第43卷 第6期 西 安 交 通 大 学 学 报 Vol. 43 №6
2009年6月 JOURNAL OF XI′AN JIAOTONG UNIVERSITY Jun. 2009

用于实现互联系统仿真的电源模块大信号模型

王润新，刘进军，侯丹
（西安交通大学电气工程学院，710049，西安）

摘要：提出一种新的针对双环控制结构电源模块(含连续导通模式功率因数校正器模块和电流模式控制DC-DC模块)的大信号建模方法，目的在于克服互联系统单纯采用开关模型实现仿真时遇到的困难.该方法利用双环控制系统中内环响应速度快、外环控制器所给出的指令信号变化缓慢这一特点，将内环闭环传输特性用比例环节等效实现；利用平均意义下的瞬时功率平衡关系，用模拟主电路功率流动规律的代数运算单元替代含有复杂开关过程的主电路.以上方法简化了控制电路，避开了耗时的开关过程，最终使双环控制的开关系统转化成为单环控制的以连续平均量为变量的非线性系统.仿真结果表明，在保证准确反映电源模块端口特性的同时，采用本文模型仿真，较之采用开关模型，仿真速度显著加快.

关键词：互联；直流-直流变换器；功率因数校正；大信号模型
中图分类号：TM46；TP391.9 **文献标志码**：A **文章编号**：0253-987X(2009)06-0076-06

Large-Signal Model of Power Supply Modules for Implementing Inter-Connected System Simulations

WANG Runxin, LIU Jinjun, HOU Dan
(School of Electrical Engineering, Xi′an Jiaotong University, Xi′an 710049, China)

Abstract: Pursuing rapid simulation speed and requiring reflection of more circuit details are always contradictory in computer simulations, especially for those of complex circuits such as a distributed power system. Simplified models of power supply modules are expected to establish a balance between above two requirements in implementing inter-connected system simulations. After discussing the difficulties in attempting to simulate inter-connected systems with switching models, the features of double-loop controlled power supply modules are investigated, in which cover a range of modules including continuous conduction mode (CCM) power factor correction (PFC) rectifiers and current mode controlled dc-dc converters. A new modeling approach is proposed, which the main idea is to simplify the double-loop controlling structure to a single-loop one by equating the inner current loop with a proportional gain block and furthermore treating the power stage as a power conservation unit that only externally represents the averaged voltage-ampere relations at both input and output ports through arithmetic calculation. A double-loop controlled switching system is transformed to a single-loop controlled non-linear system with continuous averaged variables in the proposed approach. The validity of the proposed model is verified by comparing the simulation speed and waveforms obtained respectively from switching models and the proposed model.

Keywords: interconnection; dc-dc converter; power factor correction; large-signal model

---

收稿日期：2008-09-05. 作者简介：王润新(1968—)，男，博士生；刘进军(联系人)，男，教授，博士生导师. 基金项目：国家自然科学基金资助项目(50677053).

传统的电子设备通常采用单模块电源集中供电，这种集中式电源系统有负载自动调节能力差、实现后备电源方案复杂、不易实现余度供电和不中断供电、故障范围容易扩散等缺点. 近年来，由多个模块通过串联、并联、级联等方式组成的互联式电源系统发展迅速，与之相关的研究也日渐增多[1-2].

互联系统中的各个模块大都工作在几十千赫或更高频率，其输入特性复杂，输出端也不可看作理想的电压源. 由互联导致的模块间的耦合，使得单独运行时原本不存在的问题，互联之后却显现出来. 因此，对互联系统的研究，除拓扑结构和模块间的均压、均流技术之外，模块在系统中的对外行为特性以及它们之间的相互作用，也是重要内容之一.

仿真效率问题一直备受关注[3]. 由于计算机硬件条件的限制，对规模太大以致无法在合理时间内获得有效解答的仿真问题，必须采用模型分级的方法对仿真对象简化[4-5]. 本文从研究连续导通模式功率因数校正器(PFC)模块和电流模式控制直流-直流变换器(DC-DC)模块出发，针对广泛采用的双环控制结构，提出一种针对双环控制结构电源模块的大信号建模方法. 使用该方法，能显著加快仿真速度，有效解除此类模块给整个复杂互联系统仿真带来的制约.

