

锂离子液流电池监控系统的初步研究与设计

李爱晶^{1,2}, 陈永翀^{1,2}, 张晓虎^{1,3}, 刘丹丹¹, 谢晨^{1,3}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 北京好风光储能技术有限公司, 北京 100085)

摘要: 锂离子液流电池是一种新型储能电池, 具有绿色环保、功率密度和能量密度高、输出功率和储能容量彼此独立等优点, 在规模储能中具有应用潜力。本文分析了锂离子液流电池的系统结构及特点, 对电池监控系统的硬件和软件进行了初步研究与设计, 包括电池模块的检测和驱动系统的检测。同时, 本文还对锂离子液流电池间歇式驱动模式进行了分析, 发现通过合理设置驱动时间可以减小系统机械损耗, 从而保证锂离子液流电池的高效稳定运行。

关键词: 锂离子液流电池; 监控系统; 参数监测; 间歇式控制

DOI: 10. 12067/ATEEEI610034 **文章编号:** 1003-3076(2018)02-0083-06 **中图分类号:** TM912

1 引言

太阳能、风能等可再生能源接入电网将对电力系统的电压稳定性、可靠性和电能质量产生影响^[1-3]。储能可有效解决可再生能源并网问题, 它不仅能够提高常规发电、输电的效率, 也是实现可再生能源平滑波动、调峰调频、满足可再生能源大规模接入电网的重要手段, 同时也是分布式电源、智能电网系统的重要组成部分, 在能源互联网中具有举足轻重的地位^[4,5]。

电池储能是一种成熟可靠的储能技术, 在储能设备中具有广泛的应用, 锂离子液流电池是最近发展的新型储能电池技术, 分别由中国科学院电工研究所和美国麻省理工学院独立提出, 并最早开展相关研究工作^[6,7]。锂离子液流电池结合了锂离子电池和液流电池的特点, 具有绿色环保、功率密度和能量密度高、输出功率和储能容量彼此独立等优点, 在大规模储能中具有应用潜力。锂离子液流电池应用于储能需要由众多单体电池串并联组成电池系统, 为确保电池系统的使用寿命和运行安全, 需配备电池监控系统, 对电池系统进行实时参数检测和系统控制。相对于传统的全钒液流电池, 锂离子液流电池电极悬浮液的黏度比较大, 同时具有电子和离子

混和导电特性, 因此拟采用间歇式的驱动工作模式。电池监控系统设计的重点和难点在于如何在间歇工作模式下有效地驱动电极悬浮液, 以减少机械损耗, 提高电池工作效率。

本文对锂离子液流电池监控系统的硬件和软件部分进行初步设计, 包括电池模块的检测和驱动系统的检测, 同时对间歇时间和驱动时间控制进行初步的模拟计算分析。

2 锂离子液流电池系统结构和特点

2.1 锂离子液流电池系统结构

锂离子液流电池的电极悬浮液在驱动装置的作用下流经电池反应器在微孔隔膜两侧发生氧化还原反应, 从而实现化学能和电能的转换。锂离子液流电池系统的结构如图 1 所示, 主要由电池模块、驱动系统和控制系统组成。

电池模块由电池反应器、正极储液装置和负极储液装置组成。电池反应器由正极反应腔、负极反应腔和微孔隔膜组成, 是氧化还原反应的场所, 是锂离子液流电池的核心。锂离子液流电池工作时, 正负极悬浮液在动力装置的驱动下由储液装置流出, 流经密封管道到达电池反应器, 在微孔隔膜两侧发生氧化还原反应^[8]。驱动系统采用气压驱动方式

收稿日期: 2016-10-18
基金项目: 国家自然科学基金项目(51477170)、北京市科技计划项目(Z161100000416001)
作者简介: 李爱晶(1990-), 女, 山东籍, 硕士研究生, 研究方向为储能电池管理系统;
陈永翀(1975-), 男, 江西籍, 副研究员, 博士, 研究方向为储能电池与动力电池技术。

