

微网内储能单元的建模及协调控制

张濛姣¹, 付蓉¹, 姚建国²

(1.南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210023;

2.中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 通过仿真建模的方式研究电池类储能单元与电网负荷交互的特性以及储能单元对实现微电网电量自平衡的重要作用。根据锂离子电池特性, 从电化学角度分析建立等效电路模型, 通过对实际 3.4 V/3 Ah 锂离子电池充放电曲线的分析计算来确定电池模型参数, 模型仿真曲线与实际充放电曲线拟合程度高。进一步构建储能单元模型, 模拟仿真微电网中负载发生突变的情况, 可以观察到储能单元对于微电网能量自平衡的贡献。

关键词: 锂电池; 双向 DC/DC 变换器; 微电网; 储能单元; 直流母线信号法; 分布式电源

中图分类号: TM771

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)20-0073-04

Control coordination and modeling of an energy storage unit model in the power grid

Zhang Mengjiao¹, Fu Rong¹, Yao Jianguo²

(1.College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2.China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: This paper specifically investigates the characteristics between the battery type energy storage unit and the power load interaction by using the way of modeling and simulation. According to the characteristics of lithium-ion phosphate battery, the equivalent circuit model of the battery can be established above the serious analysis of the electrochemical property. After that, the determination of the parameters in the battery model can be ensured through the analysis and calculation of the actual 3.4 V/3 Ah battery charging and discharging curves. A comparison of simulation and hardware testing results including the charging and discharging curves shows a high degree of accuracy with the selected battery model. Then make the model of the energy storage unit. The system model simulates the situation of the load mutation in the islanded power network of the power grid. The final result can definitely prove the significant function of the energy storage unit in the power grid to keep the energy balance.

Key words: lithium-ion battery; bi-directional DC-DC converter; micro-grid; energy storage unit; DC bus signal method; distributed power

随着计算机技术、电力电子技术及社会经济的发展, 分布式发电作为解决集中发电及远距离输电的传统电力系统所带来的经济及环境等方法之一, 越来越受到重视, 其在电力能源中所占比例也越来越大。世界上很多能源电力专家认为大电网与分布式发电相结合是节省投资、降低能耗、提高系统安全性和灵活性的主要方法, 是电力工业的发展方向。综合利用风力发电、太阳能发电、微型燃气轮机发电等各种可再生能源发电的微电网应运而生^[1-2]。

储能设备包括超级电容器、铅酸蓄电池等, 随着锂

离子电池技术的发展, 锂电池寿命长、环境适应性强、环境污染小等特点使其成为更适合微电网的储能设备^[3-7]。

由储能设备和 DC/DC 变换器组成的储能单元是微电网的重要组成部分, 其作用有提供短时供电、用于能量缓冲、改善电能质量、优化微型电源运行以及提高微电网的经济效益等。参考文献[8-9]描述了通过 DC/DC 变换器将直流储能元件与微电源并接在直流母线侧, 并通过对其的控制来实现分布式电源及储能元件与电网的能量变换和控制, 但因为给每个分布式电源都配上储能元件和 DC/DC 变换器会增加系统的复杂性, 因此很难控制。

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 77

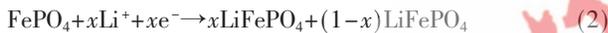
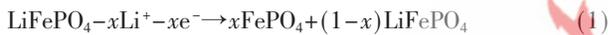
技术与方法 Technique and Method

针对微电网中分布式电源与储能单元的协调控制问题及合理分配功率的问题,不少专家都有了一些研究成果^[10-12]。参考文献[10]通过对光伏-蓄电池混合发电系统进行建模与仿真研究,实现系统电能质量的提高以及平滑的功率输出,但其选择的 Shephred 模型并不能很好地仿真蓄电池的充放电特性。参考文献[11-12]分析了超级电容器储能系统对提高风力发电机组的电能质量和稳定性的有效作用并进行了仿真。

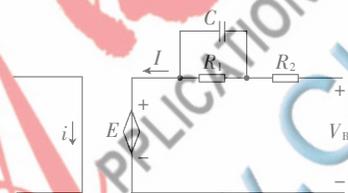
基于以上情况,本文使用 PSCAD 软件实现了储能单元的仿真及控制,提出了基于 Shepherd 模型、Unnewehr 通用模型及 Nernst 模型的混合模型来仿真锂离子电池的充放电工作。通过仿真模拟了储能单元在微电网系统中的工作情况。