1　电源模块的双环控制结构及特征

连续导通模式 PFC 模块和电流模式控制 DC-DC 模块在电源系统中有着不同的功用，但两者在电路上都采用如图 1 所示的双环控制结构. 即：以电流调节环作为模块的内环，控制指定的电感电流跟随内环指令；以电压调节环作为模块的外环，根据输出电压误差信号动态调节电压控制器输出；外环调节器(即电压控制器)输出，或者其与工频正弦全波整流信号的乘积，作内环指令.

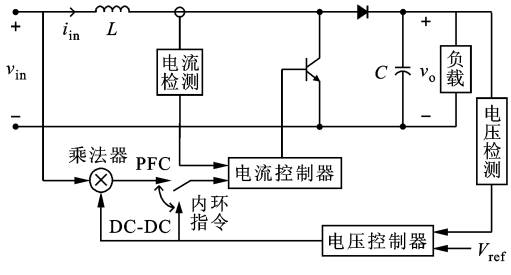
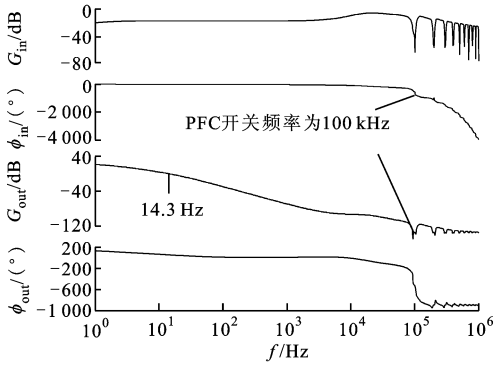
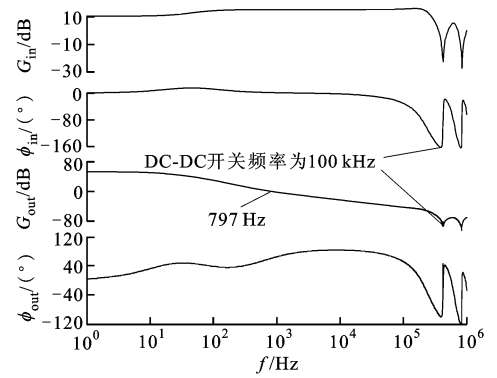


图 1　双环控制结构示意图

为了说明双环控制结构的特征，本文通过 SIMPLIS 环境中已经充分验证的两个典型电路开关模型，分别测得 PFC 和 DC-DC 的内、外环频率特性，结果如图 2 所示，其中 G_{in}、G_{out}分别为内、外环增益，ϕ_{in}、ϕ_{out}分别为内、外环相位. 两个电路的原型，分别是以 UC3854 为控制器的 PFC 电路和以 UCC3800 为控制器的 DC-DC 变换器电路. 电路参数源于控制器芯片供应商的数据表，开关模型工作正常.



(a)PFC 模块



(b)DC-DC 模块

图 2　PFC、DC-DC 模块内、外环频率特性对比

对比两种电路各自内外两个闭环的频率特性以及它们之间的关系，可以总结出以下规律：内环电流传输特性带宽大，幅频特性平坦，通带以内相位偏移小；外环环路增益截止频率低，带宽窄，电压调节器呈现典型的低通滤波特性，电压误差信号经调节器处理后，高频成分会被明显抑制；电压调节器输出信号频谱范围远小于电流传输特性带宽，由该信号直接给出或者由其与工频正弦全波整流信号相乘而生成的内环指令，变化相对缓慢，可以被内环输出准确跟随.

这些规律并非个别变换器所独有. 事实上，电源模块的双环结构与控制工程领域为抑制多个扰动信号而采用的串级控制在原理上完全一致.

