

# 高性能计算机中电压调节模块阻抗特性研究

姚信安, 宋 飞, 胡世平

(国防科学技术大学 计算机学院, 长沙 410073)

(yaoxinan@sina.com)

**摘 要:**针对高性能计算机中电源模块或子系统之间相互作用而导致的不稳定性问题,详细研究了多核处理器电压调节模块的输入输出阻抗特性。建立了电压调节模块的小信号模型和系统框图,求出了各种传递函数,设计了反馈补偿回路,并对开环和闭环阻抗特性进行了仿真和实际测量。仿真和测量结果为解决系统稳定性问题打下了基础。

**关键词:**电压调节模块; 阻抗特性; 开环阻抗; 闭环阻抗; 阻抗测量

**中图分类号:** TP303.3 **文献标志码:** A

## Research on impedance characteristics of voltage regulator module in high-performance computer

YAO Xin-an, SONG Fei, HU Shi-ping

(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

**Abstract:** To solve system instability caused by the interaction between individually designed power modules/sub-systems in high-performance computer, the input and output impedance characteristics of voltage regulator module for multi-core processor were thoroughly studied. The small-signal model and system block diagram of voltage regulator module were developed, and various transfer functions were presented. Then, the feedback compensator was designed, and the open-loop and closed-loop impedance characteristics were simulated and measured. The simulation and measurement results lay a foundation for the improvement of system stability.

**Key words:** voltage regulator module; impedance characteristic; open-loop impedance; closed-loop impedance; impedance measurement

### 0 引言

高性能计算机通常采用直流分布式供电系统进行供电,具有可靠性高、易于实现模块化和便于维护等优点。但是,由于组成分布式供电系统的各个电源模块/子系统之间的相互作用,容易导致系统不稳定。国内外已有很多学者对分布式供电系统稳定性问题进行了研究。文献[1-4]从源变换器和负载变换器的阻抗特性出发,给出了满足系统稳定性的阻抗要求,并提出了各种阻抗比判据。归根结底,分布式供电系统稳定性问题主要取决于各电源模块/子系统的阻抗特性。因此,研究电源模块/子系统的阻抗特性对于解决系统稳定性问题具有重要的意义。

目前,高性能计算机普遍采用多核处理器,工作电流高达100多安培,电源设计具有很大的挑战性。给处理器供电的电源称为电压调节模块。

本文以电压调节模块输入输出阻抗特性作为研究对象,建立了该模块的小信号模型,进行了小信号分析和仿真,并通过实验和测量验证了理论分析的正确性。

### 1 电压调节模块小信号模型

电压调节模块拓扑结构如图1所示。该模块采用六相交

错并联同步整流技术, $V_{in}$ 为输入电压, $V_{out}$ 为输出电压,S1和S2组成第一相,S3和S4组成第二相,S11和S12组成第六相。S1和S2、S3和S4、S11和S12的开关时序为互补关系,S1、S3、S5、S7、S9、S11是各相的主开关管,每周期内相差60度导通;S2、S4、S6、S8、S10、S12为各相的同步整流管。滤波电感 $L_{o1}=L_{o2}=\dots=L_{o6}$ , $C_o$ 为输出滤波电容。

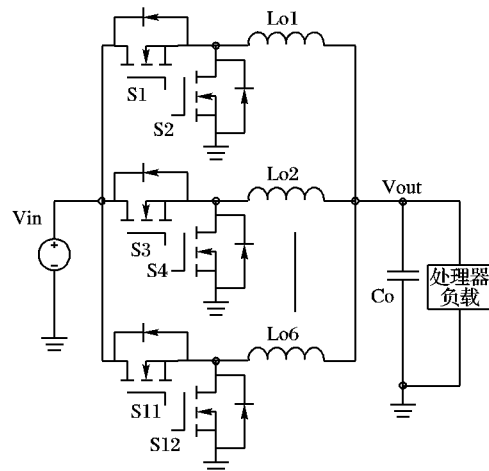


图1 电压调节模块拓扑结构

六相交错并联同步整流变换器每相输入电压相同,又共

收稿日期:2011-04-19;修回日期:2011-06-29。 基金项目:国家863计划项目(2009AA01A128)。

作者简介:姚信安(1972-),男,江西萍乡人,副研究员,硕士,主要研究方向:高性能计算机电源系统; 宋飞(1973-),男,江苏睢宁人,助理研究员,硕士,主要研究方向:高性能计算机电源系统; 胡世平(1954-),男,湖北广济人,研究员,主要研究方向:高性能计算机电源系统设计和电磁兼容。

