

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.12.010

基于断续导通模式下的 PCS 中双向 DC/DC 变换器的研究

邓湘鄂¹, 牟京卫¹, 贺俊¹, 李罗¹, 穆森婕²

(1. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710075; 2. 宝鸡铁路技师学院, 陕西 宝鸡 721300)

摘要: 为获得较高的功率密度和减小开关损耗, 将 PCS 中双向 DC/DC 变换器设计在断续导通模式(DCM)下, 并采用交错并联结构弥补 DCM 下电压电流纹波较大的缺陷。分析研究变换器采用不添加额外半导体器件的控制型软开关技术, 实现开关软通断, 减小开关损耗。最后推导了实现软开关的死区时间、电容、电感等设计公式。通过实验, 验证了理论分析的正确性。

关键词: 双向 DC/DC 变换器; 断续导通模式(DCM); 交错并联; 控制型软开关技术

Research on Bidirectional DC/DC Converter for PCS Based on Discontinuous Conducting Mode

DENG Xiang'e¹, MU Jingwei¹, HE Jun¹, LI Luo¹, MU Miaojie²

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

2. Baoji Railway Technician College, Shannxi Baoji 721300, China)

Abstract: High-power density and decreasing the turn-off loss in PCS is realized by a bidirectional DC/DC converter designed in discontinued conducting mode (DCM). The DCM associated voltage and current ripples can be alleviated by multiphase interleaved operation. To decrease the turn-off loss, soft-switching characteristics is achieved by analyzing to the controlled soft-switching technology without any additional semiconductor devices. Finally, the design formulas for the dead-time, the capacitance and the inductance, etc to realize soft-switching are deduced. The validation of theoretical analysis is verified by the experimental results.

Key words: bidirectional DC/DC converter; discontinuous conducting mode(DCM); interleaved operation; controlled soft-switching technology

0 引言

随着传统能源的日益耗竭以及新能源技术的不断发展, 分布式电源的应用越来越受到重视。双向PCS是实现储能系统与交流电网能量传递的关键设备。在用电高峰时, PCS中双向DC/DC变换器一方面将储能电池电压升至直流母线电压, 经DC/AC并入电网; 在夜间用电低谷时, 电网能量又经AC/DC, 从双向DC/DC变换器高压侧降压, 向储能电池充电^[1-6]。

为了获得较高的功率密度, 可将DC/DC变换器设计在非连续导通模式(DCM), 这样变换器所用的电感体积将大大减小^[7]。但其代价是增大了电流纹

波, 因此有必要采用多重化结构减少电流纹波^[8-10]。另外, 为了减小变换器开关损耗, 提高效率, 变换器多采用软开关技术, 常见的缓冲型软开关技术及谐振型软开关技术通常都添加辅助电路来实现软开关条件, 结构复杂、成本较高、控制也较为复杂^[11-14]。

文中采用不额外添加半导体器件的控制性软开关技术, 结合半桥式双向DC/DC变换器顺半桥结构特点, 设计变换器工作在非连续导通模式(DCM), 使电感电流与上下开关并接电容在开关死区时间内进行能量交换, 达到软开关效果。控制结构上, 采用多重化结构弥补DCM模式下电压、电流纹波大的缺陷。在控制方式上采用电压电流双闭环形式, 将共用电压环的输出作为每个基本单元的给定电流, 解

收稿日期: 2015-07-17; 修回日期: 2015-08-05

决了并联结构的均流问题^[15-19]。

1 电路结构

文中采用的三重双向 DC/DC 变换器见图 1。图 1 中由 3 个半桥双向 DC/DC 变换器交错并联组成。当 PCS 并网运行时,双向 DC/DC 变换器将蓄电池直流电压升压至并网直流母线电压,开关 $S_{bx}(x=1,2,3)$ 处于斩波状态,与二极管 $D_{ax}(x=1,2,3)$ 构成 Boost 升压电路;当用电低谷时,回馈式 DC/DC 将并网逆变器直流母线电压降压,向 PCS 的蓄电池充电,开关 $S_{ax}(x=1,2,3)$ 处于斩波状态,与二极管 $D_{bx}(x=1,2,3)$ 构成 Buck 降压电路。

