

移相全桥变换器在直流微电网储能单元中的应用

王盼宝, 王卫, 刘鸿鹏, 吴炎

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 利用移相全桥变换器设计直流微电网中的储能单元, 并采用蓄电池作为储能设备。首先介绍了直流微电网的结构和基于母线电压信息的系统运行模式切换方法。在分析移相全桥变换器单侧移相和双侧移相工作原理的基础上, 分别设计了储能单元恒压下垂模式和恒流模式的控制策略。结合直流微电网运行模式和储能单元控制策略, 进一步提出了基于母线电压信息和微电网中心控制器指令相结合的储能单元运行模式切换方案。搭建了相关实验平台, 所设计的储能单元可按照母线电压信息和电流指令在恒压与恒流模式之间进行切换, 实验结果验证了所提储能单元控制策略与运行模式切换方案的有效性。

关键词: 直流微电网; 移相全桥变换器; 蓄电池; 储能; 移相控制; 运行模式切换

中图分类号: TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.03.011

0 引言

作为一种新型的输配电系统, 微电网展现出巨大的活力, 受到广泛关注。微电网可集成大量光伏、风力发电等可再生能源, 实现本地发电本地用电, 也可与大电网交换能量, 实现并网运行, 并通过协调控制、能量管理实现自治控制^[1-3]。这些特点使得微电网不仅适合在偏远地区应用, 也可应用在商业、住宅小区等场合。相比于交流微电网, 直流微电网更加高效^[4], 因为光伏电池、蓄电池等都属于直流电源, 且大量用户设备也是直流型供电, 如果彼此通过直流变换器连接, 可节省大量 DC-AC 和 AC-DC 变换器。同时, 直流微电网不涉及无功和同步问题^[5-6], 可靠性与可控性大幅提高。

微电网具有可再生能源渗透率高的特点, 大量间歇性电源会造成系统内供电波动, 同时负载突变和来自大电网的冲击也会影响系统的稳定性。作为微电网中的重要组成部分, 储能单元不仅可平抑系统内短时功率波动, 也可在系统内能量不足时提供长时的能量补充。在直流微电网系统中, 储能单元可通过双向 DC-DC 变换器直接与直流母线连接, 常见的双向 DC-DC 变换器可分为隔离型和非隔离型两大类^[7]。文献^[8]使用 Buck/Boost 型双向变换器作为直流微电网中的储能单元变换器, 设计了系统中储能单元对应的充、放电控制策略, 并在系统不同运行模式下进行了验证。

移相全桥变换器^[9-10]通过全桥与高频变压器组

成高变压比 DC-DC 变换器, 通过移相控制进行能量传输。当高频变压器两侧均为全控全桥时, 可改变两侧全桥驱动信号的相位角实现对变换器两端功率流动大小和方向的调节, 从而实现能量的双向流动。移相全桥变换器早期被应用在舰船、飞机^[11]的直流供电系统中, 但是工作模式较为简单, 只需工作在电压模式。

与传统的 Buck/Boost 变换器相比, 移相全桥变换器变压比高, 输入输出电压调节范围宽^[12], 在直流母线电压较高时, 可有效减少因蓄电池组串联过多而造成的不平衡问题; 同时, 其具有电气隔离的特点, 系统电气安全性得到保证, 因此更适合应用在微电网中。此外, 移相全桥电路更易实现软开关控制^[13], 可进一步提高系统的效率。文献^[14]介绍了移相全桥变换器的工作原理, 并对其环流能量进行了定量分析。文献^[15]针对移相全桥变换器工作在轻载和重载不同情况下的差异, 提出了一种基于混合调制的移相控制策略。

本文使用移相全桥变换器作为直流微电网系统储能单元接口变换器, 根据直流微电网的运行特点, 设计了对应的控制策略。首先介绍了低压直流微电网的组成结构与运行方式, 给出了基于移相全桥变换器的直流微电网储能单元结构, 然后结合其工作原理, 针对储能单元运行在恒压下垂模式和恒流模式设计了相应的控制策略, 提出一种基于母线电压信息和电流指令的储能单元模式切换方案。最后搭建实验平台对所提的设计方案和控制策略进行了验证。

