

并联 Buck 变换器反步均流控制律的设计

张天瑜

(无锡市广播电视大学机电工程系, 江苏 无锡 214011)

摘要: 在电感电流连续导通的模式下, 提出一种基于反步法的并联 Buck 变换器的均流控制方法。该方法在并联 Buck 变换器状态方程的基础上, 引入一个表示电感电流间误差积分的状态量, 然后拓展状态向量, 得到拓展后的状态方程, 针对该状态方程, 根据反步法的原理, 设计了并联 Buck 变换器的反步均流控制律。仿真结果表明, 反步均流控制可以实现良好的均流效果, 与自主均流控制相比, 具有更强的鲁棒性。

关键词: 并联 Buck 变换器; 连续导通模式; 反步均流控制; 自主均流控制; Lyapunov 函数; 鲁棒性

Design of backstepping current sharing control law for paralleled Buck converter

ZHANG Tian-yu

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Wuxi Radio & Television University, Wuxi 214011, China)

Abstract: A current sharing control method of paralleled Buck converter is proposed based on backstepping method in continuous conduction mode of inductor current. On the basis of state equation of paralleled Buck converter, a state which expresses the integration of error between inductor currents is introduced and then the state vector is expanded and the expanded state equation is obtained. For the proposed state equation, according to the principle of backstepping method, the backstepping current sharing control law of paralleled Buck converter is designed. The simulation results show that the backstepping current sharing control can achieve good current sharing effect and has stronger robustness than the automatic current sharing control.

Key words: paralleled Buck converter; continuous conduction mode; backstepping current sharing control; automatic current sharing control; Lyapunov function; robustness

中图分类号: TM46 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0019-04

0 引言

DC-DC 并联电源系统具有大容量、高效率、高可靠性、模块化和成本低等优点, 它在大功率负载电路系统中得到了广泛应用。然而在实际的应用中, 由于各模块的参数不可能完全一致, 导致它们承担的输出功率不均衡。如果不采取相应的措施可能会导致某个或某些模块承受较大的电流应力, 从而引起该模块甚至整个系统的崩溃。因此, 必须对并联电源系统施加均流控制。均流对提高并联电源系统的可靠性具有重要意义, 是实现大功率电源的关键, 因为各变换器模块的输出特性存在差异, 输出特性好的模块可能承担更多的电流甚至过载, 从而使某些输出特性较差的模块运行于轻载甚至基本上是空载。其结果必然是分担电流多的模块热应力大, 增加了损坏的几率, 降低了可靠性, 而且还会由于某个模块达到最大电流的限制而使整个并联电源系统

不能正常工作。所以, 并联变换器模块间需要采用均流措施来实现各模块输出电流的均匀分配, 常见的均流控制方法有主从控制法、中央电流控制法、均流线控制法和输出下垂控制法。目前, 关于并联 DC-DC 变换器的建模与分析主要是从频域角度出发, 由系统小信号模型推导出一系列的传递函数。在研究系统稳定性时, 可由小信号模型得到冗长的闭环增益传递函数, 但其分析较为复杂, 往往只能给出一些定性的结论。尽管这些结论对工程设计有一定的指导意义, 但是其物理机理不清晰, 影响了对该类系统的深入理解^[1-11]。反步法是由 Kanellakopoulos I、Kokotovic P V 和 Morse A S 于 1991 年首先提出的, 它是通过状态反馈来解决一类线性和非线性系统稳定性和跟踪控制问题的设计方法, 目前反步法已经得到了广泛的关注, 它在电机控制、航天器控制、工业过程控制等众多领域均得到了成功的应用。本文通过引入一个表示电感电流

间误差积分的状态量来拓展状态向量，建立了并联 Buck 变换器拓展后的状态方程，根据反步法的原理，设计了满足闭环系统稳定的反步均流控制律，可以实现良好的均流效果，与自主均流控制相比，反步均流控制具有更强的鲁棒性。