1 磷酸铁锂电池及其等效电路模型

磷酸铁锂电池是由磷酸铁锂作为正极材料的锂离子电池,其工作电压范围为 2.0 V~3.8 V,平均电压约为 3.6 V,是目前较好的大电流输出动力电池之一。其充放电过程可以表示为如下化学反应式:



为了仿真模拟锂离子电池的充放电行为,需要建立一个能够较好体现电池动静态特性、模型阶数不高、易于工程实现的等效电路模型。常用的等效电路模型有 PNGV 模型、Thevenin 模型等,它们都是基于电池外部特性而建立的。本文从电化学角度考虑,根据电池在充放电过程中的电极固体物浓度、电解液浓度的变化与开路电压的关系,用受控电压源建立电池等效电路模型,设计如图 1 所示的磷酸铁锂电池单体等效模型来对锂离子电池充放电的外特性进行模拟。其中输入信号为电流 i , 放电时方向为正,充电时方向为负。图 1 磷酸铁锂电池单体等效模型。E 为受控电压源, R_1 为极化电阻, C 为极化电容, R_2 为电池内部等效电阻, V_B 为电池的输出电压。



2 锂电池模型参数的辨识

设计等效电池模型最重要的就是获得电池电压与电池充放电状态 SOC 之间的等效关系。充放电状态 SOC 从能量角度定义是指在某一时刻电流下,电池实际存储的电量与电池总容量之比;从电化学角度来讲,电池的 SOC 与电极固体物质的相对浓度有关。充放电状态 SOC 的定义如式(3)所示:

$$\text{SOC}(t) = \frac{Q - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \times 100\% \quad (3)$$

其中, Q 为观测时电池的等效剩余电荷量; Q_{\min} 为电池放电至终止电压时所对应的最小剩余电荷量; Q_{\max} 为电池的最大电荷量。

通过锂离子电池的技术规格及其放电曲线可以得

到电池模型中各个参数的计算方法,从而确定模型的参数,证明模型各个参数具有可辨识性。

电池的观测方程应当能够确切地描述 SOC、电流、内阻等因素的相互关系。在此处,观测方程就是要描述负载电压与上述各因素之间的数学关系,为 SOC 的精确估计提供观测支持。式(4)所示的混合电池模型可以更好地描述电池的电特性。

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - \int idt} + A \exp(-B \int idt) \quad (4)$$

同时,已有模型参数计算公式可以推导得到模型中各个参数的计算方法,如式(5)~式(7)所示。

$$A = E_{\text{Full}} - E_{\text{Exp}} \quad (5)$$

$$B = \frac{3}{Q_{\text{Exp}}} \quad (6)$$

$$K = \frac{(E_{\text{Full}} - E_{\text{Nom}} + A \exp(-B \times Q_{\text{Nom}} - 1)) \times (Q - Q_{\text{Nom}})}{Q_{\text{Nom}}} \quad (7)$$

其中, E_0 为空载电压; E 为电池当前电压; K 是极化电压; Q 是电池容量; $\int idt$ 是实际电池放电量; V_B 为电池电压; A 为指数区振幅; B 为指数区时间常数的逆; R_1 、 R_2 为电池内阻; I 为电池电流。

3 锂电池模型辨识算例

根据厂商提供的锂离子电池相关技术参数(如表 1 所示)设计等效电池模型。

为了验证锂离子电池模型的正确性和有效性,选取与模型相对应的锂离子电池的相关数据进行对比。模拟得到电池从满载状态开始,放电 1 s 时间内,电池电压与能量的相互关系

表 1 锂离子电池参数表

参数名称	计算值
电池容量 Q/Ah	200
空载电压 E_0/V	3.4
电池内阻 R_1/Ω	0.000 4
电池内阻 R_2/Ω	0.000 23
电池电容 $C/\mu\text{F}$	2 000
极化电压 K/V	0.07

曲线,并且与厂商提供的放电曲线进行对比验证,其结果如图 2 所示。由图可见,模型的放电曲线与实际电池的放电曲线基本重合,误差控制在很小的范围内。可见该简化模型能够准确地反映锂离子电池的外部特性。同时观察可知,在放电能量处于较低值(能量 < 100 Wh)和较高值(能量 > 300 Wh)的部分拟合程度较好,二者的中

