

静止伏安发生装置中的锂电池充放电控制

刘建伟, 尹虎臣, 韩民晓, 林少伯, 李文涛, 高宁超

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 文章在分析了锂离子电池的充放电特性和建立了电池模型的基础上, 设计了相应的控制策略, 并根据系统的动态特性, 探讨了锂电池储能装置中的能量管理控制系统的设计方法, 搭建了硬件电路。通过控制双向变换器调制锂电池的充放电, 使经过变换器的直流母线电压保持恒定, 便于后续环节的配置。通过仿真对锂电池储能装置的输出特性进行验证, 证实了所设计的能量管理控制系统的有效性。实验结果表明, 经过管理系统对电池充放电, 冲击大大减小, 电池的寿命显著延长。

关键词: 锂电池; 储能装置; 充放电特性; 能量管理; 双向DC/DC变换器

中图分类号: TM911; TM761+.1

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2011)04-0075-06

Charge and Discharge Control of Li-ion Battery in Static VA Generator Device

LIU Jian-wei, YIN Hu-chen, HAN Min-xiao, LIN Shao-bo, LI Wen-tao, GAO Ning-chao

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: This paper analyzes the charging and discharging characteristics of lithium ion battery, builds common lithium battery model and corresponding control strategy is also developed. Based on the dynamic behavior of the system, it discusses design method of energy management controlling system of the lithium battery energy storage device, and sets up the hardware circuit. We modulate lithium battery charge-discharge status by controlling the bidirectional converter, which makes bus voltage of bi-directional DC/DC converter constant, facilitates subsequent configuration. It is the simulation for lithium battery energy storage device to verify the output characteristics, which is proved that the design of energy management for the control system is valid. Experimental results show that management system for battery charging and discharging, makes the impact greatly decreased, and prolongs the battery life.

Key words: Li-ion battery; energy storage device; charging and discharging characteristics; energy management; bi-directional DC/DC converter

0 引言

随着现代社会对能源需求的增加, 以及环境污染问题的加重, 人们在解决问题的同时, 推动着再生能源的分布式发电系统 Distributed Generation DG 迅速发展。尽管DG在很多方面都具备不可比拟的优势, 但其大量入网给配网带来的问题也同样不可忽视^[1-4], 通常表现为电压偏差、电压波动、谐波、直流偏磁、故障电流和孤岛运行。这些问题最显著的特征是传统配网

变为有源网络, 造成功率的双向流动。含分布式电源的配网的控制不但需要对无功进行控制, 还需对有功进行调节。这种情况下, 基于储能技术的有功、无功都可调节的静止伏安发生装置(Static VA Generator SVAG)将能够发挥重要作用。

在目前实用的储能技术中, 电池储能技术因其历史悠久、应用广泛、可控性高、模块化程度高、技术非常成熟等特点, 通常被应用于供电质量要求较高的配电网中。其中, 锂离子电池具有很多优点, 成为了储能装置的首选。另一方面, 电池技术是电动汽车发展的关键, 电动汽车迅速发展正推动着电池产业的发展, 而引起的相关问题也亟待解决, 其中如何对电池进行

收稿日期: 2011-06-19

作者简介: 刘建伟(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电能质量、新能源发电、储能等电力系统中的应用。

能量管理成为瓶颈。同时,电动汽车在运行中会频繁的增加减速,这与DG的间歇性和随机性很相似,所以本文采用电池作为储能装置的动力源具有理论和现实的意义。

显然,在静止伏安发生装置中,对锂电池的控制至关重要;而对电池的控制主要是指如何对其进行能量管理,从而实现装置的功能。尽管通过研究锂离子电池的内部动态过程建立了各种详细的电池能量管理系统^[5-6],可是都不太适合能量管理的系统级设计。本文提出了一种新的能量管理系统思路,通过控制双向DC/DC变换器对电池进行合理充放电,使锂离子电池输出的电流按装置要实现的功能设计而改变;讨论了能量管理系统控制器的结构和设计,提出了基于双闭环控制方法进行能量管理控制。实验结果证明了该能量管理控制系统的有效性。

