

DOI: 10.7667/PSPC170460

DC-DC 变换器的差模传导干扰耦合通道建模分析

韩素敏¹, 吴晓静², 苗纪青³

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000; 2. 大唐巩义发电有限责任公司, 河南 巩义 451200; 3. 国网新疆电力公司伊犁供电公司, 新疆 伊宁 835000)

摘要: 为了实现对电力电子装置差模传导干扰的系统化分析和预测, 提出了一种基于系统辨识的方法, 描述差模传导干扰耦合通道的特性。以 Buck 变换器为研究对象, 在 MOSFET 元件漏源极之间加入伪随机信号(PRBS)作为系统输入信号, 取电源侧的差模干扰作为输出信号, 由提取的数据用最小二乘法辨识出耦合通道的系统模型。结果表明, 由耦合通道模型预测的波形和实验波形时域波形吻合性较好, 频域特性成分较一致。应用建立的模型通过测量 MOSFET 元件漏源极之间干扰电压为输入, 即可预测电源侧传导干扰, 所需测试电量较少, 可得到较好的效果。
关键词: 传导干扰; 耦合通道; 差模; 系统辨识; Buck

Modeling of differential mode conducted interference coupling channel of a DC-DC converter

HAN Sumin¹, WU Xiaojing², MIAO Jiqing³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Datang Gongyi Power Generation Co., Ltd, Gongyi 451200, China; 3. State Grid Xinjiang Electric Power Company, Yili Power Supply Company, Yining 835000, China)

Abstract: In order to implement the systematic analysis and prediction of differential mode conducted interference of power electronic devices, a method is proposed based on system identification to describe the characteristics of differential mode conducted interference coupling channel. This paper selects Buck converter as the research object, exerts Pseudo Random Signal (PBRBS) between MOSFET drain-source as input signal and takes differential mode interference of power supply side as output signal. According to the extracted data, the system model of coupling channel is identified by the least square method. It is indicated that the experimental waveforms are consistent with the coupling channel model prediction results in terms of the time domain and frequency domain. Measuring the interference voltage between the drain-source of MOSFET as the input signal by use of the built model can predict the conducted interference of power supply side and achieve good results with the relative few measurements.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0600906).

Key words: conducted interference; coupling channel; differential mode; system identification; Buck

0 引言

由于高速功率开关器件的普遍使用和电力电子装置数量的增多, 电力电子变换器产生的电磁干扰日趋强烈, 其电磁兼容问题也越来也突出^[1-3]。电磁干扰耦合通道的建模问题是电力电子装置电磁兼容

研究的重点问题之一, 精确地描述电力电子装置的电磁干扰耦合通道特性, 对分析电磁干扰形成机理, 指导电磁兼容预测和调试具有重要意义。

目前国内外已有很多文献对电力电子装置电磁干扰耦合通道问题进行了研究^[4-8]。文献[6]提出了干扰灵敏度思想, 有效地简化传导干扰耦合模型, 避免了建模中寄生参数处理问题上的盲目性。文献[7]提出了一种测量交流电机传动系统中电磁干扰耦合途径特性的方法, 它通过在系统中的某些关键点处注入低电平脉冲, 再测出敏感点处的响应得出传导干扰耦合通道的特性, 但是由于考虑的参数多, 往

基金项目: 国家重点研发计划专项资助(2016YFC0600906); 河南省控制工程重点学科开放基金资助项目(KG2011-08); 河南省教育厅科学技术研究重点项目资助(14A510022); 河南省科技厅产学研合作项目资助(182107000019)

往需要庞大的计算量, 费时费力。文献[8]中建立离线式 PWM 变换器电磁干扰耦合通道模型, 研究了其各元件及有关的杂散参数对电磁干扰耦合通道特性的影响, 但考虑各元件的杂散参数后, 建立的电路模型变得十分复杂, 不利于后期电磁干扰的抑制。

针对以上所述, 本文以 Buck 电路为研究对象, 提出了一种相对简单且精确的差模传导干扰耦合通道分析和建模方法。其主导思想就是在 MOSFET 元件漏源极之间加入伪随机信号(PRBS)作为系统输入信号, 取电源侧的差模干扰作为输出信号, 由提取的输入、输出信号数据, 利用最小二乘法辨识出耦合通道的系统模型, 实现差模干扰耦合通道特性的定量描述。

