

# 分布式发电柔性并网装置电磁兼容设计

黄 静<sup>1</sup>, 陈道品<sup>1</sup>, 赵 阳<sup>2</sup>, 彭飞进<sup>1</sup>, 唐 琪<sup>1</sup>, 王云飞<sup>1</sup>

(1. 广东电网公司佛山供电局, 广东 佛山 528000)

(2. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

**[摘要]** 针对电力系统中存在的电磁干扰(EMI)噪声问题, 本文以一款分布式发电柔性并网装置的初步设计作为案例, 从该系统中的传导噪声和辐射噪声在生成机理入手, 探讨了各设备内 以及设备间的噪声形成原因, 并对其控制模块进行了标准的传导以及辐射测试, 依据测试结果进行理论分析, 并结合噪声抑制原理给出了具体的传导噪声以及辐射噪声的抑制设计。

**[关键词]** 分布式, 传导噪声, 辐射噪声, 电磁兼容设计

**[中图分类号]** TM461; TN03 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)04-0034-06

## EMC Design of Distributed Generation Flexible Grid Connected Device

Huang Jing<sup>1</sup>, Chen Daopin<sup>1</sup>, Zhao Yang<sup>2</sup>, Peng Feijin<sup>1</sup>, Tang Qi<sup>1</sup>, Wang Yunfei<sup>1</sup>

(1. Foshan Power Supply Bureau of China Southern Power Grid, Foshan 528000, China)

(2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** This paper is aimed at the problem of EMI noise in power system, uses a preliminary design of distributed generation flexible grid connected device as a case. Firstly, this paper explains the causes of the formation of noise which in the equipment or between the devices. Secondly, according to the standard, the electromagnetic compatibility of the conduction and radiation of the control system of the device is tested, and based on the theoretical analysis of the test result, and combined with the principle of noise suppression, the specific conduction noise and radiation noise suppression design are presented.

**Key words:** distributed generation, conduction noise, radiated noise, EMC design

随着电力电子技术日益发展, 电子设备中的器件结构日益复杂, 各种电力产业中的电磁兼容问题也日益凸显出来<sup>[1]</sup>. 研究表明, 在产品阶段解决电磁兼容问题, 可以节约人力物力<sup>[2]</sup>. 对于分布式系统来说, 系统由多个设备用电缆连接而成. 因此在电磁兼容设计过程中, 需考虑每个设备的电磁兼容性, 以及各个设备之间的串扰和干扰问题. 否则后期的制作阶段的电磁兼容问题将会非常棘手<sup>[3]</sup>.

本文以分布式发电柔性并网装置为初期设计, 通过测试其控制模块的电磁兼容特性, 分析其传导与辐射方面的频谱数据及生成机理, 进而提出几种有效的电磁兼容设计, 用以提高该款设备的电磁兼容性能。

### 1 分布式发电柔性并网装置

目前已开展 50 kW 分布式发电柔性并网装置的研制, 其结构框图如图 1 所示, 该装置可分为辅助电源、控制模块、DC/DC 变换侧、DC/AC 变换侧等部分. 主电路拓扑如图 2 所示其中 DC/DC 低压侧由 3 条独立支路组成, 各支路均采用非隔离型双向 DC/DC 变换拓扑, 可直接与光

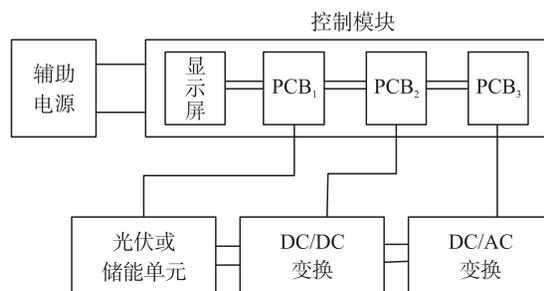


图 1 分布式发电柔性并网装置结构框图

Fig. 1 Structure block diagram of distributed power generation flexible grid-connected device

收稿日期: 2016-10-11.

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目(GDKJQQ20152031).

通讯联系人: 赵阳, 教授, 博士生导师, 研究方向: 电磁兼容技术与应用. E-mail: zhaoyang2@njnu.edu.cn

伏、储能单元相连并且根据需求进行恒压/恒流控制;DC/AC 变换侧采用两电平三相半桥拓扑结构,在系统并网运行时交流侧与电网相连 DC/AC 进行功率控制,系统离网运行时进行恒压恒频控制,为负荷提供稳定的交流电源. 分布式发电柔性并网装置 DC/DC 变换高压侧与 DC/AC 变换直流侧通过直流母线相连,直流母线电压的稳定性直接影响系统的稳定性<sup>[4]</sup>.