1 并联 Buck 变换器主电路模型分析

并联 Buck 变换器主电路的原理图如图 1 所示。

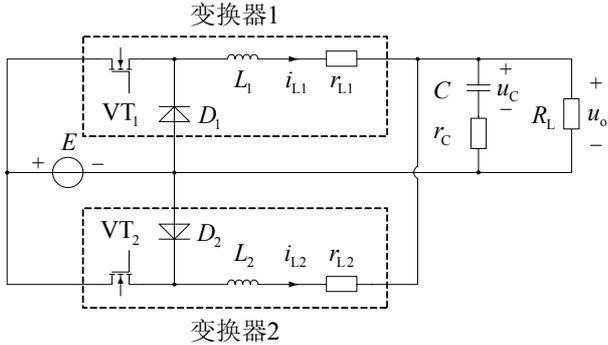


图 1 并联 Buck 变换器的主电路

Fig.1 Main circuit of paralleled Buck converter

从图 1 可以看出并联 Buck 变换器的主电路是由开关管 VT_1 、 VT_2 （如 IGBT、功率 MOSFET、功率二极管等），续流二极管 D_1 、 D_2 ，储能电感 L_1 、 L_2 和滤波电容 C 等组成。其中， r_{L1} 、 r_{L2} 为储能电感的内阻， r_c 为滤波电容的内阻， R_L 为阻性负载， i_{L1} 、 i_{L2} 分别为流经 L_1 、 L_2 的电流， E 为输入电压， u_c 为电容两端的电压， u_o 为阻性负载两端的输出电压。

选取状态向量 $\mathbf{x} = [u_c, i_{L1}, i_{L2}]^T$ ，得到并联 Buck 变换器的状态方程为：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (1)$$

式中： \mathbf{A} 为系统矩阵，

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C(R_L+r_c)} & \frac{R_L}{C(R_L+r_c)} & \frac{R_L}{C(R_L+r_c)} \\ -\frac{R_L}{L_1(R_L+r_c)} & -\frac{1}{L_1}(\frac{r_c R_L}{R_L+r_c} + r_{L1}) & -\frac{1}{L_1}(\frac{r_c R_L}{R_L+r_c}) \\ -\frac{R_L}{L_2(R_L+r_c)} & -\frac{1}{L_2}(\frac{r_c R_L}{R_L+r_c}) & -\frac{1}{L_2}(\frac{r_c R_L}{R_L+r_c} + r_{L2}) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} \text{ 为输入矩阵, } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ E/L_1 & 0 \\ 0 & E/L_2 \end{bmatrix}; \mathbf{u} \text{ 为控制律,}$$

$\mathbf{u} = [d_1, d_2]^T$ ， d_1 、 d_2 分别为开关管 VT_1 、 VT_2 的占空比， $0 \leq d_1 \leq 1$ ， $0 \leq d_2 \leq 1$ 。

为了实现均流的功能，引入一个表示电感电流

间误差积分的状态量：

$$e = \int_0^t [i_{L1}(\tau) - i_{L2}(\tau)] d\tau \quad (2)$$

对式 (2) 求导，可得：

$$\dot{e} = i_{L1} - i_{L2} \quad (3)$$

令拓展后的状态向量为：

$$\mathbf{x}_e = [e, u_c, i_{L1}, i_{L2}]^T \quad (4)$$

则并联 Buck 变换器拓展后的状态方程为：

$$\dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{A}_e \mathbf{x}_e + \mathbf{B}_e \mathbf{u} \quad (5)$$

式中： \mathbf{A}_e 为拓展后的系统矩阵，

$$\mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & -\frac{1}{C(R_L+r_c)} & \frac{R_L}{C(R_L+r_c)} & \frac{R_L}{C(R_L+r_c)} \\ 0 & -\frac{R_L}{L_1(R_L+r_c)} & -\frac{1}{L_1}(\frac{r_c R_L}{R_L+r_c} + r_{L1}) & -\frac{1}{L_1}(\frac{r_c R_L}{R_L+r_c}) \\ 0 & -\frac{R_L}{L_2(R_L+r_c)} & -\frac{1}{L_2}(\frac{r_c R_L}{R_L+r_c}) & -\frac{1}{L_2}(\frac{r_c R_L}{R_L+r_c} + r_{L2}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix};$$