1 静止伏安发生装置

1.1 装置拟实现的功能

(1) 功率追踪

为了提升并网功率的可预测性,实现发电计划,需要补偿分布式电源出力预测与实际功率的误差,这就是功率跟踪的实质。即当DG出力预测值小于当天实际发电量时,则应控制SVAG将多余的电能存储起来,若此剩余的电能多于储能装置本身容量则应通过控制减少DG出力;相反,当DG出力预测值大于当天实际发电量时,则应通过控制将存储在储能装置中的电能释放,以补偿负荷所需功率,若投入储能装置后仍不能满足负荷需求,就应对负荷进行相应控制,减少不必要的负荷。

(2) 电能质量控制

SVAG的电能质量调节功能主要集中在电压波动、电压暂降、闪变和短时供电中断等方面。通过收集智能终端得到电能质量信息,SVAG控制系统通过控制储能和并网系统对电能质量问题进行相应的处理和调节。

1.2 装置的设计及拓扑

SVAG的电池采用388.8 V/8 Ah 电池组,电压的波动范围为324~453 V,装置的输出频率为50 Hz的交流电并到380 V的三相电网。为完成装置的功能,该系统需要双向斩波和逆变并网2个功能。根据这种特殊性,装置主电路采用2级结构:第1级为非隔离双向DC/DC,将低压400 V电池电压升高到600 V直流电压,输入输出电气隔离;第2级为逆变器,采用空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation SVPWM)方式将600 V直流电压逆变成380 V三相交流电压,实现并网。最后,主电路确定为逆变电路、储能装置的充放电电路以及相

应的控制和滤波并网电路。装置的拓扑结构如图1所示。

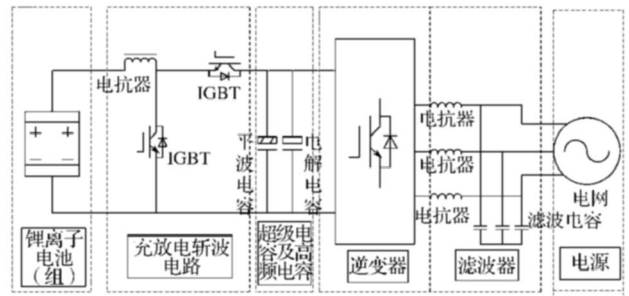


图1 SVAG 拓扑图

Fig. 1 Topology of SVAG

2 双向DC/DC变流器

2.1 双向DC/DC变流器的作用

电池作为SVAG的动力源,起着很重要的作用。双向DC/DC变流器作为电流的接口,起着对电池充放电和能量管理的双重作用。随着电池充放电状态的变化,电池电压的较大变化会给传递功率的控制带来困难。若直接采用DC/AC变流器作为电池与交流电网接口,会限制变流器输出的电压等级,增加装置的损耗,并给变流器控制带来困难。因此,在电池设备与DC/AC变换器之间增加一级双向DC/DC斩波电路,目的是提高并稳定直流电压,如图1所示。除此之外,斩波器的电池侧电抗器也起到平波作用,将逆变器直流侧脉冲电流转化为具有一定纹波的直流电流,纹波大小由电抗值决定。

装置除了具有对锂电池充放电实现有效控制,延长锂电池的使用寿命等特点外,最大优点是提高装置的运行效率,以及对能量的智能管理。双向DC/DC变流器承担系统的能量传递工作,因此有效并合理地控制双向变流器是实现该系统诸多优点的核心。在实验室通过一实验样机验证了其正确性和合理性^[7]。