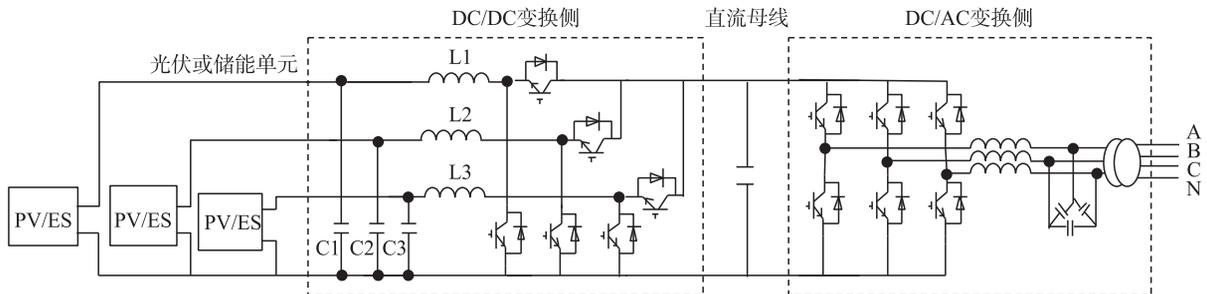


图 2 分布式发电柔性并网装置拓扑

Fig. 2 Topology of distributed power generation flexible grid-connected device

## 2 分布式发电柔性并网装置的传导噪声测试与抑制设计

### 2.1 传导测试结果及问题分析

对该装置的控制系统的初测结果如图 3 和图 4 所示. 由图可知,控制系统的 CE 初测在低频段超标,未通过测试.