\mathbf{B}_e 为拓展后的输入矩阵，

$$\mathbf{B}_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ E/L_1 & 0 \\ 0 & E/L_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix}.$$

2 反步均流控制律的设计

反步法的基本设计思想是将整个复杂的系统分解成不超过整个系统阶数的若干个子系统，然后为每个子系统设计部分的 Lyapunov 函数和中间虚拟控制量，前面的子系统必须通过后面子系统的虚拟控制才能达到稳定，这样逐步“后推”至整个系统，最终将它们集成，从而完成整个控制律的设计。

按照反步法的基本设计思想，将式 (5) 表征的整个系统分为两个子系统：

$$\dot{\mathbf{x}}_{e1} = \mathbf{A}_{11}\mathbf{x}_{e1} + \mathbf{A}_{12}\mathbf{x}_{e2} \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{e2} = \mathbf{A}_{21}\mathbf{x}_{e1} + \mathbf{A}_{22}\mathbf{x}_{e2} + \mathbf{B}_2\mathbf{u} \quad (7)$$

式中： $\mathbf{x}_{e1} = [e, u_c]^T$ ； $\mathbf{x}_{e2} = [i_{L1}, i_{L2}]^T$ 。

根据反步法的理论^[12-16]，在并联 Buck 变换器中反步均流控制律的设计步骤为：

第 1 步：

定义两个误差向量分别为：

$$\mathbf{z}_1 = \mathbf{x}_{e1} - \mathbf{x}_{\text{ref}} \quad (8)$$

$$\mathbf{z}_2 = \mathbf{x}_{e2} - \boldsymbol{\alpha} \quad (9)$$

式中： $\mathbf{x}_{\text{ref}} = [0, u_{\text{oref}}]^T$ 为 \mathbf{x}_{e1} 的期望值（显然期望 i_{L1} 等于 i_{L2} ，则 e 的期望值为 0；同时因为 r_c 远小于 R ， u_o 近似于 u_c ，所以 u_o 的参考值 u_{oref} 也近似于 u_c 的参考值）； $\boldsymbol{\alpha}$ 为虚拟控制量，需要下面的步骤来确定。

为了使式 (6) 所描述的第一个子系统稳定，选取 Lyapunov 函数为：

$$V_1 = 0.5z_1^T z_1 \quad (10)$$

对式 (10) 求导, 并根据矩阵求导以及矩阵转置的相关性质, 可得:

$$\dot{V}_1 = 0.5(z_1^T)' z_1 + 0.5z_1^T (z_1)' = z_1^T \dot{z}_1 \quad (11)$$

对式 (8) 求导, 并将式 (6) 和式 (9) 代入, 可得:

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_{e1} - \dot{x}_{\text{eref}} = A_{11}x_{e1} + A_{12}x_{e2} = A_{11}x_{e1} + A_{12}(z_2 + \alpha) \quad (12)$$

式中: x_{eref} 为常数向量, 其导数 \dot{x}_{eref} 为零向量。

将式 (12) 代入式 (11), 可得:

$$\dot{V}_1 = z_1^T (A_{11}x_{e1} + A_{12}z_2 + A_{12}\alpha) \quad (13)$$

选取虚拟控制量为:

$$\alpha = A_{12}^{-1}(-c_1 z_1 - A_{11}x_{e1}) \quad (14)$$

式中: $c_1 > 0$ 为设计参数。

将式 (14) 代入式 (13), 并根据常数转置以及矩阵转置的相关性质, 可得:

$$\dot{V}_1 = -c_1 z_1^T z_1 + z_1^T A_{12} z_2 = -c_1 z_1^T z_1 + z_2^T A_{12}^T z_1 \quad (15)$$