双向DC/DC变流器可将充放电合二为一,对电池进行储能和释能控制,常常首选图2所示的非隔离型双向

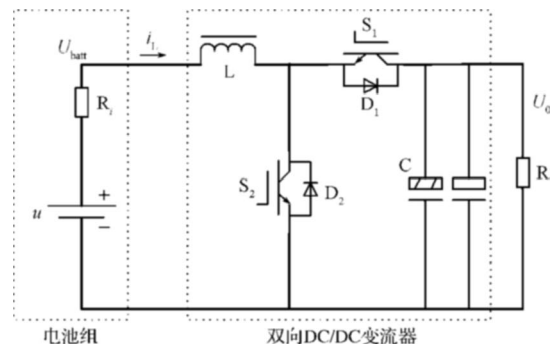


图2 锂电池储能装置系统结构图

Fig. 2 Topology of Li-ion battery energy storage system

半桥DC/DC做锂电池储能装置。该功率变换拓扑的优点为:器件数量少,造价低廉,没有变压器损耗,效率高,无源器件少,易于包装和集成控制电路简单。

2.2 双向DC/DC变流器的工作模式

工作模式的控制方案有两种:一种为互补PWM控制方式,另一种为独立PWM控制方式,两者区别在于开关管 S_1 和 S_2 的驱动是否互补。

在互补PWM控制方式下,开关管 S_1 和 S_2 的驱动为互补,控制实现简单,开关管能够实现零电压开通;但是在很多实际的系统中,当功率流方向恒定时,电感电流始终为单方向。开关管的互补驱动并没有好处,反而会降低系统的可靠性(如桥臂上下管直通)^[8]。

在独立PWM控制方式下,开关管并不为互补模式,当开关管 S_1 工作于PWM方式时,开关管 S_2 始终关断,做二极管用,此时电路工作于Buck电路模式;当开关管 S_2 工作于PWM方式时,开关管 S_1 始终关断,做二极管用,此时电路工作于Boost电路模式。这种控制方式下,电路的可靠性比较高。

由于本文中双向DC/DC变流器和并网变流器分开控制,且系统采用DSP控制,为了使控制容易,系统采用一个上位机对并网变流器和双向DC/DC变流器进行控制。双向DC/DC变流器采用独立PWM控制方式,上位机通过对电网的检测来决定双向DC/DC变流器和并网变流器工作于何种状态,进而决定双向DC/DC变流器如何工作;双向DC/DC变流器决定锂电池的充放电方向和大小,从而实现电池的能量管理。

3 建模与仿真

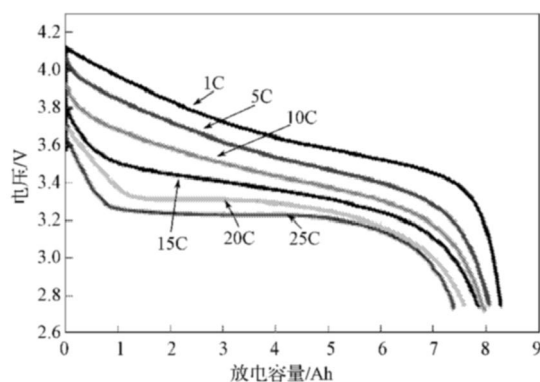
3.1 锂电池的特性及建模

3.1.1 锂电池的特性

锂离子电池的特性,一般是指锂离子单体电池的特性,如不同电流下的充放电特性、不同温度下的充放电特性等^[9-10]。单体电池的标称电压为3.6V,标称容量为8Ah;电池组的标称电压为389V,电压范围为324~453V,电池的额定电量为3.11kW·h。单体电池的充放电曲线图如图3所示。

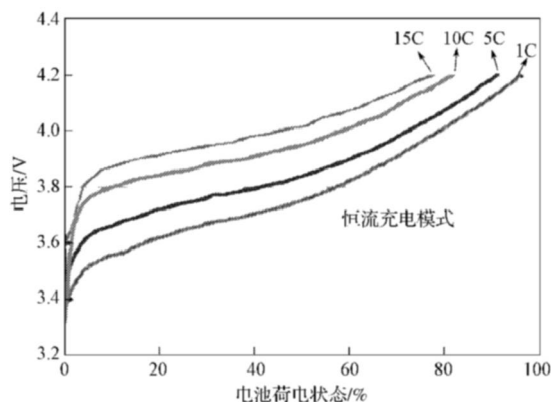
由图3(a)可以看出,锂离子电池恒流放电情况下的工作电压变化分3段:在放电初始阶段,电池工作电压下降迅速;而后进入线性下降区,也就是锂离子电池的工作阶段,持续工作时间随放电率的不同而有所不同,电压下降速率也会因为放电率的不同而变化;在放电接近终止时,电池工作电压又开始急剧下降(下降速率迅速上升,如果没有很好的防护措施,有可能损坏电