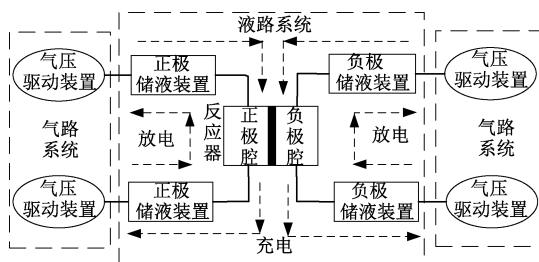


图1 锂离子电池液流电池气压系统

Fig. 1 Pressure system of lithium-ion flow battery

使电极悬浮液在储液装置和电池反应器之间循环流动。控制系统通过控制各个阀的开启、关闭顺序以及开启时间来实现正极反应腔和负极反应腔的有序换液,同时由于正负极悬浮液的粘度、流动速度以及流动阻力不同,需要由气动控制阀来控制各个气体流入支路中气体的压力和流量,实现换液的同步性,确保锂离子液流电池系统的正常稳定运行。

2.2 锂离子液流电池系统的特点

(1) 锂离子液流电池的电极悬浮液粘稠度较大,若采用传统液流电池连续的驱动方式将导致驱动系统的能耗过大,所以锂离子液流电池采用间歇式的驱动控制方式。麻省理工学院的研究也验证了间歇式驱动控制的优势。以钴酸锂为正极,石墨为负极,在连续驱动模式和间歇式流动模式下的充放电容量相差不大,但是两种模式下的机械损耗分别为22%和1%^[8,9],由此可见间歇式驱动方式有助于降低锂离子液流电池的能耗。

(2) 锂离子液流电池正(负)极悬浮液是由正(负)极活性材料颗粒、导电剂和电解液组成的混合物,若采用传统液流电池的液泵驱动方式,将会由于电极悬浮液中颗粒产生摩擦进而造成漏液、液泵循环寿命降低、能耗增大等问题,所以作者所在课题组提出气压驱动系统设计方案,利用压缩干燥惰性气体驱动电极悬浮液在电池反应器和储液装置间循环流动,效果较好^[10]。

(3) 电极悬浮液为非水系有机电解液,具有电子导电性,将导致漏电发生。所以对单体电池的串并联系统具有较高的要求,作者所在课题组提出一种新的液流电池系统,采用合理的电流连接方案、相对独立的供液体系以及相应的操作运行策略,有效解决电池漏电问题,提高了锂离子液流电池的安全性^[11]。

(4) 锂离子液流电池具有传统液流电池输出功率和储能容量彼此独立的优势,能量存储于电极悬

浮液中,通过增加电极悬浮液的体积或提高电极悬浮液中颗粒的含量可增加电池的容量,同时可通过增加电极面积和单体电池串并联的数量增加电池的输出功率。这使得锂离子液流电池应用于大规模储能具有一定的潜力。

(5) 能量密度和能量效率高。Yet-Ming Chiang等估计锂离子液流电池系统的能量密度可达到300~500(W·h)/L(130~250(W·h)/kg),能量效率在85%~90%左右^[8,9]。综合考虑电极悬浮液的流动性要求以及其他辅助设施,本课题组估计锂离子液流电池系统合适的能量密度在50~130(W·h)/kg之间,是全钒液流电池系统能量密度的3~5倍。

3 锂离子液流电池监控系统的设计

锂离子液流电池监控系统主要包括两部分:监测系统和控制系统。

3.1 监测系统

对于锂离子液流电池监测系统,需要检测的参数有电池模块参数和循环系统参数。电池模块参数包括单体电压、总电压、电流以及温度,循环系统参数包括液路循环系统的电极悬浮液流量、压力和温度以及气路循环系统的气体流量和压力。

锂离子液流电池参数的检测是实现系统控制的基础,准确及全面的检测对于系统的安全稳定高效运行具有重要意义。

3.1.1 硬件设计

根据电池监控平台监测信号的种类、数量、特点以及系统要求^[12,13],设计以中央处理器、各类传感器、信号处理单元以及电源模块为核心的外围硬件电路,以满足储能系统的要求。

锂离子液流电池监控系统的硬件设计主要包括CPU、数据采集模块、通信模块和控制模块。CPU是系统的核心,数据采集模块采集的数据通过通信模块传输到CPU进行处理,运行控制单元则根据测量的各类参数进行控制。图2为锂离子液流电池监测系统硬件设计图。