1 直流微电网运行模式与储能单元设计

1.1 直流微电网系统组成

本文采用如图 1 所示的直流微电网体系结构。其主要包括光伏发电单元、风力发电单元(可统称为

收稿日期: 2015-04-09; 修回日期: 2016-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477033, 51207032); 哈尔滨市科技创新人才研究专项资金资助项目(2014RFQXJ136)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477033, 51207032) and the Specialized Research Fund for Technological Innovation of Harbin(2014RFQXJ136)

分布式发电单元), 储能单元, 并网变换器和用户负载等。微电网中心控制器(MGCC)通过慢速通信与系统各单元实现双向通信, 可获取各单元的工作状态与数据, 进行能量管理, 发出控制指令调节各单元的工作状态, 进而实现系统的优化运行。

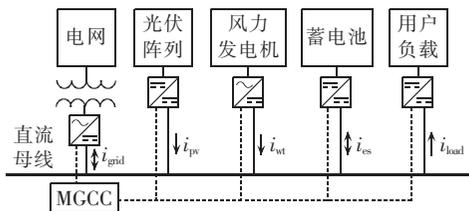


图 1 直流微电网结构

Fig.1 Architecture of DC microgrid

图 1 中, i_{grid} 、 i_{pw} 、 i_{wt} 、 i_{es} 、 i_{load} 分别为流经并网变换器、光伏发电单元变换器、风力发电单元变换器、储能单元变换器以及负载变换器的电流。

1.2 直流微电网运行方式

与交流微电网类似, 直流微电网的运行方式可分为并网运行和离网运行两大类^[16]。在并网运行模式中, 当系统中发电单元发出能量满足本地负载后仍有剩余时, 并网变换器可工作在逆变状态向电网馈电, 反之并网变换器可工作在整流状态从电网获取电量。大电网发生故障或直流微电网系统自身能够维持能量平衡时, 并网变换器停机, 系统则切换至离网运行模式。

在直流微电网离网运行时, 当分布式发电单元发出能量充足时, 直流母线电压尤其稳定, 此时系统中多个分布式发电单元同时工作在恒压输出模式, 多个直流电压源并联会由于自身变换器与线缆阻抗等参数差异导致输出功率失衡, 可在控制策略中引入下垂控制^[17]实现各单元输出功率的合理分配; 当分布式发电单元发出能量不足时, 将切换至最大功率跟踪模式, 此时储能单元放电并稳定直流母线电压。如遇交流电网故障不能并网运行, 且分布式发电单元和储能单元发出能量均不能满足负载需求时, 则系统需要进行减载操作。

直流微电网的运行控制方法主要有主从控制和自主控制 2 种^[18], 后者因无需快速通信而更加符合微电网分布的特点。在直流微电网基于母线电压信息的自主控制^[19-20]中, 系统各单元可依照直流母线电压信息协调运行, 大致方法是将直流母线电压分成若干等级, 系统各单元按照不同电压等级下设定的状态运行, 且每个电压等级下都有指定的单元工作在恒压模式稳定直流母线电压, 其余单元则工作在电流模式。

本文采用基于母线电压信息的自主控制对直流微电网中储能单元的运行模式进行切换, 具体内容

将在 2.3 节进行介绍。

1.3 直流微电网储能单元设计

基于移相全桥变换器的储能单元结构如图 2 所示, 移相全桥变换器一端与蓄电池连接, 另一端与直流母线连接。图中, L_p 为串联在变压器初级的外接电感; i_L 为流经 L_p 的电流; u_p 、 u_s 分别为高频变压器初级、次级端电压; i_s 为流经变压器次级电流; i_o 、 i_{dk} 分别为移相全桥变换器输出侧滤波前与滤波后电流。为实现冗余功能, 直流微电网系统中使用多个储能单元并联至直流母线, 这样即使某个储能单元发生故障, 其余单元仍可正常工作并保证系统持续稳定运行。