1 差模干扰耦合通道模型

功率开关元件在导通和关断瞬间产生很高的 dv/dt 、 di/dt , 给电源及其他敏感设备带来严重的电磁干扰^[9], 是 Buck 变换器的主要电磁干扰源。Buck 电路(如图 1)属于周期性开关线性系统(Periodically Switched Linear System, PLS), 除了 MOSFET 和续流二极管周期性开关外, 均为线性元件。所以, 开关元件在导通和关断过程中本身的动态变化以及整个电路的传播引起干扰和非线性^[10]。在 buck 变换器中, 只有 MOSFET 和续流二极管两个周期性元件, 而 MOSFET 是受控制的, 二极管的导通关断是由其间接控制的, 所以将 MOSFET 看作干扰的源头, 将 MOSFET 漏源极之间的电压看做电压型干扰源, 此干扰源可通过不同回路传播, 如图 1 箭头方向所示。或者说, 干扰源通过导电介质向外发射, 而导电介质即为干扰耦合通道。可通过研究此干扰源传导至电源侧的耦合通道模型, 从而实现干扰预测。差模干扰源、干扰耦合通道以及差模干扰之间的关系可用图 2 所示的二端口网络来表示, 图中 v_{DS} 代表功率 MOSFET 元件漏源极间的电压, 差模干扰经由耦合通道传播后通过 LISN 测试。

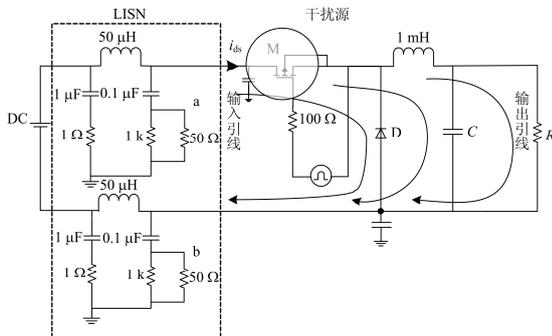


图 1 Buck 变换器及其差模干扰发射测量原理图

Fig. 1 Diagram of Buck converter and differential mode interference emission measurement

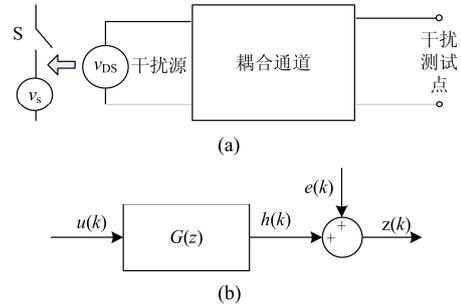


图 2 差模干扰耦合通道模型图及系统结构图

Fig. 2 Differential mode interference coupling channel model and system structure diagram

而耦合通道内, 干扰通过导线、元件的作用是一个动态变化、彼此交互的平衡过程, 其传播方向见图 1。将 v_{DS} 看做输入, 则差模干扰耦合通道模型可看作是一个线性动态系统(CAR 模型), 其系统结构图如图 2(b)所示。其数学模型表示为如下形式。

$$A(z)z(k) = B(z)u(k) + e(k) \quad (1)$$

式中: $u(k)$ 和 $z(k)$ 为系统的输入和输出信号; $e(k)$ 为零均值方差为 σ^2 的随机白噪声信号; z^{-1} 为单位后移算子 [$z^{-1}y(k) = y(k-1)$, $zy(k) = y(k+1)$]。

式中:

$$A(z) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a} \quad (2)$$

$$B(z) = b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b} \quad (3)$$

2 模型参数辨识

Buck 变换器的主电路及其差模干扰发射测量原理如图 1 所示, 具体的测量布局参照 CISPR16-1-2 标准, 主要由线路阻抗稳定网络(LISN)、电源输入引线、buck 变换器、输出引线和负载组成。Buck 变换器主要由电阻、电感及功率开关元件构成, 其输入电压 $V_{DC}=12\text{ V}$, 开关频率 $f=100\text{ kHz}$, 电感 $L_1=1\text{ mH}$, 滤波电容 $C=100\text{ }\mu\text{F}$, 输出电阻 $R=10\text{ }\Omega$, MOSFET 元件型号为 IRFP460, 二极管型号为 MR501。

