

钒液流电池的综合建模研究

常志松¹, 王志强¹, 袁铁江¹, 王 茜², 李国锋¹, 王宁会¹

(1. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024;
2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 本文以全钒液流电池(VRB)的等效电路模型为基础,包括电堆电动势、过电势和欧姆极化,结合分析离子扩散、电解液流动损耗和温度变化的动态模型,在 Simulink 中建立了 VRB 的动态等效电路仿真模型。将实验测量的参数代入所建立的模型中,对比了恒流以及恒功率充放电的实验与仿真曲线,经定量分析可知所建立模型的误差小于 1%。最后结合仿真数据分析了 VRB 的电荷效率和能量效率,结果表明充放电循环电流/功率越大,其电荷效率越高,但能量效率随之降低。

关键词: 全钒液流电池; 动态等效电路; 仿真模型

DOI: 10.12067/ATEEE1907038 文章编号: 1003-3076(2019)09-0073-08 中图分类号: TM912

1 引言

全钒液流电池(all-Vanadium Redox flow Battery, VRB)作为一种大容量、长寿命和高安全的储能电池,已有很多示范应用^[1]。在微电网等某些实际应用场景中,功率需求变化复杂,具有很大的随机性^[2],可能出现需求峰值过大、储能电池过充过放以及停机等极端运行状况,因此需要结合储能电池的实际运行状态进行有效地预测^[3]。

VRB 的模型建立是设计其具体系统运行控制方案的必要条件^[4],国内外对此已经开展了相关研究。文献[5]建立了一种 VRB 静态等效电路模型,可以在此基础上扩展外电路。但 VRB 是一个时变系统,其等效电路参数会随着其状态的改变而实时动态更新变化。若采用恒定电路参数的静态模型,会导致分析误差较大,并且误差会随着充放电的进行不断积累。文献[6]的动态模型考虑了离子扩散损失、电解液流场损耗,分析温度变化,根据电化学模型建立动态数学分析模型,以适应参数变化。该模型虽可以模拟 VRB 简单充/放电工况,但难以满足外部电路特性变化的需求。文献[7,8]分别结合 VRB 的充放电循环实验对所提出的模型进行了修正和验证,从而进一步提升了模型精度。

本文提出一种动态模型实时更新静态模型参数的方法,系统地建立动态等效电路模型,通过实验验证了模型的准确性。最后结合仿真数据得出实验中无法测量的参数,并且分析了 VRB 的测试结果。本文提供的建模方法不仅可以提高模型的精度,还能够在此基础上扩展出基于 VRB 的完整系统,结合电池内部的状态参数,给整个系统的控制方案设计提供数据参考,同时也可用来辅助分析 VRB 的测试结果。

2 VRB 动态等效电路模型

2.1 静态等效电路模型

VRB 的静态等效电路模型如图 1 所示。等效电路参数如下:电池堆的开路电压 U_s 和过电势 φ ,会随着电解液中各价态钒离子浓度 C_i (本文所有下标 i 表示钒离子价态, $i=2,3,4,5$) 以及电解液温度 T_s 动态变化,而过电势 φ 主要由通过电堆的电流 I_s 决定。模型还包括欧姆极化作用等效电阻 R_s 、外部寄生电阻 R_{fix} 、正负极电极板的极间电容 C_e ^[5]。最终计算出 VRB 输出的电压 U_b 和电流 I_b 。

2.1.1 等效电路输出

对于 VRB 的输出,根据图 1 有:

$$U_b = U_s + \varphi + I_b R \tag{1}$$

收稿日期: 2019-07-15
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0903503)
作者简介: 常志松(1995-),男,安徽籍,硕士研究生,研究方向为电工理论与新技术;
王志强(1983-),男,安徽籍,副教授,博士,研究方向为电工理论与新技术(通讯作者)。

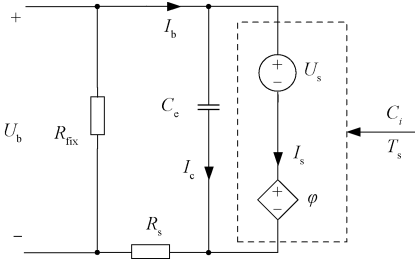


图 1 VRB 静态等效电路
Fig.1 Equivalent circuit of VRB

$$I_b = I_s + C_e \frac{d(U_s + \varphi)}{dt} \quad (2)$$

规定 I_s 与 I_b 充电时的电流方向为正。VRB 电极上没有电流通过时,称为平衡状态,设 VRB 单体的正负极标准电动势为 U_{cell} ,则开路电压 U_s 由能斯特方程求得^[1]:

$$U_s = NU_{cell} + \frac{NRT_s}{F} \ln \frac{C_2 C_5}{C_3 C_4} \quad (3)$$

式中, R 为理想气体常数($J/(K \cdot mol)$); F 为法拉第常数; N 为 VRB 电池堆的电池单体数目。

当电极上有电流通过时,VRB 脱离平衡状态,由于电解液、电极等导体元件的等效电阻之和 R_s 引起的压降(欧姆极化),以及过电势 φ 的存在,输出电压 U_b 与开路电压 U_s 出现偏差。