在图 3 所示的串级控制系统中，内、外两个控制环路(内环、外环)分别称为副回路和主回路. 副回路由副调节器 G_{c2}、被控对象 G_2 以及测量变送器 H_2 闭环而成，用来快速抑制扰动 N_2. 作为主回路前向

通道的一部分，副回路又与用来慢速调节主回路输出变化的主调节器 G_{c1} 相串联，共同对被控对象 G_1 实施控制. 主调节器的输出作副回路的给定值 R_2. 这样的串级控制系统，尽管被控对象 G_1 的具体形态可能千差万别，但设计时总是将慢速的主回路近似当作一个恒值控制系统，而要求把副回路控制成一个能够快速响应、准确跟踪的随动系统[6].

串级控制原理应用于常见的转速、电流双环控制直流电机调速系统时，副回路是电流环，主回路是速度环. 若应用于双环控制的电力电子模块，则副回路是电流环，主回路是电压环. 有了电源模块开发设计遵循串级控制原理这个前提，串级控制的设计目标自然而然地成了任何设计良好的双环控制电源模块都应当具备的特征. 控制原理的一致性使得本节前面讨论的规律有了普遍意义. 把电流环在功能上当作一个理想的随动系统，或者说，在仿真中采用比例环节等效实现电流环的电流传输特性，是本文后续部分建立模型的策略之一.

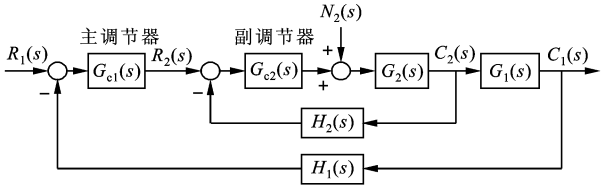


图 3 串级控制系统结构图

2 主电路中的瞬时平均功率平衡关系

采用比例环节等效实现电流环的电流传输特性，意味着主电路中被控电感电流的滑动平均量在数值上将完全成比例于内环指令. 这里，滑动平均量定义为

$$\langle x(t)\rangle(t)=\frac{1}{T_s}\int_t^{t+T_s}x(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{1}$$

式中：T_s 为开关周期.

若将 PFC、DC-DC 模块主电路（不含输出电容）看作二端口，并且用 $\langle u_{in}\rangle$、$\langle i_{in}\rangle$、$\langle u_{out}\rangle$、$\langle i_{out}\rangle$ 分别表示其输入、输出端口的平均电压和平均电流，那么由瞬时平均功率平衡，可以推出 3 种典型主电路拓扑各自 4 个端口变量之间所应满足的约束关系，如表 1 所示. 下面，以图 4 所示的 Boost 主电路为例，简述推导过程.

(1)假设主电路初态为零，电路启动后的能量关系为

$$\int_0^t\langle u_{in}\rangle(\tau)\langle i_{in}\rangle(\tau)\mathrm{d}\tau=$$

$$\frac{1}{2}L\langle i_{in}\rangle^2+\int_0^t\langle u_{out}\rangle(\tau)\langle i_{out}\rangle(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{2}$$

(2)将能量关系式对时间求导，获得功率关系式

$$\langle u_{in}\rangle\langle i_{in}\rangle=L\frac{\mathrm{d}\langle i_{in}\rangle}{\mathrm{d}t}\langle i_{in}\rangle+\langle u_{out}\rangle\langle i_{out}\rangle \tag{3}$$

(3)对功率关系式进行整理，使之左右两端分别表达由输入电流和输出电流对应的功率

$$\left(\langle u_{in}\rangle-L\frac{\mathrm{d}\langle i_{in}\rangle}{\mathrm{d}t}\right)\langle i_{in}\rangle=\langle u_{out}\rangle\langle i_{out}\rangle \tag{4}$$

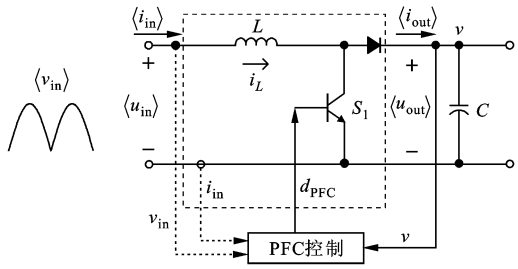


图 4 Boost 主电路二端口

对于 Buck 和 Boost 电路，表 1 中的功率关系直观反映出开关网络消耗的功率为 0. 此关系也可以理解为，输送至负载（含输出电容）的平均功率始终等于输入端口从电源获取的平均功率与主电路内储能元件消耗的平均功率之差. 对于 Buck-boost 电路，注意到在表 1 所规定的电流参考方向下，有

$$\langle i_L\rangle=i_{ctrl}=\langle i_{in}\rangle+\langle i_{out}\rangle \tag{5}$$