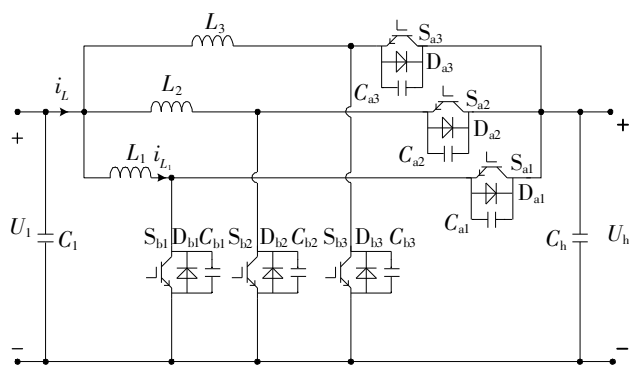


图 1 三重双向 DC/DC 变换器

Fig. 1 Three-phase interleaved bidirectional DC/DC converter

Boost 模式下第一重双向 DC/DC 变换器采用控制型软开关技术下的主要工作波形见图 2; Buck 模式下第一重双向 DC/DC 变换器采用控制型软开关技术下的主要工作波形见图 3。

3 个基本半桥交错并联,斩波时间互错三分之一开关周期,每个周期导通时间相同,总电流纹波为单重电流纹波的三分之一。

2 控制策略

双向 DC/DC 变换器工作在 Boost 下时,以并网逆变器直流母线所需电压为控制器电压外环给定,变换器高压侧电压为反馈,差值经 PI 调节器作为 3 个电流内环的给定,电感电流作为内环反馈,差值经 PI 调节后用于产生开关的控制信号;在用电低谷时,双向 DC/DC 变换器工作在 Buck 模式,将电网能量经 AC/DC 的直流母线电压降压,向蓄电池充电,蓄电池额定电压作为电压外环给定,变换器低压侧电压为反馈,差值经 PI 调节器作为 3 个电流内环的给定,电感电流作为内环反馈,差值经 PI 调节后用于产生开关的控制信号。3 个相对独立的电流内环共用一个电压外环给定,保证并联的每重变换器电

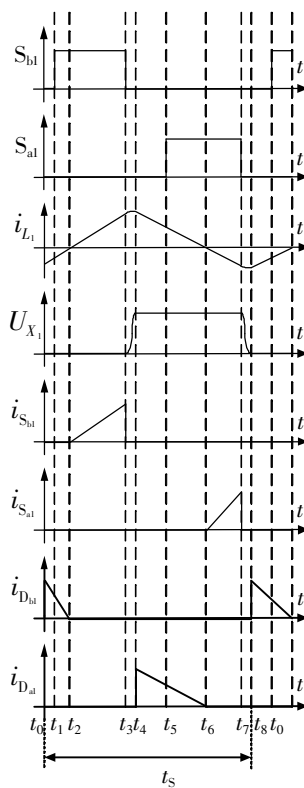


图 2 Boost 模式下主要工作波形

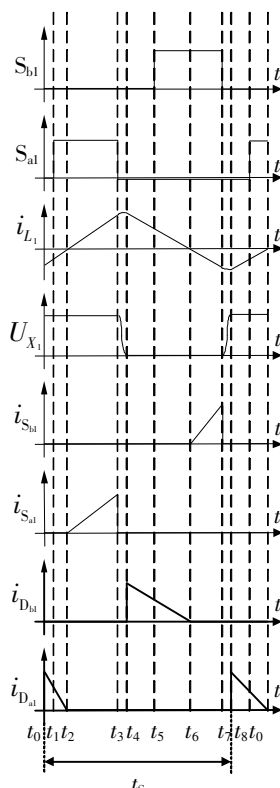


图 3 Buck 模式下主要工作波形

Fig. 2 The main working waveforms in Boost mode

Fig. 3 The main working waveforms in Buck mode

应力和热应力合理分配,使其自动均流,避免环流产生。其控制框图见图 4。

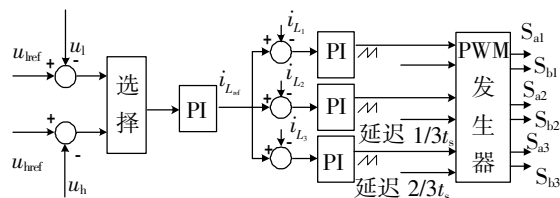


图 4 双向 DC/DC 变换器控制框图

Fig. 4 The control block diagram of the bidirectional DC/DC converter

3 工作原理分析

电感电流及电压参考方向见图 1。 i_{L1} 为第一重半桥电感电流; C_l 、 C_h 分别为 DC/DC 变换器低压侧与高压侧的滤波电容; U_l 、 U_h 分别为变换器低压侧和高压侧电压。以 Boost 工作模式为例,变换器工作在 DCM 状态见图 2。一个开关工作周期可分为 8 个状态:

状态 1($t_0 \sim t_1$): t_0 时刻, i_{L1} 达到负向最大值,二极管 D_{b1} ZVS 导通; $i_{L1}(t) = i_{L1}(t_0) + \frac{U_l}{L}t$, i_{L1} 线性增加; t_1 时刻,开关 S_{b1} 获得门极导通信号,但 i_{L1} 仍为负,开关 S_{b1} 未导通;

状态 2($t_1 \sim t_2$): i_{L1} 持续增加,直至 t_2 时刻 i_{L1} 上升至

零, t_2 时刻二极管 D_{b1} ZCS 关断;

状态 3($t_2 \sim t_3$): t_2 时刻后, 开关 S_{b1} ZVS 导通, i_{L1} 继续增加, $i_{L1}(t) = 0 + \frac{u_1}{L}t$, t_3 时刻, i_{L1} 达到正向最大值, 开关 S_{b1} 获得门极关断信号;

状态 4($t_3 \sim t_4$): t_3 时刻, X_1 点电压 U_{X1} 为零, 开关 S_{b1} 关断, 变换器进入第 1 个死区时间, i_{L1} 正向最大值保持不变, 电容 C_{a1} 放电, 将能量转移到电容 C_{b1} ; t_4 时刻, 电容 C_{a1} 两端电压为零;

状态 5($t_4 \sim t_5$): 二极管 D_{a1} ZVS 导通, 电感电流线性下降: $i_{L1}(t) = i(t_4) + \frac{u_1 - u_h}{L_1}t$; t_5 时刻开关 S_{a1} 获得门极导通信号;

状态 6($t_5 \sim t_6$): 开关 S_{a1} 虽然获得门极导通信号, 但电感电流 i_{L1} 仍为正, 开关 S_{a1} 未能导通; t_6 时刻, i_{L1} 降为零;

状态 7($t_6 \sim t_7$): t_6 时刻, 二极管 D_{a1} ZCS 关断, 开关 S_{a1} ZVS 导通, 电感电流继续下降; t_7 时刻, 开关 S_{a1} 获得门极关断信号, i_{L1} 降为负向最大值;

状态 8($t_7 \sim t_{8(0)}$): 变换器进入第 2 个死区时间, i_{L1} 反向最大值保持不变, 电容 C_{b1} 放电, 将能量转移到电容 C_{a1} ; $t_{8(0)}$ 时刻, 电容 C_{b1} 两端电压为零。

一周期结束。

4 软开关实现条件

由以上分析可见, 采用控制型软开关技术, 没有添加额外的半导体器件, 利用 DCM 运行时, 电感电流反向的特点, 在死区时间内, 配合开关并接的小电容, 进行能量交换, 以达到软开关效果。

以 Boost 工作模式为例, 回馈式 DC/DC 变换器首先要工作在断续导通模式, 电感电流半纹波值需要大于电感电流平均值, 需要满足以下条件:

$$\frac{u_1 D_1 T_s}{2L} > I_{Lh} \quad (1)$$

式(1)中: u_1 为低压侧 PCS 电池电压; I_{Lh} 为变换器 Boost 模式下电感电流平均值; L 为电感的电感量; T_s 为开关周期; D_1 为 Boost 模式下主开关导通占空比。

因 C_1 、 C_h 电容值较小, 在死区时间内, 电感电流相当于恒流源, 应当拥有抽取电容的能力, Boost 模式下应满足条件为

$$\begin{cases} \left| \frac{u_1 D_1 T_s}{2L} + I_{Lh} t_{d1} \right| > (C_{a1} + C_{b1}) u_h \\ \left| \frac{u_1 D_1 T_s}{2L} - I_{Lh} t_{d2} \right| > (C_{a1} + C_{b1}) u_h \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: u_h 为高压侧直流母线电压; t_{d1} 是第 1 个