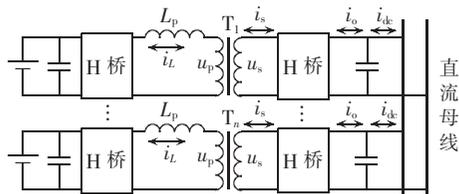


图 2 基于移相全桥变换器的储能单元

Fig.2 Energy storage units based on phase-shifting full-bridge converter

由于移相全桥变换器具有高变压比特点, 使用移相全桥变换器连接蓄电池和直流母线时, 蓄电池不需要过多串联, 在降低串联蓄电池不平衡影响的同时, 也有利于提高系统的冗余程度和实现储能单元模块化, 从而提高系统的稳定性, 降低系统维护难度。

2 移相全桥变换器工作原理与控制策略

2.1 恒压下垂模式控制策略

当储能单元工作在恒压下垂模式时, 每个子单元可视作输出电压恒定的电压源, 此时蓄电池放电, 能量从蓄电池侧向网侧转移。该模式下可对移相全桥变换器左侧全桥进行桥臂间移相, 右侧全桥则封锁驱动信号。具体的调制波形如图 3 所示, 2 组有一定移相角度的占空比为 50% 的互补驱动信号(带有一定死区)分别施加在左侧全桥 V_1 、 V_2 和 V_3 、 V_4 构成的 2 个桥臂上, 使得高频变压器初级在 $t_0 \sim t_2$ 和 $t_3 \sim t_5$ 时刻电压分别为 U_1 和 $-U_1$ 。次级感应到幅值为 $\pm U_2$ 的交变方波电压, 右侧全桥开关管中的反并联二极管进行不控整流, 最终电能以直流形式输出至直流母线。

图 4 为储能单元恒压下垂控制策略, 主要包含电压电流闭环控制、下垂控制和蓄电池荷电状态(SOC)管理三部分。

首先, 电压给定信号 U_{DC}^* 与直流母线电压 u_{DC} 比较后减去变换器输出电流与下垂系数的乘积, 然后送至电压 PI 调节器。电压 PI 调节器输出作为电流

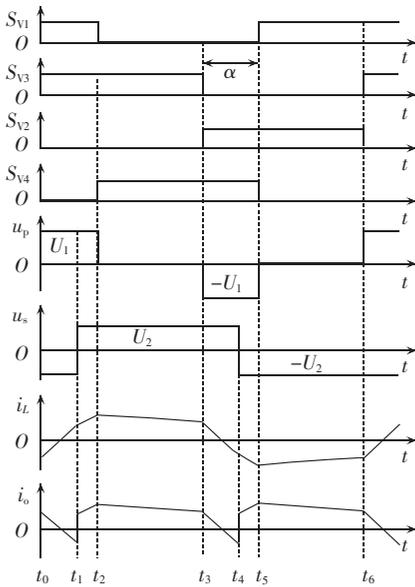


图 3 单侧移相工作原理

Fig.3 Theoretical waveforms of single-side phase-shifting

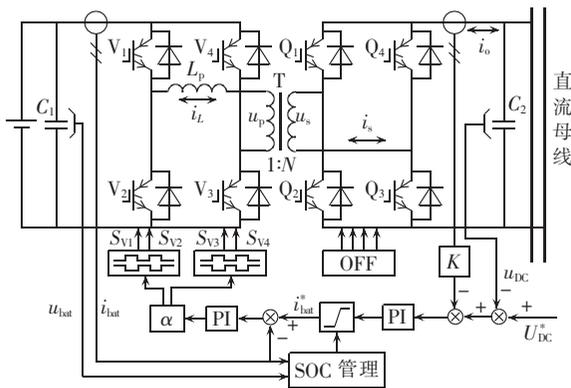


图 4 恒压下垂控制策略

Fig.4 Constant voltage droop control strategy

给定信号并经过限幅器,再与蓄电池当前电流比较后送入电流 PI 调节器并输出对应移相驱动信号至左侧桥臂开关管。

其中下垂控制相当于人为增大变换器输出阻抗,使其远大于线缆阻抗以及其他杂散参数,从而保证各储能单元输出功率的均衡。下垂控制原理可表示为^[21]:

$$U_{DC_REF}^*(n) = U_{DC}^* - KI(n) \quad (1)$$

其中, U_{DC}^* 为储能单元的给定电压参考值; $I(n)$ 为变换器 n 的输出电流; K 为各变换器对应的下垂系数,可看作是一个虚拟电阻; $U_{DC_REF}^*(n)$ 为经过下垂调节后的给定电压参考值。