2.1 基于最小二乘法的差模干扰耦合通道模型辨识

为了计算式(1)中模型的各项参数, 需要测试干扰源和差模传导干扰。为使建立模型和测试实验简单化, 可用仿真模型来代替, 其误差和精度均在可接受之内^[11]。为了更好地描述 Buck 变换器差模干扰耦合通道的特性, 现用理想开关 S 和分段线性 PWL (Piece Wise Linearity)电压源的串联代替 MOSFET 元件, 以激发变换器的常态工作模式。此时, Pspice 仿真模型输入信号 $u(k)$ 是由 PWL 电压源 v_s 模拟产生的伪随机信号(PRBS), 该伪随机信号可激励 Pspice 仿真模型的所有模态^[12-14], 其波形如图 3 所

示。Pspice 仿真模型输出信号是加伪随机信号时 LISN 测试的差模干扰与不加伪随机信号时 LISN 测试的差模干扰之差, 该信号表明仅由 PRBS 所产生的干扰, 其波形如图 4 所示。根据输入输出数据, 利用最小二乘法辨识差模干扰耦合通道模型 (CAR 模型) 的参数^[15-19]。

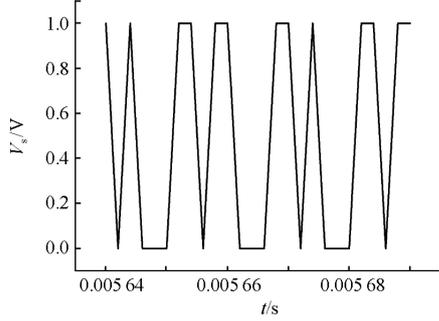


图 3 输入信号波形

Fig. 3 Waveform of input signal

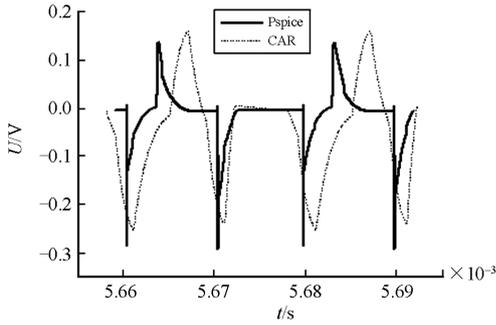


图 4 差模干扰波形对比

Fig. 4 Contrast of differential mode interference waveform

式(1)写成最小二乘标准格式为

$$z(k) = \mathbf{h}^T(k)\boldsymbol{\theta} + e(k) \quad (4)$$

式中:

$$\mathbf{h}(k) = [-z(k-1) \cdots -z(k-n_a) \quad u(k-1) \cdots u(k-n_b)]^T$$

$$\boldsymbol{\theta} = [a_1 \quad a_2 \cdots a_{n_a} \quad b_1 \quad b_2 \cdots b_{n_b}]^T \quad (5)$$

对于 $k=1, 2, 3, \dots, L$, 式(4)构成一个线性方程组, 写成矩阵形式如式(6)。

$$\mathbf{z}_L = \mathbf{H}_L \boldsymbol{\theta}_L + \mathbf{E}_L \quad (6)$$

式中:

$$\mathbf{z}_L = [z(k+1) \quad z(k+2) \cdots z(k+L)]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{E}_L = [e(k+1) \quad e(k+2) \cdots e(k+L)]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{H}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{h}^T(k+1) \\ \mathbf{h}^T(k+2) \\ \vdots \\ \mathbf{h}^T(k+L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z(k) & \cdots & -z(1) & u(k) & \cdots & u(1) \\ -z(k+1) & \cdots & -z(2) & u(k+1) & \cdots & u(2) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -z(k+L-1) & \cdots & -z(L) & u(k+L-1) & \cdots & u(L) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $z(k)$ 和 $u(k)$ 都是可观测量; $\boldsymbol{\theta}$ 是待估计参数; $e(k)$ 为预测误差, 其方差为

$$J = \frac{1}{L} \sum_{k=2}^L e(k)^2 \quad (10)$$

根据最小二乘标准格式, 令 $\partial J / \partial a_{n_a} = 0$,

$\partial J / \partial b_{n_b} = 0$, 则系数矩阵 $\boldsymbol{\theta}_L$ 可表示为

$$\boldsymbol{\theta}_L = (\mathbf{H}_L^T \mathbf{H}_L)^{-1} \mathbf{H}_L^T \mathbf{z}_L \quad (11)$$

由于 Buck 变换器有两个动态元件, 一个二阶微分方程即可表述其差模干扰耦合通道特性:

$$a_1 z(k-1) + a_2 z(k-2) = b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) \quad (12)$$