在选择测试器件时,要充分考虑锂离子液流电池的特点和工作环境,要求传感器具有抗腐蚀性和高的可靠性。

3.1.2 软件设计

锂离子液流电池监测系统的软件设计采用Labview来实现。图3为锂离子液流电池监测系统软件设计图。

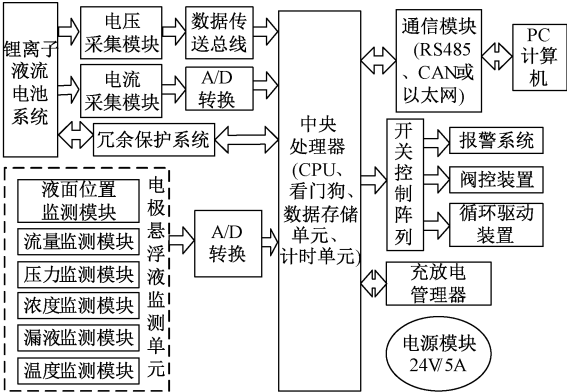


图2 锂离子液流电池监测系统硬件设计

Fig.2 Hardware design of monitoring system of lithium-ion flow battery

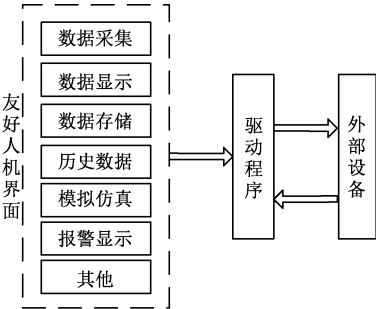


图3 锂离子液流电池监测系统软件设计

Fig.3 Software design of monitoring system of lithium-ion flow battery

监测程序的主要流程为:对参数进行设置,包括采集模式、通道数以及文件的保存路径等,然后启动采集系统开始实时参数的采集,电堆充放电过程中的电信号和温度、压力、液位以及流量信号通过数据采集模块、信号变送模块,在监测窗口中实时显示,同时设定参数的安全范围,若超出此范围发出报警提示。根据采集到的数据估算电池的实时荷电状态(SOC)变化,同时实现数据的存储。锂离子液流电池监测系统软件各模块功能如表1所示。

图4为基于Labview的锂离子液流电池运行监测系统的界面,通过运行监测数据显示,实现基本的数据检测功能。

3.2 间歇式驱动控制

由于锂离子液流电池电极悬浮液的粘度比较大(约为600~1000cP),所以该电池系统采用间歇式驱动控制方式。图5为间歇式驱动模式下的充电电压-时间和容量-时间关系示意曲线。0~t₁、t₂~t₃为间歇时间,t₁~t₂为驱动时间。

表1 锂离子液流电池监测系统软件各模块功能

Tab.1 Function of each software module of monitoring system for lithium-ion flow battery

模块	功能
界面显示模块	通过波形图表和数据报表的形式显示电池运行过程中电压、电流、温度、流量、压力和液位等参数的变化过程
通信模块	通过USB实现软件和硬件的通信,实现数据的发送和接收功能,与电池检测系统、控制系统以及故障诊断系统实现完整的数据通信
数据存储模块	将采集的数据以文本和电子表格的形式进行存储
控制模块	当出现故障或需进行系统参数调整时,给下位机控制器发送控制命令,实现启动参数测量、动力循环系统的开关、控制报警器等

