

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.02.024

分布式控制的多模块并联电流型 双向直流—直流变换器

宋波, 杨峰, 易航

(西安理工大学, 西安 710000)

摘要: 针对并联多模块电流型双向直流—直流变换器, 为了实现功率组合的灵活性及模块化设计, 提出了一种改进模式的分布式控制策略。该策略通过采样高压侧电压和低压侧电流, 实现下垂控制, 同时采用电压补偿技术, 改善了高压侧电压调整率。搭建了二台功率各为 1.5 kW 的样机进行了实验验证。实验结果表明: 该方法无论在静态还是动态下, 可以实现模块之间良好的功率均分; 同时改善了电压调整率并能实现热插拔功能。

关键词: 电流型; 双向直流—直流变换器; 分布式控制; 电压补偿; 功率均分

Bidirectional DC-DC Converter of Multi-module Shunt Current-mode with Distributed Control

SONG Bo, YANG Feng, YI Hang

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: For bidirectional DC - DC converter of multi-module shunt current-mode, an improved distributed control strategy is proposed in order to achieve the flexible power architecture and modular design. The strategy achieves droop control by sensing the high-voltage side voltage and low-voltage side current, meanwhile, and improves the voltage regulation rate on the high voltage side by adopting voltage compensation technology. Two 1.5 kW prototypes are established to verify the effectiveness of the proposed control strategy. The experimental results show that excellent power sharing is obtained under both steady state and various dynamic states. Besides, improvement of voltage regulation and hot swapping can be realized.

Key words: current-mode; bidirectional DC-DC converter; distributed control; voltage compensation; power sharing

0 引言

模块并联技术是将小功率变换器模块应用到高功率场合的有效手段^[1-5]。由于电动汽车^[6], 储能系统^[7], 分布式发电^[8], 不间断电源等领域的需求, 输入与输出之间电气隔离的双向直流—直流变换器开始受到越来越多的关注^[9-11]。在一个蓄电池侧电压 18 ~ 36 V, 高压侧电压为 270 V 的车载电源应用场合里, 这种双向直流—直流变换器^[12-13]在提高转换

效率, 增加续航能力等方面具有显著的优势。

多模块双向直流—直流变换器的控制系统必须确保在任何功率流向时各个模块的功率均分。目前, 对于多模块单向功率流直流—直流变换器主要采用下垂法^[14], 平均电流法, 主从设置法^[15], 同占空比控制^[16]等。下垂法不需要均流母线, 实施简单, 模块化程度高, 但是电压调整率较差。平均电流法各模块均流控制比较精确, 但是均流母线对噪声敏感, 需要集中控制, 控制器负担重, 随着模块数的增

收稿日期: 2018-10-30; 修回日期: 2018-12-15

基金项目: 陕西省重点研发计划(2018ZDXM-GY-169)。

Project Supported by Shaanxi Province Key Research and Development Plan(2018ZDXM-GY-169).

加,变得更加困难。主从法扩充性好,但是主模块一旦出错,系统将不能工作,可靠性低。而同占空比法在模块参数不一致的情况下无法实现模块间精确均流^[16-17]。

目前国内外双向直流一直流变换器模块化研究主要基于有源双桥(DAB)与有源半桥(DHB)等电压源型拓扑^[18-20],但这种电压源型拓扑应用在蓄电池侧电流脉动大。为了能够显著地减小蓄电池侧的电流脉动,可以使电流源型DAB与蓄电池间串接一个电感。对于多模块并联双向DC-DC变换器的研究目前主要采用集中控制^[3],缺乏多模块双向DC-DC变换器的分布式控制研究。

文中采用了一种改进模式的分布式控制策略。该方法可以保证变换器精确稳定的均流效果,同时可以改善高压侧负载调整率差的问题,提高了变换器的模块化程度。还对控制策略的原理进行了分析,通过实验验证了控制策略的有效性。