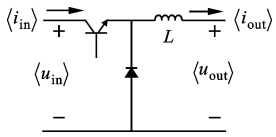
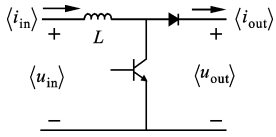
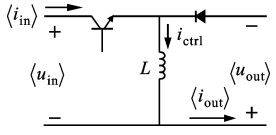
以上论述仍然适用.

3 简化的单环模型

在双环控制的 PFC、DC-DC 电源模块中，将内环指令与代表电流传输增益的比例系数的乘积，记作 i_{ctrl}，总可以归结为流过某个电感的平均电流. 对主电路二端口而言，此电感电流可能是输入电流（如 Boost）或输出电流（如 Buck），也可能是它们的线性组合（如 Buck-boost）.

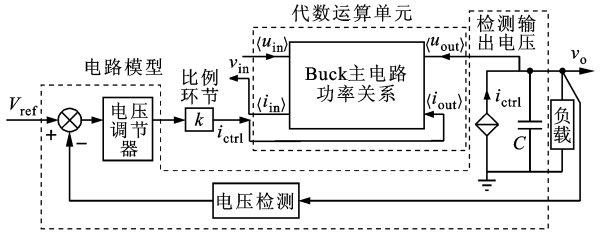
根据前面的讨论，如果：①只关注电源模块的端口特性而忽略电路内部的动作细节；②对端口变量，只关注其平均值而忽略开关周期尺度下的波形细节. 那么，仿真中可以设法避开反映拓扑状况以及实际开关过程的主电路，以符合表 1 中功率关系的代数运算单元取而代之. 该代数运算单元与保留下来的电压调节回路一起，能够构成一个新的闭环模型. 由于新模型中只完整保留了电压外环而不再含有任何电流内环细节，本文称之为单环模型.

表 1　典型变换器拓扑主电路二端口功率关系

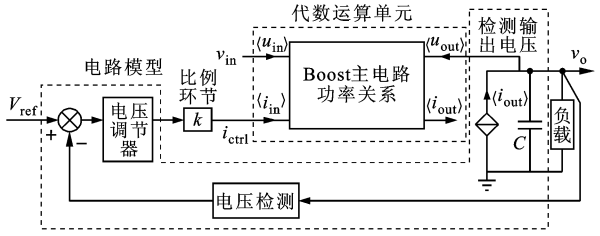
主电路	拓扑	功率关系
Buck		$\langle u_{\text{in}}\rangle\langle i_{\text{in}}\rangle = \left(\langle u_{\text{out}}\rangle + L\dfrac{\text{d}\langle i_{\text{out}}\rangle}{\text{d}t}\right)\langle i_{\text{out}}\rangle$
Boost		$\left(\langle u_{\text{in}}\rangle - L\dfrac{\text{d}\langle i_{\text{in}}\rangle}{\text{d}t}\right)\langle i_{\text{in}}\rangle = \langle u_{\text{out}}\rangle\langle i_{\text{out}}\rangle$
Buck-boost		$\langle i_{\text{in}}\rangle\left(\langle u_{\text{in}}\rangle - L\dfrac{\text{d}(\langle i_{\text{in}}\rangle + \langle i_{\text{out}}\rangle)}{\text{d}t}\right) = \langle i_{\text{out}}\rangle\left(\langle u_{\text{out}}\rangle + L\dfrac{\text{d}(\langle i_{\text{in}}\rangle + \langle i_{\text{out}}\rangle)}{\text{d}t}\right)$

利用平均意义下的瞬时功率平衡关系，用模拟主电路功率流动规律的代数运算单元替代含有复杂开关过程的主电路，是本文建立模型的又一策略.