享同一组补偿回路,因此其小信号模型可以等效成一个等效电感为单相电感的 1/6,等效开关频率为单相开关频率 6 倍的单相同步整流 Buck 变换器<sup>[5]</sup>。

单相同步整流 Buck 变换器的小信号模型如图 2 所示。

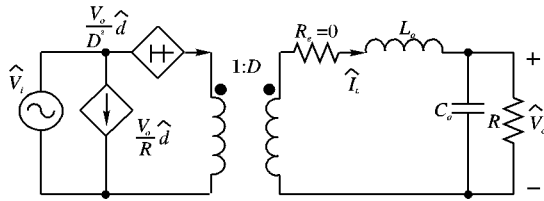


图 2 单相 Buck 变换器小信号模型

图 2 中,  $D$  为占空比,  $d$  是  $D$  的扰动量,  $V_i$  为输入电压,  $V_o$  为输出电压,  $R$  为负载电阻,  $L_o$  为输出滤波电感,  $C_o$  为输出滤波电容,  $R_e$  为寄生参数造成的损耗。为了简化设计,本文不考虑开关管和整流管的导通电阻、输出滤波电感和电容的等效串联电阻等寄生参数。

根据图 2 的小信号模型,可进行小信号分析,求出 Buck 变换器的开环传递函数。

开环输出阻抗  $Z_o(s)$  为:

$$Z_o(s) = \frac{L_o s}{L_o C_o s^2 + \frac{L_o}{R} s + 1} \quad (1)$$

开环输入阻抗  $Z_i(s)$  为:

$$Z_i(s) = \frac{R}{D^2} \frac{L_o C_o s^2 + \frac{L_o}{R} s + 1}{RC_o s + 1} \quad (2)$$

输出电压  $V_o(s)$  对  $d(s)$  的传递函数  $G_{vd}(s)$  为:

$$G_{vd}(s) = \frac{V_o}{D} \frac{1}{L_o C_o s^2 + \frac{L_o}{R} s + 1} \quad (3)$$

输出电压  $V_o(s)$  对输入电压  $V_i(s)$  的传递函数  $A_v(s)$  为:

$$A_v(s) = \frac{D}{L_o C_o s^2 + \frac{L_o}{R} s + 1} \quad (4)$$

Buck 变换器的小信号系统框图如图 3 所示。

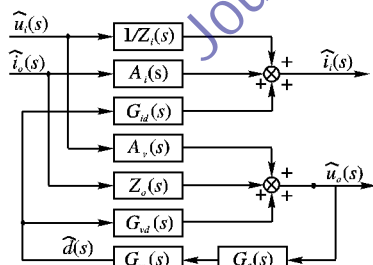


图 3 Buck 变换器小信号系统框图

图 3 中,  $A_v(s)$  是输入—输出电压开环传递函数,  $A_i(s)$  是输出—输入电流开环传递函数,  $G_c(s)$  是补偿网络的传递函数,  $G_m(s)$  是 PWM 脉宽调制器的传递函数,  $Z_o(s)$  为开环输出阻抗,  $Z_i(s)$  为开环输入阻抗,  $G_{vd}(s)$  是控制—输出电压传递函数,  $G_{id}(s)$  是控制—输出电流传递函数。

根据图 3,可得回路增益函数  $T_v(s)$  为:

$$T_v(s) = G_c(s) G_m(s) G_{vd}(s) \quad (5)$$

闭环输出阻抗  $Z_{oc}(s)$  为:

$$Z_{oc}(s) = \frac{Z_o(s)}{1 + T_v(s)} \quad (6)$$

闭环输入阻抗  $Z_{ic}(s)$ <sup>[6]</sup> 为:

$$Z_{ic}(s) = \left( \frac{1}{Z_N(s)} \times \frac{T_v(s)}{1 + T_v(s)} + \frac{1}{Z_D(s)} \times \frac{1}{1 + T_v(s)} \right)^{-1} \quad (7)$$