由式(10)计算出各系数:

$$a_1 = -0.38152, \quad a_2 = -0.42807$$

$$b_1 = -0.18365, \quad b_2 = 0.18129$$

式(10)对应的传递函数的表达式为

$$G(z) = \frac{-0.18365z + 0.18129}{z^2 - 0.38152z - 0.42807} \quad (13)$$

2.2 差模干扰耦合通道模型的验证

在 Matlab 工作环境下中给定与 Pspice 仿真模型相同的输入信号 $u(k)$, 通过差模干扰耦合通道传递函数模型 (CAR 模型) 计算出的输出响应与 Pspice 仿真模型中输出信号相比, 其波形图和频谱图分别如图 4、图 5 中的 CAR 所示。

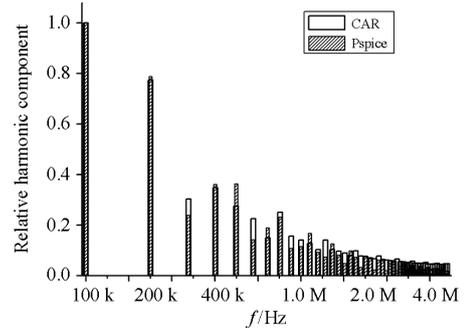


图 5 差模干扰频谱对比

Fig. 5 Contrast of differential mode interference spectrum

1) 差模干扰耦合通道模型的输出响应波形和 Pspice 仿真模型的输出信号波形变化趋势大致相同, 在幅值上误差 0.05 V 左右。

2) 两个模型输出信号的频谱成分基本吻合, 频谱都主要集中分布在 100 kHz~1 MHz 之间, 最大值出现在开关频率(100 kHz)附近。

3 电源侧差模干扰预测

3.1 预测方案

为了利用该模型预测电源侧差模干扰, 参照传

导干扰测试标准,按照图 1 的原理搭建实际电路如图 6 所示。测试电路中 MOSFET 元件漏源极的干扰 v_{ds} 作为输入信号 $u(k)$, 波形如图 7 所示; 由 LISN 测试出的电源侧实际干扰输出如图 8 所示。由建立的差模干扰耦合通道模型(CAR 模型)计算得出的差模干扰与实际电路电源侧的差模干扰相比,其波形和频谱分别如图 8、图 9 所示。两者的波形趋势大致相同,都是在开关管导通和关断的瞬间产生差模干扰,其电压幅值和频谱成分也基本吻合,频谱都主要集中在 100 kHz~1 MHz 之间,最大值出现在开关频率(100 kHz)附近。