1 两模块并联控制策略原理分析

两模块并联型双向流变换器拓扑图见图1。采用移相加PWM控制,其中移相用来调节输出功率以及功率传递方向,PWM控制用来调节原副边电压匹配。

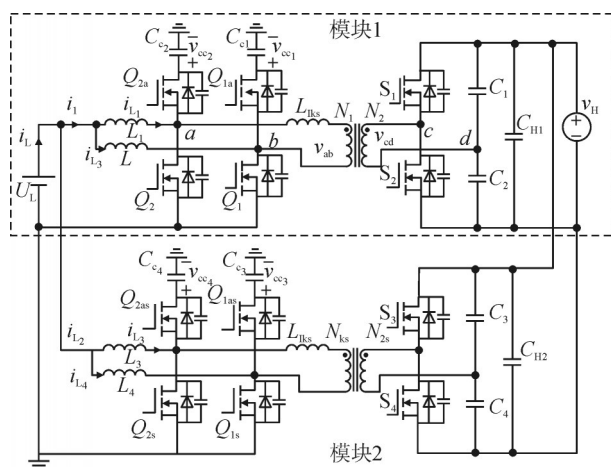


图1 两模块并联型双向流变换器拓扑

Fig. 1 Two module parallel-connected bi-directional converter topology

有无补偿环时电压下垂特性的对比(假设两个模块的下垂特性相一致)见图2。无补偿环时,起始状态并联模块中的每个子模块工作在 O 点,此时能够实现均流。假设有外部干扰产生,每个子模块的供电电流偏离稳态工作点 O 。此时模块1和模块2的供电电流分别变成了 i_M 和 i_N ;并且这时 $i_M < i_O < i_N$ 。那么参考式(1), $U_{ref1} - K_{d1} i_1$ 为子模块1电压给定值,此时变为 v_M , $U_{ref2} - K_{d2} i_2$ 为子模块2的高压侧电压给

定值,此时变小为 v_N 。此时实际高压侧电压值仍然保持为 v_O 。因为 $v_M > v_O > v_N$,那么子模块1采样得到的实际电压比其参考电压 v_M 小,控制环路会通过动态调节增大模块1的功率,其供电电流会在 i_M 基础上增大,模块1的稳定工作点会向 O 点方向移动。同理模块2的稳定工作点同样也会向 O 点方向移动。两个模块重新达到稳定工作点。

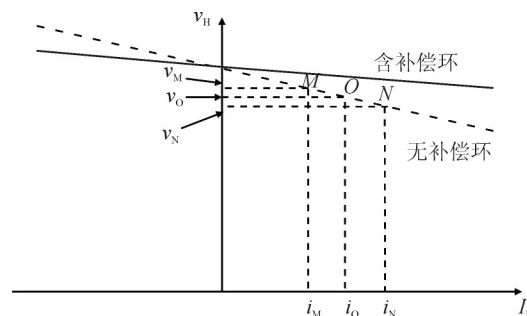


图2 带补偿和不带补偿时高压侧电压下垂特性

Fig. 2 The high-voltage side voltage droop characteristic with and without compensator

$$U_{ref1} - K_{d1} i_1 = U_{ref2} - K_{d2} i_2 \quad (1)$$

$$i_1 + i_2 = i_L \quad (2)$$

式(1)-(2)中: U_{ref1} 为模块1空载时高压侧电压给定值; U_{ref2} 为模块2空载时高压侧电压给定值。 i_1 为模块1低压侧电流。 i_2 为模块2的低压侧电流。 K_{d1} 和 K_{d2} 分别是两个模块的下垂系数。

由式(1)、(2)可以求解 i_1 和 i_2 为

$$i_1 = \frac{U_{ref1} - U_{ref2} + K_{d2} i_L}{K_{d1} + K_{d2}} \quad (3)$$

$$i_2 = \frac{U_{ref2} - U_{ref1} + K_{d1} i_L}{K_{d1} + K_{d2}} \quad (4)$$

由式(3)、(4)可以得到两个模块低压侧电流的不均流程度公式,即

$$\frac{\Delta i_L}{i_L} = \frac{(K_{d2} - K_{d1}) i_L + 2(U_{ref1} - U_{ref2})}{(K_{d1} + K_{d2})} \quad (5)$$

将(3)、(4)代入式(1),可以得到式(6)

$$v_H = \frac{K_{d1} U_{ref2} + K_{d2} U_{ref1} + K_{d1} K_{d2} i_L}{K_{d1} + K_{d2}} \quad (6)$$