其中:

$$Z_D(s) = \frac{R}{D^2} \frac{L_o C_o s^2 + \frac{L_o}{R} s + 1}{RC_o s + 1} \quad (8)$$

$$Z_N(s) = -\frac{R}{D^2} \quad (9)$$

## 2 阻抗特性分析

### 2.1 开环阻抗特性

本节对电压调节模块等效电路模型的各种开环阻抗进行了曲线拟合,并与实际测量的模块开环阻抗进行比较,来进一步验证以上理论分析的准确性。

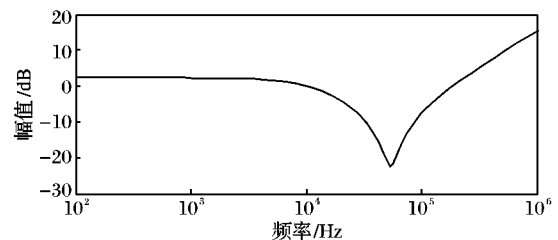
在图 1 中,  $V_{in} = 12 \text{ V}$ ,  $V_{out} = 1.1 \text{ V}$ ,输出电流为  $100 \text{ A}$ ,  $L_{o1} = L_{o2} = \dots = L_{o6} = 300 \text{ nH}$ ,输出滤波电容  $6800 \text{ uF}$ ,开关频率  $250 \text{ kHz}$ ,负载电阻  $11 \text{ m}\Omega$ 。等效成单相同步整流 buck 变换器后,输出电感为  $50 \text{ nH}$ ,开关频率为  $1.5 \text{ MHz}$ 。

将以上参数代入到变换器开环输入阻抗和开环输出阻抗表达式中,可得:

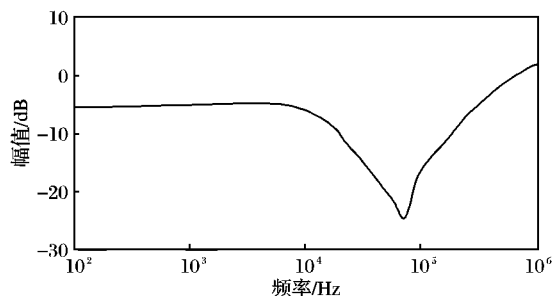
$$Z_i(s) = \frac{3.74 \times 10^{-12} s^2 + 5 \times 10^{-8} s + 0.011}{6.29 \times 10^{-7} s + 0.0084} \quad (10)$$

$$Z_o(s) = \frac{5 \times 10^{-8} s}{3.4 \times 10^{-10} s^2 + 4.5 \times 10^{-6} s + 1} \quad (11)$$

用 Matlab 软件绘制了根据理论计算出的开环输入输出阻抗的波特图,并用 Venable 3120 频率响应分析仪对电压调节模块的开环输入输出阻抗特性进行了实际测量。图 4 分别给出了由小信号模型计算以及实际测量得到的开环输入阻抗特性,图 5 分别给出了由小信号模型计算以及实际测量得到的开环输出阻抗特性。对比理论计算得到的阻抗特性图和用 3120 频响分析仪实测的阻抗特性图,可以看出理论分析的结果与实际测量的结果基本上一致,这说明电压调节模块的小信号模型是正确的。



(a) 开环输入阻抗幅频特性



(b) 实测开环输入阻抗幅频特性

图 4 开环输入阻抗特性

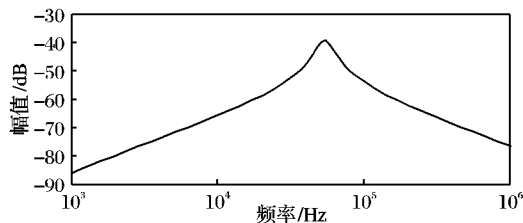
## 2.2 回路增益设计

### 2.2.1 原始回路增益函数

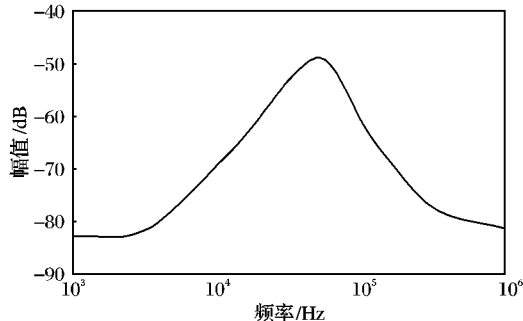
对于 Buck 变换器,回路增益函数  $T_v(s)$  为:

$$T_v(s) = G_c(s)G_m(s)G_{vd}(s)H(s) = G_c(s)G_o(s) \quad (12)$$

其中:  $G_o(s) = G_m(s)G_{vd}(s)H(s)$  为未加补偿网络  $G_c(s)$  时的回路增益函数,称为原始回路增益函数;  $G_m(s)$  是 PWM 脉宽调制器的传递函数,等于调制器中锯齿波幅值  $V_m$  的倒数;  $H(s)$  表示反馈分压网络的传递函数,  $H(s) = 1$ 。