SOC 管理通过测量蓄电池端电压 u_{bat} 和电流 i_{bat} 获取蓄电池当前 SOC,通过调节限流器幅值限制蓄电池的最大充、放电电流,使其 SOC 不超过所设置的上、下限。

$$SOC_{MIN} \leq SOC(t) \leq SOC_{MAX} \quad (2)$$

关于蓄电池 SOC 的计算与控制管理方法较多,且并不是本文重点,在此不再赘述。

2.2 恒流模式控制策略

当直流微电网母线电压由其他单元稳定时,储能单元应工作在电流模式,蓄电池根据 SOC 和系统指令进行充电或放电。全桥移相控制可实现变换器两侧功率的双向流动,与上一节的控制方式不同,此时变换器左右 2 个全桥同时工作,全桥内不再进行移相操作,每个全桥对管施加带有一定死区的占空比为 50% 的互补驱动信号。

该控制方法通过对 2 个全桥开关管的移相调制,使高频变压器初级、次级产生具有一定相位差的方波电压,并通过对电感 L_p 的充放电实现能量转移。以蓄电池向直流微电网供电为例,具体的工作原理如图 5 所示。在 $t_0 \sim t_1$ 时刻,电感电压为 $U_1 + U_2$,电流快速上升; $t_1 \sim t_2$ 时刻电感电压为 $U_1 - U_2$,电流缓速上升;在 $t_2 \sim t_4$ 时刻,情况相反。

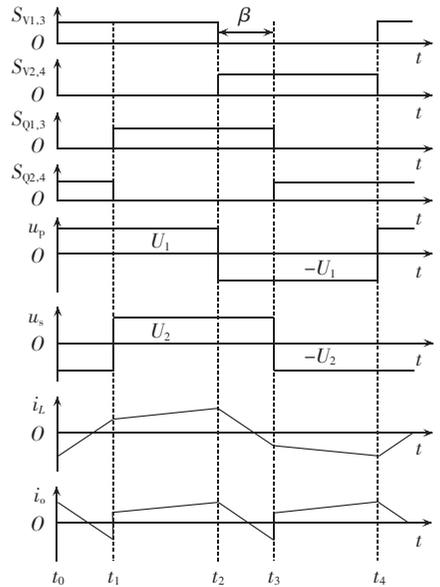


图 5 双侧移相工作原理

Fig.5 Theoretical waveforms of double-side phase-shifting

移相全桥变换器双侧移相传输功率与移相角之间关系表达式^[15]如下:

$$P = \frac{u_1 u_2}{\omega L} \left(\beta - \frac{\beta^2}{\pi} \right) \quad (3)$$

其中, β 为移相角; ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$; L 为高频变压器漏感与外接电感 L_p 之和。

移相全桥变换器在直流微电网系统中以恒流模式工作时的控制策略如图 6 所示。给定功率 P^* 与变换器当前输出功率比较后经由电压 PI 调节器送至限幅器,其输出作为蓄电池电流给定信号,与实际电流采样信号 i_{bat} 比较后送至电流 PI 调节器,之后输出移相角调节量驱动两侧全桥开关管工作。其

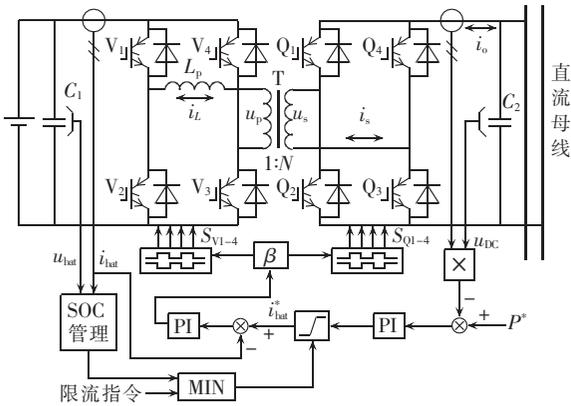


图 6 恒流控制策略

Fig.6 Constant current control strategy

中, P^* 由中心控制器给出; 限流器的大小由 SOC 管理模块和中心控制器的限流指令共同决定, 且取其中较小者。SOC 的限流原理与上节类似, 中心控制器的功率给定大小与限流指令则与系统中其他单元工作状态有关, 中心控制器依照各单元状态决定蓄电池的充放电电流幅值, 从而实现能量优化管理^[22]。