第 2 步:

对式 (14) 求导, 并将式 (6) 式和 (12) 代入, 可得:

$$\dot{\alpha} = A_{12}^{-1}(-c_1 \dot{z}_1 - A_{11} \dot{x}_{e1}) = -A_{12}^{-1}(c_1 I_2 + A_{11})(A_{11}x_{e1} + A_{12}x_{e2}) \quad (16)$$

式中: I_2 表示 2×2 的单位矩阵。

对式 (9) 求导, 并将式 (7) 代入, 可得:

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_{e2} - \dot{\alpha} = A_{21}x_{e1} + A_{22}x_{e2} + B_2 u - \dot{\alpha} \quad (17)$$

为了保证整个系统具有稳定性, 选取 Lyapunov 函数为:

$$V_2 = V_1 + 0.5z_2^T z_2 = 0.5z_1^T z_1 + 0.5z_2^T z_2 \quad (18)$$

式中: 显然 $V_2 > 0$ 。

对式 (18) 求导, 并将式 (15) 和式 (17) 代入, 可得:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2^T \dot{z}_2 = -c_1 z_1^T z_1 + z_2^T (A_{12}^T z_1 + A_{21}x_{e1} + A_{22}x_{e2} + B_2 u - \dot{\alpha}) \quad (19)$$

为使 \dot{V}_2 负定, 反步均流控制律取:

$$u = B_2^{-1}(-c_2 z_2 - A_{12}^T z_1 - A_{21}x_{e1} - A_{22}x_{e2} + \dot{\alpha}) \quad (20)$$

式中: $c_2 > 0$ 为设计参数。

将式 (20) 代入式 (19), 可得:

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^T z_1 - c_2 z_2^T z_2 \quad (21)$$

式中: 显然 $\dot{V}_2 < 0$, 因此 \dot{V}_2 是负定的。

由于 \dot{V}_2 是负定的, 在式 (18) 中 $V_2 > 0$, 并且当 $\|x_e\| \rightarrow \infty$ 时, $V_2 \rightarrow \infty$ 。根据 Lyapunov 稳定性理论, 由式 (20) 设计的反步均流控制律所实现的整

个闭环系统具有大范围渐近稳定 (或称全局渐近稳定) 的特性。

3 仿真实验与结果分析

在 Matlab 软件中基于功能强大的 Simulink 平台, 构建并联 Buck 变换器的仿真模型, 选取其主电路的参数分别为: $E = 48 \text{ V}$, $u_{\text{oref}} = 24 \text{ V}$, $L_1 = 0.02 \text{ H}$, $r_{L1} = 0.05 \Omega$, $L_2 = 0.04 \text{ H}$, $r_{L2} = 0.2 \Omega$, $C = 47 \mu\text{F}$, $r_C = 0.01 \Omega$, $R_L = 10 \Omega$ 。在并联 Buck 变换器未启用反步均流控制时, 取 $d_1 = d_2 = 0.5$ 。反步均流控制律中的设计参数选取 $c_1 = 6120$, $c_2 = 7500$ 。定义两路电感电流平均值之间的相对误差为 $\varepsilon = \frac{|i_{L1} - i_{L2}|}{0.5(i_{L1} + i_{L2})}$, 把它作为均流效果的综合评价指标。

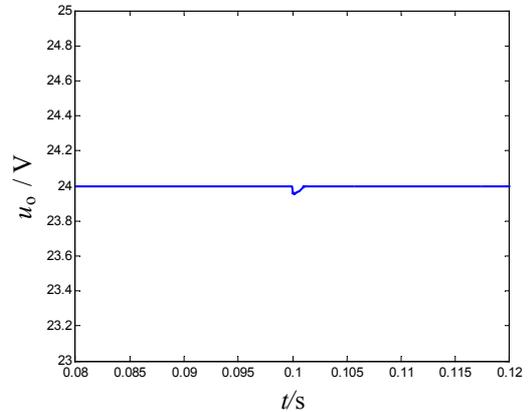


图 2 $R_L = 10 \Omega$ 时反步均流控制前后输出电压的波形

Fig.2 Output voltage waveform before and after the backstepping current sharing control when $R_L = 10 \Omega$

