

多电池组储能系统双向 DC-DC 变换器的研制

李立¹, 刘刚²

(1. 湖南工程学院电气信息学院, 湖南湘潭 411101; 2. 许继集团, 河南许昌 461000)

摘要: 介绍了多电池组储能系统中常用几种电池充放电变换器的主电路拓扑和工作原理, 并对与电池连接的双向 DC-DC 变换器的控制策略进行了研究。研制了一台由 3 路双向 DC-DC 变换器和 1 路双向 PWM 变流器构成的电池充放电系统, 功率为 120 kW, 能满足 3 路电池的独立充放电要求。在锂电池储能系统中的实验结果表明, 研制的双向 DC-DC 变换器, 具有电池充电、电池放电、孤岛运行和电池互充放电等多种功能, 而且充电电流纹波电流小于 0.5%, 波形平滑, 可适用于多组, 宽范围电压的电池组的充放电要求。

关键词: 多电池组储能系统; 双向 DC-DC 变换器; 锂电池

Development of bi-directional DC-DC converter in multiple battery energy storage system

LI Li¹, LIU Gang²

(1. College of Electrical & Information Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411101, China;
2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: It introduces the main circuit topology and working principle of the battery charging and discharging converter in multiple battery energy storage system, and studies the control strategy for bi-directional DC-DC converters connecting with the battery. A battery charge and discharge system composed of three groups of bi-directional DC-DC converters and one bi-directional PWM converter is developed, whose power is 120 kW, which can meet the need for independent charge and discharge of three groups of batteries. Experimental results in the lithium battery energy storage system show that the bi-directional DC-DC converter has multiple functions, such as battery charging, battery discharge, islanding operation, battery charge and discharge with each other. The charge current ripple current is less than 0.5% with smooth waveform, which is applicable to multiple, wide-range voltage battery charge and discharge.

Key words: multiple battery energy storage system; bi-directional DC-DC converter; lithium battery

中图分类号: TM91 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)03-0090-05

0 引言

在当今全球绿色能源、节能减排战略中, 不仅把风力发电、太阳能发电、生物发电和核能发电技术作为优先发展和政策扶持的对象, 而且将能量储存技术也作为今后的研究方向, 特别是电池储能系统, 它不仅犹如一家特殊“银行”, 可以将夜间的“谷电”存起来白天用, 或是将平日富余的电能存起来, 到电力紧张甚至供电中断时拿出来一解燃眉之急。而且也是城市电网削峰填谷的“调度高手”, 更是风光互补储能系统的关键设备^[1-2]。不管是新能源的发展、还是智能电网的发展都离不开它。

在电池储能系统有两个重要的组成部分, 第一就是号称“心脏”的电池储能系统中的电池, 负责

能量的存储和释放; 第二个就是号称“大动脉”的电池储能系统中的充放电变换器, 它是电池储能系统能量传递的双向高速通道。二者缺一不可, 密不可分。

电池储能系统中的电池不再单单采用传统的铅酸蓄电池, 钠硫电池、钒电池、锂电池和镍氢电池等也纷纷在电池储能系统中使用, 因此电池储能系统对充放电变化器的要求也越来越高, 他不仅要求充放电变化器具有传统的充放电功能, 还需满足电池电压的宽范围运行、快速充放运行、瞬时大功率输出运行、无功补偿运行、孤岛运行及多组电池的充放电运行要求。

本文对多电池组储能系统中电池充放电变换器的

池接口的双向 DC-DC 变换器进行了研究,在此基础上,研制了一台由“多路双向 DC-DC 变换器”和“双向并网变流器”构成的 120 kW 电池储能系统变换器。并在 3 组锂电池组构成的电池储能系统中进行了试验验证,为多电池组储能系统各路电池独立充放电提供了一个成熟的解决方案。