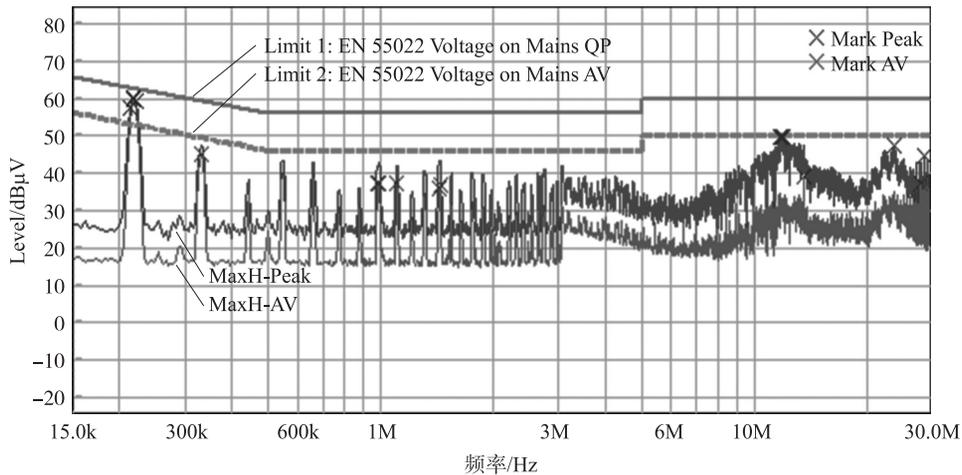


图 3 L 线的 CE 初测结果

Fig. 3 CE initial test results of L line

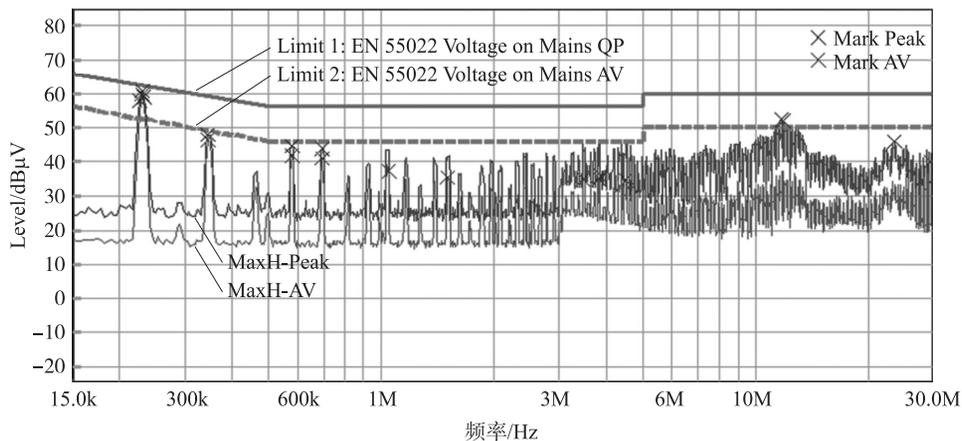


图 4 N 线的 CE 初测结果

Fig. 4 CE initial test results of N line

控制系统主要在低频段超标,200 kHz~300 kHz 有超标现象,在 222 kHz 附近的频段超标最严重. 在 330 kHz~982 kHz 左右的频段接近临界值,比较危险.

传导 EMI 噪声包括火线—地线,中线与地线间高频噪声电流引起的共模噪声  $U_{CM}$ ,以及火线—中线间高频噪声电流引起的差模噪声  $U_{DM}$ . 开关器件上升沿、散热器浮地、接地不良、线缆间射频电磁场耦合以及 PCB 线缆阻抗失配等均会产生传导 EMI 噪声. 在该系统相应的控制模块中,线缆信号随时间不断改变,线缆周围会产生射频电磁场,从而将高频噪声耦合至其它线缆,即为串扰.

### 2.2 传导噪声抑制设计

(1)在控制系统电源线处安装一个  $\pi$  型 EMI 滤波器

由于干扰信号的频带高于控制系统的有用信号的频带,因此采用低通 EMI 滤波器来滤除干扰信号. 该 EMI 滤波器安装在连接 220V 交流电的开关电源的交流端. EMI 滤波器用是滤除整流输出电压中的谐波,把脉动的直流变成平滑的直流. 该  $\pi$  型滤波器为 LC 滤波器,结构如图 5 所示.

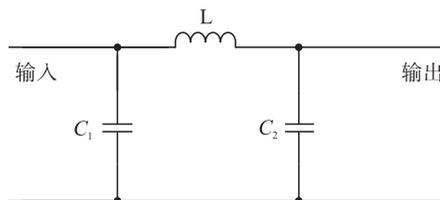


图 5  $\pi$  型 EMI 滤波器  
Fig. 5  $\pi$  type EMI filter

(2)通讯线缆上卡磁环

磁环在高频时呈现电阻性,相当于品质因数很低的电感器,能在相当宽的频率范围内保持高阻抗,有利于高频滤波<sup>[5]</sup>. 控制电路各电路板间联系密切,通讯线缆很多,在这些线缆上卡磁环可以有效的传导噪声干扰. 卡在各线缆上的磁环的规格应与线缆大小相匹配.

(3)在电源线、开关器件、芯片电源等处对地并联电容

电容是基本的滤波元件,在控制电路的电源线、开关器件、芯片电源处对地并联电容,可利用其阻抗随频率升高而降低的特性对高频干扰信号旁路<sup>[6]</sup>. 在整个控制系统的电源处考虑到安全因素,使用安规电容. 在电路板上的开关器件的驱动电路、变压器的输入与输出端口、芯片电源端口等处可使用陶瓷电容和穿心电容.

## 3 分布式发电柔性并网装置的辐射噪声测试与抑制设计

### 3.1 测试结果及问题分析

该装置的控制模块进行了辐射测试,初测的波形如图 6 所示,可以看出在 60 MHz~300 MHz 辐射超标严重. 由该测试结果可以判定该设备辐射试验失败,未通过测试.