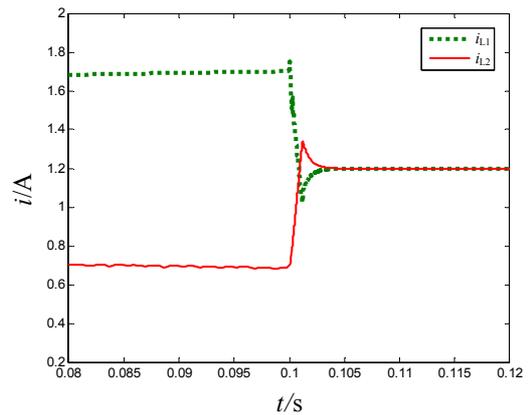


图 3 $R_L = 10 \Omega$ 时反步均流控制前后电感电流的波形

Fig.3 Inductor current waveform before and after the backstepping current sharing control when $R_L = 10 \Omega$

通过仿真得到反步均流控制前后输出电压和电感电流的波形分别如图 2 和图 3 所示。从图 2 和

图 3 可以看出, 当 $t < 0.1$ s 时, 并联 Buck 变换器未启用反步均流控制, 此时输出电压 $u_o = 24$ V, 两个 Buck 变换器中电感电流的平均值相差很大, $i_{L1} = 1.685$ A, $i_{L2} = 0.691$ A, 它们之间的相对误差达到了 $\varepsilon = 83.67\%$, 均流效果很差, 这在实际的系统中显然是不允许的; 当 $t = 0.1$ s 时, 并联 Buck 变换器切换为反步均流控制, 稳定后, 输出电压仍为 $u_o = 24$ V, 两个 Buck 变换器中电感电流的平均值几乎完全相等, $i_{L1} = 1.200$ A, $i_{L2} = 1.201$ A, 它们之间的相对误差只有 $\varepsilon = 0.083\%$, 达到了良好的均流效果。

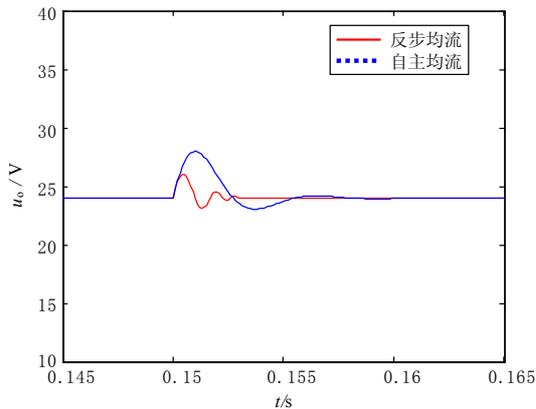


图 4 R_L 突变时在两种均流控制下输出电压的波形

Fig.4 Output voltage waveform under the control of two current sharing when R_L changes suddenly

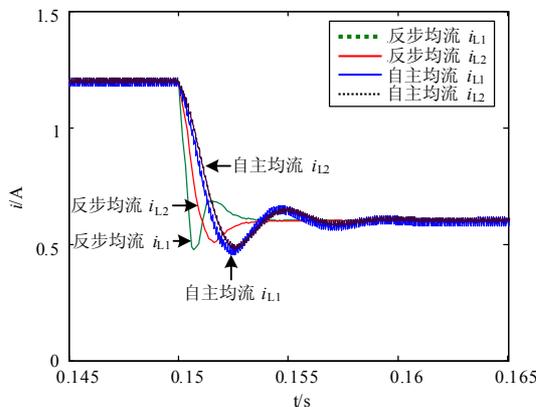


图 5 R_L 突变时在两种均流控制下电感电流的波形

Fig.5 Inductor current waveform under the control of two current sharing when R_L changes suddenly