1 主电路拓扑和工作原理

在电池储能系统中,如果是单组电池,则只需一个由三相 IGBT 全桥电路构成的双向并网变流器(以下简称“PWM 双向并网变流器”)就可以实现电池的充放电功能。

在多电池组储能系统中,各电池不能并联,需独立充放电,仅一个 PWM 双向并网变流器满足不了系统要求,虽然也可以每个电池组均配一个 PWM 双向并网变流器,但这样的成本较高、体积较大,性价比低。对于多电池组储能系统,采用图 1 所示主电路拓扑(多个“DC-DC 变换器”+ 1 个“PWM 双向并网变流器”)结构简洁紧凑、性价比高,即在电网端配置一个 PWM 双向并网变流器,在电池端则根据电池组数量,配置相应数量的 DC-DC 变换器,如果将 DC-DC 变换器和 PWM 双向并网变流器连接点电压称为直流母线电压(V_{dc}),则当电池充放电时,DC-DC 变换器只需根据系统要求,往直流母线回馈或吸收能量,而 PWM 双向并网变流器则通过与电网能量的双向流动,保证直流母线电压(V_{dc})的稳定。

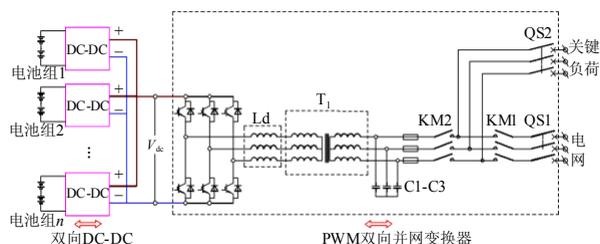


图 1 主电路拓扑

Fig.1 Topology of main circuit

DC-DC 变换器拓扑也有多种类型,文献[3]介绍了一种多重化双向 DC/DC 变换器,文献[4]也介绍了图 2 所示双向双全控桥 DC/DC 变换器,该变换器的特点是电池和直流母线隔离、两边均为单相全控桥变换器、可以工作在零电压开关(ZVS)模式,但该变换器的缺点是开关器件多、驱动及控制电路复杂、受高频变压器的限制,其变换器容量不能做得太大,仅适用中小功率系统。

文献[5]详细介绍了双极性控制的全桥 SPWM 双向变流器的系统构成及原理,采用单相拓扑,并

研制了一台 1 kW 样机进行测试,其特点是开关频率高,对电网污染小。文献[3-5]共同特点是几十千瓦以下的中小功率变换器,针对的也是一组电池的充放电。对于 100 kW 以上的大功率和多组电池的充放电还需采用更加适用的变换器。

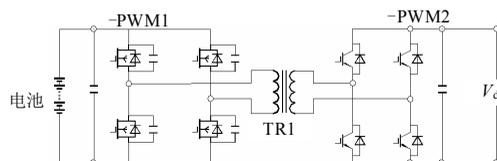


图 2 双向双全控桥 DC/DC 变换器

Fig.2 Bi-directional dual half-bridge DC/DC converter

图 3 所示另一种双向 DC-DC 变换器,当电池放电时,变换器以 Boost 模式工作;当电池充电时,变换器以 Buck 模式工作。该变换器的特点是结构简单、开关器件数量少、损耗小、驱动和控制电路简单、电池侧输出采用 LCL 滤波,能有效地减小电池端的纹波电压和纹波电流,该变换器的不足是电池和直流母线不隔离,共地。

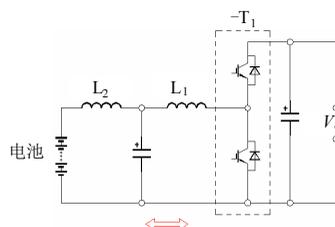


图 3 双向 DC-DC 变换器

Fig.3 Bi-directional DC-DC converter

本文研制的 120 kW 锂电池储能系统双向 DC-DC 变换器则采用图 3 所示拓扑。该系统有 3 组独立电池,每组电池和变换器直流母线电压参数如下:

- 单组电池额定电压: DC400 V;
- 单组电池电压范围: DC330~DC460 V;
- 单组电池最大充电电流: 110 A;
- 单组电池最大放电电流: 110 A;
- 变换器直流母线额定电压 V_{dc} : DC500 V

为了与其他产品兼容,本文研制的 120 kW 双向 DC-DC 变换器采用 2 个三相 IGBT 全桥电路(PWM1 和 PWM2)构成,图 4 所示,两个半桥输出并联作为 1 路 DC-DC 变换器,采用该拓扑还有一个最大的优点是双向 DC-DC 变换器与 PWM 双向并网变流器均是采用的三相 IGBT 全桥电路,因此二者的 IGBT 功率模块(IGBT、散热器、电容)IGBT 的驱动及控制电路均可以借用,减少了开发时间、维护也比较方便。

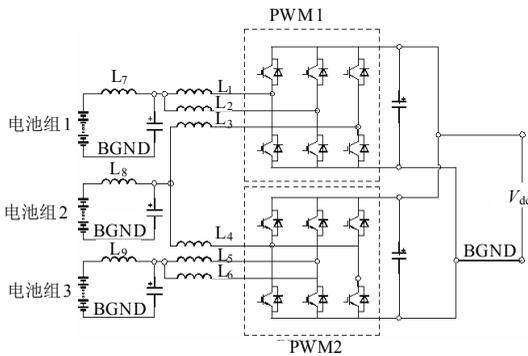


图 4 3 组电池储能系统双向 DC-DC 变换器

Fig.4 Bi-directional DC-DC converter in battery energy storage system with 3 battery

本文研制的 120 kW 锂电池储能系统双向 DC-DC 变换器，在电网断电时，还能作为电压源输出，即以 Boost 模式工作，输出电压 V_{dc} 稳定，后级 PWM 双向并网变流器则做孤岛运行，断开 KM1、闭合 KM2，保证关键负荷供电。

2 控制系统设计

本文研制的双向 DC-DC 变换器，其基本工作原理为 Buck 和 Boost 变换，当电池放电时，DC-DC 变换器以 Boost 工作模式运行，在电池充电时，DC-DC 变换器以 Buck 工作模式运行，本文不再对 Buck 和 Boost 工作模式的常规控制策略进行累述，仅对电池储能系统中双向 DC-DC 控制器设计时需要注意的几个方面进行了分析。

2.1 均流控制

根据戴维宁等效电路，图 4 所示电路单组电池可做如图 5 等效。

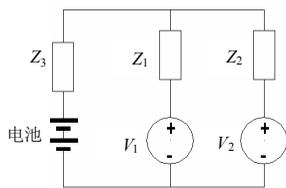


图 5 DC-DC 变换器等效电路

Fig.5 DC-DC converter equivalent circuit

其中 V_1 、 V_2 分别为两个并联模块对应的开路电压（桥臂输出）， Z_1 、 Z_2 为两个模块等效阻抗， Z_3 为并联接点到电池的阻抗，由于各并联模块铜排的布局、驱动的死区、以及 IGBT 的开通延时和上升沿等的不同，导致输出 $V_1 \neq V_2$ ，同理每个并联模块输出电缆长度和电抗器阻抗不同，一般 $Z_1 \neq Z_2$ ，如果不采用均流控制策略，将导致两个模块输出电流不一致，且产生环流，环流大小为 $I = (V_1 - V_2) / (Z_1 + Z_2)$ 。

环流的存在不仅导致流过 IGBT 的电流增大，同时也影响系统效率，为有效抑制环流，实现两组变换器均等的输出电流，必须采用均流控制策略，即是每个并联模块采用独立的反馈控制，以实现两并联模块电流相等，实现均流。当采用均流控制后两个变换器可等效为图 6 所示两个并联的电流源，通过控制，当 $I_1 = I_2$ 时，即可避免环流的产生。