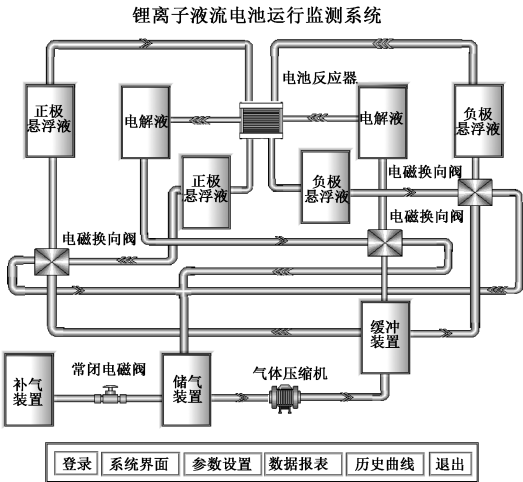


图4 锂离子液流电池运行监测系统界面

Fig.4 Operation monitoring system of lithium-ion flow battery

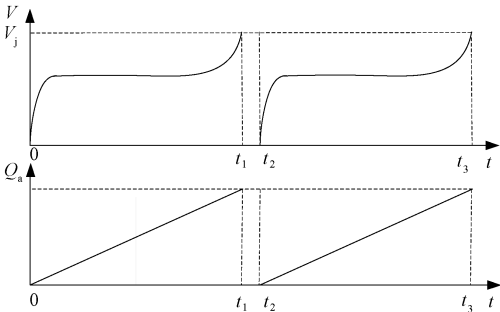


图5 电极悬浮液间歇式驱动方式

Fig.5 Intermittent flow cycle protocol of suspension

3.2.1 间歇时间

电极悬浮液在电池反应器中停留合适的时间使

正负极活性材料颗粒发生完全反应,然后启动驱动系统将反应完的正负极悬浮液导出反应器,导入未反应的电极悬浮液进行充放电。所以对于锂离子液流电池来说间歇时间的控制是一个重要的参数。时间 t_1 设置得过小时,将使得活性物质未能完全反应便离开电极表面,造成能量的浪费,降低了电池的整体效率^[14];时间 t_1 设置得过大时,将使电池发生过充或过放,对电池造成损伤,并发生危险。所以通过控制每次流入电池反应腔的悬浮液体积和悬浮液流入、流出的时间,可以有效提高电池的能量效率。

根据电极悬浮液和电池反应器的参数计算静态电池的理论容量,根据充放电的电流计算反应所需的时间,如式(1)和式(2)所示:

$$Q_c = It_1$$

(1)

$$Q_c = V\rho P\% Q_0$$

(2)

式中, Q_c 为电池容量; I 为充放电电流; t_1 为间歇时间; V 为电池反应腔的体积; ρ 为电极悬浮液的密度; $P\%$ 为电极悬浮液中活性物质体积百分比; Q_0 为电极材料的比容量。

由式(1)和式(2)可以得到电池反应的时间即间歇时间 t_1 为:

$$t_1 = \frac{V\rho P\% Q_0}{I}$$

(3)

若需要在电池某一荷电状态下进行控制,则需要在此基础上乘以 SOC :

$$t_1 = \frac{V\rho P\% Q_0}{I}SOC$$

(4)

3.2.2 驱动时间

在电池反应器内的电极悬浮液反应后,启动驱动系统,将未参加反应的电极悬浮液推入电池反应器取代已经参加完反应的电极悬浮液,只有合理控制驱动系统的驱动时间 t 才能使未参加反应的电极悬浮液完全取代已参加完反应的电极悬浮液,保证锂离子液流电池的整体效率达到最佳状态。

锂离子液流电池在驱动过程中将产生附加能量损耗,损耗与电池系统参数、电极悬浮液流量以及驱动时间有关,由流体动力学的知识,驱动损耗 P_{mesh} 与流量的关系为^[15]:

$$P_{mesh} = \Delta p Q$$

(5)

式中, Δp 为电极悬浮液流动压降; Q 为电极悬浮液流量。

由 Darcy-Weisbach 公式计算电池运行中的管路沿程损失 Δp_1 和局部损失 Δp_2 ,分别为:

$$\Delta p_1 = \frac{1}{2}\lambda \frac{L_1}{D_1}\rho v^2$$

(6)

$$\Delta p_2 = \frac{1}{2}k\rho v^2$$

(7)

式中, λ 为摩擦系数; L_1 为管路长度; D_1 为管路水力直径; k 为局部损失系数; v 为电极悬浮液在管道中的流速。

当雷诺系数 $Re \leq 2000$ 时,管内流动为层流,此时有:

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

(8)

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu}$$

(9)

式中, μ 为电极悬浮液的动力黏度系数。

流量与电池反应腔体积的关系为:

$$Q = \frac{nV}{t}$$

(10)

式中, n 为单体电池个数。

计及管路与电堆的损失,由式(5)~式(10),可以得到电池在运行中的驱动损耗与驱动时间的函数为:

$$P_{mesh} = \frac{\rho k V^3}{2 S_1^2 t^3} + \frac{32 \mu L_1 V^2}{S_1 D_1^2 t^2} + \frac{32 \mu L_2 V^2}{S_2 D_2^2 t^2}$$

(11)

式中, S_1 为管路的截面积; L_2 为电极的长度; S_2 为电极悬浮液流入电堆时对应的截面积; D_2 为电极的等效水力直径。

设定锂离子液流电池系统参数,如表2所示。

表 2 锂离子液流电池系统参数

Tab. 2 System parameters of lithium-ion flow battery

参数	数值
电极悬浮液密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1400
电极悬浮液比容量 $Q_0 / (\text{mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1})$	50
电极悬浮液黏度 μ / cP	1000
反应器尺寸 $(L_2 \times W \times H) / \text{cm}^3$	$50 \times 40 \times 1$
管路直径 D_1 / cm	4
管路长度 L_1 / m	6
局部损耗系数 k	1.5