由式(6)可以得到高压侧电压调整率公式,即

$$\frac{v_{HA} - v_{HB}}{i_{LA} - i_{LB}} = \frac{K_{d1} K_{d2}}{K_{d1} + K_{d2}} \quad (7)$$

由式(5)可知,两模块的均流效果会随着下垂系数增大而变好,但是,由式(7)可知高压侧负载调整率会随着下垂系数增大而变差。

通过在每个模块高压侧电压给定部分加入补偿环节,可以解决高压侧负载调整率较差的问题,

见图3。其中 K 是补偿系数, U_{ref} 为高压侧电压给定值, 两个模块的反馈电压是 v_{H_1}, v_{H_2} 。则此时低压侧不均流程度可以表示为

$$\frac{\Delta i_L}{i_L} = \frac{(K_{d_1} - K_{d_2})i_L + 2(1 + K)(U_{\text{ref}_1} - U_{\text{ref}_2})}{(K_{d_1} + K_{d_2})}$$

(8)

高压侧负载调整率为

$$\frac{v_{HA} - v_{HB}}{i_{LA} - i_{LB}} = \frac{K_{d_1} K_{d_2}}{(K_{d_1} + K_{d_2})(1 + K)}$$

(9)

则由式(7)、(9)对比可得, 将高压侧电压作为补偿环加入到控制器设计中, 会明显改善高压侧负载调整率, 结果如图2中实线所示。由式(5)、(8)对比, 在实际的控制程序中 U_{ref_1} 与 U_{ref_2} 是相等的。因此, 补偿环节中系数 K 的加入不会对均流效果带来影响。

2 系统控制框图

文中提出的功率均分系统控制框图见图3。在两个模块的控制系统中, 高压侧电压给定值 V_{ref} 各自加入其低压侧电流负反馈值, 通过这样的反馈机制, 实现两个并联模块均流。当两个模块不均流时, 实际电流较大的模块高压侧电压给定值会相应减小(另一个模块高压侧电压给定值增大), 通过动态调节使两个模块重新达到功率均分状态。

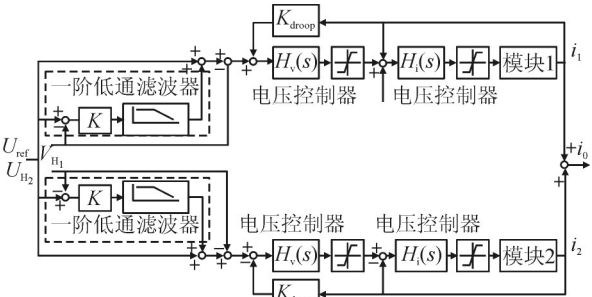


图3 系统控制框图

Fig. 3 Block diagram of control system

该方法通过引入高压侧电压采样值作为补偿量来改善负载调整率。将 $K \times (U_{\text{ref}} - U_{H_1})$ 叠加到各个模块高压侧电压参考值中。假设模块1的高压侧电压采样值 V_{H_1} 减小, 那么叠加值 $K \times (V_{\text{ref}} - V_{H_1})$ 会增加, 实际高压侧电压参考值也被相应提高了, 控制器会通过动态调节使实际高压侧电压升高。通过这种方法对高压侧电压进行了补偿。

3 实验结果

搭建了由两个双向功率流模块组成的并联组合变换器实验平台, 对文中的控制方法进行实验验

证, 主要参数见表1。其中, 两个双向功率流模块的低压侧与两节串联的蓄电池相连接, 因此, 低压侧的电压范围为 18~36 V; 高压侧接双向 PWM 整流器, 高压侧电压为 270 V; 双向 PWM 整流器保证系统实现功率的双向流动。为了证明文中所提控制方法对模块参数扰动的抑制作用, 两个模块变压器匝比采用不同值, 分别为 1:2 和 1:2.2, 匝比相差 10%, 用以表征公差 10% 的情况。实验中, 对应图3控制系统的下垂系数 K_{droop} 设为 0.12, 补偿系数 K 设为 1.2。

表1 两模块实验平台参数列表

Table 1 Experimental platform with 2 power module

名称	数值
低压侧电压/V	18~36
高压侧电压给定值/V	270
单模块功率/kW	1.5
变压器匝比	10:20;10:22
下垂系数	0.12
补偿系数	1.2