R_s 会随着 T_s 动态变化,但运行中随温度变化的程度较电动势 U_s 、过电势 φ 相比很小,本文以一个恒定值进行分析,通过实验测量得到。

过电势主要分为两类:浓差过电势 φ_c 和活化过电势 φ_a ^[9]:

$$\varphi = \varphi_a + \varphi_c \quad (4)$$

2.1.2 活化过电势

φ_a 大小取决于反应速率,根据 Butler-Volmer 方程,设正负极的电荷转移系数都是 0.5,可以求得正负极的活化过电势之和^[6]:

$$\varphi_a = \frac{2NRT_s}{F} \operatorname{asinh} \left(\frac{I_s}{2A_e F k_{v+} \sqrt{C_4 C_5}} \right) + \frac{2NRT_s}{F} \operatorname{asinh} \left(\frac{I_s}{2A_e F k_{v-} \sqrt{C_2 C_3}} \right) \quad (5)$$

式中, A_e 为电极的表面积; k_{v+} 、 k_{v-} 分别为正负极反应速率常数(m/s),通过 Arrhenius 公式求出:

$$k_{v+} = k_{v+ref} \exp \left[\frac{FE_+^0}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \quad (6)$$

式中, E_+^0 为正极反应参考电位; k_{v+ref} 为参考温度 T_{ref}

下正极反应速率常数。负极 k_{v-} 计算方法同正极。

2.1.3 浓差过电势

浓差过电势是电解液本体和在电极表面离子浓度差异而导致的电位偏差^[9]。

设 C_i^s 为电极表面离子的浓度,则

$$\varphi_c = \frac{NRT_s}{F} \ln \left(\frac{C_3 C_4}{C_2 C_5} \frac{C_2^s C_5^s}{C_3^s C_4^s} \right) \quad (7)$$

在理想稳态扩散情况下,电极表面的离子浓度和溶液中的离子浓度有如下关系:

$$C_i^s = C_i \left(1 - \frac{j}{j_d} \right) \quad (8)$$

式中, j 为电流密度; j_d 为极限电流密度:

$$j_d = FD_i \frac{C_i}{l} \quad (9)$$

其中, l 为扩散层厚度; D_i 为离子在电极表面区域和本体溶液之间的扩散系数(m^2/s)。根据式(7)~式(9)可得 φ_c :

$$\varphi_c = \frac{NRT_s}{F} \ln \frac{\left(1 - \frac{I_s l}{A_e F C_2 D_2} \right) \left(1 - \frac{I_s l}{A_e F C_3 D_3} \right)}{\left(1 - \frac{I_s l}{A_e F C_4 D_4} \right) \left(1 - \frac{I_s l}{A_e F C_5 D_5} \right)} \quad (10)$$

2.2 VRB 动态模型

通过建立各个物理量之间联系的方程,动态更新 VRB 静态等效电路状态参数 C_i 、 T_s 的分析模型,称之为动态模型。动态模型基本原理如图 2 所示,由输入输出量互相耦合的一系列子分析模块组成,具体包括:离子扩散分析、电解液温度分析、流动损耗分析(电解液的流动泵损功率为 P_{pum} ,单位时间流量 Q)。

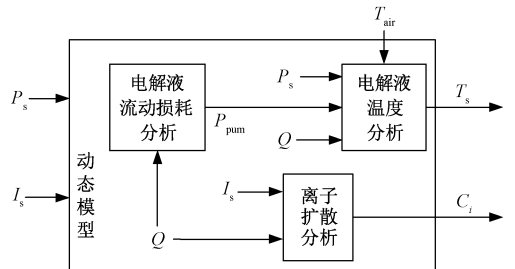


图 2 VRB 动态模型
Fig.2 VRB dynamic model

输入变量有: I_s 、VRB 静态等效电路充/放电的热损失功率 P_s 和外界条件(气温 T_{air})。

2.2.1 离子扩散分析模块

VRB 在实际运行中,由于电堆正负极电解液钒

离子浓度差,离子会扩散到离子膜另一侧发生自放电^[10]。假设反应瞬时完成,电解液体积不变,扩散系数恒定,考虑离子扩散影响的充放电离子浓度变化微分方程为:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{N}{V} \left(\frac{\beta_i I_s}{F} + \alpha_{i2} K_2 \frac{C_i S}{d} + \alpha_{i3} K_3 \frac{C_i S}{d} + \alpha_{i4} K_4 \frac{C_i S}{d} + \alpha_{i5} K_5 \frac{C_i S}{d} \right) \quad (11)$$