池)。而图3(b)中电池端电压在充电初始时刻有比较大的上升率,随着充电过程的不断进行,电池端电压逐渐趋于平稳,此时对应为锂电池的正常充电区域,当电池接近充满时,电压的上升率又比较大。



(a) 单体电池放电曲线

(a) Discharge curve for monomer battery



(b) 单体电池充电曲线

(b) Charge curve for monomer battery

图3 单体电池放电和充电曲线

Fig. 3 Discharge and charge curve for monomer battery

总之,电池荷电状态(SOC)在0~30%和70%~100%之间会变化剧烈;而在30%~70%之间变化平缓,期间电池组端电压变化不大。同时,考虑实际应用中避免过充、过放等问题,一般令电池组工作在线性区域30%~70%之间。本文提出的能量管理控制作用正是根据电池的充放电特性,通过双向DC/DC变换器的调节,使电池工作在充放电平台阶段,从而很好地使直流母线电压恒定。

3.1.2 锂电池的模型

电池模型是电池状态估算、性能分析、科学评价的基础,是从电池外部特性到内部状态的桥梁。本文采用了一种易于使用的电池模型,应用了动态模拟软件。为了准确地重现电池曲线,仿真模型仅使用荷电状态的作为状态变量,从而避免了代数循环问题^[11]。该模型由一个受控电压源串联一个电阻组成,如图4所示。

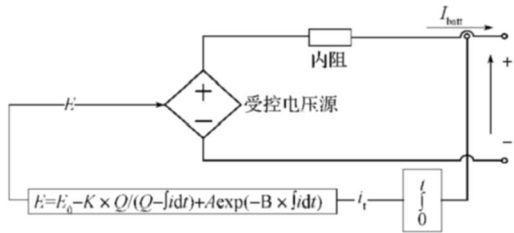


图4 电池模型

Fig.4 Battery model

该模型假设充电和放电有相同的特性。开路电压通过基于电池实际的SOC组成的非线性方程计算得到。受控电压源通过式(1)和式(2)来描述：

$$E = E_0 - K \times \frac{Q}{Q - \int i dt} + A \exp(-B \times \int i dt) \quad (1)$$

$$V_{batt} = E - R \times i \quad (2)$$

式中： E ——空载电压(V)； E_0 ——电池的恒定电压(V)； K ——极化电压(V)； Q ——电池的额定容量； $\int i dt$ ——实际的电池充电容量(V)； A ——指数区的电压暂降(V)； B ——指数区电池容量(Ah)的倒数，为 $(Ah)^{-1}$ ； V_{batt} ——电池电压(V)； R ——电池内阻(Ω)； i ——电流(A)。