两个流模块都提供 1 500 W 额定输出功率时, 稳态低压侧电流波形见图4。图4中, 高压侧电压 U_H 波形展示在图中作为参考。可以看到, 两个子模块的低压侧电流均为 30 A, 实现了稳态的功率均分。仔细观察, 子模块低压侧电流平均值相差 0.2 A, 稳态实验结果说明, 此控制方法在稳态时能够实现很好的均流。

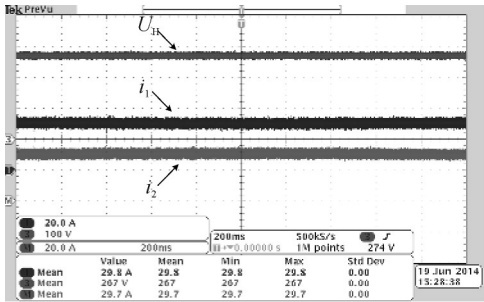


图4 两模块的低压侧稳态电流波形

Fig. 4 Modules' LV-side current in steady state

突加负载的动态实验结果见图5。实验中, 低压侧负载由 2 000 W 突加到额定功率 3 000 W。从图5中可知, 突加负载后, 两个模块的低压侧电流同时上升, 迅速达到稳态, 稳态时, 两模块的低压侧电流相同。除此之外, 低压侧电流在过渡过程中没有明显的超调。观察子模块高压侧电压 U_H 可知, 在突加负载后, U_H 略有下降。但是, U_H 立即恢复到突加负载前的电压值, 这正是得益于控制系统中所加入的电压补偿环。所加入的电压补

偿环避免了传统下垂法高压侧电压负载调整率差的问题。

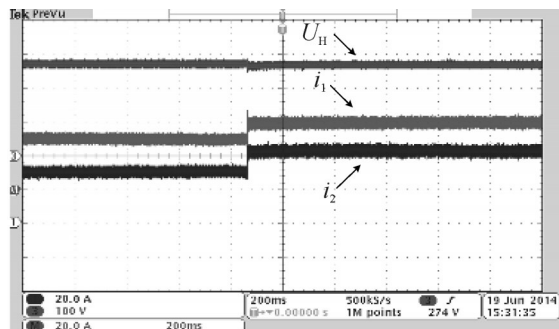


图5 突加负载时两模块的低压侧电流波形

Fig. 5 Modules' LV-side current under load step

两模块实验平台启动过程的低压侧电流波形见图6。从图6中可知,两个模块不仅迅速完成了启动,而且,在启动过程中,两个模块的低压侧电流相等,实现了良好的均流。文中所研究的双向直流变换器具备功率双向流动的能力,当功率反向时,所提出的控制方法依然能够实现稳态和动态状态下,子模块之间的功率均分,稳态的实验结果见图7。当功率反向时两个子模块依然均流。其中,低压侧电流中的波动来自于实验中的双向PWM整流器电流波动。功率流向切换过程的实验结果见图8。从图8可以看出,在功率流向的切换过程中,两个模块依然能够实现均流。而且由于电压补偿环的作用,并未观察到高压侧电压 v_H 的明显变化。