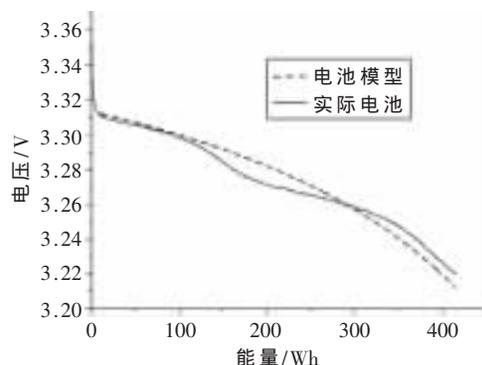


图 2 电池放电模型与实际电池放电曲线对比图

技术与方法 Technique and Method

间部分有一定误差。

因为考虑到实际情况下,电池的容量不可能降低到0,所以设置0.01作为电池空载充电的起始容量。设置充电电流为厂家提供的18A,单体电池空载充电仿真结果如图3所示。

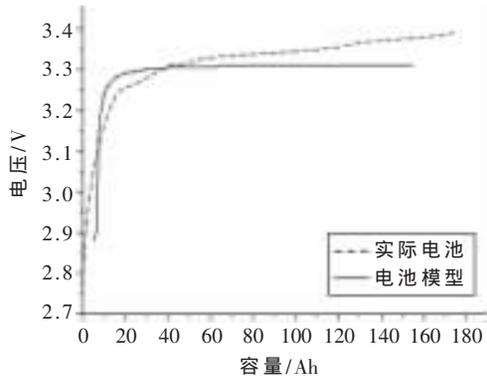


图3 电池充电模型与实际电池充电曲线对比图

由图3可知,在电池中低容量段(容量<100Ah),仿真模型的充电曲线与实际电池充电曲线拟合度好,在高容量段(容量>140Ah)存在一定偏差。整体仿真曲线与实际电池曲线拟合度高,证明电池充电模型能较好地仿真实际电池的充电情况。

4 储能设备控制模块

在微电网系统中储能元件需要实现能量的双向流动。当可再生能源输出能力高于负载要求时,多余的能量要存储在储能元件中;当可再生能源输出能力不满足负载要求时,储能元件释放能量维持负载正常工作。而这些储能元件都需要能量双向流动的双向DC/DC变换器来控制。

双向DC/DC变换器控制的系统结构图如图4所示,图中包括两个全控器件 V_1 、 V_2 和两个续流二极管 VD_1 、 VD_2 。当 V_1 开通、 V_2 关断时,双向DC/DC变换器工作可以等效成降压斩波电路;当 V_2 开通、 V_1 关断时,双向DC/DC变换器工作可以等效成升压斩波电路。为了实现电池的充放电控制,就要合理设置全控器件 V_1 、 V_2 的开通时间及两者的导通关系。

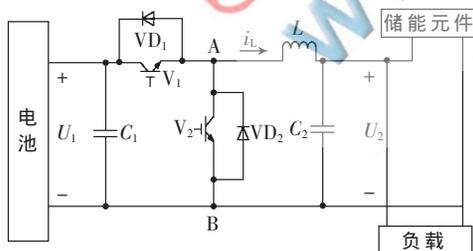


图4 双向DC/DC变换器控制系统结构图

根据锂离子电池能量管理的控制目标,采用PI环节作为双向DC/DC变换器的闭环控制策略,可以有效实现锂离子电池组的控制。图4体现了微电网孤网运行时,分布式电源、锂离子电池组与负载之间的能量流动关系。

储能单元与分布式电源协调供电是通过双向DC/DC变换器来实现的。将电池组充放电给定电流与输出负载电流的差作为控制量,经过PI调解器形成一个电流调制信号。再利用电流调制信号与固定频率的锯齿波信号的交点形成脉冲信号。当负载大小发生突变时,PI调节器的输出也随之发生变化。于是调制信号与锯齿波的交点也发生了改变,从而改变脉冲宽度,达到功率闭环控制的作用。同时实现当负载需求大于分布式电源供电时,控制电池放电;当负载需求小于分布式电源供电时,控制电池充电的协调供电方式。

5 系统仿真算例

用等效电压源来模拟光伏电池及其他直流输出型的分布式电源;将电池组模型及双向DC/DC变换器作为储能单元。将储能单元和分布式电源并联在直流母线处,直流母线连接直流负载。直流负载侧通过设置一个开关选项用来模拟在系统运作一定时间后,负载大小发生突变时,储能单元的工作状况。

本次算例系统设计在直流负载侧并联两个 10Ω 电阻,在系统运行2s后,断开其中一个电阻与系统的连接。分析可知,电池组初始应处于放电阶段,在2s断开一个电阻后,负载侧电压不变,电流会发生突变,通过控制系统的控制会使得电池放电,电压、电流及充放电状态SOC发生突变来满足负载的需求(如图5、图6所示),