式中, d 为离子膜的厚度; K_i 为各价态钒离子扩散系数; S 为离子膜面积; α, β 均为整数系数; V 为正/负极电解液的体积(假设电池正负极结构对称,电解液体积相等)。式(11)中的系数(充电时)见表1^[11]。

表1 离子扩散模型方程系数

Tab.1 Differential equation coefficient of ion diffusion model

系数	i	α_{i2}	α_{i3}	α_{i4}	α_{i5}	β_i
	2	-1	0	-1	-2	1
数值	3	0	-1	2	3	-1
	4	3	2	-1	0	-1
	5	-2	-1	0	-1	1

注: β_i 为充电时的系数,放电时对应取相反数, α_i 不变。

设 dC_{zi} 为由离子扩散引起的 i 价钒离子浓度变化量, I_z 为离子扩散作用等效的自放电流。自放电伴随着活性物质减少,即 C_3, C_4 增加, C_2, C_5 减少。根据表1可知离子扩散过程中,2价和5价钒离子浓度减少量等于3价、4价钒离子浓度增加量。由式(11),可以得到式(12)。通过自放电电流,可以计算因离子扩散而损失的功率。

$$-\frac{dC_{z2}}{dt} - \frac{dC_{z5}}{dt} = \frac{dC_{z3}}{dt} + \frac{dC_{z4}}{dt} = \frac{N}{VF} 2I_z \quad (12)$$

假设欧姆极化、过电势以及自放电造成的损失都转换成电池堆的热量,有:

$$P_s = \varphi I_s + U_s I_z + I_b^2 R_s \quad (13)$$

2.2.2 流动损耗分析模块

VRB 电解液流动有效地减少了局部过热的现象,使得 T_s 分布更加均匀。但液流泵维持电解液流动,克服液压回路的流动阻力产生功率损耗,假设其全部被转化为热量。损失功率 P_{pum} 与循环回路的压降 Δp 和 Q 有关^[12]:

$$P_{pum} = 2\Delta p Q \quad (14)$$

循环回路的压降分为电堆压降 Δp_s 和管道压降 Δp_p :

$$\Delta p = \Delta p_s + \Delta p_p \quad (15)$$

由于电堆结构复杂, Δp_s 一般无法通过数值计算得出,需要使用有限元仿真。电解液属于不可压缩粘性流体,由于循环流动,高度、速度变化为0,因此管道压降 Δp_p 包括:沿程损失(管壁与流体间的摩擦损失) Δp_1 ; 局部损失(由于流经弯道和阀门等元件,电解液流速的方向和速度发生改变时产生的损失) Δp_2 ^[13]:

$$\Delta p_p = \Delta p_1 + \Delta p_2 \quad (16)$$

假设管道内为层流,且出口入口的直径相等,根据 Darcy-Weisbach 公式有:

$$\Delta p_1 = \frac{32\mu L v_m}{D_h^3} \quad (17)$$

$$\Delta p_2 = K \frac{\rho v_m^2}{2} \quad (18)$$

式中, ρ 为电解液密度; v_m 为管道内的平均流速; K 为形损系数; L 为管道的长度; D_h 为管道直径; μ 为动态粘度。

2.2.3 电解液温度分析模块

假设电解液完全混合且体积保持不变。正负极的结构、参数完全对称。罐体和管道的外表面暴露在自然对流环境中,由于罐内的流速很低,罐内表面也可以被视为自然对流过程。

根据能量平衡方程,电池堆的电解液温度模型可以描述为如下微分方程^[14]:

$$C_p \rho V_L \frac{dT_s}{dt} = 2QC_p \rho (T_p - T_s) + P_s + H_s A_s (T_{air} - T_s) \quad (19)$$

液流泵的功率损耗与管道的热对流条件相结合,同理可得管道与储液罐温度模型:

$$C_p \rho V_p \frac{dT_p}{dt} = QC_p \rho (T_s + T_t - 2T_p) + H_p A_p (T_{air} - T_p) + P_{pum} \quad (20)$$

$$C_p \rho V_t \frac{dT_t}{dt} = QC_p \rho (T_p - T_t) + H_t A_t (T_{air} - T_t) \quad (21)$$

式中, C_p 为电解液的比热; T_s 为电堆电解液温度; V_L 为电池堆中电解液体积; H_s 为电池堆总传热系数; A_s 为电池堆电解液表面积; T, H, V, A 分别为温度、传热系数、体积、表面积; 下标 t 代表储液罐; 下标 p 代表管道。