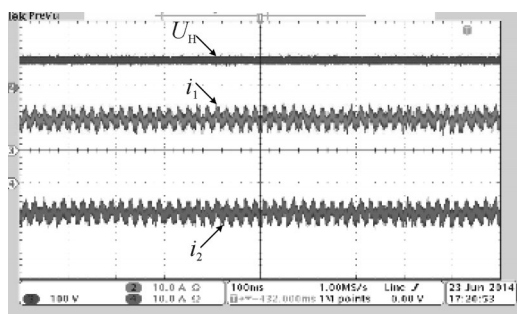


图6 启动时两模块的低压侧电流波形

Fig. 6 Modules' LV-side current during start-up

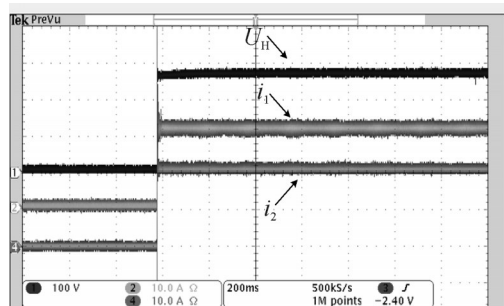


图7 反向运行时两模块的低压侧电流波形

Fig. 7 Modules' LV-side current in reverse state

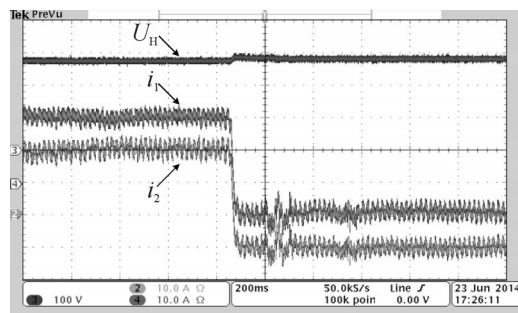


图8 正反向切换时两模块的低压侧电流波形

Fig. 8 Modules' LV-side current during power flow reversion

单个模块切除和插入的动态试验结果见图9、10。当切除一个模块时,另一个模块低压侧电流迅速上升,承担所有功率。当插入一个模块时,两个模块经过一段时间的调节,再一次达到功率均分的状态,调节过程平滑、无振荡和超调。通过单个模块的切除和插入实验,验证了所提出控制方法的无互联线的情况下,依然可以实现可靠的功率均分。

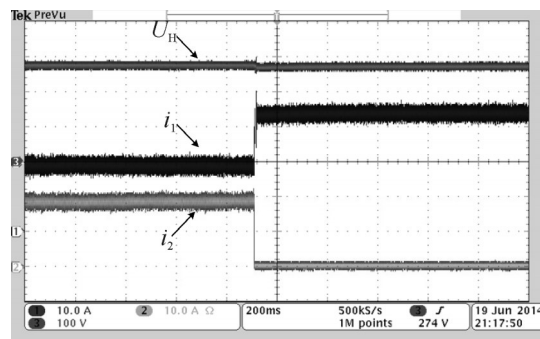


图9 单模块切除时两模块的低压侧电流波形

Fig. 9 Modules' LV-side current during single module release

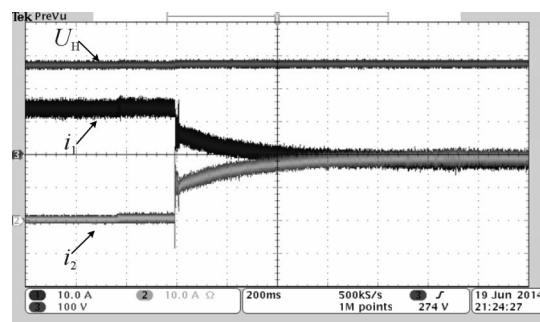


图10 单模块切入时两模块的低压侧电流波形

Fig. 10 Modules' LV-side current during single module insertion

带电压补偿环与不带电压补偿环时,在不同负载条件下,高压侧电压电流的实验结果对比见图11。可以看出,加入电压补偿环后,高压侧电压调整率明显优于不加入电压补偿环时的结果。实验结果和前文分析一致。

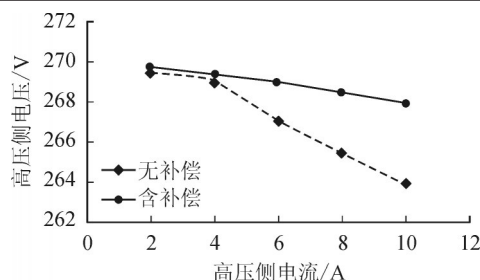


图 11 电压补偿环的实验结果对比

Fig. 11 Experiment comparison of control method with voltage compensation loop

通过以上一系列的稳态和动态实验可以说明,文中所提出的控制方法能使并联系统各个模块在各种工况下实现比较精确的功率均分,并且能够有效地改善电压调整率的问题。除此之外,在实验中,变压器的匝比存在明显差异,实验结果也有效证明了此控制方法对模块间的参数差异性有良好的抑制作用。

4 结语

并联电流源型双向直流-直流组合变换器的正常工作,关键在于保证各个模块的功率均分。文中提出了基于低压侧电流下垂特性的分布式控制策略,并加入了高压侧电压补偿环节。所提出的控制策略不仅能够保证组合变换器在各种工作状态下能够实现功率均分,还能解决传统下垂控制带来的负载调整率差的问题。实验结果充分证明了控制策略的有效性。