(a) 开环输出阻抗幅频特性



(b) 实测开环输出阻抗幅频特性

图5 开环输出阻抗特性

原始回路增益函数  $G_o(s)$  为:

$$G_o(s) = \frac{G_{vd}(s)}{V_m} \quad (13)$$

已知  $V_m = 1.5$ , 根据式(3)、(13), 可求出  $G_o(s)$  为:

$$G_o(s) = \frac{8}{3.4 \times 10^{-10}s^2 + 4.5 \times 10^{-6}s + 1} \quad (14)$$

原始回路增益函数  $G_o(s)$  的波特图如图6所示。可以看出, 相位裕量只有  $5.29^\circ$ , 系统虽然是稳定的, 但会具有较大的超调量和调节时间。通常需选择相位裕量在  $45^\circ$  左右, 增益裕量在 10 dB 左右。

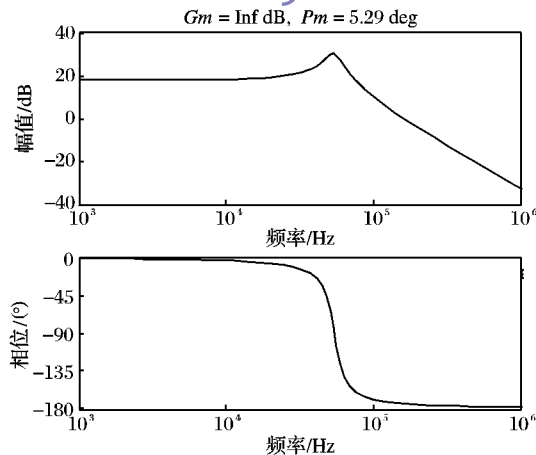


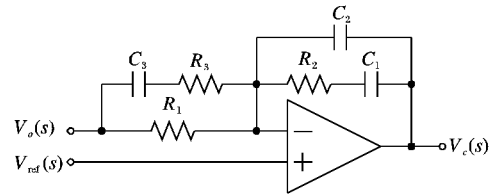
图6 原始回路增益函数波特图

### 2.2.2 补偿网络的确定

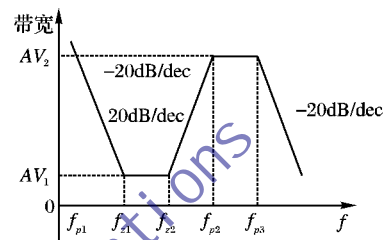
原始回路增益函数  $G_o(s)$  不能满足系统静态和动态特性的要求, 需加入补偿网络  $G_c(s)$ 。补偿网络只是系统中的一个

很小部分, 但是对系统的静态和动态特性却是非常重要的部分, 它会影响系统的输出精度、电压调整率、频带宽度以及暂态响应。

图7是C型补偿网络的电路结构及传递函数, 该补偿网络可以提供两个零点和三个极点用来拓展回路增益的带宽和增加相位裕量。



(a) C型补偿网络电路结构



(b) C型补偿网络幅频图

图7 C型补偿网络电路

补偿网络的传递函数  $G_c(s)$  为:

$$G_c(s) = \frac{\left(\frac{1}{sC_2}\right) \parallel \left(R_2 + \frac{1}{sC_1}\right)}{(R_1) \parallel \left(R_3 + \frac{1}{sC_3}\right)} \quad (15)$$

零点为:

$$f_{z1} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1}, f_{z2} = \frac{1}{2\pi(R_1 + R_3)C_3} \quad (16)$$

极点为:

$$f_{p1} = 0, f_{p2} = \frac{1}{2\pi R_3 C_3}, f_{p3} = \frac{1}{2\pi \frac{R_2 C_1 C_2}{C_1 + C_2}} \quad (17)$$

