

DOI: 10.13208/j.electrochem.130417

Cite this: *J. Electrochem.* 2014, 20(2): 156-163

Artical ID:1006-3471(2014)02-0156-08

Http://electrochem.xmu.edu.cn

# 氧化还原电池组等效电路模型

尤东江<sup>1\*</sup>, 张华民<sup>2</sup>

((1. 中国船舶重工集团公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056027; 2. 中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023))

**摘要:** 本文综合考虑氧化还原二次电池内部的电化学反应和电池组漏电电流, 建立了氧化还原电池组的等效电路模型. 以 1 kW 额定输出功率的全钒液流储能电池组为例, 测试电池组暂态响应和自放电曲线, 确定了等效电路模型的重要参数, 比较模拟结果与实验结果, 计算电池组的内阻和自放电电流, 可知漏电电流造成的容量损失约占系统总容量损失的 60%左右.

**关键词:** 等效电路模型; 暂态响应; 漏电电流

**中图分类号:** O646.5

**文献标识码:** A

公用电解质溶液通道的双极堆式电化学装置, 如液流电池、氯碱电池、燃料电池等, 各单体电池之间的电解液通道形成离子短路, 电池之间产生电解液支路和公用电解液管路的漏电电流, 此电流不通过放电主回路<sup>[1]</sup>. 氧化还原二次电池漏电电流的研究大多依据 Kirchhoff 定律建立数学模型. Katz 等<sup>[2]</sup>将齐纳二极管引入漏电网, 模拟电解反应的阳极和阴极极化曲线, 简化了等效电路和计算复杂性, 但作为电化学反应体系的真实模型仍不足. Kanari<sup>[3]</sup>进一步简化了进出口漏电回路, 模型计算了千瓦级电堆的库仑效率与电压效率. Burney 等<sup>[4]</sup>计算了公用管路为电子良导体的双极堆式电池漏电电流, 该模型要求通过公用管路电解液的电势差足以让电流从溶液中转移至管路, 若电势差大于水的分解电压, 则在公用管路的两端分别析氢、析氧.

以往建立的模型大都忽略了由于电解液充放电状态的变化导致电池电压的改变, 且对引起电池组电流效率损失的其它原因予以简化, 计算结果与实验结果往往有误差. 本文综合考虑电池内部的电化学反应和电池组漏电电流, 建立了氧化还原电池组的等效电路模型. 以 1 kW 额定输出功率的全钒液流储能电池组为例, 通过该电池组暂态响应和自放电实验, 确定了等效电路模型的重要参数. 其结果给出了电池组充放电电压的模拟曲线, 电池组漏电电流与分布, 以及电池组各节电池电压和内部电

流. 模型还估计了电池组的容量损失, 并提出影响电池组电流效率的关键因素.

## 1 模型描述

### 1.1 电池组等效电路

图 1 给出由  $N$  节电池串联组成的电池组的等效电路图, 图中符号的物理意义如下:  $R_A$ 、 $R_C$  为阳极和阴极电解液分配支路离子阻抗;  $R_{MA}$ 、 $R_{MC}$  为阳极和阴极电解液公用管路离子阻抗;  $i$ 、 $j$  为阳极和阴极电解液分配支路漏电电流;  $I$ 、 $J$  为阳极和阴极电解液公用管路漏电电流;  $V_n$  为第  $n$  节 ( $1 \leq n \leq N$ ) 电池的电压;  $K_n$  为第  $n$  节 ( $1 \leq n \leq N$ ) 电池的内部电流.

除位于电池组两端的 2 节电池只有 2 个电流回路外, 电池组其它电池均有 4 个电流回路, 分别代表了阳极或者阴极在电解液入口或出口的漏电电流等效电路, 且阳极或阴极在电解液入口和出口的等效电路相互对称. 因此, 电池组的等效电路可以用  $2N-2$  个等效回路表示, 而该等效回路必须满足 Kirchhoff 定律:

$$R_A(i_{n-1}-i_n) + R_{MA}I_n - V_n = 0 \quad (1 \leq n \leq N-1) \quad (1)$$

$$R_C(j_n-1-j_{n-1}) + R_{MC}J_n - V_n = 0 \quad (2 \leq n \leq N) \quad (2)$$

阳极和阴极电解液分配支路漏电电流和公用管路漏电电流, 以及电池内部电流之间关系如下:

$$I_n = I_{n-1} + i_{n-1} \quad (3)$$

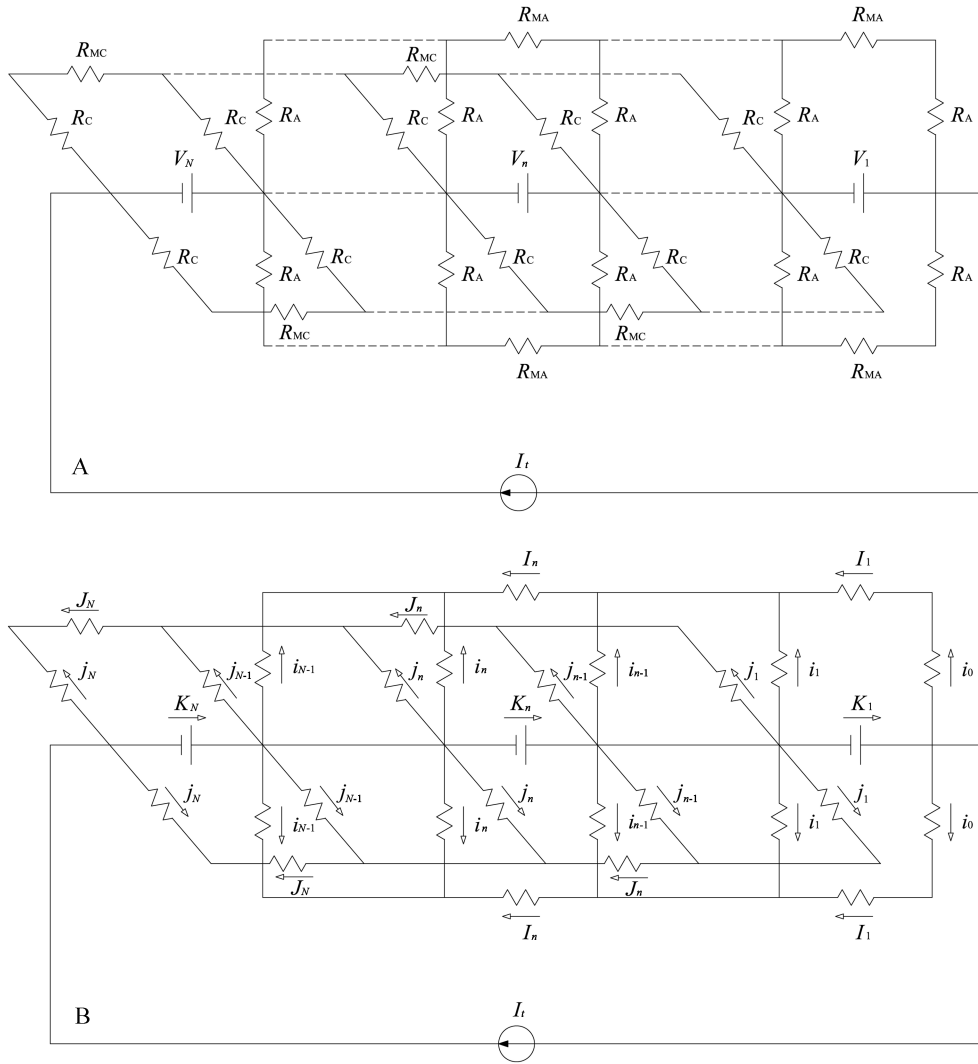


图1 电池组等效电路图 A. 等效电路元件图; B. 等效电流回路图

Fig. 1 An equivalent circuit of redox flow battery stack A. equivalent element; B. equivalent circuit

$$J_n = J_{n-1} + j_{n-1} \quad (4)$$

$$K_n = K_{n-1} + 2i_{n-1} + 2j_{n-1} \quad (5)$$

第1和第 $N$ 节电池的节点处(即电池组两端), 阳极和阴极电解液分配支路漏电电流和公用管路漏电电流, 以及电池内部电流之间存在着如下特殊关系:

$$i_0 = I_1, j_0 = J_1 = 0 \quad (6)$$

$$j_N = -J_N, i_N = I_N = 0 \quad (7)$$

$$K_1 = I_t + 2i_0 \quad (8)$$

阳极和阴极电解液分配支路离子阻抗和公用管路离子阻抗, 可以用下式<sup>[5]</sup>计算:

$$R_i = \rho \frac{l_i}{A_i} \quad (9)$$

式中,  $\rho$  为电解液的电阻率,  $l$  为电解液管路的长度,  $A$  为电解液管路的横截面积。

上述电池组等效电路模型没有给出单节电池电压的具体表达式, 故与文献<sup>[6]</sup>不同, 本文单节电池电压不当作常数处理, 而将其与电解液的充电状态和过电位相关联, 表达式如下:

$$V_n = V_{oc} + \eta_n \quad (10)$$

式中,  $V_{oc}$  为单节电池的开路电压, 其值与电解液的充电状态(SOC)有关:

$$V_{oc} = V_{cell}^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[SOC]^2}{[1-SOC]^2} \quad (11)$$

式中,  $V_{cell}^0$  为 50% SOC 时的标准电池电势, 据 Had-

dadi-Asl 的实验结果<sup>[7]</sup>,其值为 1.4 V(25 °C). 各节电池的过电位取决于电池的内阻  $r_m$  和流经电池的电流  $K_n$ ,即:

$$H_n = K_n r_m \quad (12)$$

此处假设各节电池的内阻相同. 故电池组各节电池的电压表达式:

$$V_n = 1.4 + K_n r_m + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{SOC}]^2}{[1-\text{SOC}]^2} \quad (13)$$

将式(13)代入式(1)、(2),解 2N-2 个线性方程组,就可分别得出各节电池的电压和内部电流,以及漏电电流在整个电池组内的分布. 仅将漏电电流引入,系统充放电容量损失  $Q_f$  就可按下式计算:

$$Q_f = \int_0^{t_c} \sum_{n=1}^N I_n^c(t) dt + \int_0^{t_d} \sum_{n=1}^N I_n^d(t) dt \quad (14)$$

式中,  $I_n^c$  和  $I_n^d$  分别为第  $n$  节电池充放电过程的总漏电电流,包括了阳极和阴极电解液分配支路和公用管路的漏电电流.

## 1.2 电池组的效率

电池组的电流效率(CE)定义为 1 个充放电周期内电池组的放电容量与充电容量之比,即:

$$\text{CE} = \frac{Q_d}{Q_c} = \frac{Q_c - Q_s}{Q_c} \quad (15)$$

式中,  $Q_c$  和  $Q_d$  分别为电池组的充电容量和放电容量,  $Q_s$  为充放电过程的容量损失. 充电容量  $Q_c$  可以用下式计算:

$$Q_c = Q_{\text{ideal}} (S_c - S_0) \quad (16)$$

式中,  $S_c$  和  $S_0$  分别代表充电伊始和充电结束时电解液的 SOC 值. 理论充电容量  $Q_{\text{ideal}}$  可以用下式计算:

$$Q_{\text{ideal}} = nFCV/N \quad (17)$$

上式中,  $n$  为反应电荷数,  $F$  为法拉第常数 (96.487 C·mol<sup>-1</sup>),  $C$  为钒离子的浓度 (mol·L<sup>-1</sup>),  $V$  为电解液的体积 (L),  $N$  为电池组的电池节数.

电池组的电压效率(VE)定义为一个充放电周期内电池组的放电电压对时间的积分平均值与充电电压对时间的积分平均值之比,如下式:

$$\text{VE} = \frac{\bar{V}_{\text{stack}}^d}{\bar{V}_{\text{stack}}^c} = \frac{\int_0^{t_d} \sum_{n=1}^N V_n^d dt}{\int_0^{t_c} \sum_{n=1}^N V_n^c dt} \quad (18)$$

式中  $\bar{V}_{\text{stack}}^c$  和  $\bar{V}_{\text{stack}}^d$  分别代表电池组的充电电压对时

间的积分平均值和放电电压对时间的积分平均值;  $V_n^c$  和  $V_n^d$  分别为第  $n$  节电池的充电电压和放电电压.

电池组的能量效率(EE)定义:一个充放电周期内,电池组的输出能量与对电池组输入的能量之比,它可以用电流效率和电压效率的乘积来计算,即:

$$\text{EE} = \text{CE} \times \text{VE} \quad (19)$$

## 2 实 验

用一台 1 kWh 额定输出的 VRB 系统,测试电池组暂态响应、充放电循环以及自放电电流.(VRB 系统的特征参数详见表 1).