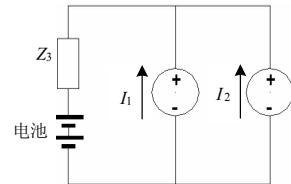


图 6 采用均流控制后等效电路

Fig.6 Equivalent circuit with a current sharing control

两并联模块的均流控制框图见图 7 所示， I_{ref} 为电池给定充放电电流，两路模块并联时，每个模块的电流指令为 I_{ref} 的一半，分别与对应模块的电流反馈 (I_{1f} 或 I_{2f}) 形成闭环，采用该控制策略能使两路输出电流完全相等。

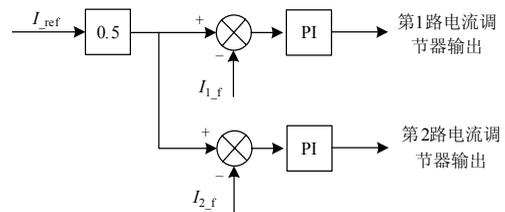


图 7 电流控制框图

Fig.7 Control block diagram of the current control

图 8 为采用均流前后的稳态仿真波形（本文电流波形以充电电流为负方向，放电电流为正方向），图 8 (a) 为两并联桥臂为同一个脉冲，仅 L_1 电流为闭环控制，因此由于输出阻抗（设定 L_1 桥臂 5 mΩ， L_2 桥臂 8 mΩ）不同， L_2 电流与 L_1 差 5 A 左右，输出总电流也差 5 A，而图 8 (b) 波形为两并联桥臂独立控制，均流度较好，两桥臂电流波形重合，达到了均流目的。

在本文研制的 120 kW 双向 DC-DC 变换器中，交错并联的两组变换器即采用相同的电流指令（总电流的一半），经闭环控制后即可实现均流输出。当系统运行于充、放电状态时，两组变换器电流给定值相同；当工作于恒压浮充状态时，电流指令由电池电压环决定，电压环调节器输出一分为二作为两组变换器电流环指令；当系统运行于孤岛模式时，电流指令由直流母线电压环决定，同样将电压环调节器输出一分为二作为两组变换器的电流指令以实现均流控制。

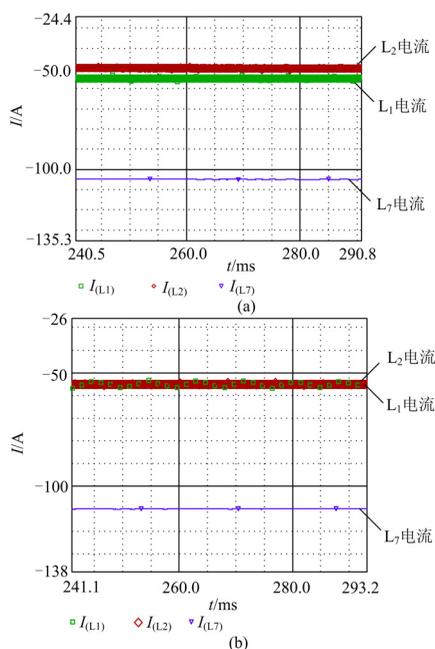


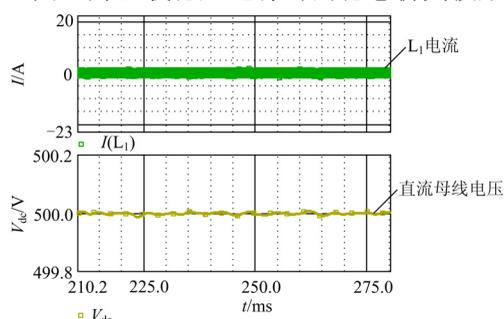
图 8 采用均流控制措施前后的波形对比

Fig.8 Waveform contrast in two kinds of control modes

2.2 Boost 空载稳压控制

在本文研制的电池储能系统中,要求在电网断电时,图 1 所示变换器能做孤岛运行,向关键负荷供电,即双向 DC-DC 做 Boost 模式运行,维持直流母线电压的恒定,而后级 PWM 双向并网变换器则做逆变器运行,向关键负荷供电,通常 Boost 变换器是不能空载运行的,这主要是因为其升压电感在开关管导通过程中的储能没有释放路径,直流母线电压端相当于开路,电压将逐渐上升。