列出状态方程:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (22)$$

式中

$$\mathbf{x} = [T_s \quad T_p \quad T_t]^T, \mathbf{u} = [P_s \quad T_{air} \quad P_{pum}]^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{2Q}{V_L} - \frac{H_s A_s}{C_p \rho V_L} & \frac{2Q}{V_L} & 0 \\ \frac{Q}{V_p} & -\frac{2Q}{V_p} - \frac{H_p A_p}{C_p \rho V_p} & \frac{Q}{V_p} \\ 0 & \frac{Q}{V_t} & -\frac{Q}{V_t} - \frac{H_t A_t}{C_p \rho V_t} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_p \rho V_L} & \frac{H_s A_s}{C_p \rho V_L} & 0 \\ 0 & \frac{H_p A_p}{C_p \rho V_p} & \frac{1}{C_p \rho V_p} \\ 0 & \frac{H_t A_t}{C_p \rho V_t} & 0 \end{bmatrix}$$

2.3 动态模型与静态等效电路的结合

VRB 静态等效电路模型与动态模型互相联系,共同组成动态等效电路模型,其原理示意图如图 3 所示。动态模型状态参数 C_i 、 T_s 影响静态等效电路输出特性,静态等效电路的 I_s 、热损失 P_s 与 T_{air} (外界条件)会改变 VRB 动态模型的状态。

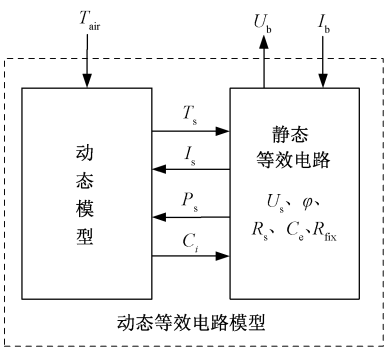


图3 VRB 动态等效电路简图

Fig.3 Diagram of dynamic equivalent circuit of VRB

3 VRB 实验与仿真结果验证分析

3.1 仿真模型

按照图 1~图 3 以及式(1)~式(22),建立 Simulink 仿真模型,如图 4 所示,其中“VRB_Sub”模块为动态模型以及过电势计算模块的总和;电路元器件模型搭建的“Equivalent Circuit”模块以及“Circuit_Caculation”模块组成静态等效电路,各个仿真模型间变量联系按照图 4 中各 Tag 的路径。

3.2 实验平台

本研究搭建了全钒液流电池堆的测试平台,来验证所建立的全钒液流电池动态等效电路模型的对

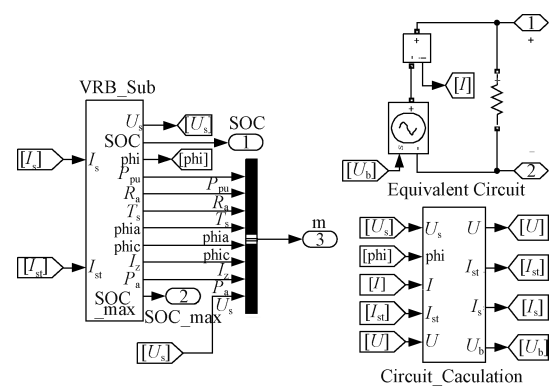


图4 VRB 动态等效电路仿真模型

Fig.4 Dynamic equivalent circuit simulation model of VRB

效性。实验装置基本原理示意图如图 5 所示,包括:

(1)电池堆,由 10 个单体电池组成。正负极储液罐储存待反应的电解液,电解液满足 $C_2 + C_3 = C_4 + C_5 = 1.5\text{mol/L}$,额定功率 5kW。

(2)电池模块测试系统,即储能变流器 (Power Converter System, PCS)。对电池进行充放电,开关在位置 1 时对 VRB 进行放电,2 时对 VRB 进行充电,充/放电方式为恒流或恒功率。计算机 (PC) 与该系统实时通讯,将测量的电压、电流数据实时送到 PC 上保存,通过 PC 程序实现对测试系统充放电运行的实时控制。

(3)三相电机 (3.7kW/220V/50Hz/2800r/min)、变频器用来驱动电解液的流动。流量计 Q 测量管道内电解液的单位时间流量。

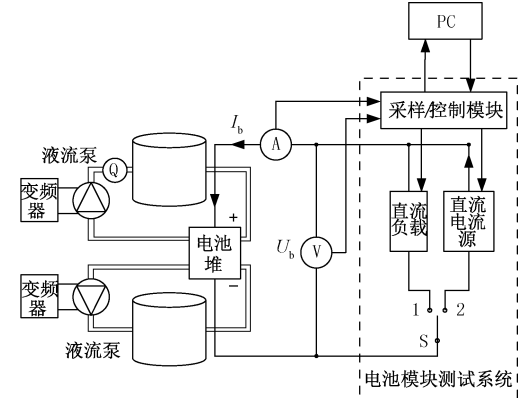


图5 VRB 实验平台原理简图

Fig.5 Principle sketch of VRB experimental platform

3.3 仿真模型的验证

设定 PCS 先对 VRB 进行充电,VRB 电压 U_b 超过 16V 后,切换至对 VRB 放电,低于 10V 后停止,以此为一个循环。实验过程中每隔 2s 采集一次 U_b