死区时间, t_3 时刻到 t_5 时刻; t_{d2} 是第 2 个死区时间, t_7 时刻到 t_1 时刻。

死区时间不能过大, 开关 S_{a1} 要在电感电流下降到零之前获得导通信号, 开关 S_{b1} 要在反向电感电流上升到零之前获得导通信号, 即满足式(3):

$$\begin{cases} t_{d1} < t_{a1} + t_6 - t_4 = \frac{2C_s u_h}{\left| \frac{u_1 D_1 T_s}{2L} + I_{Lh} \right|} + \frac{\left| \frac{u_1 D_1 T_s}{2L} + I_{Lh} \right| L}{u_h - u_1} \\ t_{d2} < t_{b1} + t_2 - t_0 = \frac{2C_s u_h}{\left| \frac{u_1 D_1 T_s}{2L} - I_{Lh} \right|} + \frac{\left| \frac{u_1 D_1 T_s}{2L} - I_{Lh} \right| L}{u_1} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, t_{a1} 、 t_{b1} 分别为电容 C_{a1} 能量完全转移到电容 C_{b1} 及电容 C_{b1} 能量完全转移到电容 C_{a1} 的时间。

5 仿真与实验

为了验证以上控制型软开关技术, 搭建了额定功率 40 W 的实验平台用于研究开关软开断的情况。以 Boost 模式为例, 实验参数: 电感 $L=500 \mu\text{H}$, 低压侧滤波电容 $C_1=680 \mu\text{F}$, 高压侧滤波电容 $C_h=680 \mu\text{F}$, 低压侧输入电压 $U_1=24 \text{ V}$, 高压侧给定输出电压 $U_h=53 \text{ V}$, 与开关并接小电容大小为 46.2 nF , 开关周期为 $100 \mu\text{s}$ 。

电感电流见图 5。电感电流 i_{L1} 、 i_{L2} 及 i_{L3} 交错叠加, 最终电流 i_L 纹波减小到原来的三分之一。

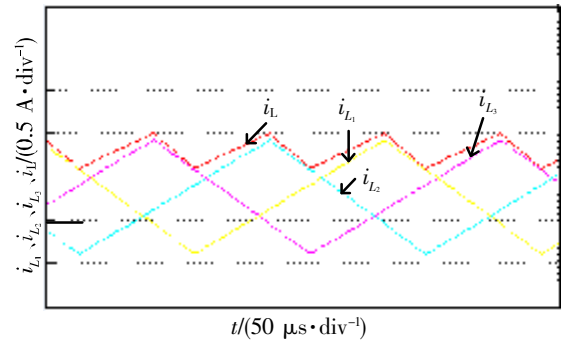


图 5 电感电流波形

Fig. 5 The waveforms of inductor currents

变换器 Boost 模式下实验波形见图 6。图 6(a)中: CH_1 为变换器开关 S_{b1} 压降波形; CH_2 正方向部分为二极管 D_{a1} 电流波形, 负方向部分电流为开关 S_{a1} 电流波形。在 Boost 模式下, 经一个开关死区时间后, 电容 C_{a1} 能量转移到电容 C_{b1} 后, 二极管 D_{a1} ZVS 导通, 电感电流降至零后, 二极管 D_{a1} ZCS 关断, 开关 S_{a1} ZVS 导通; 图 6(b)中: CH_1 为变换器开关 S_{b1} 压降波形, CH_2 为二极管 D_{b1} 电流波形。二极管 D_{b1} 在其电压降为零后 ZVS 导通, 在其电流降为零后 ZCS 关断。