表 1 额定输出 1 kWh 的 VRB 系统特征参数

Tab. 1 Configuration of 1 kWh VRB system

Item	Characteristic parameter
Rated output power	1 kW
Rated output capacity	1 kWh
Voltage range	0 ~ 25 V
Rated output current	52.5 A
Electrolysis solution	1.5 mol·L <sup>-1</sup> VOSO <sub>4</sub> + 3 mol·L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Volume of electrolyte	20 L

暂态响应测试:1 kW 的电池组输入 52.5 A 的阶跃电流,持续时间 300 s. 而后切断电流,静置时间 300 s,测试电池组的电压,不同电解液充电状态(SOC)下重复上述测试.

恒电流充放电模式:电池组充电电压上限 23.25 V,放电电压下限 17 V. 不同充放电电流测试电池组充放电曲线,并与模拟结果对比.

自放电模式:50%电解液充电状态(SOC),测量电池组开路电压-时间曲线,电解液流速保持恒定.

上述测试由 Arbin 仪器 (Model BT 2000, Arbin Instruments Corp., 美国)监控和记录.

## 3 结果与讨论

### 3.1 电池组暂态响应特性

采用电流阶跃法,可粗略估算电池组内阻. 仿照交流阻抗模拟电解池的等效电路,图 2 给出了电池组的阻抗等效电路. 其中,  $R_1$  为欧姆内阻,包括电极电阻、膜电阻以及电极和集流板间的接触电阻;双电层电容  $C_2$  和反应电阻  $R_2$  并联,代表着扩

散速率和电子转移速率控制阻抗;而  $R_3$  和  $C_3$  并联则为电池内部离子传递阻抗; $C_0$  为电解液的充电容量, $i_s$  为自放电电流. 据此,电流阶跃下电池组电压的特性可用下式描述:

$$\begin{aligned} V_{\text{stack}}(t) &= V_1 + V_2 + V_3 + V_0 \\ &= I_t R_1 + I_t R_2 [1 - \exp(-\frac{t}{C_2 R_2})] \\ &\quad + I_t R_3 [1 - \exp(-\frac{t}{C_3 R_3})] + I_t \frac{t}{C_0} \end{aligned} \quad (20)$$

式中, $I_t$  为阶跃电流. 图 3 给出了 1 kW 额定输出功率的电池组在电解液的 SOC 为 16% 时阶跃电流的电压响应曲线. 图中, $V_s$  和  $V_e$  分别为  $t = 0$  s 和  $t = 600$  s 的开路电压; 电流加载瞬间和卸载瞬间的电压阶跃幅度相等, 并标记为  $V_1$ ; 电流卸载 300 s 时间开路电压的下降幅度, 标记为  $V_2 + V_3$ . 与式 (20) 比较, 图中电阻元件的数值可由下式确定<sup>[8]</sup>:

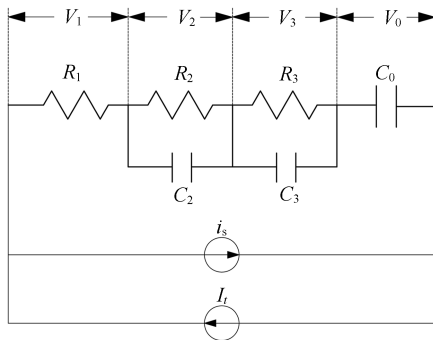


图 2 电池组等效阻抗图

Fig. 2 An equivalent impedance of redox flow battery stack

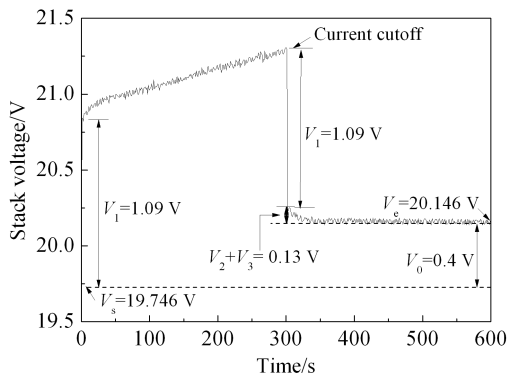


图 3 阶跃电流电池组的电压响应曲线

Fig. 3 The response of the stack voltage to the current impulse

$$R_1 = \frac{V_1}{I_t}, \quad R_2 + R_3 = \frac{V_2 + V_3}{I_t} \quad (21)$$

电池组内阻实际上包括了 3 个等效电阻, 故将电池组的内阻定义:

$$R_m = \sum_{i=1}^3 R_i \quad (22)$$

据此, 算出 16% SOC 电池组内阻为 0.0233  $\Omega$ . 同理, 也可计算不同电解液充电状态下电池组内阻, 如图 4 所示. 从图 4 可以看出, SOC 不同下电池组内阻相差不大, 可取不同 SOC 电池组内阻的平均值作为模拟参数, 即  $R_m = 0.0225 \Omega$ . 若假设各节电池内阻都一样, 那么式 (12)  $r_m$  可取近似值  $r_m = 0.0015 \Omega$ .