图 5 中给出了分别含有 Buck 主电路和 Boost 主电路的 DC-DC 模块单环模型结构图（主电路输入端电流结构未画出）. 采用 Buck 主电路时，i_{ctrl} 控制输出平均电流 $\langle i_{\text{out}}\rangle$，代数运算单元通过 i_{ctrl}、外部输入电压 v_{in} 以及检测得到的输出电压 v_{o} 等 3 个变量，实时计算主电路从电源端吸取的平均电流 $\langle i_{\text{in}}\rangle$. 采用 Boost 主电路时，$i_{\text{ctrl}}$ 控制输入平均电流 $\langle i_{\text{in}}\rangle$（在输入电压 v_{in} 由外部给定的情况下，实际上等同于控制输入功率）. 代数运算单元通过将输入功率与检测到的输出电压 v_{o} 相除，实时计算输出平均电流 $\langle i_{\text{out}}\rangle$.



(a)Buck 主电路



(b)Boost 主电路

图 5　DC-DC 模块的单环模型框图

采用 Buck-boost 主电路时，如式(5)所示，i_{ctrl} 控制的是输入与输出电流之和. 欲使 i_{ctrl} 取代 $\langle i_{\text{in}}\rangle$ 或 $\langle i_{\text{out}}\rangle$ 而成为参与代数运算的 4 个变量之一，可利用式(5)，将功率关系式稍作变形，得到的以下两式

$$i_{\text{ctrl}}\left(\langle u_{\text{in}}\rangle - L\frac{\text{d}i_{\text{ctrl}}}{\text{d}t}\right) = \langle i_{\text{out}}\rangle(\langle u_{\text{in}}\rangle + \langle u_{\text{out}}\rangle) \quad (6)$$

$$\langle i_{\text{in}}\rangle(\langle u_{\text{in}}\rangle + \langle u_{\text{out}}\rangle) = i_{\text{ctrl}}\left(\langle u_{\text{out}}\rangle + L\frac{\text{d}i_{\text{ctrl}}}{\text{d}t}\right) \quad (7)$$

均可用来实现代数运算单元.

图 6 给出了由式(6)所实现的 Buck-boost 主电路功率二端口简化模型. 图中的代数运算单元由乘法器、除法器作简单组合得到，其端子对外采集或输出只体现数量关系的电压或电流控制信号，电气连接则通过相应的受控源完成. 由于实现过程中只用到最基本的运算或控制单元，绝大多数仿真环境在器件上都可以满足需求.

将图 6 的二端口模型应用于图 5，可以获得含有 Buck-boost 主电路的单环模型. 图 5 中示出的两个

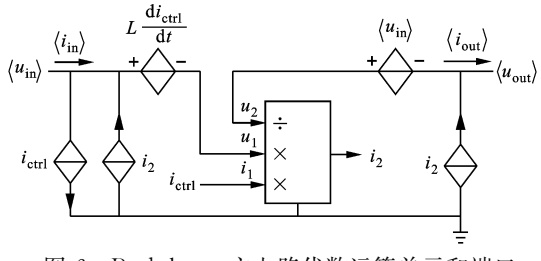


图 6　Buck-boost 主电路代数运算单元和端口电流的实现方法

代数运算单元以及相应的主电路输入端电流，也都可以仿照图 6 实现.

回顾整个模型建立过程，单环模型在采用比例环节等效实现电流环电流传输特性的同时，又以模拟主电路功率流动规律的代数运算单元作为被控对象(即图 3 中的 G_1)，不仅简化了控制电路，而且避开了复杂、耗时的开关过程，最终使系统转化成为一个以连续平均量为变量的非线性系统. 由于计算机处理乘、除法运算远比处理开关过程简单，所以有理由期望采用该模型后仿真速度会显著加快.

4 单环模型的有效性验证

4.1 仿真速度验证

针对一款 UC3854 典型应用电路(带有输入电压前馈功能的 PFC)的 SIMPLIS 开关模型[7]，图 7 给出了同一环境下采用本文方法导出的单环模型.