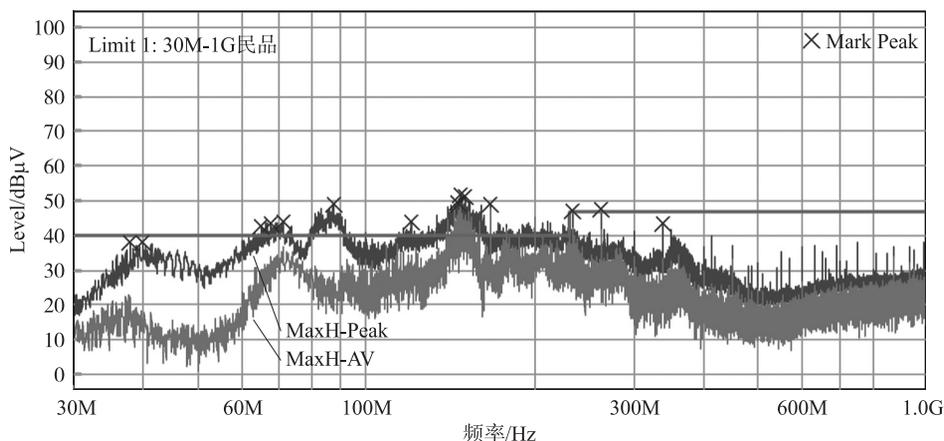


图 6 RE 初测结果

Fig. 6 RE initial test results

(1)因传输线缆引起的辐射噪声分析

基于被测设备的控制模块有多个 PCB 板,之间有大量的传输线缆,包括与各电路模块的通讯线路. 因此考虑传输线缆所引起的辐射噪声超标问题. 设备各模块间的通讯线缆,尤其是显示器控制芯片与显示器之间的数据传输线是产生辐射噪声的重要因素. 如图 7(a)所示,数据传输线时刻向显示器传输信号数

据,所以数据传输线对外辐射噪声等效为线缆对外产生的共模辐射噪声. 根据其工作原理可以得出如图 7(b)的等效干扰模型电路.

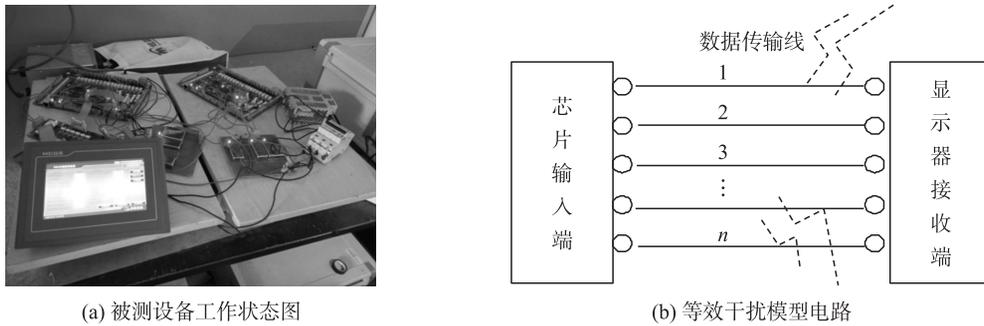


图 7 传输线缆串扰

Fig. 7 Crosstalk of transmission cable

### (2) 基于电路芯片时钟信号管脚引起的辐射噪声分析

基于被测设备的控制模块有多个 PCB 板组合而成,每块 PCB 上又有多个芯片,考虑电路中芯片的时钟信号管脚可能会引起较大的辐射噪声<sup>[7]</sup>. 设该设备中任意两个芯片  $U_1$ 、 $U_2$ ,芯片  $U_1$  产生的高频噪声信号通过时钟信号管脚 CLK 以差模噪声电流的形式耦合至芯片  $U_2$ ,如图 8 所示. 差模噪声电流经过信号电流大环路后将产生严重的差模辐射干扰,从而导致电子设备辐射 EMI 噪声超过标准限值. 差模辐射噪声与信号频率平方、信号电流环路面积以及差模电流成正比,与测试距离成反比. 对已设计完成的电路而言,信号频率、信号环路面积以及测试距离根据功能需要所选定. 故只能通过减小差模电流以抑制差模辐射噪声<sup>[8]</sup>.

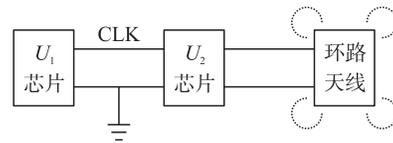


图 8 差模辐射干扰模型

Fig. 8 The interference model of differential mode radiation

### (3) 因接地不良引起的辐射噪声

考虑到控制模块中有多个电源变压环节,可能存在接地不良问题而引起辐射噪声过大. 由于各类器件接地不良或接地点地电位不为零,易产生电偶极子辐射,即共模辐射<sup>[9]</sup>.