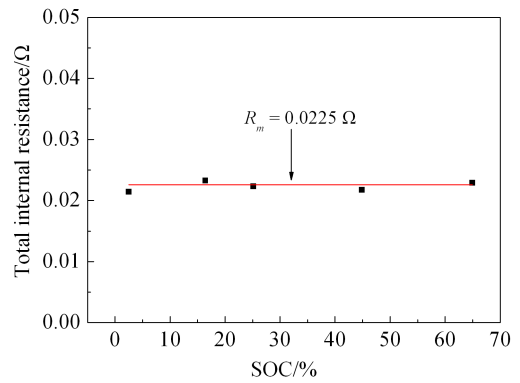


图 4 不同的电解液充电状态(SOC)电池组等效内阻值

Fig. 4 The equivalent impedance of redox flow battery stack at different states of charge

此时, 只测量电池组充电状态的暂态响应, 而没有测量电池组放电状态的暂态响应. 据文献<sup>[6]</sup>报道, 当电池组电压较小范围内变化, 电池组不论处于充电状态还是放电状态, 电池组内阻差异不大. 这说明, 电池组内阻只与电解液的 SOC 有关, 而与电池组处于充电状态或放电状态无关, 故将电池组内阻视作常数处理. 需要指出的是, 当电解液的充电状态逐渐接近 100% 时, 电池组内阻可能会迅速增大, 此时出现浓差极化, 使电池组内阻明显递增, 这对电池系统的性能产生不利影响. 将充电电压上限设定在 23.25 V (单节电池电压上限 1.55 V), 这一电压对应于电解液的充电状态(SOC)约 70%.

### 3.2 自放电速率的确定

电池自放电的机理, 文献已有详述<sup>[9]</sup>. 全钒液流储能电池组充放电过程, 其容量的损失主要源于

3 个部分:(1)正负极电活性物质(即不同价态的钒离子)透过离子交换膜的迁移量不同,导致电池组一侧的钒离子总量不断增加,而另一侧钒离子总量则不断减少,使得电池组的充放电容量不断降低;(2)电池组相邻的两节电池的正极和负极共用一个集流板,就会通过公用的电解液管路形成电的回路,产生漏电电流;(3)电池组充电过程,电池负极发生活性离子还原反应同时析氢,使电池组充放电容量下降.

图 5 给出电池组开路电压( $V_{oc}$ )-时间( $t$ )曲线(A)和开路电压( $V_{oc}$ )-电解液的充电状态(SOC)曲线(B).从图 5A 可以看出, $V_{oc}$  随时间的变化基本趋于线性,只在自放电末期曲线才呈现陡降,故电池组自放电速率可视为恒值,即定义自放电电流  $i_s$  代表自放电速率.据 Enomoto Kazuhro 等<sup>[8]</sup>提出自放电电流的计算式如下:

$$i_s = \frac{dQ_s}{dt} = \frac{dV_{oc}}{dt} \frac{dSOC}{dV_{oc}} \frac{dQ_s}{dSOC} \quad (23)$$