参考文献:

- [1] 陈武,阮新波,颜红. DC/DC多模块串并联组合系统控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(7): 93-102.
CHEN Wu, RUAN Xinbo, YAN Hong. Control strategy for dc/dc multiple modules series-parallel combined systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(7): 93-102.
- [2] RAJAGOPALAN J, XING K, GUO Y, et al. Modeling and dynamic analysis of paralleled dc/dc converters with master-slave current sharing control[C]//IEEE Application Power Electronics. Conference.[S.l.]:IEEE, 1996: 678-684.
- [3] MAZUMDER S K, Tahir M, Acharya K. Master-slave current sharing control of a parallel DC-DC converter system over an RF communication interface[J]. IEEE Transactions on industrial Electronics, 2008, 55(1):59-66.
- [4] PANOV Y, RAJAGOPALAN J, LEE F C. Analysis and design of N paralleled DC-DC converters with master-slave current-sharing control[C]//12th Annual IEEE APEC.[S.l.]:

IEEE, 1997:436-442.

- [5] SHI J J, ZHOU L B, HE X N. Common-duty-ratio control of input-parallel output-parallel(IPOP) connected DC-DC converter modules with automatic sharing of currents[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(7): 3277-3291.
- [6] 张晓峰,吕征宇. 混合动力车用全数字电流控制型双向DC/DC变换器[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 84-89.
ZHANG Xiaofeng, LYU Zhengyu. Digital - current - controlled bi-directional DC/DC converter in the hybrid electric vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 84-89.
- [7] 任桂周,常思勤. 一种基于超级电容器组串并联切换的储能系统[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 187-195.
REN Guizhou, CHANG Siqin. An energy storage system based on series-parallel switchover of ultra-capacitor banks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 187-195.
- [8] 王冕,田野,李铁民,等. 应用于储能系统的双向DC-DC变换器研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 66-71.
WANG Mian, TIAN Ye, LI Tiemin, et al. Study of bidirectional DC-DC converters applied to energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 66-71.
- [9] FAN Haifeng, HUI Li. A distributed control of input-series-output-parallel bidirectional DC-DC converter modules applied for 20 kVA solid state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 939-945.
- [10] INOUE Shigenori, AKAGI Hirofumi. A bidirectional isolated DC-DC converter as a core circuit of the next-generation medium - voltage power conversion system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 535-542.
- [11] PENG F Z, LI H, SU G J, et al. Lawler a new ZVS bidirectional DC-DC converter for fuel cell and battery application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 19(1): 54-65.
- [12] XIAO H F, XIE S J. A ZVS bidirectional DC-DC converter with phase - shift plus PWM control scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2): 813-823.
- [13] LABELLA T, LAI J S. A hybrid resonant converter utilizing a bidirectional GaN AC switch for high-efficiency PV applications[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2014, 50(5):3468-3475.
- [14] KONDRATIEV I, SANTI E, DOUGAL R. Nonlinear synergistic control for m parallel-connected DC-DC buck converters: Droop current sharing[C]//Power Electronics Specialists Conference.[S.l.]:[s.n.], 2006:1-7.
- [15] 袁珊珊. 中小功率DC/DC模块并联均流方案的优选及实现的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
YUAN Shanshan. Current sharing scheme selection and re-

(下转第182页)