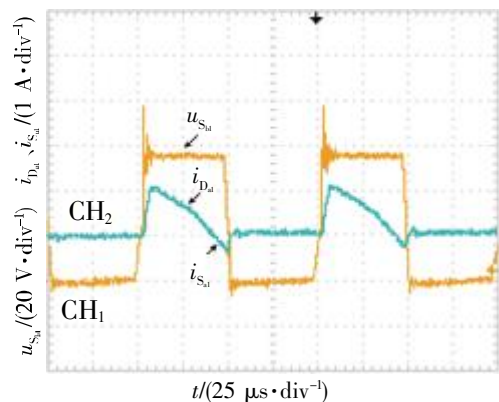
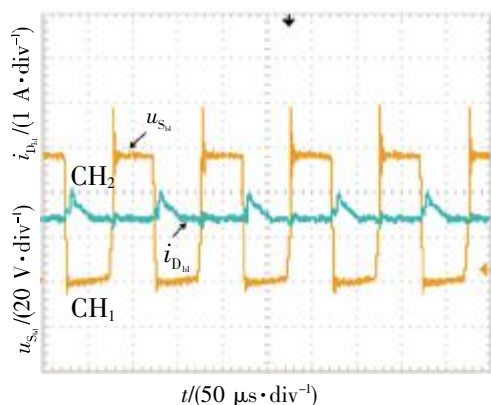
(a) 开关 S_{bl} 电压、二极管 D_{bl} 电流, 开关 S_{al} 电流(b) 开关 S_{bl} 电压、二极管 D_{bl} 电流

图 6 变换器 Boost 模式下实验波形

Fig. 6 Experimental waveforms of the converter in Boost mode

6 结论

对工作在 DCM 下, 采用控制型软开关技术的回馈式 DC/DC 变换器进行了深入研究。文中采用的控制型软开关技术, 利用在死区时间内, 电感电流配合上下开关并接的小电容, 在开关动作之前进行能量交换, 二极管达到 ZVS 导通、ZCS 关断, 开关 ZVS 导通的软开关效果。经过研究计算, 得出实现软开关的条件, 最后通过实验进行了验证。

参考文献:

- [1] 刘刚, 梁燕, 胡四全, 等. 电池储能系统双向 PCS 的研制[J]. 电力电子技术, 2010, 44(10): 12-13.
LIU Gang, LIANG Yan, HU Siqian, et al. Development of bi-directional PCS in battery energy storage system [J]. Power Electronics, 2010, 44(10): 12-13.
- [2] 武星, 殷晓刚, 宋昕, 等. 中国微电网技术研究及其应用现状[J]. 高压电器, 2013, 49(9): 142-149.
WU Xing, YAN Xiaogang, SONG Xin, et al. Research on microgrid and its application in China[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 142-149.
- [3] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107.
- [4] ACKERMANN T, ANDERSSON G, SODER L. Distributed generation: A definition[J]. Fuel and Energy Abstracts, 2002, 43(3): 191.
- [5] 梁振锋, 杨晓萍, 张娉. 分布式发电技术及其在中国的发展[J]. 西北水电, 2006, 51(1): 51-53.
LIANG Zhenfeng, YANG Xiaoping, ZHANG Pin. Distributed power generation technology and its development in China[J]. Northwest Water Power, 2006, 51(1): 51-53.
- [6] 戚艳. 微网广义储能系统协调控制策略及容量优化配置方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
QI Yan. Research on the coordination control and capacity optimization method of extended energy storage systems in microgrid[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [7] XU Haiping, PENG F Z, LI Kong. Multi-phase DC-DC converter with bi-directional power flow ability for distributed generation system[C]//Power Electronics Specialists Conference. [S.l.]: IEEE, 2008: 2800-2805.
- [8] HUANG X D, NERGAARD T, LAI J S, et al. A DSP based controller for high-power interleaved boost converters[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition. [S.l.]: IEEE, 2003: 327-333.
- [10] XU Haiping, WEN Xuhui, LI Kong. Dual-phase DC-DC converter in fuel cell electric vehicle[C]//IEEE CIEP. Beijing, China: [s.n.], 2004: 92-97.
- [11] 王男, 陆飞, 杨喜军, 等. $M \times N$ 交错并联移相驱动的单相功率因数校正器[J]. 电力电子技术, 2013, 47(8): 64-66.
WANG Nan, LU Fei, YANG Xijun, et al. Single-phase power factor corrector with phase-shifted driving $M \times N$ interleaved paralleled switches[J]. Power Electronics, 2013, 47(8): 64-66.
- [12] 陈刚. 软开关双向 DC-DC 变换器的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
CHEN Gang. Research on soft switching bidirectional DC/DC converter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
- [13] 孙频东. 一种新型的零电压开关双向 DC-DC 变换电源[J]. 电气传动, 2005, 35(6): 35-38.
SUN Pindong. Novel ZVS bi-directional DC-DC converter [J]. Electric Drive, 2005, 35(6): 35-38.
- [14] LI Hui, PENG Fangzheng, LAWLER J S. A natural ZVS high-power bidirectional DC/DC converter with minimum number of devices[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 39(2): 525-535.
- [15] 谢小高, 张军明, 蔡拥军, 等. 半桥变流器的软开关控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 48-52.