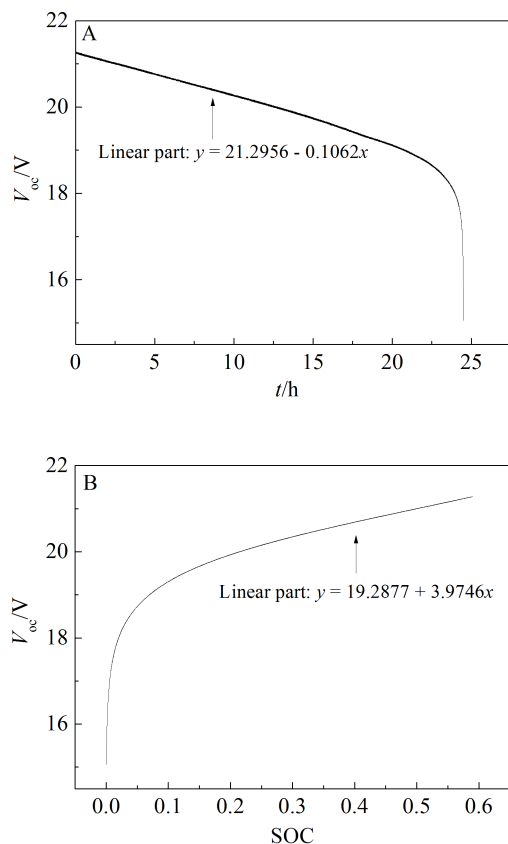


图 5 A. 电池组自放电开路电压( $V_{oc}$ )-时间( $t$ )曲线;B. 自放电开路电压( $V_{oc}$ )-电解液充电状态(SOC)曲线

Fig. 5 A. Open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) to rest time( $t$ ); B. Open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) to state of charge (SOC)

依据图 3 的实验结果,上式 3 项均可近似估算:

$$\frac{dV_{oc}}{dt} = \frac{-0.1062}{3600} = -2.95 \times 10^{-5} \quad (24)$$

$$\frac{dV_{oc}}{dSOC} = 3.9746 \quad (25)$$

$$\frac{dQ_s}{dSOC} \approx Q_{ideal} = 193,000 \quad (26)$$

因此,自放电电流  $i_s = -1.432$  A.

由于自放电实验在开路条件下进行,因此上述估算只是自放电电流近似值.实际运行的自放电电流还需要考虑更多因素,模拟手段更加复杂.

### 3.3 模拟结果与电池组性能

电池组的输出电压(各节电池的电压之和):

$$V_{stack} = \sum_{n=1}^N V_n \quad (27)$$

各节电池的电压仅为电流  $K_n$  和电解液的充电状态 SOC 的函数,即式(10)、(11).实际测量电池组输出电压随时间变化,而电池组在充电或者放电的任意时刻  $t$  对应的电解液的充电状态 SOC,可以用下式求得:

$$SOC = S_0 + \frac{t}{t_0}(S_e - S_0) \quad (28)$$

上式, $S_0$  和  $S_e$  分别对应电池组充电(放电)伊始和充电(放电)结束,电解液的 SOC 值. $t_0$  则代表一个充放电周期,电池组的充电时间(放电时间).这样,就可将模拟不同 SOC 的电池组电压与实验测得的不同瞬时的电池组电压一一对应.

表 2 列出了模拟 1 kW 额定输出功率电池组所需要的各项基本参数值,模拟结果通过 Matlab 软件编程计算.图 6A 是加载电流曲线,不同电流密度下电池组充放电的电压曲线的模拟结果与实验结果见图 6B.可以看出,模拟结果与实验结果吻合良好,模拟值与实验值的最大误差为 0.655 V,即 4%相对误差.

表 2 模拟 1 kW 额定输出功率的电池组参数值

Tab. 2 Input parameters used for modeling the 1 kW RFB stack

$I/A$	$S_0/\%$	$S_e/\%$	$R_A(\text{or } R_C)/\Omega$	$R_{MA}(\text{or } R_{MC})/\Omega$	$r_{m,n}/\Omega$
$\pm 35$	1.53	86.95	792	13	0.0015
$\pm 52.5$	2.52	80.00	792	13	0.0015
$\pm 70$	4.13	70.59	792	13	0.0015

Note: “+” Input current; “-” Output current

图 7A 给出了电解液 50% SOC 时电池组各节电池的漏电电流分布. 可以看出, 电解液公用管路漏电电流( $I$  或  $J$ )位于电池组中间处呈现最大值, 并以此中心向两端趋于减小; 电解液分配支路漏电电流( $i$  或  $j$ )位于电池组两端处出现最大值, 并朝着电池组中间处呈逐渐减小的趋势. 图 7B 则给出

了电解液 SOC 50%时电池组各节电池的电压  $V_n$  和内部电流  $K_n$  的分布. 从图中可以看出, 电池组两端的电池电压最高, 而电池组中间电压最低, 呈“U”型分布. 电池组各节电池的内部电流分布与电压分布正好相反.