- Theoretical Electricity. [S.l.]:IEEE,2012:1-5.
- [9] 池立江,刘伟,冉允喜.一次导体偏心对罗氏线圈的干扰研究[J].高压电器,2014,50(1):67-71.
CHI Lijiang, LIU Wei, RAN Yunxi. Study on the interference of a conductor eccentricity to rogowski coils[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 67-71.
- [10] 申狄秋,朱明东,王旭峰,等.罗氏线圈电流互感器谐波计量特性研究[J].高压电器,2018,54(6):170-176.
SHEN Diqu, ZHU Mingdong, WANG Xufeng, et al. Study on harmonic measurement characteristics of Rogowski coil current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 170-176.
- [11] 张建功,赵军,谢鹏康,等.VFTO作用下电子式电流互感器二次端口电磁特性仿真分析[J].电工技术学报,2015,30(z2):88-94.
ZHANG Jiangong, ZHAO Jun, XIE Pengkang, et al. Simulation and analysis of electromagnetic properties at the secondary port of electronic current transformers under very fast transient overvoltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(z2): 88-94.
- [12] CHEN H, LIU H, JIANG H, et al. A scheme for detection and assessment of current transformer saturation[C]//International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. [S.l.]:IEEE,2017:90-93.
- [13] LIU Z, DUAN X, LIAO M, et al. Simulation and test of electromagnetic interference with electronic current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3):994-999.
- [14] CHENG Lin, GUO Anxiang, QI Weidong, et al. Study on output characteristics of electronic current transformer in complex electromagnetic environment[J]. Smart Power, 2017, 45(8):64-69.
- [15] VOLOVICH G I, KIRPICHNIKOVA I M, TOPOLSKIY D V. Experimental operation of the adaptive electronic instrument transformer of current and voltage[C]//International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. [S.l.]:[s.n.],2017:1-5.
- [16] 陈庆,李红斌,张明明,等.采用主副印制电路板构造的Rogowski线圈性能分析及设计[J].电力系统自动化,2004,28(16):79-82.
CHEN Qing, LI Hongbin, ZHANG Mingming, et al. Analysis and design of Rogowski coils with main and assistant printed circuit boards[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 79-82.
- [17] 汪建,戴原骁. Rogowski线圈数字积分器的直流误差消除方法研究[J].电测与仪表,2016(24):80-86.
WANG Jian, DAI Yuanxiao. A DC error elimination method for Rogowski coil digital integrator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016(24): 80-86.
- [18] HAJIPOUR E, VAKILIAN M, SANAYE-PASAND M. Current - transformer saturation prevention using a controlled voltage-source compensator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 1039-1048.
- [19] CATALIOTTI A, COSENTINO V, DI CARA D A, et al. Rogowski coil current transducer compensation method for harmonic active power error[J]. Measurement, 2015(63): 240-251.
- [20] GUO X H, LIAO J S, ZHU M J, et al. Improved performance Rogowski coils for power system[C]//2003 IEEE PES Transmission and distribution conference and exposition. [S. l.]:IEEE,2003:371-374.
- [21] WANG H M, ZHANG H L, ZHENG S X. Optimization design of configuration for single-layer rigid Rogowski coils[C]//13th International Symposium Power Electronics Ee2005 Novi Sad, Serbia and Montenegro:[s. n.],2005 :2-4.
- [22] 互感器第8部分:电子式电流互感器:GB/T 20840. 8—2007[S]. 2007.
Transformers - Part 8:Electronic current transformers:GB/T 20840. 8—2007[S]. 2007.

徐子立(1984—),男,硕士,高级工程师,研究方向为数字化电能计量技术和智能量测技术。

(上接第175页)

- alization research for middle and low power level paralleled DC/DC converters[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [16] SHI J J, LUO J, HE X N. Common-duty-ratio control of input-series output-parallel connected phase-shift full-bridge DC-DC converter modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3318-3329.
- [17] 陈武.多变换器模块串并联组合系统研究[D].南京:南京航空航天大学,2009.
CHEN Wu. Modularization structure for series-parallel connected converters[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [18] TODORCEVIC T, BAUER P, FERREIRA J A, et al. Bidirectional modular multilevel DC-DC converter control and efficiency improvements through separate module control method[C]//Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).[S.l.]:[s.n.],2013:2038-2043.
- [19] FAN H, LI H. A novel phase-shift bidirectional dc-dc converter with an extended high-efficiency range for 20 kVA solid state transformer[C]//Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).[S.l.]:[s.n.],2010: 3870-3876.
- [20] SUN L, XU D, CHEN M, et al. Dynamic model of PWM plus phase-shift (PPS) control bidirectional DC-DC converters[C]// IAS.[S.l.]:[s.n.], 2005: 614-619.
- 宋波(1976—),男,工程师,本科,主要从事智能电网方面的工作。
- 杨峰(1977—),男,高级工程师,硕士,主要从事智能电网,电力市场方面的工作。
- 易航(1994—),男,本科,主要从事电力系统自动化方面的研究。