.33 s 时,将电阻切换为 150Ω ;又在 0.5 s 时,电阻切换为 60Ω 。电阻突变模拟电动汽车的接入与撤出,相应的电流也在发生变化。电阻突变的A相电流及谐波成分如图6所示。可以发现畸变已经比较严重,而且随着等效电阻的变化,电流呈现比较大的变化。

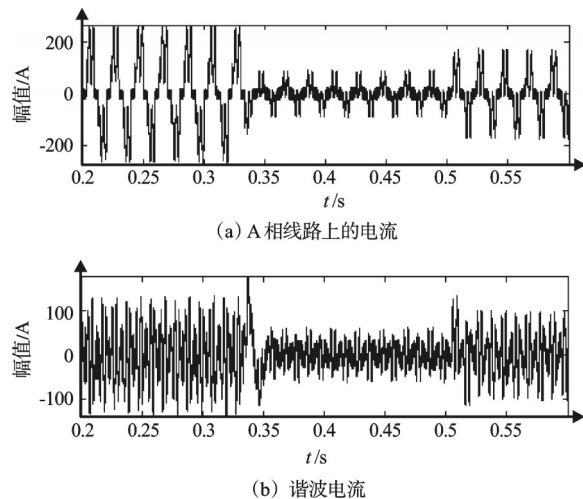


图6 电阻突变的A相电流及谐波成分

与其他类型的非线性电阻^[16-17]相比,充电站作为一种非线性电阻应属于文献[16]所述的电子开关型,但它同时却有着电弧型那样不规则的谐波特性。尽管如此,充电站的谐波特性仍有着自身的特点。它具有最大值,但同时却又时刻变化着的。它的时变并非随机变化,是与充电机的功率输出曲线紧密相连的。

所以研究者可以据此对充电站的谐波做出预估。

3 充电站谐波治理的仿真

3.1 LC滤波器与有源滤波器

使用滤波器来治理谐波时,一般有两种滤波器可供选择—LC滤波器与有源滤波器。LC滤波器也称无源滤波器,它由电容器、电抗器以及电阻器适当组合而成,与谐波源并联,起滤波作用。LC滤波器可分为单调谐滤波器、双调谐滤波器以及高通滤波器等。考虑到充电机谐波电流的特点,一般只有5次与7次谐波含量比较大,可以采用单调谐滤波器与高通滤波器的组合来治理。

有源滤波器与无源滤波器有很大的区别,它并不像后者那样通过将谐波电流导入大地从而达到滤波效果。有源滤波器会产生与主电路中谐波电流极性相反、大小相等的电流,将其导入母线与谐波抵消。有源滤波器可以分为4个部分(谐波检测及运算环节,电流跟踪控制电路,驱动电路以及产生补偿电流的主电路)。本研究通过检测环节测得负载电流中的谐波成分以及补偿电流,由跟踪电路产生的信号经过驱动电路得到所需要的PWM波形。用产生的方波驱动IGBT,主电路产生所需要的补偿电流并注入系统刚好可与负载电流中的谐波成分抵消,从而达到滤波的效果。

3.2 小区充电站谐波治理结果分析

首先研究谐波含量最大时刻的滤波情况。笔者设计LC滤波器来消除谐波。考虑充电站谐波特性,需要选择5次与7次的单调谐滤波器。由于高次的谐波含量太少,并未添加高通滤波器。设计滤波器时,考虑到最大经济效益,应选择最小滤波电容器安装容量。经过计算,滤波器的参数选择如表2所示。

表2 LC滤波器参数选择

名称	电阻 R/Ω	电抗 L/H	电容 C/F
5次	0.12	0.003 4	1.19×10^{-4}
7次	0.31	0.006 3	3.29×10^{-5}

谐波LC滤波之后的电流波形图如图5(b)所示,与图5(a)相比可以发现电流得到了明显的改善。此时各次谐波的含量如表3所示,对比滤波前表1中的数据可以发现,各次谐波含量都有了明显的降低。