电极的等效水力直径 $D_2 = 3.48 \text{cm}$,单体电池个数 $n = 10$ 。根据电池系统参数以及式(2)计算电池容量为 $1400 \text{A} \cdot \text{h}$,设定电池 0.2C 倍率电流充电,则充电电流 I 为 280A ,电堆功率 P_{stack} 为:

$$P_{stack} = UI = 3.7 \text{V} \times 280 \text{A} = 1036 \text{W}$$

(12)

式中, U 为电池电压。

根据电池系统参数计算驱动损耗:

$$P_{\text{mesh}} = \frac{425.5}{t^3} + \frac{7639.8}{t^2} + \frac{529.7}{t^2} \quad (13)$$

损耗功率比 η 为:

$$\eta = \frac{P_{\text{mesh}}}{P_{\text{stack}} + P_{\text{mesh}}} \times 100\% \quad (14)$$

损耗功率比与驱动时间的关系曲线如图 6 所示。

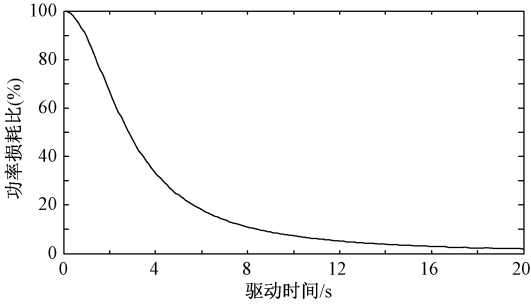


图 6 特定参数下损耗功率比与驱动时间的关系

Fig. 6 Relationship between percentage of driving loss and driving time under certain parameters

当快速驱动电极悬浮液时损耗将比较大, 当时间趋于 0 时的极限情况相当于电池工作在连续模式下, 这也在一定程度上说明了间歇式驱动有助于减小电池系统的损耗。缓慢驱动电极悬浮液有助于减小驱动过程中的驱动损耗, 但是由于电极悬浮液具有电子导电性, 驱动时间过长将使电池发生自放电, 所以驱动时间需控制在一定范围, 不宜过长; 如图 6 所示, 当时间为 10s 时对应的功率损耗百分比约为 8%, 此后百分比减小趋势变缓慢, 延缓驱动时间对于电池驱动功率的减小效果不明显, 只会增加电池的自放电损耗, 所以在此模拟条件下可认为 10s 为较优驱动时间。

锂离子液流电池监控系统需采集精确的电压、电流参数, 根据间歇时间 t_1 和驱动时间 t 来实现电池系统的间歇式驱动控制。

模拟计算针对的是千瓦级的电池模块, 对于千瓦级锂离子液流电池系统的设计和示范具有指导意义。同时千瓦级电池模块可作为规模化电池系统的基本单元模块, 相应的机械损耗可根据式(11)进行扩展。

4 结论

本文对锂离子液流电池监控系统的硬件部分和软件部分进行了初步设计, 包括监控系统的组成、监控流程等, 较为全面地涉及到电池模块、液路循环系

统以及气路循环系统的检测。重点对间歇式驱动控制模式进行了分析, 通过对机械损耗与驱动时间关系的初步模拟分析可知, 缓慢驱动电极悬浮液有助于减小驱动损耗, 但是考虑到电池的自放电, 运行中应根据电池系统参数和充放电情况确定合理的驱动时间以使电池取得较优的性能。模拟计算结果表明, 为 10s 时可认为是较优的驱动时间。锂离子液流电池监控系统的初步研究为锂离子液流电池管理系统的完整开发和实现提供了基础, 对千瓦级以及更大规模电池系统的设计和示范具有指导意义。

锂离子液流电池系统的研究尚处于起步阶段, 在未来储能系统应用中, 对于锂离子液流电池监控系统还需进一步的优化, 在研究中需要考虑以下几个问题: ①应用可靠的控制技术对电池进行有效精确全面的管理, 提高系统的可靠性和稳定性; ②研究锂离子液流电池系统接入电网的方法, 实现锂离子液流电池系统的大规模应用。

参考文献 (References):