## 3.2 辐射噪声抑制设计

### (1) 数据传输线干扰抑制设计方案

如图 8 所示,PCB 电路在高频信号工作情况下,数据传输线将会产生大量的高频辐射噪声. 数据传输线上传输的信号频率、线缆长度以及测试距离不可改变,故只可改变线缆上的电流来控制共模辐射噪声<sup>[10]</sup>. 如图 9,数据传输线对外产生辐射干扰机理可以等效为共模噪声源  $U_{cm}$ ,共模噪声源内阻抗  $Z_{cm}$  以及负载阻抗  $R$ . 其产生的辐射场强与噪声电流成正比,即  $E_{cm} \propto I_{cm}$ <sup>[12]</sup>. 所以对上述模块间的数据传输线加一层屏蔽材料(铜箔)或卡磁环等措施以增大阻抗,从而达到降低噪声电流  $I_{cm}$ ,最终降低辐射场强  $E_{cm}$  的目的.

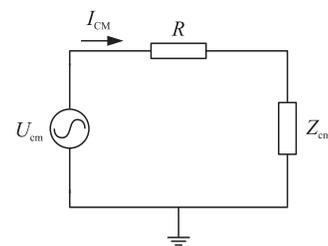


图 9 共模噪声抑制等效电路图

Fig. 9 The equivalent circuit diagram of the common mode noise rejection

### (2) 电路芯片时钟信号管脚干扰抑制设计方案

电路芯片时钟信号管脚以一定频率噪声信号向外发射,即测试结果中一系列的倍频辐射干扰超标频点<sup>[11]</sup>. 因此,需对电路芯片时钟信号管脚进行滤波处理,降低辐射噪声. 可考虑采用高频滤波电容进行多级并联以抑制等效环路天线对外辐射干扰. 首先可以设计 EMI 滤波器模型以及加载位置,考虑到多级并联的高频滤波电容可以减小差模辐射电流,EMI 滤波器的作用是逐步降低由  $U_1$  芯片通过时钟信号 CLK 传输至  $U_2$  芯片的辐射噪声以及减小由  $U_2$  芯片流向信号环路的差模辐射电流,达到降低差模辐射场强的目的<sup>[13]</sup>.

基于上述 EMI 滤波器的模型,可考虑如下方案,在  $U_1$  芯片时钟信号管脚 CLK 的输出端以及  $U_2$  芯片时钟信号管脚 CLK 的输入端同时并联电容,并在  $U_2$  芯片与信号环路之间分别并联多个电容进行多级滤波.如图 10 所示.

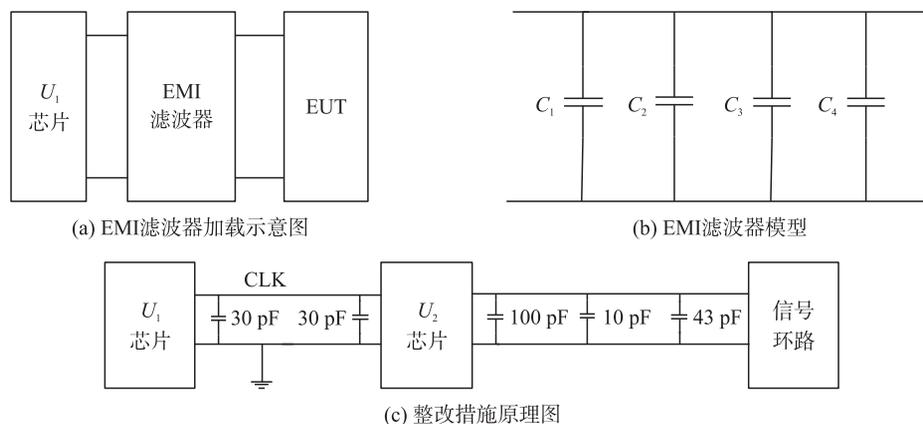


图 10 安装 EMI 滤波器

Fig. 10 Installing EMI filter

### (3) 因接地不良引起的辐射噪声干扰的设计抑制方案

因接地不良引起的辐射噪声可等效为电偶极子辐射,PCB 电路中的接地不良主要是由于接地点地电位不为零产生的,如因布线问题引起的高频信号接地系统阻抗过大,以及因多点接地可能引起的接地点电位不同.该辐射噪声与等效短直天线的长度、接地点地电位有关.因此,应该缩短信号线长度,同时通过改良接地措施(加粗接地线缆,使用扁平线缆,多点接地等)加强系统接地<sup>[14]</sup>.但采用多点接地方式可能会导致各接地点电位不同,然而采用单点接地方式也可能增加系统接地阻抗,因此可考虑采用 PCB 多层板设计,即将多模块 PCB 板放入多层设计中,并利用地平面(地层)接地有助于提高系统的接地性能.同时将电源线做屏蔽处理后,将屏蔽铜箔接地将对辐射噪声有一定的抑制效果<sup>[15]</sup>.