当 $t = 0.15$ s 时, 把负载电阻 R_L 由 10Ω 突然增加至 20Ω 。为了能够进一步看出反步均流控制的优劣, 与常见的自主均流控制进行对比。通过仿真得到在两种均流控制下输出电压和电感电流的波形分别如图 4 和图 5 所示。从图 4 可以看出, 稳定后在两种均流控制下输出电压完全相等 $u_o = 24$ V, 与自主均流控制相比, 在反步均流控制下输出电压的超

调量更小, 调节时间更短。从图 5 可以得到, 稳定后在自主均流控制下 $i_{L1} = 0.802$ A, $i_{L2} = 0.801$ A, 它们之间的相对误差 $\varepsilon = 0.125\%$, 稳定后在反步均流控制下 $i_{L1} = 0.801$ A, $i_{L2} = 0.800$ A, 它们之间的相对误差 $\varepsilon = 0.125\%$, 这说明反步均流控制的效果也非常理想。从图 5 还可以进一步看出, 与自主均流控制相比, 在反步均流控制下电感电流的调节时间更短。由此可见, 在负载电阻的大小发生突变时, 反步均流控制不仅可以实现良好的均流效果而且还具有更强的鲁棒性。

4 结语

并联 Buck 变换器具有功率密度高、输出功率大、冗余性好、支持在线热拔插、可模块化设计等诸多优点。本文在电感电流连续导通的模式下, 提出一种基于反步法的并联 Buck 变换器的均流控制方法。该方法的创新之处在于通过引入一个表示电感电流间误差积分的状态量来拓展状态向量, 根据反步法的原理, 设计了并联 Buck 变换器的反步均流控制律, 可以实现良好的均流效果, 与自主均流控制相比, 反步均流控制具有更强的鲁棒性。可以预计随着大功率 DC-DC 并联电源以及分布式电源的迅速发展, 反步均流控制将会拥有更加广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Ismail E H. Large Step-Down DC-DC Converters with Reduced Current Stress [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(2): 232-239.
- [2] Elmas C, Deperlioglu O, Sayan H H. Adaptive Fuzzy Logic Controller for DC-DC Converters [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2): 1540-1548.
- [3] Choi Y, Chang N, Kim T. DC-DC Converter-Aware Power Management for Low-Power Embedded Systems [J]. IEEE Trans on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2007, 26(8): 1367-1381.
- [4] Chan C Y. Simplified Parallel-Damped Passivity-Based Controllers for DC-DC Power Converters[J]. Automatica, 2008, 44(11): 2977-2980.
- [5] Lopez M, de Vicuna L G, Castilla M, et al. Current Distribution Control Design for Paralleled DC/DC Converters Using Sliding-Mode Control [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2004, 51(2): 419-428.
- [6] Li P, Lehman B. A Design Method for Paralleling Current Mode Controlled DC-DC Converters [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(3): 748-756.

(下转第 91 页 continued on page 91)