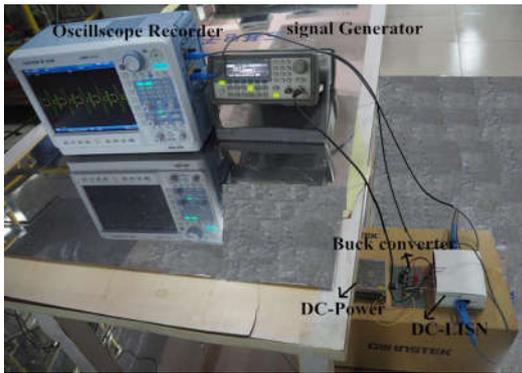


图 6 实验测试平台

Fig. 6 Experimental test platform

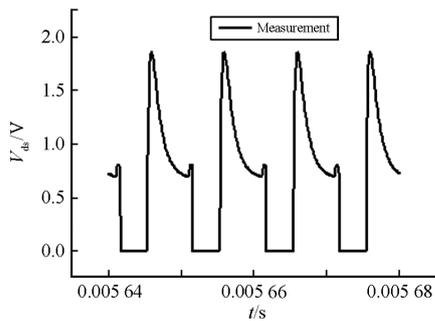


图 7 输入信号波形

Fig. 7 Waveform of input signal

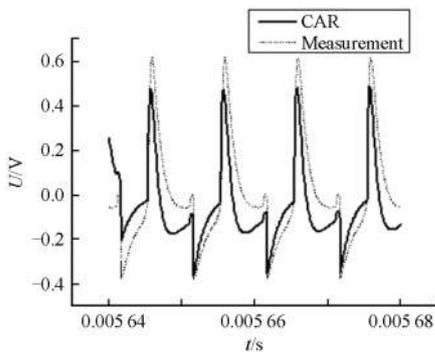


图 8 差模干扰波形对比

Fig. 8 Contrast of differential mode interference waveform

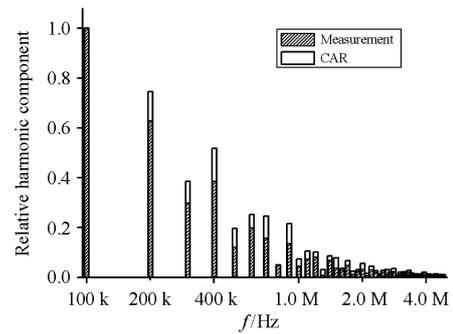


图 9 差模干扰频谱对比

Fig. 9 Comparison of differential mode interference spectrum

3.2 预测结果分析

从图 4 和图 8 的数据波形可以看出,实际测试的结果和预测结果的误差(图 8)高于仿真结果(图 4)。为了深入对比,提取图 4 和图 8 的数据波形的主要参数,见表 1。

表 1 仿真预测与实际测试误差主要数据对比

Table 1 Main data comparison between simulation prediction and real test

参数	正半周误差	负半周误差	延迟
	最大值/V	最大值/V	时间/ μ s
仿真预测	0.028 1	0.053 3	1.64
实际测试	0.145	0.158	0.001

由表 1 可以看出,实际测试的误差明显高于仿真验证的误差,但实际测试的延迟时间较小,分析其原因可能有两个方面:

1) 输入信号波形不同,幅值也不同。图 4 波形采用的输入信号为幅值为 1 V 的 PRBS(见图 3);而图 8 波形的输入信号为 MOSEFET 的实际干扰信号(见图 7),幅值约为 1.726 V。输入信号越大,干扰输出也越大,误差也越大。

2) PRBS 具有随机信号的特征,虽然叠加在理想开关上,仍使得输入信号规律性受到一定程度的影响,所以图 4 波形稳定性不如图 8;当此不稳定的输入信号去激励 CAR 模型时,因为存在上升与下降的缓变特征,使得输出也会存在响应的延迟甚至提前。而对于图 7 的输入信号,一方面非常稳定,另一方面开关切换时间非常短暂,结果使得图 8 的输出波形变化稳定,且跟随性能好。

以上分析也说明,纵然所建立的模型对于仿真预测有一定的误差,模型本身还有很大的改进空间,而且实际中由于测试设备或测试环境等不可估量却实际存在的因素会对预测结果产生影响,但是预测波形仍和实际波形吻合度较好,可以作为测试的一

种替代方法。

4 结论

本文以理想开关和伪随机信号(PRBS)作为干扰输入, 取电源侧差模干扰为输出, 利用最小二乘法对差模干扰耦合通道系统模型进行辨识。该模型可以较准确描述差模干扰耦合通道特性, 进一步实现对实际电路中电源侧差模干扰的定量预测和功率谱分析, 为解决实际电路干扰不易测试的问题提供了一种可行方法。本文的分析方法可以推广到其他拓扑类型的开关电路上, 对电磁干扰的建模和预测工作具有一定的指导意义。另外, 为了突出问题的重要性, 本文未将二极管作为干扰源来分析, 这也可能是模型不够准确的原因之一。有多个开关元件协调工作的变换器的传导干扰问题也是以后研究的重点之一。