3.2 双向DC/DC变流器建模

由于双向DC/DC变流器在充、放电的状态下工作模式不同，下面分别对Boost和Buck电路下的工作状态进行分析。

电池放电时，电路结构如图5所示，其中 u_{batt} 表示电池端电压， u_d 为直流母线电压， L_d 为平波电抗， R_d 为装置的串联等效电阻。

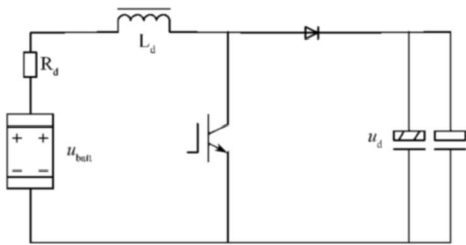


图5 电池放电状态斩波器模型

Fig.5 DC/DC converter model in discharging

设开关管占空比为 D ，流过电流 i_L ，根据开关管导通和关断2种状态列写回路的状态方程，如式(3)：

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= -\frac{R_d}{L_d} \times i_L + \frac{1}{L_d} \times u_{batt}, \quad nT \leq t < (n+D)T \\ \frac{di_L}{dt} &= -\frac{R_d}{L_d} \times i_L + \frac{1}{L_d} \times u_{batt} - \frac{1}{L_d} \times u_d, \quad (n+D)T \leq t \leq (n+1)T \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

为获得一个开关周期内的统一状态方程，采用状态空间平均法^[12]，利用占空比对式(3)加权平均，式(4)

中 $\bar{i}_L$ 为电池电流在一个开关周期内的均值。

$$\frac{d\bar{i}_L}{dt} = -\frac{R_d}{L_d} \times \bar{i}_L + \frac{1}{L_d} \times u_{batt} - (1-D) \frac{1}{L_d} \times u_d \quad (4)$$

电池充电时，可以采用同样的方法获得Buck工作模式下下一个开关周期内的加权平均状态方程，如式(5)：

$$\frac{d\bar{i}_L}{dt} = -\frac{R_d}{L_d} \times \bar{i}_L + \frac{1}{L_d} \times u_{batt} - D \times \frac{1}{L_d} \times u_d \quad (5)$$

可看出，式(4)与式(5)具有相似性，设 $D^*=1-D$ ，则式(4)与式(5)相同，于是，在装置的充/放电状态下，可以用统一的状态方程来进行控制器设计。

3.3 能量管理的Matlab建模与仿真

根据前两部分的建模，在Matlab/Simulink平台下搭建了系统的仿真模型，其主电路的仿真模型如图6所示。其中，电池的标称电压为400V，额定容量为8Ah，初始荷电状态为80%。

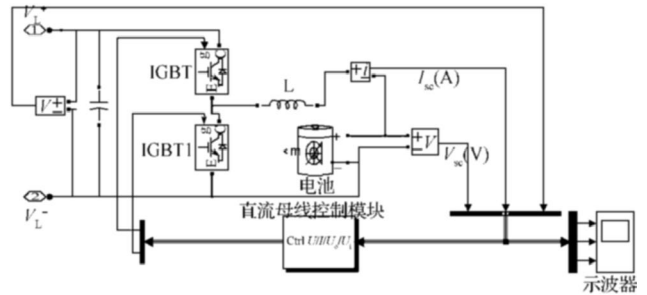


图6 锂电池储能装置的仿真模型图

Fig.6 Simulation model of Li-ion battery energy storage device

系统采用DSP控制，在两种工作状态下，控制的目的不同：Buck电路模式工作状态的目的是给锂电池组充电；Boost电路模式工作状态的目的是维持并网变换器的直流母线电压 V_{bus} 稳定，以使并网变流器能够向电网输出恒定的有功功率。根据双向DC/DC变流器控制的要求，需要采样3个控制量：锂电池组电压 V_{batt} ，直流母线电压 V_{bus} ，电感电流 i_L 。

为了防止桥臂的上下管发生错误动作导致直通，始终需要对上下管进行互锁。为此，设计一个两种状态之间转换的控制电路很重要，Buck/Boost状态切换控制框图如图7所示。