针对相同的谐波源,考虑用有源滤波器来治理。本实验主电路的电感取值2 mH,直流侧作为供应电能电容取值100 μF ,初始电压为800 V。加入有源滤波器进行滤波处理,得到电流波形如图5(c)所示。

通过比较图5(b)与图5(c)以及表3提供的数据,可以发现,有源滤波器的治理效果非常明显,而且相对于LC滤波器,治理的能力更加出色。

表3 LC滤波与APF滤波后各次谐波含量

名称	5次 $I(\%)$	7次 $I(\%)$	11次 $I(\%)$	13次 $I(\%)$	17次 $I(\%)$	总畸变率 $I(\%)$
LC	7.58	3.43	3.11	1.43	1.52	9.29
APF	0.79	0.91	0.53	0.49	0.45	3.79

针对电动汽车充电站谐波含量的时变性、突变性,需要验证有源滤波器的跟踪性能。三相电路中A相的电流如图7(a)所示,可以明显发现,畸变已经比较严重。治理之后的波形如图7(b)所示,效果很明显。说明在电动汽车充电站发生谐波突变的情况下,有源滤波器也能够有比较好的跟踪性能。

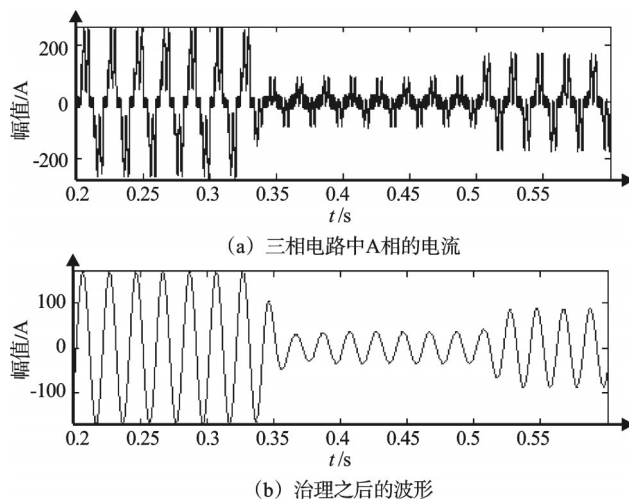


图7 电阻突变后的滤波效果

4 结束语

在对充电机产生的谐波进行分析的基础上,本研究对某小区整个充电站运行时所产生的最大谐波进行了仿真,该仿真结果对充电站的设计有一定的参考价值。利用LC滤波器以及有源滤波器实现谐波的消除。比较两种滤波器的治理效果可以发现,有源滤波器的治理效果要明显优于LC滤波器。在仿真谐波以及突变的情况下都采用了近似的处理,与实际的情况下尚存在一定的误差。

在接下来的工作中,笔者将进一步完善模型,使其更切合实际,从而更精确研究电动汽车充电站所产生的电能质量问题。

参考文献(References):

- [1] 刘晓飞,张千帆,崔淑梅. 电动汽车V2G技术综述[J]. 电工技术学报,2012,27(2):121-127.
- [2] 龚长武,张有兵,翁国庆. 插电式电动汽车入网体系框架研究[J]. 机电工程,2012,29(8):961-965.
- [3] 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,2008,41(9):31-36.

表3 中间段亮度

车速/(km·h ⁻¹)	亮度/(cd·m ⁻²)
120	220
100	200
80	100
60	50
40	35

出口过渡段的亮度可以按照如下公式计算得到:

$$L_{tc} = 0.3 \times L_{th} \quad (3)$$

式中: L_{tc} —出口过渡段亮度, cd/m²。

由于隧道出口处是人眼视觉的明适应过程,适应时间很短,可作较简单的处理。该方案中设计出口段长度为 60 m,亮度为中间亮度的 5 倍。

3 结束语

笔者研究并设计了一种基于 ZigBee 无线网络技术的 LED 隧道灯控制系统,该 LED 隧道灯服务器控制系统通过 ZigBee 组成的无线网络与各个控制模块通讯,并通过传感器模块采集洞内外亮度、车速以及车流量作为系统输入的基本参数,从而制定了各个路段的亮度控制规则,实现了对隧道内 LED 灯的自动控制,各个路段的状态信息可以通过 LED 隧道灯服务器控制系统的 LCD 屏幕实时显示出来。实验结果表明,