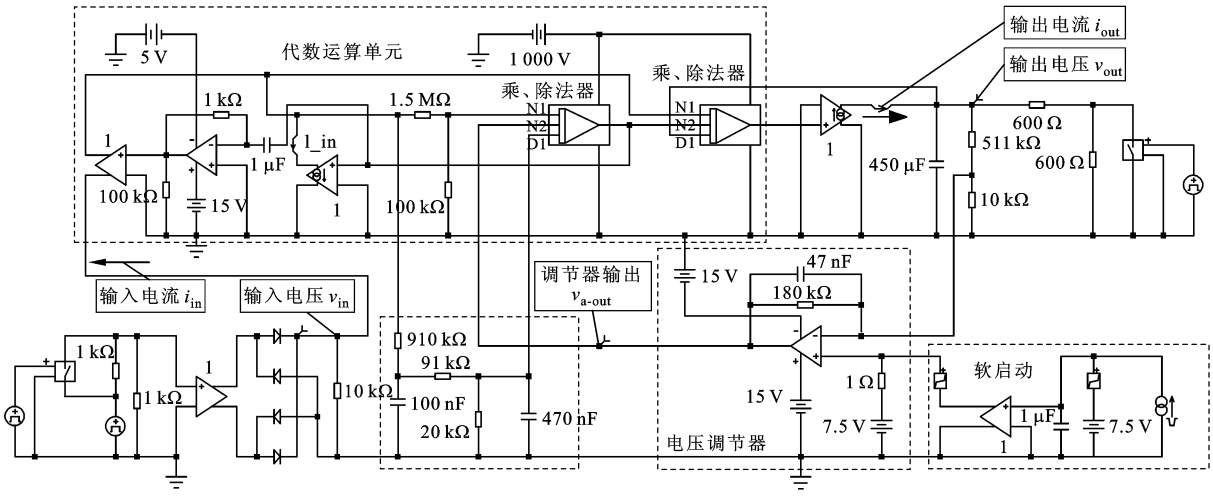


图 7 一款带有输入电压前馈功能的 PFC 模块对应的 SIMPLIS 单环模型

图 8 是单环模型的仿真结果，该结果与采用开关模型的仿真结果相近. 在相同的硬件条件下，采用开关模型仿真，需要 CPU 时间 6 min 50.92 s，采用单环模型仿真，所需 CPU 时间显著下降为 17.81 s.

更多的仿真实践表明，如果选用不同的仿真软件，仿真速度之间的差异程度会发生变化. 但是，由于单环模型在电路结构以及变量关系描述上所做的明显简化，及其能提升仿真速度这一事实，没有因所选用软件的变化而发生根本改变.

4.2 特征波形验证

倍周期现象是单相 PFC 电路在非正常工况下所表现出的一种特有的大信号行为[8]. 由于此现象的发生由包括电流环电流传输特性在内的整个电压控制回路和主电路的功率传输特性共同决定，因此仿真结果能否正确反映此现象可以作为检验模型是否有效的标准.

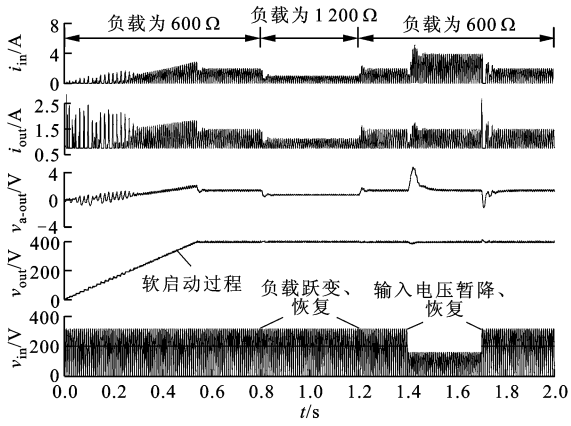


图 8 图 7 模型给出的仿真结果

图 9 和图 10 给出了 Saber 环境下对同一工况

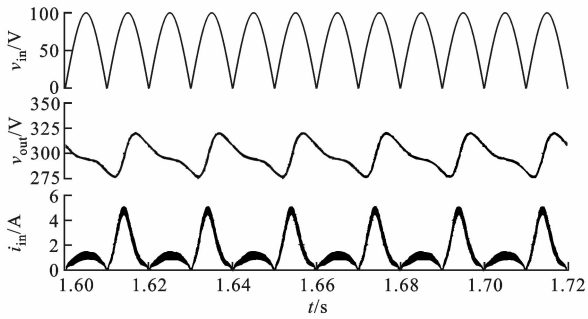


图 9 单相 PFC 开关模型中的倍周期现象

分别采用开关模型、单环模型进行仿真所获得的结果. 从图中可以看出，两种仿真结果基本一致，输入电流及输出电压波形的倍周期特征明显.