和 I_b 。实验和仿真的参数见表 2 和表 3,仿真模型中设置的充放电切换时间与实验数据一致。

表 2 参数列表(实际测量)

Tab.2 Parameter list (Actual measurement)

参数	数值
离子隔膜的面积 S/m^2	0.869×0.389
离子膜的厚度 $d/\mu\text{m}$	0.1
电极的表面积 A_e/m^2	0.869×0.389
电池单体个数 N	10
电池的体积 V_L/m^3	0.001
管道的体积 V_p/m^3	0.0029
储液罐的体积 V_t/m^3	0.1117
电解液流量 $Q/(\text{m}^3/\text{h})$	1.3
正负极电解液的体积 V/L	69
管道总长度 L/m	6
管道直径 D_h/m	0.02

表 3 参数列表(来自文献[6,11,12])

Tab.3 Parameter list (from refrence [6,11,12])

参数	数值
电池堆总传热系数×面积 $H_sA_s/(\text{W}/\text{K})$	1.78
管道的总传热系数×面积 $H_pA_p/(\text{W}/\text{K})$	0.7
储液罐的总传热系数×面积 $H_tA_t/(\text{W}/\text{K})$	2.07
局部损失系数 K	0.9
动态粘度 $\mu/(\text{pa}\cdot\text{s})$	0.008
电池堆压降 Δp_s	需要另外分析
电解质的比热 $C_p/(\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}))$	3200
电解液的密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1345
2 价钒离子扩散系数 $K_2/(\text{m}^2/\text{s})$	8.768e-12
3 价钒离子扩散系数 $K_3/(\text{m}^2/\text{s})$	3.222e-12
4 价钒离子扩散系数 $K_4/(\text{m}^2/\text{s})$	6.825e-12
5 价钒离子扩散系数 $K_5/(\text{m}^2/\text{s})$	5.897e-12
单位 VRB 正负极标准电动势 U_{cell}/V	1.39
正电极反应的参考电位 E_+^0/V	1.004
负电极反应的参考电位 E_-^0/V	-0.386
参考温度下正极反应速率常数 $k_{v+,\text{ref}}$	5.235e-6
参考温度下负极反应速率常数 $k_{v-,\text{ref}}$	4.5e-6

实验过程中 C_i 以及 R_s 无法实时测量,本文通过仿真结果与实验数据进行对比后,估算并微调,设模型与仿真的初始电压值误差为 ΔU_0 ,充电截止电压值误差为 ΔU_1 、放电初始电压值误差为 ΔU_2 ,当 $|\Delta U_0|+|\Delta U_1|+|\Delta U_2|$ 最小,且曲线的走势大致相同,并且 C_i 以及 R_s 都在相对合理的范围内时,完成反应参数设置。

分别恒定以 150A、200A、250A 的电流做一组充放电循环,对比仿真与实验的充放电输出电压曲线,结果如图 6 所示。

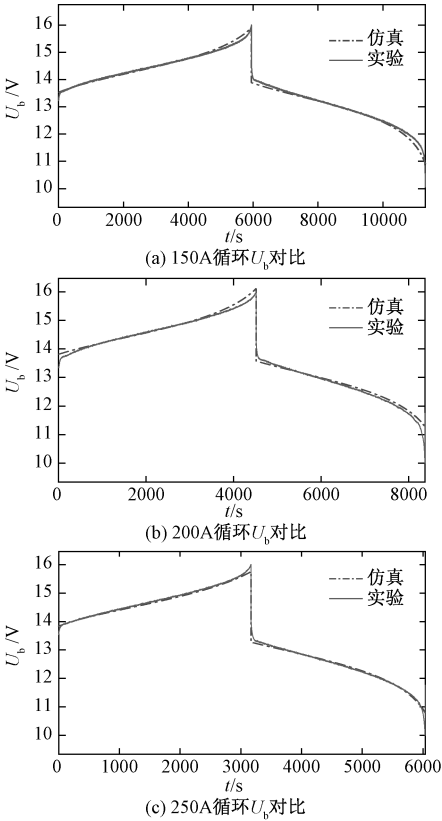
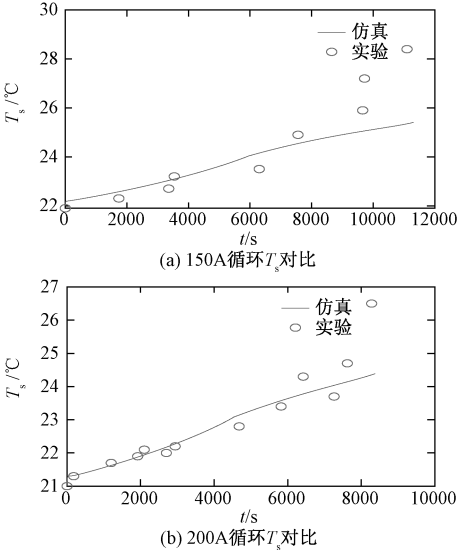