对本文研制的双向 DC-DC 而言,两个源之间的能量交换是自由的,空载稳压运行时,由于 Boost 输出电压受控,故可等效为一个电压源,这样电感电流可实现双向流动,不存在传统 Boost 变换器空载条件下电感储能没有路径释放的问题。而传统采用二极管自然整流输出作为源也不能实现空载稳压运行。图 9 为空载稳压运行时的稳态仿真波形,波

图 9 直流母线电压 V_{dc} 和 L_1 电流波形Fig.9 Waveforms of V_{dc} and L_1 current

形显示在直流母线电压稳压 500 V 运行中,电感 L_1 电流是双向流动的。

2.3 两组电池互充放电控制

在本文研制的双向 DC-DC 还可以实现两组电池的相互充放电功能,既当电网断电时,其中一组电池 Boost 模式运行,实现直流母线的稳压功能,另一路电池则可从直流母线取电给自身进行充电,该功能在其中一组电池急需充电,而其他电池组还能满足放电时就可以采用本文介绍的功能,图 10 为仿真波形,图 4 所示电池 1 进行稳压(指令电压为 500 V),电池组 2 充电(充电电流指令为 -100 A),仿真结果显示直流母线电压稳定,充电电流平滑。

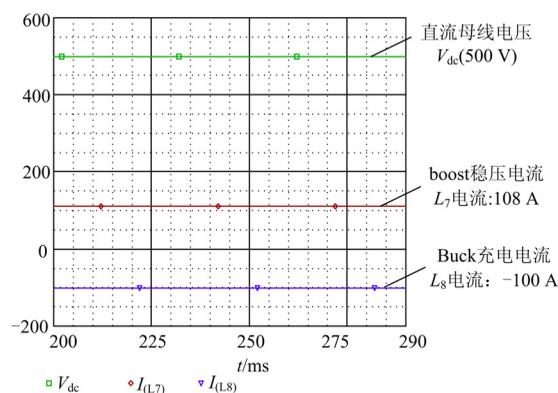


图 10 两组电池相互充放电波形

Fig.10 Waveforms for two sets of battery charge and discharge with each other

3 实验结果

以下实验波形为图 4 所示电池组 1 (锂电池) 的实验波形,图 11 为恒流充电波形,电池充电电流为 86 A, L_1 电流为充电电流的一半,充电时,电池纹波电流小于 0.5%; 图 12 为恒流放电波形,放电时,电池纹波电流小于 0.5%; 图 13 为电池放电和充电在线转换波形,充放电模式转换无需停机,且转换过程中波形平滑。