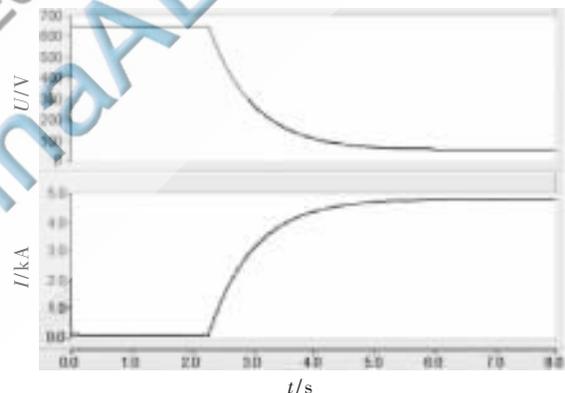


图5 电池电压、电流图

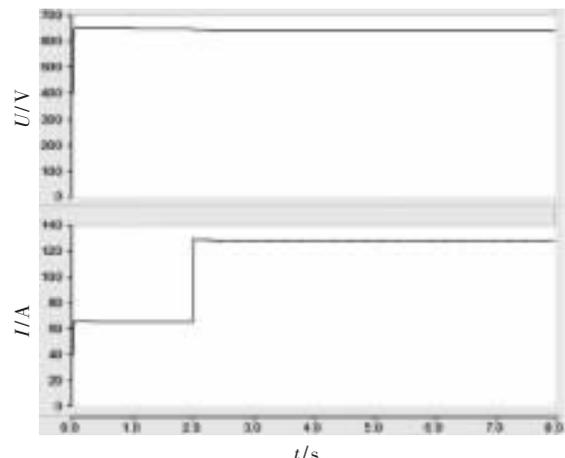


图6 负载电压、电流图

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 79

技术与方法 Technique and Method

最终系统会重新回到平衡状态。

本文采用简化等效模型的思路进行锂离子电池建模,与厂家提供的数据能够有效拟合。同时观察可得,在充电仿真实验中,中低容量段拟合度较好,高容量段拟合度略有偏差;在放电实验中,中段拟合度好,低能量段和高能量段略有偏差。

同时,双向DC/DC变换器采用直流电压作为电池充放电控制判定参数,采用PI控制使电池充放电电流实时跟踪电池管理系统(BMS)的电池电流值。仿真实现了微电网在孤网运行情况下,光伏电池等直流输出型分布式电源与锂离子电池配合对负载提供能量的情况。微电网系统采用直流母线信号控制的方法,实现了能源高效合理的分配及优化管理。

参考文献

- [1] 张建华,黄伟.微电网运行控制与保护技术[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [2] LASSETER R H. Microgrids[C]. Proceedings of 2002 IEEE PES Winter Meeting, New York, 2002: 305-308.
- [3] 侯幽明,陈其工,江明.磷酸铁锂电池模型参数辨识与SOC估算[J].安徽工程大学学报,2011,26(2):55-58.
- [4] 汪涵,郑燕萍,蒋元广,等.实用型磷酸铁锂电池SOC高精度算法研究[J].电源技术与设计,2011,35(10):1198-1207.
- [5] 周苏,胡哲,陈凤祥,等.基于析气现象的锂电池系统建模[J].电源技术与设计,2010,34(2):134-138.
- [6] 全猛,邵静玥,卢兰光,等.基于二阶段放电试验的磷酸

铁锂电池的Peukert模型[J].清华大学学报,2010,50(2):295-298.

- [7] OLIVIER T, LOUIS A. Dessaint, Abdel-Ilah Dekkiche[C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007: 284-289.
- [8] NIKKHAJOEI H, LASSETER R H. Distributed generation interface to the CERTS microgrid[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2009, 24(3): 1598-1608.
- [9] 金一丁,宋强,刘文华.电池储能系统的非线性控制器[J].电力系统自动化,2009,33(7):75-80.
- [10] 董旭柱,雷金勇,饶宏,等.含蓄电池储能的光伏并网发电系统的建模与仿真[A].第十三届中国科协年会第15分会场-大规模储能技术的发展与应用研讨会论文集[C].天津:2011.
- [11] 纪明伟,陈杰,栾庆磊.基于电流分解的微网功率控制策略研究[J].安徽建筑工业学院学报,2009,17(5):110-113.
- [12] 王立乔,孙孝峰.分布式发电系统中的光伏发电系统[M].北京:机械工业出版社,2010.

(收稿日期:2013-06-20)

作者简介:

张濛姣,女,1990年生,硕士研究生,主要研究方向:分布式发电,微电网的运行与控制。

付蓉,女,1974年生,博士,副教授,主要研究方向:市场环境下的电力系统规划。

姚建国,男,1963年生,研究员,高级工程师,主要研究方向:智能电网技术,电网调度运行研究。