表 3 列出了电池组电流效率、电压效率和能量

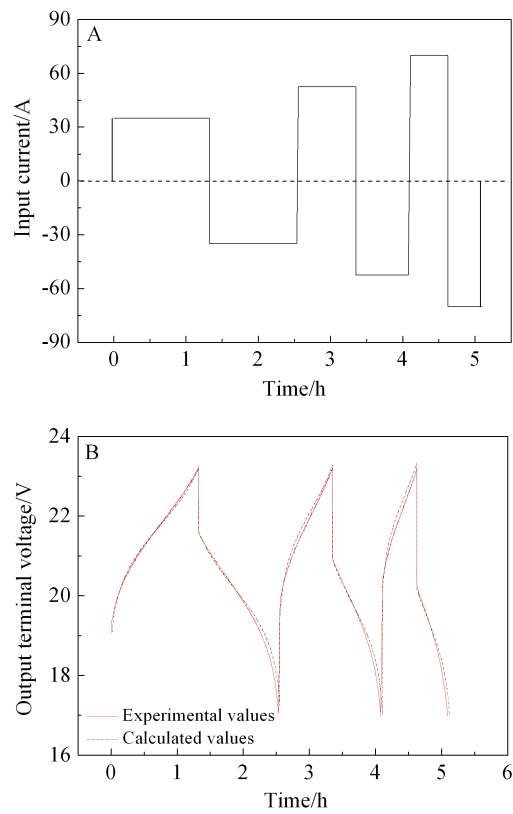


图 6 电池组充放电循环电流加载曲线(A)和电池组充放电电压模拟与实验曲线(B)

Fig. 6 Loading currents to battery stack for charge and discharge operations (A) and comparison between experimental and calculated output terminal voltages of battery stack during charge and discharge operations (B)

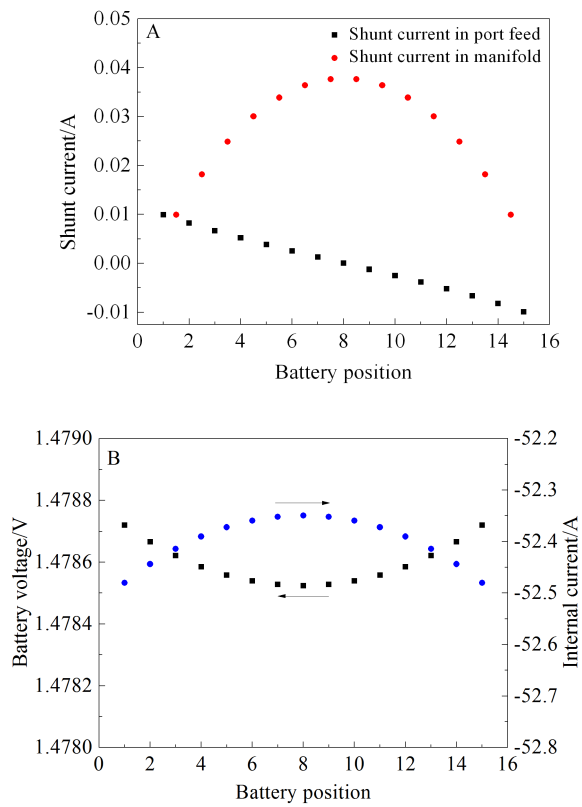


图 7 电解液 50%充电状态下电池组漏电电流分布曲线(A)和电池组各节电池电压及其内部电流的分布曲线(B)

Fig. 7 Calculated shunt current in port feed ( $i$  or  $j$ ) and in manifold ( $I$  or  $J$ ) at 50% SOC during charge operation (A); Distribution of calculated battery voltage  $V_n$  and internal current  $K_n$  in battery stack at 50% SOC during charge operation (B)

表 3 电池组效率的计算值与实验值  
Tab. 3 Comparison between the calculated and experimental efficiencies

$I_i$ /A	CE/%		VE/%		EE/%	
	Calculated	Experimental	Calculated	Experimental	Calculated	Experimental
	values	values	values	values	values	values
± 35	92.01	93.05	93.06	92.15	85.62	85.75
± 52.5	94.65	94.55	90.19	89.02	85.36	84.17
± 70	95.91	95.52	86.49	85.77	82.95	81.93

效率的计算值与实验值. 可以看出, 计算值与实验值相差甚微, 这进一步说明了模型的准确性. 另外, 随电池组充放电电流增大, 电池组的电流效率增加, 而电压效率却呈下降趋势. 这可归因于: 随充放电电流密度增大, 电池组充放电周期缩短, 各节电池的过电位增大, 最终导致电池组自放电损失减小, 电化学极化增大.