参考文献

- [1] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 58-66.
WANG Tongwen, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Analysis of reliability for relay protection systems in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 58-66.
- [2] 王世山, 龚敏, 虞振洋. 差共模噪声相互转化机理及在平面 EMI 滤波器设计中的应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 239-246.
WANG Shishan, GONG Min, YU Zhenyang. Theoretical investigation of mutual transformation between differential mode and common mode noise and its implementation in the design of planar EMI filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 239-246.
- [3] 汪泉弟, 安宗裕, 郑亚利, 等. 电动汽车开关电源电磁兼容优化设计方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 225-231.
WANG Quandi, AN Zongyu, ZHENG Yali, et al. Electromagnetic compatibility optimization design for switching power supply used in electric vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 225-231.
- [4] LI Jing, LI Xiao, SUKHJINDER T, et al. EMI coupling paths and mitigation in a board-to-board connector[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57(4): 771-779.
- [5] 牛博, 宋政湘, 王建华, 等. 继电保护装置信号端口电磁干扰传播通道的建模与仿真[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(10): 104-108.
NIU Bo, SONG Zhengxiang, WANG Jianhua, et al. Simulation for electromagnetic interference coupling path of signal port of relay protection equipment[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(10): 104-108.
- [6] 马伟明, 赵治华, 孟进, 等. 传导电磁干扰的精确定量预测方法[J]. 中国科学(E 辑: 技术科学), 2009, 39(7): 1237-1246.
MA Weiming, ZHAO Zhihua, MENG Jin, et al. Accurate quantitative prediction method of conducted electromagnetic interference[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2009, 39(7): 1237-1246.
- [7] CHEN Chingchi. Novel EMC debugging methodologies for high-power converters[C] // Electromagnetic Compatibility, 2000, IEEE International Symposium on, Washington, DC: IEEE, 2000, 25(7): 385-390.
- [8] 和军平, 姜建国, 陈为. 离线式 PWM 变换器电磁干扰传播通道模型的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 56-60.
HE Junping, JIANG Jianguo, CHEN Wei. Study of the model of the EMI coupling paths of an off-line PWM converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(4): 56-60.
- [9] 蒋保涛, 游家发, 朱小祥. PWM 逆变器共模电磁干扰源及抑制技术探究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(11): 73-74.
JIANG Baotao, YOU Jiafa, ZHU Xiaoxiang. Research on origin and suppression of common mode EMI in PWM inverter[J]. Power Electronic Technology, 2011, 45(11): 73-74.
- [10] 唐酿, 盛超, 刘昌, 等. 电源内阻对双向 DC-DC 变换器性能的影响[J]. 广东电力, 2016, 29(10): 24-30, 68.
TANG Niang, SHENG Chao, LIU Chang, et al. Influence of source impedance on performance of bidirectional DC-DC converter[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(10): 24-30, 68.
- [11] 吴晓静, 韩素敏, 艾永乐, 等. DC-DC 变换电路差模传导电磁干扰预测模型研究[J]. 测控技术, 2017(1): 140-143.
WU Xiaojing, HAN Sumin, AI Yongle, et al. Research on predicting model of differential mode conducted EMI in DC-DC converter circuit[J]. Measurement & Control Technology, 2017(1): 140-143.
- [12] ALONGE F, RABBENI R, PUCCI M, et al. Identification and robust control of a quadratic DC/DC

- boost converter by Hammerstein model[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(5): 3975-3985.
- [13] ACCETTA A, ALONGE F, CIRRINCIONE M, et al. Parameter identification of induction motor model by means of state space-vector model output error minimization[C] // International Conference on Electrical Machines: IEEE, September 2-5, 2014 Berlin, Germany: 843-849.
- [14] ALONGE F, D, IPPOLITO F, CANGEMI T. Identification and robust control of DC/DC converter Hammerstein model[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(6): 2990-3003.
- [15] 马智远, 崔晓飞, 黄裕春, 等. 辨识谐波电流监测数据中异常数据的一种方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 96-102.
- MA Zhiyuan, CUI Xiaofei, HUANG Yuchun, et al. A detection method of abnormal harmonic current monitoring data[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 96-102.
- [16] KHODAPARAST J, KHEDERZADEH M. Least square and Kalman based methods for dynamic phasor estimation: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 1-18. DOI: 10.1186/s41601-016-0032-y.
- [17] 徐长宝, 庄晨, 蒋宏图. 智能变电站二次设备状态监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 127-131.
- XU Changbao, ZHUANG Chen, JIANG Hongtu. Technical research of secondary equipments' state monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 127-131.
- [18] 谢仕炜, 胡志坚, 吴方劫, 等. 基于递推最小二乘法的多端口外网静态等值参数辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 26-34.
- XIE Shiwei, HU Zhijian, WU Fangjie, et al. Static equivalent parameter identification method of multi-port external network based on recursive least squares algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 26-34.
- [19] 李育强, 宋国兵, 王维庆, 等. 基于参数识别光伏接入配网永久性故障判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 1-7.
- LI Yuqiang, SONG Guobing, WANG Weiqing, et al. Permanent fault identification method based on parameter identification for photovoltaic access to distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 1-7.

收稿日期: 2017-03-31; 修回日期: 2017-06-07

作者简介:

韩素敏(1979—), 女, 副教授, 在读博士, 研究方向为电力电子设备的电磁兼容、电气设备远程故障维护; E-mail: hansumin@hpu.edu.cn

吴晓静(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子设备的电磁兼容。

(编辑 葛艳娜)