图 6 恒流充放电实验仿真对比
Fig.6 Comparison between experiments and simulation at constant current charge/discharge

温度测量采用 FLIR 红外热像仪,由于采用非接触式测量,精度较低,实验数据仅反映温度变化的大致趋势,无法准确反映具体数值,结果如图 7 所示。然后分别恒定以 3kW、4kW 的功率做一组充放电循环,对比仿真与实验的充放电输出电压与电流曲线,结果如图 8 所示。



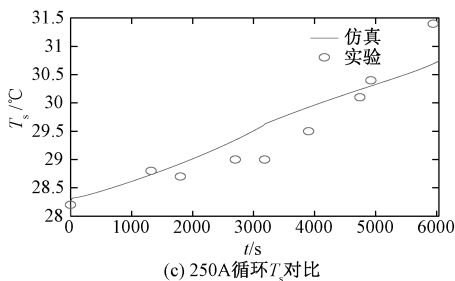


图 7 恒流充放电循环电堆温度的实验仿真对比
Fig.7 Comparison of experimental and simulation of stack temperature in constant current charge-discharge cycle

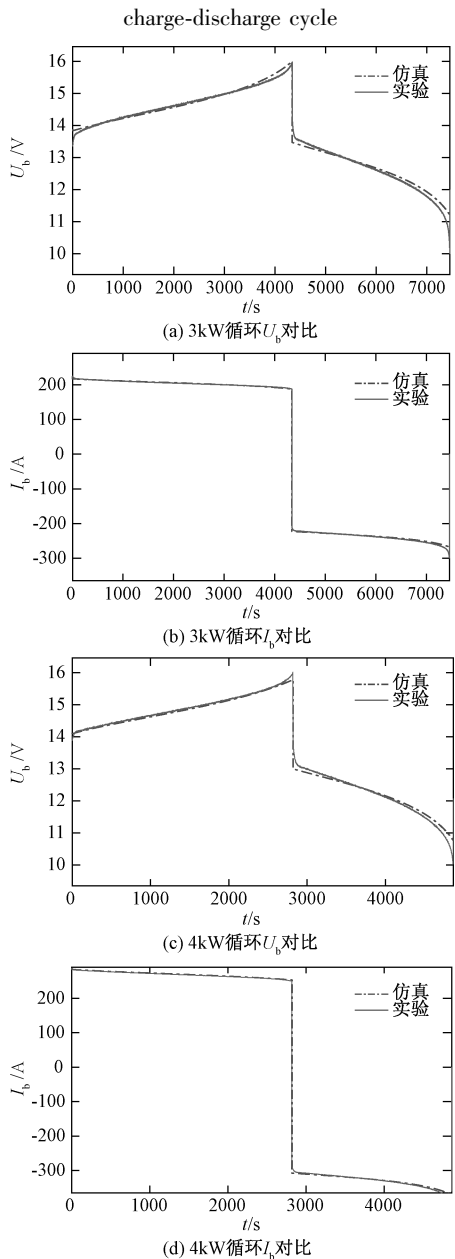


图 8 恒功率充放电实验仿真对比

Fig.8 Comparison between experiments and simulation at constant power charge/discharge

3.4 模型评价与效率分析

对比实验与仿真结果,由图 6 可知,恒流充放电过程中,电堆电压随时间变化曲线在充电以及放电的前期以及中期阶段,模型与实验数据的契合度较高。由图 8 可知,恒功率充放电过程中,电压的变化规律与恒流充放电过程相同,而对于电流的变化曲线,模型与实验数据的误差也仅仅在放电的末期出现。

定量评价实验与仿真的误差,使用式 (23) 均方根误差 $RMSE$ 、式 (24) 平均绝对百分误差 $MAPE$:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{t_{end} - t_0} \int_{t_0}^{t_{end}} [U_{sim}(t) - U_{exp}(t)]^2 dt} \tag{23}$$

$$MAPE = \frac{1}{t_{end} - t_0} \int_{t_0}^{t_{end}} \frac{|U_{sim}(t) - U_{exp}(t)|}{U_{sim}(t)} dt \tag{24}$$

式中, t_0 、 t_{end} 分别为充/放电过程的开始、结束时刻; 下标 sim 、 exp 分别表示仿真、实验数据。

表 4 为各组实验与仿真的均方根误差和平均绝对百分误差。可以看出,平均相对百分误差都在 1% 以内。综上可以认为模型能够较为准确地反映 VRB 的输出特性。

表 4 实验仿真对比误差

Tab.4 Error of simulation-experiment comparison		
实验循环组	$RMSE/V$	$MAPE(\%)$
150A 恒流充放电	0.0931	0.4711
200A 恒流充放电	0.1259	0.5426
250A 恒流充放电	0.0897	0.3219
3kW 恒功率充放电	0.1237	0.5522
4kW 恒功率充放电	0.1098	0.4891