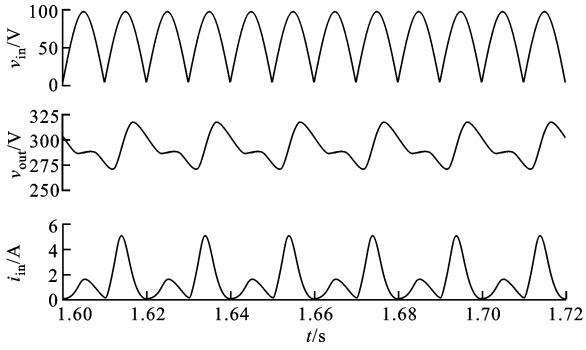


图 10　单环模型所复现的单相 PFC 倍周期现象

5　结　论

与其他简化模型相比，单环模型有自己的特点：①建模对象是设计成熟、运行正常的电源模块；②所得模型是反映模块端口特性的大信号模型；③保留了系统的小信号动态特性[9]；④原理简单，物理意义明确；⑤与开关模型联系紧密，容易从已有开关模型直接导出.

应用本文方法以及由其导出的大信号模型，可以方便地建立能高效运行的互联电源仿真系统，进而对系统进行大信号分析. 所提模型完全适用于多模块以不同方式互联的场合，有望成为通过仿真方法研究互联系统的工具之一.

参考文献：

[1] LIU Jinjun, WILSON T G, ZHAO Q, et al. Large-signal model of a downstream DC/DC converter for analysis and design of front-end PFC rectifier using computer simulation[C]// Proceedings of the 18th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 1002-1007.

[2] ALTOWATI A, SUNTIO T, ZENGER K. Input filter interactions in multi-module parallel switching-mode power supplies[C]// Proceedings of International Conference on Industrial Technology. Piscataway, N J, USA: IEEE, 2005: 851-856.

[3] 郭立芝，赵录怀. 计及动作时间的开关模型及其应用[J]. 西安交通大学学报，2003，37 (12)：1284-1287.
GUO Lizhi, ZHAO Luhuai. New model of switches taking account of switching interval and its application [J]. Journal of Xi′an Jiaotong University, 2003, 37 (12): 1284-1287.

[4] THOTTUVELL V J, CHIN D, VERGHESE G C. Hierarchical approaches to modeling high-power-factor AC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1991, 6 (2): 179-187.

[5] WANG Runxin, LIU Jinjun, WANG Hao, et al. Multi-level modeling of PFC rectifier and dc-dc converter modules in inter-connected switching power supply systems[C]// Proceedings of the 22nd Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1475-1479.

[6] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 4 版. 北京：科学出版社，2001：118-133.

[7] Simplis Technologies Inc. SIMPLIS reference manual [M]. Thatcham, UK: Cantena Software Ltd., 2008: 117-169.

[8] WONG S C, TSE C K, ORABI M, et al. The method of double averaging: an approach for modeling power-factor-correction power converters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems: I, 2006, 53(2): 454-462.

[9] WANG Runxin, LIU Jinjun, WANG Hao, et al. Small-signal analysis of the lower-frequency power transfer model[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Power Electronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 102-106.

（编辑　杜秀杰）

[本刊相关文献链接]

电流型单端初级电感变换器的不稳定性与分岔控制. 2007,41(12):1465-1469.
Boost 变换器的输出纹波电压分析与最小电感设计. 2007,41(6):707-711.
Buck-Boost DC/DC 变换器中边界碰撞分岔现象的实验研究. 2006,40(4):454-458.