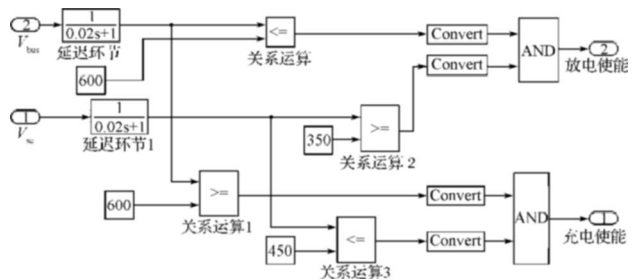


图7 Buck/Boost状态切换模块

Fig.7 Block diagram for switching Buck/Boost status

采集所得的3个控制量经过Buck/Boost 状态切换控制子模块后 ,输出电池充放电的使能信号。电池充电采用电流滞环比较控制 ,放电采用加入PI 补偿环节的电

流模式控制 ,如图8 所示。整体控制框图如图9 所示。

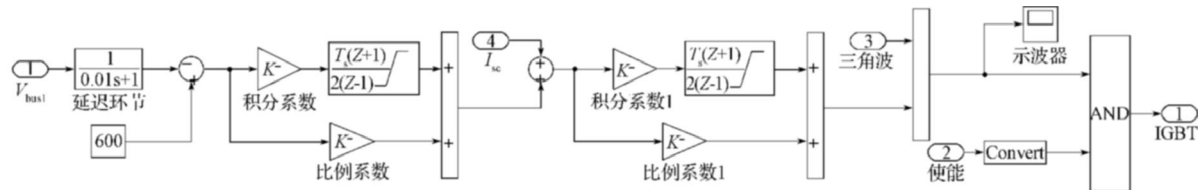


图 8 放电控制模块

Fig.8 Control block diagram for discharging

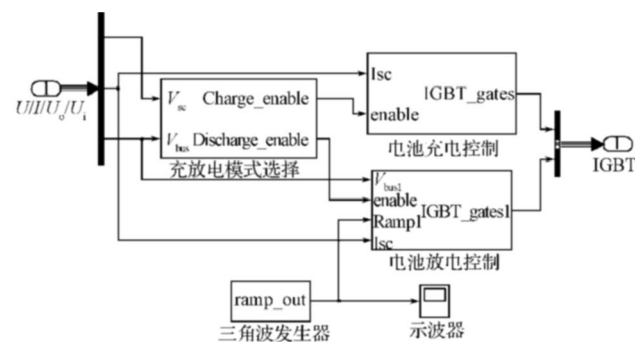


图 9 电池充放电整体控制模块

Fig.9 Integral control block diagram for charging and discharging

搭建完锂电池储能装置的仿真模型后 ,对电池的充放电进行仿真 ,仿真结果如图10所示 ,第一个波形图为电池电压波形 ,中间为充电电流波形 ,最后为直流母线电压波形。仿真结果表明 ,通过控制双向变换器调制锂电池的充放电 ,使经过变换器的直流母线电压保持恒定600 V ,便于后续并网环节的配置。

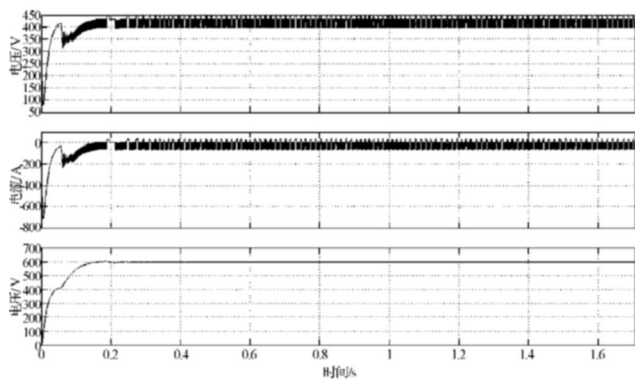


图 10 电池储能装置充放电输出波形图

Fig. 10 Output waveforms of battery energy storage device

当0.16 s时 ,在直流母线侧突加100 Ω电阻作为扰动 ,扰动情况下的仿真波形如图11 所示。从图中可见 ,扰动会带有小的电压波动 ,但是 ,最大纹波系数为4.8% ,在电压波动的允许范围内 ,控制效果明显。