- Measurement & Instrumentation, 2005, 42 (473): 7-9.
- [4] 林海雪, 李世林, 刘惠民. 电压电流频率和电能质量国家标准应用手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
LIN Hai-Xue, LI Shi-lin, LIU Hui-min. Voltage and Current Frequency and Application Manual of National Standard for Power Quality[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [5] 马玉龙, 刘连光, 等. IEC 闪变测量原理的数字化实现方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 21(11): 92-95.
MA Yu-long, LIU Lian-guang, et al. Research of Digital Flicker Meter Based on IEC Standard[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 21 (11): 92-95.
- [6] Salvatore Caldara, Salvatore Nuccio, Ciro Spataro. A Virtual Instrument for Measurement of Flicker[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1998, 47 (10): 1155-1158.
- [7] 王小华, 何怡刚. 一种新的基于神经网络的高精度电力系统谐波分析算法[J]. 电网技术, 2005, 29 (3): 72-75.
WANG Xiao-hua, HE Yi-gang. A New Neural Network Based Power System Harmonics Analysis Algorithm with High Accuracy[J]. Power System Technology, 2005, 29 (3): 72-75.
- [8] 张伏生, 曹进, 魏磊. 基于虚拟仪器技术的电能质量综合测量分析系统的研制[J]. 华北电力技术, 2003, (6): 14-17.
ZHANG Fu-sheng, CAO Jin, WEI Lei. Development of Integrated Measurement and Analysis System for Power Quality on Virtual Instruments[J]. North China Electric Power, 2003, (6): 14-17.
- [9] 魏佩瑜, 李震梅. 基于虚拟仪器的电能质量网络监测系统的实现[J]. 微计算机信息, 2007, 8 (1): 176-177.
WEI Pei-yu, LI Zhen-mei. Realization of Power Quality Network Monitoring System Based on Virtual Instrument[J]. Microcomputer Information, 2007, 8 (1): 176-177.

收稿日期: 2009-02-04; 修回日期: 2009-03-04

作者简介:

王明渝(1960-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能变换及控制, 电气传动等;

周延静(1984-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量检测与分析, 神经网络理论在谐波检测中的应用;

E-mail: yanjing2352650@sina.com

赵俊晖(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能变换及控制。

(上接第 22 页 continued from page 22)

- [7] Calderón A J, Vinagre B M, Feliu V. Fractional Order Control Strategies for Power Electronic Buck Converters [J]. Signal Processing, 2006, 86(10): 2803-2819.
- [8] Angulo F, Olivar G, Taborda A. Continuation of Periodic Orbits in A ZAD-Strategy Controlled Buck Converter [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2008, 38(2): 348-363.
- [9] Hsieh F H, Yen N Z, Juang Y T. Optimal Controller of A Buck DC-DC Converter Using the Uncertain Load as Stochastic Noise [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2005, 52(2): 77-81.
- [10] Papafotiou G A, Margaritis N I. Calculation and Stability Investigation of Periodic Steady States of the Voltage Controlled Buck DC-DC Converter [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(4): 959-970.
- [11] Garcera G, Figueres E, Pascual M, et al. Analysis and Design of a Robust Average Current Mode Control Loop for Parallel Buck DC-DC Converters to Reduce Line and Load Disturbance [J]. IEE Proceedings of Electric Power Applications, 2004, 151(4): 414-424.
- [12] Lin F J, Shieh P H, Chou P H. Robust Adaptive Backstepping Motion Control of Linear Ultrasonic Motors Using Fuzzy Neural Network [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2008, 16(3): 676-692.
- [13] Jankovic M. Forwarding, Backstepping, and Finite Spectrum Assignment for Time Delay Systems [J]. Automatica, 2009, 45(1): 2-9.
- [14] Wen C Y, Zhou J, Wang W. Decentralized Adaptive Backstepping Stabilization of Interconnected Systems with Dynamic Input and Output Interactions [J]. Automatica, 2009, 45(1): 55-67.
- [15] Lin F J, Teng L T, Shieh P H. Intelligent Adaptive Backstepping Control System for Magnetic Levitation Apparatus [J]. IEEE Trans on Magnetics, 2007, 43(5): 2009-2018.
- [16] Lin F J, Chang C K, Huang P K. FPGA-Based Adaptive Backstepping Sliding-Mode Control for Linear Induction Motor Drive [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(4): 1222-1231.

收稿日期: 2009-02-06; 修回日期: 2009-04-05

作者简介:

张天瑜(1980-), 男, 讲师, 技师, 硕士, 研究方向为电气工程中的多种物理场耦合理论及其数值分析, 电力电子系统中的复杂行为、先进控制、鲁棒控制与故障诊断。

E-mail: zhangtianyu163@tom.com