## 4 结语

本文以某分布式发电柔性并网装置为例,结合样机控制模块的测试结果,对该系统中的辐射与传导问题进行了分析,给出的具体的电磁兼容设计方案及其理论依据,对该系统的后期制作与完善有一定的参考价值.

### [参考文献] (References)

- [1] 赵阳,封志明,黄学军. 电磁兼容测试方法与工程应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010:1-12.  
ZHAO Y, FENG Z M, HUANG X J. EMC test methods and engineering applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 1-12. (in Chinese)
- [2] 赵阳,SEE K Y, 电磁兼容基础与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2006:1-20.  
ZHAO Y, SEE K Y. Fundamental of electromagnetic compatibility and application[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 1-20. (in Chinese)
- [3] 陈树勇,鲍海,吴春洋,等. 分布式光伏发电并网功率直接控制方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(10):6-11.  
CHEN S Y, BAO H, WU C Y, et al. Direct grid-tie power control method for distributed photovoltaic generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 6-11. (in Chinese)
- [4] PAUL C R. 电磁兼容导论[M]. 2 版. 北京:人民邮电出版社,2007:332-350.  
PAUL C R. Introduction to electromagnetic compatibility[M]. 2nd ed. Beijing: Posts & Telecom Press, 2007: 332-350. (in Chinese)
- [5] LEONE M. Design expression for the trace-to-edge common-mode inductance of a printed circuit board[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2001, 43(4): 667-671.
- [6] ANTONINI G, ORLANDI A. Wavelet packet-based EMI signal processing and source identification[J]. IEEE transactions on

- electromagnetic compatibility,2001,43(2):140-148.
- [7] 赵阳,董颖华,陆婉泉,等. EMI 噪声分离网络在电力线噪声分析中的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,30(21):114-120.  
ZHAO Y,DONG Y H,LU W Q,et al. EMI noise discrimination network applied to power-line EMI noise analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(21):114-120.(in Chinese)
- [8] 任小永,姚凯,旷建军,等. 损耗最小化输出滤波电感的设计[J]. 中国电机工程学报,2008,28(27):84-88.  
REN X Y,YAO K,KUANG J J,et al. Design of output inductor for minimal power loss[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(27):84-88.(in Chinese)
- [9] 王世山,朱叶,崔永生. 基于“负参数”理论的 EMI 滤波器寄生参数的双重消除[J]. 电工技术学报,2011,26(10):181-187.  
WANG S S,ZHU Y,CUI Y S. Dual-cancellation of parasitic parameters based on theorem of negative parameters for EMI filters[J]. Transactions of China electrotechnical society,2011,26(10):181-187.(in Chinese)
- [10] 陈文洁,杨旭,王兆安. 集成模块用有源电磁干扰滤波器的设计[J]. 中国电机工程学报,2005,25(24):51-55.  
CHEN W J,YANG X,WANG Z A. A study on design of an active EMI filter for integrated power electronics modules[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(24):51-55.(in Chinese)
- [11] BHARGAVA A,POMMERENKE D,KAM K W,et al. DC-DC buck converter EMI reduction using PCB layout modification[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility,2011,53(3):806-813.
- [12] 陈庆彬,陈为. 开关电源中变压器共模传导噪声抑制能力的评估方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(18):73-79.  
CHEN Q B,CHEN W. An evaluation method of transformer behaviors on the suppression of common-mode conduction noise in switch mode power supply[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(18):73-79.(in Chinese)
- [13] CHEN S,BAO H,WU C,et al. Grid-tie power control method for distributed photovoltaic generation[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(10):6-11.
- [14] 赵阳,颜伟,赵波,等. 电路辐射干扰机理诊断与特性估计[J]. 电工技术学报,2010,25(10):6-13.  
ZHAO Y,YAN W,ZHAO B. EMI radiated noise diagnosis and estimation for HF circuits[J]. Transactions of China electrotechnical society,2010,25(10):6-13.(in Chinese)
- [15] 赵阳,戎融,张宇环,等. 提高 GTEM 小室测量 EMI 噪声精度的研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(27):169-176.  
ZHAO Y,RONG R,ZHANG Y H,et al. Accuracy improvement of GTEM cells for EMI noise measurement[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(27):169-176.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]