2.3 基于母线电压信息的模式切换

基于母线电压信息与微电网中心控制器电流指令的储能单元模式切换方案如图 7 所示。储能单元的设定参考电压与当前母线电压比较, 当母线电压采样值在设定值附近时, $S=0$, 储能单元将工作在恒压下垂模式, 并将直流母线电压稳定在设定值; 当储能单元发出能量不足、母线发生跌落或分布式发电单元发出能量充足、母线电压升高时, $S=-1$ 或 $S=1$, 此时蓄电池单元将工作在恒流模式, 直流母线电压依据电压等级由其他对应发电单元进行稳定。同时, 储能单元依据蓄电池 SOC 以及中心控制器的指令 i_{limit}^* 进行限流放电或限流充电。

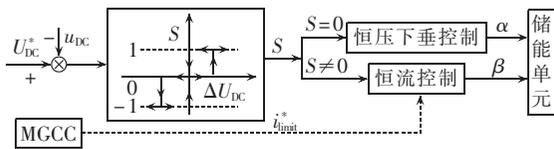


图 7 基于母线电压信息的模式切换方案

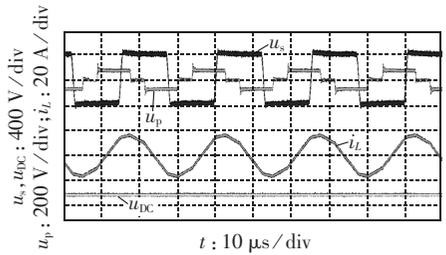
Fig.7 Operating modes switching method based on DC bus signaling

3 实验结果

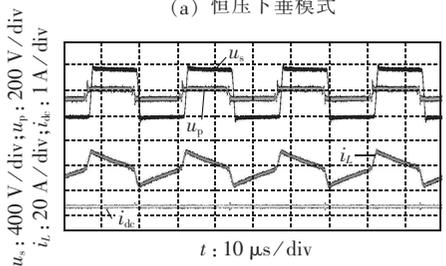
为验证所提控制策略的有效性, 搭建了基于移相全桥变换器的储能单元实验平台, 其中移相全桥变换器额定功率 1 kW, 蓄电池侧电压 48 V, 直流母线侧电压 400 V, 双侧全桥开关频率均为 40 kHz。控制器采用基于 Cortex-M4 内核的 STM32F407。

首先验证储能单元在恒压下垂模式与恒流模式稳态运行情况。在恒压下垂模式中, 如图 8(a)所示,

移相全桥变换器初级线圈电压 u_s 呈阶梯形, 次级线圈电压 u_p 为 ± 400 V 方波电压, 直流母线电压 u_{DC} 被稳定在 400 V。在恒流模式中, 如图 8(b)所示, 移相全桥变换器初级与次级线圈电压为方波并具有一定相移角, 直流母线侧输出电流 i_{dq} 恒定。



(a) 恒压下垂模式



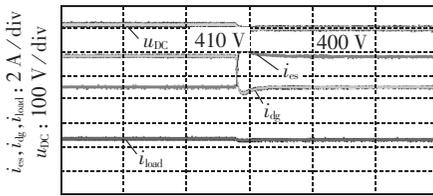
(b) 恒流控制模式

图 8 系统稳态运行实验波形

Fig.8 Experimental waveforms of steady-state operation

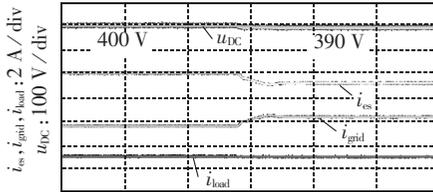
为了验证系统的暂态性能, 组建了一个包含储能单元、分布式发电单元、并网逆变器和用户负载的基本直流微电网系统。其中使用 2 台可编程电源模拟系统中分布式发电单元和并网变换器的发电情况, 使用可编程直流电子负载模拟用户侧负载的用电情况。