### 2.2.3 回路增益函数的实际设计

原始回路增益函数  $G_o(s)$  有两个相近的极点  $f_{p1-G_o} = f_{p2-G_o} = 8636$  Hz; 补偿网络可以提供两个零点  $f_{z1}$ 、 $f_{z2}$  和三个极点  $f_{p1}$ 、 $f_{p2}$ 、 $f_{p3}$ 。下面通过分析它们之间的关系, 来确定补偿网络的参数。

1) 选择补偿后的增益交越频率  $f_g$ 。理论上可设定为开关频率的 1/2, 考虑到抑制输出开关纹波,  $f_g$  一般取为开关频率的 1/5。

2) 原始回路增益函数有两个极点, 可将补偿网络  $G_c(s)$  的两个零点设计为原始回路函数极点频率的 1/2, 即:

$$f_{z1} = f_{z2} = \frac{1}{2} f_{p1-G_o, p2-G_o} \quad (18)$$

3) 原始回路函数没有零点, 可将补偿网络的两个极点  $f_{p2}$ 、 $f_{p3}$  设定为  $f_{p2} = f_{p3} = f_s$ , 以减小输出高频开关纹波。

按照以上公式设计的补偿网络各补偿元件参数如下所示:

$$R_1 = 2.7 \text{ k}\Omega; R_2 = 4.7 \text{ k}\Omega; R_3 = 0.147 \text{ k}\Omega; C_1 = 2.2 \text{ nF}; C_2 = 10 \text{ pF}; C_3 = 4.7 \text{ nF}$$

根据以上参数可求出  $G_c(s)$ , 从而求出回路增益函数  $T_v(s)$  为:

$$T_v(s) = \frac{1.86 \times 10^{-4}s^2 + 31.8s + 1340707}{1.1 \times 10^{-23}s^5 + 2.5 \times 10^{-16}s^4 + 3.4 \times 10^{-10}s^3 + 5.2 \times 10^{-6}s^2 + s} \quad (19)$$

$T_v(s)$  的波特图如图 8 所示。从图 8 中可知,补偿后回路增益的相位裕量在  $51.5^\circ$  左右,增益裕量为  $31.4 \text{ dB}$  左右,满足系统稳定性要求。

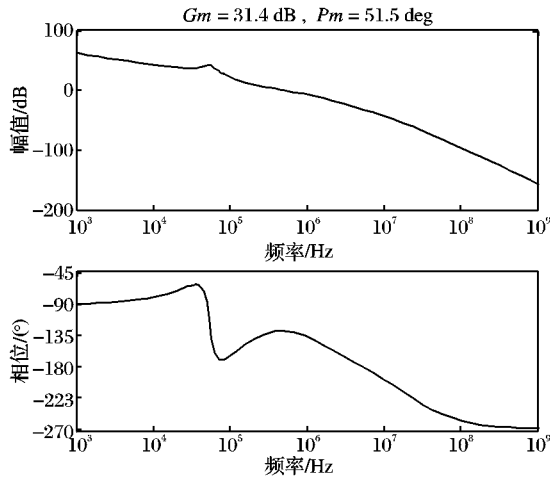


图 8  $T_v(s)$  波特图

### 2.3 闭环阻抗特性

当回路增益  $T_v(s)$  的幅值裕度和相位裕度满足要求后,可以进一步分析研究电压调节模块的闭环阻抗特性。闭环输出阻抗表示闭环系统对负载扰动的抑制能力,闭环输出阻抗越小,抗负载扰动的能力越好。由式(6)、(11)、(19)可以计算出电压调节模块的闭环输出阻抗  $Z_{oc}(s)$  特性。图 9 为小信号模型理论计算以及实际测量得到的闭环输出阻抗幅频特性。可以看出,理论计算得到的闭环输出阻抗特性与实际测量得到的结果是比较一致的。