由于实验过程中无法实时测量离子的浓度,因此每组 VRB 实验的起始和结束的荷电状态 SOC 都未知,无法直接对比充放电的效率。而在仿真模型中,根据式 (25) 可以计算出采样时刻对应的 SOC :

$$SOC(t) = \min \left[\frac{C_2(t)}{C_2(t) + C_3(t)}, \frac{C_5(t)}{C_5(t) + C_4(t)} \right] \tag{25}$$

对比仿真模型与实验,取 $SOC=0.15$ 为充电的起点与放电的终点,基于 SOC 对 VRB 的性能进行分析。采用式 (26) ~ 式 (29) 对比各组实验的电荷效率 η_Q 以及能量效率 η_E ,结果见表 5、表 6。

$$\eta_Q = \frac{Q_d}{Q_c} \tag{26}$$

$$\eta_E = \frac{W_d}{W_c} \tag{27}$$

$$Q = \int_{t_0}^{t_{end}} I_b(t) dt \tag{28}$$

$$W = \int_{t_0}^{t_{end}} U_b(t) I_b(t) dt \tag{29}$$

式中, W_d 为放电能量; W_c 为充电能量; Q_d 为放电电荷; Q_c 为充电电荷。

表 5 不同循环组的电荷效率

Tab.5 Charge efficiency of different cycle groups			
充放电循环组	充电电荷 /(A·h)	放电电荷 /(A·h)	电荷效率 η_Q (%)
150A 恒流	223.62	203.81	91.14
200A 恒流	219.16	204.40	93.27
250A 恒流	190.47	180.44	94.73
3kW 恒功率	213.66	202.20	94.64
4kW 恒功率	183.60	176.42	96.09

表 6 不同循环组的能量效率

Tab.6 Energy efficiency of different cycle groups			
充放电循环组	充电能量 /(W·h)	放电能量 /(W·h)	能量效率 η_E (%)
150A 恒流	3266.30	2663.70	81.55
200A 恒流	3246.37	2604.98	80.24
250A 恒流	2831.14	2262.99	79.93
3kW 恒功率	3160.95	2544.44	80.50
4kW 恒功率	2748.53	2155.34	78.42

通过截取相同起点终点的充放电循环过程的数据,计算出各种工况下的能量与电荷效率。可以得出充放电循环电流/功率越大,电荷效率越高,但能量效率随之越低。

前文所述的实验仿真数据联合处理分析流程归纳如图 9 所示。结合仿真模型得出实验中难以实时测量的 SOC,对比不同工况下,相同 SOC 变化范围的充放电循环的能量以及电荷的效率,适用于分析电池工作效率。

4 结论

本文通过动态分析 VRB 的离子扩散作用,电解液流动损耗和温度变化,结合 VRB 静态等效电路的过电势以及欧姆极化电阻,综合地搭建了全钒液流电池的动态等效电路模型,通过实验验证,并结合仿真模型分析实验数据。结论如下:

(1)实验数据与采用对应实验参数所搭建仿真模型的结果误差低于 1%。从输出特性来说,该 VRB 模型可较为准确地描述液流电池工作特性,可以作为设计基于 VRB 具体系统的数值分析模型。

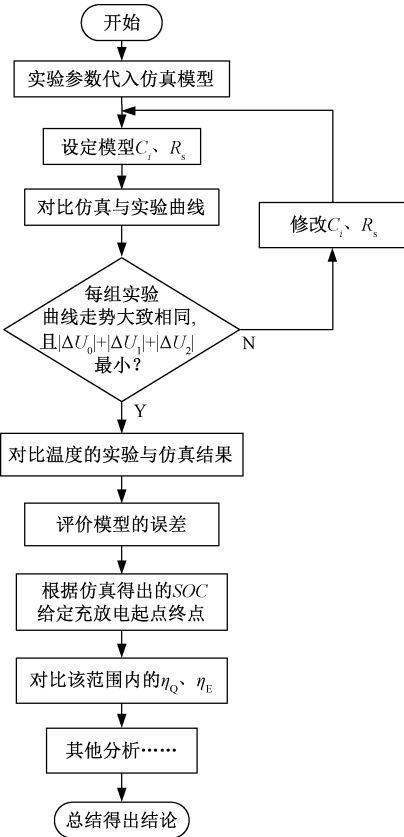


图 9 VRB 实验/仿真数据联合处理流程图
Fig.9 Flow chart of joint processing VRB experiment/simulation data

(2) 根据 VRB 实验与仿真数据联合处理与分析流程,结合仿真模型,采集 VRB 工作过程中相同 SOC 变化范围内的数据分析对比,更加有效地分析其电荷效率和能量效率。

(3)提高 VRB 的充放电电流/功率可以在一定程度上提高电荷效率,但能量效率随之降低。

由于实验条件有限,温度测量精度较低,无法更精确地验证分析。而且本文未考虑副反应及外界温度变化对实验的影响,导致所搭建的模型适用范围受限,该问题有待后续研究。

参考文献 (References):

[1] 桂少婷 (Gui Shaoting). 全钒液流电池故障诊断系统的设计与研究 (Design and research of fault diagnosis system on vanadium redox flow battery) [D]. 合肥: 合肥工业大学 (Hefei: Hefei University of Technology), 2017.