选取 2 种情形验证储能单元的暂态运行情况, 实验波形如图 9 所示。图 9 中, i_{es} 为储能单元电流; i_{dq} 为分布式发电单元输出电流; i_{grid} 为并网逆变器电流; i_{load} 为负载电流。在图 9(a)中, 开始时分布式发电单元发出能量充足, 直流微电网母线电压由其稳定在 410 V, 储能单元限流充电, 分布式发电单元发出功率、负载消耗功率和蓄电池充电功率分别为 1 400 W、1 000 W 和 400 W; 随后, 分布式发电单元发出能量不足, 降至 400 W, 此时母线电压开始下降, 在降至 400 V 时, 储能单元根据母线电压信息由电流模式切换到电压模式, 开始输出能量并稳定母线电压。在图 9(b)中, 开始时, 储能单元工作在恒压模式, 母线电压由其稳定在 400 V, 且其发出功率为 800 W; 随后, 由于限流指令使其切换至电流模式, 输出电流变小, 输出功率降至 400 W, 系统能量不足, 母线电压开始下降, 在降至 390 V 时, 并网变换器开始运行并稳定直流母线电压, 不足能量由电网提供。



$t: 10 \text{ ms/div}$

(a) 电流模式向恒压模式切换



$t: 10 \text{ ms/div}$

(b) 恒压模式向电流模式切换

图 9 系统暂态运行实验波形

Fig.9 Experimental waveforms of transient operation

4 结语

本文根据直流微电网的组成、结构和运行特性,设计了基于移相全桥变换器的直流微电网储能单元控制策略及运行模式切换方案。分析了移相全桥变换器工作在电压模式与电流模式的控制原理,并结合储能单元的运行模式设计了对应的控制策略。使用基于母线电压信息的自主控制与系统中心控制器指令相结合的方式决定储能单元的运行模式切换。实验结果表明,储能单元可在稳定工作在恒压下垂模式与恒流模式,当系统内能量供需发生改变时,可依照直流母线电压和电流指令在 2 个模式之间进行切换。

参考文献:

- [1] 吴雄,王秀丽,刘世民,等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):7-14.
WU Xiong,WANG Xiuli,LIU Shimin,et al. Summary of research on microgrid energy management system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(10):7-14.
- [2] 郝雨辰,窦晓波,吴在军,等. 微电网分层分布式能量优化管理[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):154-162.
HAO Yuchen,DOU Xiaobo,WU Zaijun,et al. Hierarchical and distributed optimization of energy management for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):154-162.
- [3] 梁建钢,金新民,吴学智,等. 基于下垂控制的微电网变流器并网运行控制方法改进[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):59-65.
LIANG Jiangang,JIN Xinmin,WU Xuezhi,et al. Improved grid-connection operation of microgrid converter based on droop control[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):59-65.
- [4] 李玉梅,查晓明,刘飞,等. 带恒功率负荷的直流微电网母线电压稳定控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):57-64.