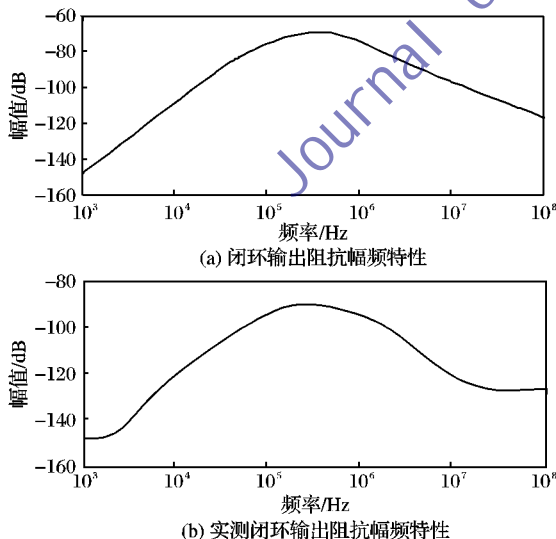


图 9 模块闭环输出阻抗特性

闭环输入阻抗表示变换器对供电电源的负载特性,实际设计中可根据闭环输入阻抗来确定电压调节模块输入滤波器的参数。同时,闭环输入阻抗也是判断直流分布式供电系统是否稳定的重要依据。分别求出各个子系统的闭环输入阻抗后,再根据一次电源输出阻抗之间的关系可以判定系统是否稳定<sup>[1-3]</sup>。由式(7)~式(19)可以计算出电压调节模块的闭

环输入阻抗  $Z_{ic}(s)$  特性。图 10 为小信号模型理论计算以及实际测量得到的闭环输入阻抗幅频特性。可以看出,理论计算得到的阻抗特性与实际测量得到的结果是比较一致的。

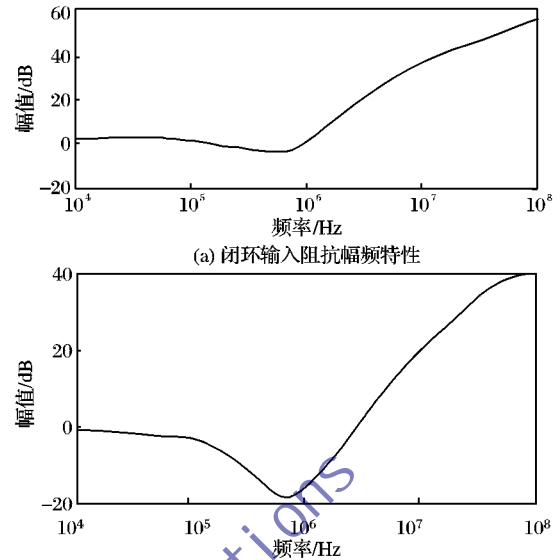


图 10 模块闭环输入阻抗特性

### 3 结语

本文详细分析了高性能计算机中电压调节模块的输入输出阻抗特性。建立了电压调节模块的小信号模型,通过理论计算得出了阻抗特性的表达式,绘制了波特图,然后用频率响应分析仪实际测量了电压调节模块的开环输入输出阻抗特性,并根据测量结果针对性地优化设计了反馈补偿回路参数,从而使环路增益的带宽和相位裕量满足设计要求。在此基础上,得到了电压调节模块的闭环阻抗特性,再用频率响应分析仪进行了实际测量,验证了理论计算的正确性。本文建立的小信号模型和计算出的参数,为电源系统稳定性设计奠定了基础。同时,这种模块电源阻抗特性分析的步骤和流程,对其他类型模块电源的阻抗特性研究具有很好的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] WILDRICK C M, LEE F C, CHO B H, *et al.* A method of defining the load impedance specification for a stable distributed power system [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1995, 10(3): 280-285.
- [2] FENG XIAOGANG, LIU JINJUN, LEE F C. Impedance specifications for stable DC distributed power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002, 17(2): 157-162.
- [3] ZHANG J M, XIE X G, JIAO D Z, *et al.* Stability problems and input impedance improvement for cascaded power electronic systems [C]// *Proceedings of IEEE APEC*. [S. l.]: IEEE, 2004: 1018-1024.
- [4] ABE S, HIROKAWA M, ZAITSU T, *et al.* Study of stabilization design for on-board distributed power architecture [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1993, 8(2): 112-119.
- [5] WONG P-L. Performance improvements of multi-channel interleaving voltage regulator modules with integrated coupling inductors [EB/OL]. [2011-01-01]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.58.1506&rep=rep1&type=pdf>.
- [6] ERICKSON R W. *Fundamentals of power electronics* [M]. New York: Kluwer Academic, 2001: 377-391.