(下转第 65 页)

- [16] BARTOLETTI C, DESIDERIO M, DI CARLO D, et al. Vibro-acoustic techniques to diagnose power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 221-229.
- [17] 郭洁, 陈祥献, 黄海, 等. 基于峰度的电力变压器铁心松动故障在线监测方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(11): 2401-2407.
GUO Jie, CHEN Xiangxian, HUANG Hai, et al. Application of kurtosis in online detection of transformer iron core looseness [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(11): 2401-2407.
- [18] 熊卫华, 赵光宙. 基于希尔伯特—黄变换的变压器铁心振动特性分析[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 9-13.
XIONG Weihua, ZHAO Guangzhou. Analysis of transformer core vibration characteristics using Hilbert-Huang transformation[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2006, 21(8): 9-13.
- [19] 汲胜昌, 李彦明, 傅晨钊. 负载电流法在基于振动信号分析法监测变压器铁心状况中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 154-158.
JI Shengchang, LI Yanming, FU Chenzhao. Application of on-load current method in monitoring the condition of transformer's core based on the vibration analysis method [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 154-158.
- [20] 吴书有. 基于振动信号分析方法的电力变压器状态监测与故障诊断研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
WU Shuyou. Research on condition monitoring and fault diagnosis of power transformer based on vibration signal analysis [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.
- [21] 杨廷方, 李景禄, 曾祥君, 等. 基于多方法组合诊断模型的大型变压器故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 92-95.
YANG Tingfang, LI Jinglu, ZENG Xiangjun, et al. Large power transformer fault diagnosis based on a diagnosis model combined with several methods [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 92-95.
- [22] 汲胜昌, 刘味果, 单平, 等. 变压器铁心及绕组状况的振动测试系统[J]. 高电压技术, 2000, 26(6): 1-3.
JI Shengchang, LIU Weiguo, SHAN Ping, et al. The vibration measuring system for monitoring core and winding condition of power transformer [J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(6): 1-3.
- [23] 王璋奇, 王孟. 电力变压器绕组轴向振动稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 24-28.
WANG Zhangqi, WANG Meng. Stability of axial vibration of power transformer windings [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 24-28.
- 王春宁(1966—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力设备监测与故障诊断、电气设备管理、电力科技管理。
- 耿志慧(1987—), 女, 硕士, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。
- 马宏忠(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断、电力系统谐波分析。
- 金基平(1961—), 男, 总工程师, 高级工程师, 主要研究方向为电力设备监测与诊断、电力监测仪器。
- 李凯(1979—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电气设备运行管理、电气设备状态监测与故障诊断。

(上接第 58 页)

- XIE Xiaogao, ZHANG Junming, CAI Yongjun, et al. Research on soft-switching control strategies for half-bridge converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 48-52.
- [16] 卢胜利, 鞠文耀, 贾中璐. 一种双向储能变流器并网控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2013, 47(6): 41-43.
LU Shengli, JU Wenyao, JIA Zhonglu. Study of a grid-connected strategy for bi-directional power conversion system[J]. Power Electronics, 2013, 47(6): 41-43.
- [17] 杨孝志. 一种节能型蓄电池充放电装置的研究[J]. 电气传动自动化, 2008, 34(1): 17-20.
YANG Xiaozhi. Study of an energy saving device for storage battery charge or discharge [J]. Electrical Drive Automation, 2008, 34(1): 17-20.
- [18] 顾亦磊, 陈世杰, 吕征宇, 等. 控制型软开关变换器的实现策略[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 55-59.
- GU Yilei, CHEN Shijie, LYU Zhengyu, et al. Strategy for control type soft switch converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 55-59.
- [19] 陈明, 汪光森, 刘德红, 等. 多重化双向 DC-DC 变换器复合校正双闭环控制策略研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 83-88.
CHEN Ming, WANG Guangsen, LIU Dehong, et al. Dual close-loop control strategy for multi-channel interleaving bidirectional DC-DC power converter based on compound regulation technology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 83-88.
- 邓湘鄂(1986—), 女, 工程师, 主要从事电力电子变换器的研制工作。