- [1] 肖立业, 林良真 (Xiao Liye, Lin Liangzhen). 未来电网初探 (Investigations on future power grid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2011, 30 (1): 56-63.
- [2] 李建林, 马会萌, 惠东 (Li Jianlin, Ma Huimeng, Hui Dong). 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势 (Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (14): 1-10.
- [3] 刘世林, 文劲宇, 孙海顺, 等 (Liu Shilin, Wen Jinyu, Sun Haishun, et al.). 风电并网中的储能技术研究进展 (Progress on applications of energy storage technology in wind power integrated to the grid) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2013, 41 (23): 145-153.
- [4] Dunn B, Kamath H, Tarascon J M. Electrical energy storage for the grid: A battery of choices [J]. Science, 2011, 334 (6058): 928-935.
- [5] 陈永翀, 李爱晶, 刘丹丹, 等 (Chen Yongchong, Li Aijing, Liu Dandan, et al.). 储能技术在能源互联网系统中应用与发展展望 (Application and development of energy storage in energy internet system) [J]. 电器与能效管理技术 (Electrical & Energy Management Technology), 2015, (24): 39-44.
- [6] Chiang Y M, Carter W C, Ho B, et al. High energy density redox flow device [P]. International Patent;

WO2009US03551, 2009-06-12.

- [7] 陈永翀, 王秋平, 张萍, 等 (Chen Yongchong, Wang Qiuping, Zhang Ping, et al.). 一种锂离子液流电池 (A lithium-ion flow battery) [P]. 中国专利 (Chinese Patent): 201110175924.1, 2011-06-28.
- [8] 陈永翀, 武明晓, 任雅琨, 等 (Chen Yongchong, Wu Mingxiao, Ren Yakun, et al.). 锂离子液流电池的研究进展 (Research progress in lithium ion flow battery) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2012, 31 (3): 81-85.
- [9] Duduta M, Ho B, Wood V C, et al. Semi-solid lithium rechargeable flow battery [J]. Advanced Energy Materials, 2011, 1 (4): 511-516.
- [10] Chen Yongchong, Fei Caimei, Zhang Yanping, et al. Pump-free lithium ion fluid flow battery, battery reactor and preparation method of electrode suspension solution [P]. International Patent: WO2013/166924A1, 2013-04-26.
- [11] 张晓虎, 陈永翀 (Zhang Xiaohu, Chen Yongchong). 一种锂离子液流电池系统 (A type of lithium-ion liquid flow battery system) [P]. 中国专利 (Chinese Patent): 201410265489.5, 2014-06-14.
- [12] 武斌, 陈峭岩, 刘斌, 等 (Wu Bin, Chen Qiaoyan, Liu Bin, et al.). 电池管理系统监测平台的设计 (Design of the battery management system monitoring platform) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2013, 50 (565): 112-116.
- [13] 漆阳华 (Qi Yanghua). 钒电池智能监控管理系统设计 (A design of intelligent monitor and manage system for vanadium batteries) [J]. 信息与电子工程 (Information and Electronic Engineering), 2010, 8 (5): 588-593.
- [14] 刘飞, 杜涛, 姜国义, 等 (Liu Fei, Du Tao, Jiang Guoyi, et al.). 基于能效优化的液流电池储能监控系统研制 (Development of monitoring and control system for flow battery energy storage based on energy efficiency optimization) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2015, 41 (7): 2245-2251.
- [15] 严敢, 吕玉祥, 马维青, 等 (Yan Gan, Lv Yuxiang, Ma Weiqing, et al.). 泵损对全钒液流电池性能和效率的影响分析 (Effects of pump losses on performance of vanadium redox battery) [J]. 电源技术 (Chinese Journal of Power Sources), 2015, 139 (12): 2647-2649.

Research and design of monitoring system for lithium-ion flow battery

LI Ai-jing^{1,2}, CHEN Yong-chong^{1,2}, ZHANG Xiao-hu^{1,3}, LIU Dan-dan¹, XIE Chen^{1,3}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Beijing HAWAGA Power Storage Technology Co. Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: Lithium-ion flow battery (LFB) is a new type of energy storage battery. It is environmentally friendly, and has the comprehensive advantages of high power density, high energy density, independently designed output power and energy storage capacity, etc., thus has a huge technological superiority in large-scale energy storage industry. In this paper, the system structure and characteristics of LFB were analyzed, and the hardware and software of the monitoring system were preliminarily investigated and designed, which includes the detection of both the battery module and the drive system. The intermittent driving mode of LFB was also investigated in the present work. It was found that the mechanical loss of the system can be decreased by reasonable setting of the driving time. This ensures the efficient and stable operation of lithium-ion battery.

Key words: lithium-ion flow battery (LFB); monitoring system; parameter detection; intermittent control