4 控制系统的软件与硬件设计

4.1 双向DC/DC变换器硬件电路设计

根据储能装置对双向DC /DC 变换器的工作性能要

求 ,硬件电路的设计除了包括双向DC /DC 主电路外 ,还包括吸收、保护、驱动、与DSP 控制器连接的接口电路等。双向DC /DC 变换器的设计参数见表1。

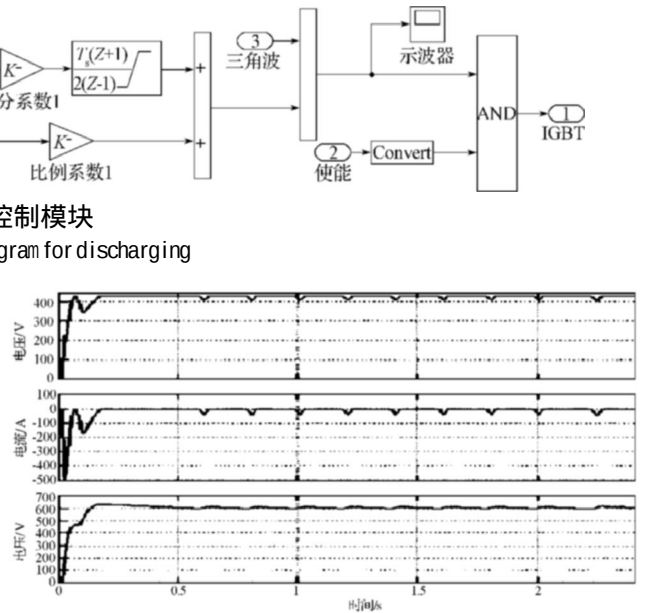


图 11 直流母线侧突加扰动时输出波形图

Fig. 11 Output waveform of plus disturbance for DC bus

求 ,硬件电路的设计除了包括双向DC /DC 主电路外 ,还包括吸收、保护、驱动、与DSP 控制器连接的接口电路等。双向DC /DC 变换器的设计参数见表1。

表1 双向DC/DC变换器的设计参数

Tab. 1 Design parameters for bi-directional DC /DC converter

参 数	数 值
最大输出功率 P_o / kW	10
额定输出电压 V_o / V	600
输入直流电压范围 V_i / V	300~450
最大输出电压纹波 $\Delta V_o / \%$	5
最大输入电压纹波 $\Delta V_i / \%$	5
最大储能电感电流纹波率 $\gamma_L / \%$	30
最大储能电容电压纹波率 $\gamma_C / \%$	30
开关频率 f_{sw} / kHz	20

电感量的计算依据见式(6)

$$L = \frac{V_i \times D}{f_{sw} \times I_{f \max}} \tag{6}$$

按照设计要求中的 γ_L 可知 ,电感纹波率等于6.67 ,计算电感量如式(7):

$$L = \frac{450 \times 0.75}{20 \times 10^3 \times 6.67} \approx 2.53 \text{ mH} \tag{7}$$

因此 ,电感设计值为2.53 mH/60 A。

4.2 双向DC/DC变换器软件设计

软件分为两个部分 :主程序和中断子程序。软件设计流程图如图12 所示。

主程序主要完成以下功能 : (1) 初始化。主要包括对程序中定义的各种变量的初始赋值和对系统中各种

外设(如输入输出、AD模块、CAN以及定时器等)初始化。(2)向上位机发送DC/DC的状态。主程序的另一个功能就是通过通讯功能将DC/DC的运行状态、输出电压值等信息发给上位机。程序中设有两个中断,包括定时器下溢中断和器件保护中断。中断子程序主要管理程序中各种事件的定时操作,定时器的中断周期为50 μs。通过对定时器中断操作的计数可以实现对程序中事件的定时操作,读取采样值,根据算法改变器件的占空比。定时器中断子程序获得电流电压的AD采样值,进行PID运算,输出给IGBT。