- LI Yumei,ZHA Xiaoming,LIU Fei,et al. Stability control strategy for DC microgrid with constant power load[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):57-64.
- [5] GU Yunjie,XIANG Xin,LI Wuhua. Mode-adaptive de-centralized control for renewable DC microgrid with enhanced reliability and flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2014,29(9):5072-5080.
- [6] DRAGICEVIC T,GUERRERO J M,VASQUEZ J C,et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2014,29(2):695-706.
- [7] 夏向阳,孔祥霖,帅智康,等. 基于磁集成结构 DC-DC 变换器的超级电容储能系统[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):95-99.
XIA Xiangyang,KONG Xiangji,SHUAI Zhikang,et al. Supercapacitor energy storage system based on DC-DC converter with integrated magnetic structure[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):95-99.
- [8] XU Lie,CHEN Dong. Control and operation of a DC microgrid with variable generation and energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(4):2513-2522.
- [9] 郑连清,朱军,姜洪立,等. 新型零电流转换移相全桥 DC/DC 变换器[J]. 电力自动化设备,2008,28(6):22-26.
ZHENG Lianqing,ZHU Jun,LOU Hongli,et al. Zero-current-transition phase-shift full-bridge DC/DC converter[J]. Electric Power Auto-mation Equipment,2008,28(6):22-26.
- [10] 蒋赢,潘俊民. 基于集成磁件的光伏升压移相全桥 DC/DC 变换器[J]. 电力自动化设备,2010,30(8):84-89.
JIANG Ying,PAN Junmin. PV step-up PSFB DC/DC converter based on integrated magnetics[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(8):84-89.
- [11] NAAAYAGI R T,FORSYTH A J. Bidirectional DC-DC converter for aircraft electric energy storage systems[C]//IET International Conference on Power Electronics,Machines and Drives. Brighton, UK:IEEE,2010:1-6.
- [12] JEONG D K,RYU M H,KIM H G. Optimized design of bi-directional dual active bridge converter for low-voltage battery charger[J]. Journal of Power Electronics,2014,14(3):468-477.
- [13] INOUE S,AKAGI H. A bidirectional DC-DC converter for an energy storage system with galvanic isolation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(6):2299-2306.
- [14] 张方华,严仰光. 推挽正激移相式双向 DC-DC 变换器[J]. 电工技术学报,2014,19(12):59-64.
ZHANG Fanghua,YAN Yangguang. Research on push-pull forward phase-shifted bi-directional DC-DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,19(12):59-64.
- [15] ZHOU Haihua,KHAMBADKONE A M. Hybrid modulation for dual-active-bridge bidirectional converter with extended power range for ultracapacitor application[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2009,45(4):1434-1442.
- [16] EGHTEADARPOUR N,FARJAH E. Control strategy for distributed integration of photovoltaic and energy storage systems in DC micro-grids[J]. Renewable Energy,2012,45(1):96-110.
- [17] WANG Panbao,WANG Wei,XU Dianguo,et al. An autonomous control scheme for DC micro-grid system[C]//39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna, Austria:IEEE,2013:1519-1523.

- [18] LU Xiaonan, GUERRERO J M, SUN Kai, et al. An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1800-1812.
- [19] 王毅, 张丽荣, 李和明, 等. 风电直流微网的电压分层协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 16-24.
WANG Yi, ZHANG Lirong, LI Heming, et al. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 16-24.
- [20] CHEN D, XU L, YAO L. DC voltage variation based autonomous control of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 637-648.
- [21] TOMISLAV D, GUERRERO J M, JUAN C V, et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 695-706.
- [22] SECHILARIU M, WANG Baochao, LOCMENT F, et al. DC mi-

crogrid power flow optimization by multi-layer supervision control: design and experimental validation[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 82(6): 1-10.

作者简介:



王盼宝(1984—),男,河北卢龙人,博士研究生,主要研究方向为新能源发电技术、微电网控制与优化技术(**E-mail**: wangpanbao@hit.edu.cn);

王卫(1963—),女,上海人,教授,博士生导师,主要研究方向为新能源发电技术、照明技术等(**E-mail**: wangwei602@hit.edu.cn);

刘鸿鹏(1978—),男,内蒙古包头人,讲师,博士,主要研究方向为光伏发电技术、微电网技术、储能与节能技术;

吴炎(1990—),男,黑龙江佳木斯人,硕士研究生,主要研究方向为光伏发电技术、直流微电网控制技术。

Application of phase-shifting full-bridge converter in energy storage unit of DC microgrid

WANG Panbao, WANG Wei, LIU Hongpeng, WU Yan

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150001, China)

Abstract: The phase-shifting full-bridge converter is applied in the design of ESU(Energy Storage Unit) for DC microgrid and the batteries are adopted as its energy storage devices. The architecture of DC microgrid and the system operating mode switching based on the DC-bus voltage signal are introduced. The single- and dual-side phase-shifting principles of phase-shifting full-bridge converter are analyzed and the ESU control strategies in constant-voltage droop mode and constant-current mode are designed respectively. By combining the DC microgrid operating mode with the ESU control strategy, an ESU operating mode switching scheme based on the DC-bus voltage signal together with the command of DC microgrid central controller is proposed. An experiment platform is established and the experimental results of an ESU prototype demonstrate the switching between constant-voltage and constant-current operating modes based on the DC-bus signal and current command, verifying the effectiveness of the proposed ESU control strategy and switching scheme.

Key words: DC microgrids; phase-shifting full-bridge converter; electric batteries; energy storage; phase-shifting control; operating mode switching