[2] 李鹏, 韩鹏飞 (Li Peng, Han Pengfei). 含高密度可再生能源的交直流混合微网模糊优化运行 (Fuzzy optimal operation of hybrid AC/DC microgrid with high-den-

- sity renewable energy sources) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (9): 63-70.
- [3] Fathima A H, Palanisman K. Modeling and operation of a vanadium redox flow battery for PV applications [J]. Energy Procedia, 2017, 117: 607-614.
- [4] 隋欣, 张晓虎, 陈永翀, 等 (Sui Xin, Zhang Xiaohu, Chen Yongchong, et al.). 基于等效电路模型的串联电池组不一致分布特征仿真分析 (Simulation analysis of inconsistency distribution characteristics of series battery based on equivalent circuit model) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (9): 24-32.
- [5] 朱金华 (Zhu Jinhua). 具有钒液流电池储能变流器控制策略研究 (Control strategy for the vanadium redox flow battery energy storage system) [D]. 沈阳: 沈阳工业大学 (Shenyang: Shenyang University of Technology), 2013.
- [6] 沈海峰, 朱新坚, 曹弘飞, 等 (Shen Haifeng, Zhu Xinjian, Cao Hongfei, et al.). 全钒液流电池动态建模 (Dynamic modeling of all-vanadium flow battery) [J]. 储能科学与技术 (Energy Storage Science and Technology), 2018, 7 (1): 135-140.
- [7] Pugach M, Kondratenko M, Briola S, et al. Zero dimensional dynamic model of vanadium redox flow battery cell incorporating all modes of vanadium ions crossover [J]. Applied Energy, 2018, 226: 560-569.
- [8] König S, Suriyah M R, Leibfried T. Validating and improving a zero-dimensional stack voltage model of the vanadium redox flow battery [J]. Journal of Power Sources, 2018, 378: 10-18.
- [9] 刘记 (Liu Ji). 全钒液流电池双极板流道的优化及流量控制研究 (Study on optimization of bipolar plate channel and flow rate control in VRB) [D]. 长春: 吉林大学 (Changchun: Jilin University), 2011.
- [10] 尹丽, 李欣然, 卢龙辉, 等 (Yin Li, Li Xinran, Hu Longhui, et al.). 考虑离子扩散的全钒液流电池等效电路建模 (Equivalent circuit modeling of all vanadium redox flow battery considering ion diffusion) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSC), 2015, 27 (9): 36-41.
- [11] Merei G, Adler S, Magnor D, et al. Multi-physics model for the aging prediction of a vanadium redox flow battery system [J]. Electrochimica Acta, 2015, 174: 945-954.
- [12] Tang A, Bao J, Skyllas-Kazacos M. Studies on pressure losses and flow rate optimization in vanadium redox flow battery [J]. Journal of Power Sources, 2014, 248: 154-162.
- [13] Blanc C, Rufer A. Multiphysics and energetic modeling of a vanadium redox flow battery [A]. 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies [C]. 2008. 696-701.
- [14] Tang A, Ting S, Bao J, et al. Thermal modelling and simulation of the all-vanadium redox flow battery [J]. Journal of Power Sources, 2012, 203: 165-176.

Synthetical modeling and analysis of vanadium redox flow battery

CHANG Zhi-song¹, WANG Zhi-qiang¹, YUAN Tie-jiang¹, WANG Qian²,
LI Guo-feng¹, WANG Ning-hui¹

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Wuhan Nari Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper proposed a dynamic equivalent circuit simulation model of all vanadium liquid flow battery (VRB) in Simulink. The model is built based on the equivalent circuit model of VRB, including the electromotive force, overpotential and ohmic polarization of the reactor, and the dynamic model analysis of effects of ion diffusion, electrolyte flow loss and temperature change. By substituting experimental parameters into the model, the experimental and simulation curves of constant current/power charge-discharge are compared. Quantitative analysis shows that the error of the model is less than 1%. Finally, the charge efficiency and energy efficiency of VRB are analyzed with simulation data. The results show that if the cyclic current/power increase, the charge efficiency will increase as well, while voltage efficiency will decrease.

Key words: VRB; dynamic equivalent circuit; simulation model