各个模块通过 ZigBee 无线技术组网速度快,数据传输可靠性高,而且使布线摆脱了有线的局限性,提高了后期维护的便捷性,使该设计具有实际应用价值。

参考文献(References):

- [1] RAFAEL C G, RICHARD E G. Digital Image Processing [M]. 2nd ed. 北京:电子工业出版社,2007.
- [2] 郭兰英,梁波,张生瑞. 一种新的隧道照明系统控制策略[J]. 西北工业大学学报,2009,39(4):571-572.
- [3] 钱怀风. 基于 ARM 微处理器的隧道照明智能控制器[J]. 电子产品世界,2007(2):95-96.
- [4] 肖华. 基于 ZigBee 隧道照明无线控制系统研究和设计[D]. 长沙:湖南大学电气与信息工程学院,2009.
- [5] 高守玮,吴灿阳. ZigBee 技术实践教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009.
- [6] 李春茂,李蓉. LED 隧道照明控制系统的研究[J]. 高科技与产业化,2009,5(7):102-104.
- [7] 王旭升. 基于 ZigBee 的智能建筑灯光控制系统设计[J]. 机电工程技术,2011,40(12):22-25.
- [8] 戴增辉,马小军,刘向,等. 基于 PLC 的隧道照明控制系统[J]. 低压电器,2010(7):27-30.
- [9] 辛颖,谢光忠,蒋亚东. 基于 ZigBee 协议的温度湿度无线传感器网络[J]. 传感器与微系统,2006,25(7):82-88.
- [10] 重庆交通科研设计院. JTJ-2002,公路隧道通风照明设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [11] 姚其,陈大华,林燕丹. 白光 LED 用于公路隧道照明的设计分析(上)[J]. 中国照明电器,2008(11):6-9.

[编辑:李辉]

(上接第 749 页)

- [4] 陈玉进. 电动汽车充电设备特点及对电网影响探讨[J]. 湖北电力,2009,33(6):48-50.
- [5] RUTHERFORD M J, YOUSEFZADEH V. The Impact of Electric Vehicle Battery Charging on Distribution Transformers [C]//IEEE APEC2011. Denver: [s.n.], 2011: 396-400.
- [6] 纪斌义,周江涛,黄海波. 基于电动汽车充电机的仿真研究[J]. 自动化与仪器仪表,2011(4):19-21.
- [7] 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.
- [8] 张谦,韩维健,俞集辉,等. 电动汽车充电站仿真模型及其对电网谐波影响[J]. 电工技术学报,2012,27(2):159-164.
- [9] ORR J A, EMANUEL A E, OBERG K W. Current harmonics generated by a cluster of electric vehicle battery chargers [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(3):691-700.
- [10] STAATS P T, GRADY W M, ARAPOSTATHIS A, et al. A statistical method for predicting the net harmonic currents generated by a concentration of electric vehicle battery chargers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3):1258-1266.
- [11] 蒋浩. 电动汽车充电站的谐波抑制与消除[J]. 广东电力,2010,23(8):16-19.
- [12] 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,2005.
- [13] 黄梅,黄少芳. 电动汽车充电站谐波的工程计算方法[J]. 电网技术,2008,32(20):20-23.
- [14] LEWIS L R, CHO B H, LEE F C, et al. Modeling, analysis and design of distributed power systems [C]//Power Electronics Specialists Conference. Milwaukee, USA: [s.n.], 1989 (1):152-159.
- [15] 滕乐天,姜久春,何维国. 电动汽车充电机(站)设计[M]. 北京:中国电力出版社,2009:70-84.
- [16] 陈晨. 电力系统非线性负载谐波特征分析的研究[D]. 武汉:华中科技大学高电压与绝缘技术专业,2007.
- [17] 费益军,徐卫文,陈兵,等. 供电网典型非线性负载谐波特性分析[J]. 江苏电机工程,2011,30(1):1-4.

[编辑:李辉]