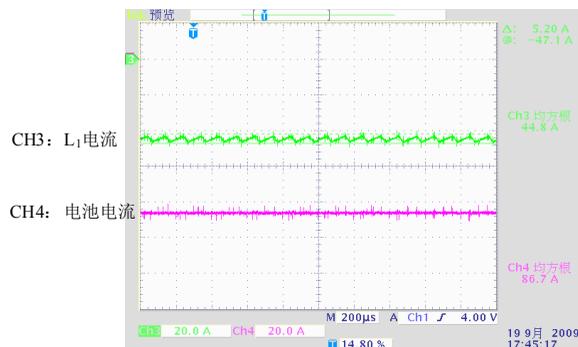


图 11 恒流充电波形

Fig.11 Waveforms of constant-current charging

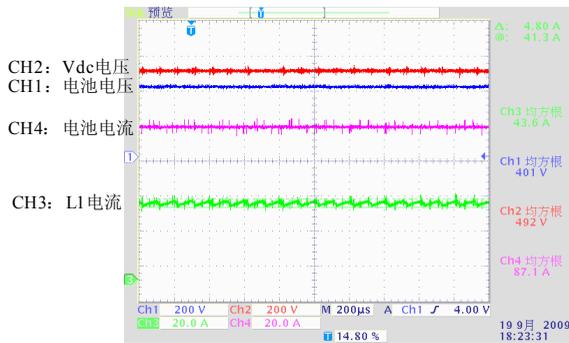


图 12 恒流放电波形

Fig.12 Waveforms of constant-current discharging

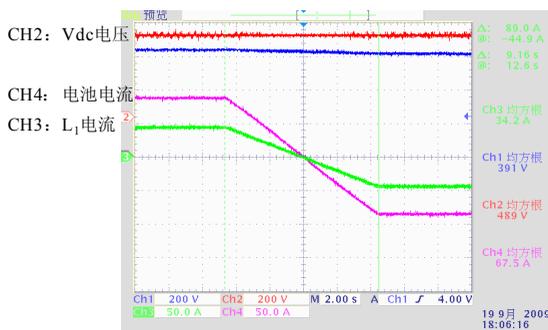


图 13 放电与充电之间转换波形

Fig.13 Waveforms for discharge to charge

4 结论

本文对多电池组储能系统电池充放电变换器拓扑和原理进行了介绍,对 DC-DC 变换器的控制器设计进行了分析,并给出了双向 DC-DC 变换器的仿真结果和在锂电池组上的实验波形,仿真和实验结果表明,本文研制的双向 DC-DC 变换器,具有电池充电、电池放电、孤岛运行和电池互充放电等多种功能,而且充电电流纹波电流小于 0.5%,波形平滑,可适用于多组,宽范围电池的充放电要求,为多电池组储能系统电池充放电提供了一个很好的解决方案。

参考文献

[1] 王文亮,葛宝明,毕大强. 储能型直驱永磁同步风力发电控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 43-48, 78.
 WANG Wen-liang, GE Bao-ming, BI Da-qiang. Energy storage based direct-drive permanent magnet synchronous wind power control system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 43- 48, 78.

[2] 李国杰,唐志伟,聂宏展,等. 钒液流储能电池建模及其平抑风电波动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 115-119, 125.

[3] 陈明,汪光森,马伟明,等. 多重化双向 DC-DC 变换器电流纹波分析[J]. 继电器, 2007, 35(4): 53-57.
 CHEN Ming, WANG Guang-sen, MA Wei-ming, et al. Analysis of the inductor current ripple in interleaved lo-directional DC-DC power converters[J]. Relay, 2007, 35(4): 53-57.

[4] Profumo F, 等. 发电用燃料电池特性及其电力电子调节系统的专用解决方案[J]. 变流技术及电力牵引, 2007, 2: 52-57.
 Profumo F, et al. Fuel cell for electric power generation: peculiarities and dedicated solutions for power electronic conditioning systems[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2007, 2: 52-57.

[5] 张仕彬,林仲帆,杜贵平,等. 基于双向交流技术的蓄电池充放电装置[J]. 电力电子技术, 2008, 42 (5): 77-79.
 ZHANG Shi-bin, LIN Zhong-fan, DU Gui-ping, et al. Charging-discharging equipment for accumulator based on bidirectional inverting and commuting technology[J]. 2008, 42 (5): 77-79.

收稿日期: 2010-02-27; 修回日期: 2010-06-03

作者简介:

李立 (1961-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电力电子技术与交直流传动, 计算机测控技术与 DSP 应用;

刘刚 (1973-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电力电子变流技术. E-mail: gangl@xjgc.com

(上接第 77 页 continued from page 77)

收稿日期: 2010-02-13; 修回日期: 2010-04-22

作者简介:

尚秋峰 (1968-), 女, 教授, 主要研究方向为信号与信

息处理;

康丹 (1984-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为信号与信息处理; E-mail:icanfly930@sohu.com

李青 (1984-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理。