通过电池组自放电测试, 粗略估算了电池组的自放电电流  $i_s$ . 据自放电电流, 计算电池系统自放电容量损失  $Q_s$ , 计算了电池组的电流效率. 据式 (14), 计算漏电电流造成的容量损失, 发现漏电电流造成的容量损失为总容量损失的 60% 左右, 也就是说自放电电流的 60% 源于漏电电流的贡献. 而总容量损失的 40% 则来源于正负极活性物质 (即不同价态的钒离子) 透过离子交换膜的迁移和副反应 (析氢反应) 的容量损失. 因此, 减小电池组漏电电流无疑是提高电池组效率的关键之一.

## 4 结 论

建立了液流储能电池组的等效电路模型, 并与 1 kW 额定输出功率的全钒液流电池组的实验数据相对应, 估算了电池组的内阻和自放电电流, 分析了电池组漏电电流及其分布情况以及电池组中各节电池的电压和内部电流, 估计了电池组的容量损失. 主要结论如下:

(1) 电池组内阻和自放电电流可由电池组的暂态响应和自放电估算;

(2) 电池组充放电电压的模拟值与实验值良好吻合, 证明了该模型的正确性;

(3) 电池系统的总容量损失的 60% 源自漏电电流, 因此减小电池组的漏电电流无疑是提高电池组效率的关键之一.

## 参考文献(References):

- [1] Roušar I, Cezner V. Experimental determination and calculation of parasitic currents in bipolar electrolyzers with application to chlorate electrolyzer[J]. Journal of The Electrochemical Society, 1974, 121(5): 648-651.
- [2] Katz M. Analysis of electrolyte shunt currents in fuel cell power plants[J]. Journal of The Electrochemical Society, 1978, 125(4): 515-520.
- [3] Kanari K. Numerical analysis on shunt current loss in a redox flow battery[C]. Denki Kagaku Oyobi Kogyo Butsuri Kagaku, 1989 (57): 517-522.
- [4] Burney H S, White R E. Predicting shunt currents in stacks of bipolar plate cells with conducting manifolds[J]. Journal of The Electrochemical Society, 1986, 135(7): 1609-1612.
- [5] Codina G, Aldaz A. Scale-up studies of an Fe/Cr redox flow battery based on shunt current analysis[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1992, 22: 668-674.
- [6] Li M H, Funaki T, Hikiyara T. Study of output terminal voltage modeling for redox flow battery based on charge and discharge experiments[C]. Kyoto University, Kyoto: Power Conversion Conference-Nagoya. 2007: 221-225.
- [7] Sukkar T, Skyllas-Kazacos M. Water transfer behaviour across cation exchange membranes in the vanadium redox battery[J]. Journal of Membrane Science, 2003, 222(1/2): 235-247.
- [8] Enomoto K, Sasaki T, Shigematsu T, et al. Evaluation study about redox flow battery response and its modeling [C]. IEEE Transaction on Power System Engg, 2002, 122-B(4): 554-560.
- [9] Brian E B, Pell W G, Liu T C. Diagnostic analyses for mechanisms of self-discharge of electrochemical capacitors and batteries[J]. Journal of Power Sources, 1997, 65 (1/2): 53-59.

## An Equivalent Circuit Model for Redox Flow Battery Stack

YOU Dong-jiang<sup>1\*</sup>, ZHANG Hua-min<sup>2</sup>

(1. *The 718th Research Institute of CSIC, 056027, Handan, China*; 2. *Dalian Institute of Chemical Physics, CAS, 116023, Dalian, China*)

**Abstract:** This paper introduces an equivalent circuit model for a redox flow battery stack. The model combines the electrochemical reaction of the battery cell and the shunt current of the battery stack. An all-vanadium redox flow battery stack of 1 kW rated output power is tested through transient response and self-discharge experiments. All the parameters used for the modeling are obtained. Calculated shunt current and distribution of calculated battery voltage are shown in the results. It is concluded that the impedance of the battery stack can be obtained by the experimental results of the transient response and self-discharge measurements. The capacity loss of about 60% for the battery system is caused by the shunt current.

**Key words:** equivalent circuit model; transient response; shunt current