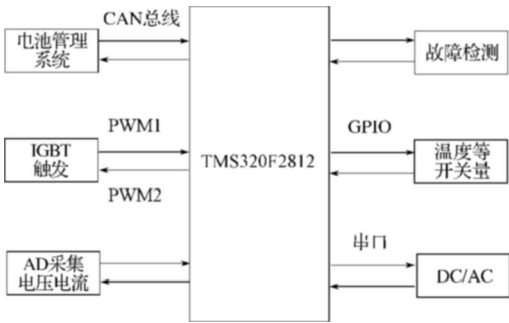


图 12 软件设计流程图
Fig. 12 Flow chart for software design

5 实验验证

搭建实验电路,对电池充放电控制,测量双向DC/DC变换器输出端电压,即母线电压是否恒定。双向DC/DC变换器实际装置如图13所示。

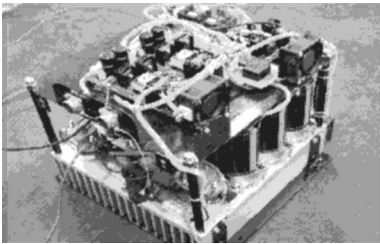


图 13 双向DC/DC变换器实际装置
Fig. 13 The actual device of bi-directional DC/DC converter

双向DC/DC变换器有两个控制端,可以控制装置的启停、升降压切换、充放电电压、充放电电流、温度等储能装置实际运行时状态量。双向DC/DC变换器输入侧接锂电池,输出侧接逆变器。

利用万用表对直流母线进行测量,可以测得:当电池充放电时,直流母线电压可以恒定为614 V,并保持很长时间。用示波器对直流母线的电压和电池侧电压变化进行采样,截取其中一段,如图14所示。

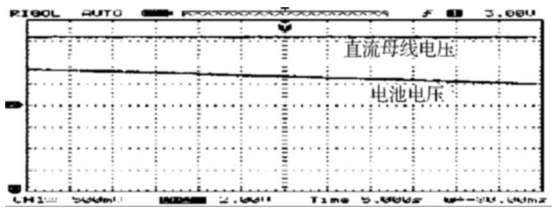


图 14 电池放电时电压采样图
Fig. 14 The diagram for voltage variation when discharging

6 结语

本文在锂离子电池储能装置的能量管理方面提出了系统级设计方法,并通过理论、仿真、实验等各种方法分析、验证了方法的有效性。利用双向DC/DC控制使直流母线电压稳定,充放电电流大小得到限制,能量按照规定的方向、速度流动,从而达到能量管理的效果,不仅使锂电池更好地得到利用,而且为后续环节的设计提供了方便。同时,本文也有利于更好地设计分布式发电、电动汽车和智能电网中的储能装置。

参考文献:

[1] 肖湘宁,韩民晓,徐永海,等. 电能质量分析与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2004.

[2] 冯希科,邵能灵,宋凯,等. DG容量对配电网电流保护的影响及对策研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(22):156-160.

[3] 梁才浩,段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化,2001,25(6):53-56.

[4] 韦钢,吴伟力,胡丹云,等. 分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术,2007,33(1):36-40.

[5] Doyle M, Fuller T T, Newman J. Modeling of galvanostatic charge and discharge of the lithium/polymer/insertion cell[J]. Electrochem. Soc. 1993,140(6):1526-1533.

[6] Song L, Evans J W. Electrochemical-thermal model of lithium polymer batteries[J]. Electrochem. Soc. 2000,147(6):2086-2095.

[7] 李少林,姚国兴. 一种风光互补发电系统中双向DC/DC变换器研究[J]. 电气传动,2010,40(3):60-62.

[8] 郑健超. 电力技术发展趋势浅议[J]. 电网技术,1997,21(11):4-10.

[9] 胡广侠. 锂离子电池充放电过程的研究[D]. 上海:中国科学院上海微系统与信息技术研究所,2002.

[10] 陈清泉,孙迎春,祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002.

[11] Plett Gregory L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs-Part 2: Modeling and identification[J]. Journal of Power Sources, 2004, 134(2):262-276.

[12] CHOI B, CHO B H, HONG S S. Dynamics and control of DC-DC converters driving other converters downstream[J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems :Fundamental Theory and Applications, 1999,46(10):1240-1248.