

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181186

计及大规模全钒液流电池储能系统外特性建模与仿真

葛维春¹, 孙恺², 葛延峰¹, 刘宗浩², 史松杰³, 周博然⁴, 黄佳伟⁴, 刘静豪², 张蓉蓉²

(1. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110000; 2. 大连融慧能源科技有限公司, 辽宁 大连 116025; 3. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006; 4. 国网辽宁省电力有限公司大连供电公司, 辽宁 大连 116023)

摘要: 研究了全钒液流电池(VFB)储能系统外部运行特性, 基于 VFB 电化学性质开展了储能系统(ESS)建模仿真工作。系统地分析储能系统实际运行数据并评估其过载运行对调度控制的影响, 对荷电状态(SOC)、电动势以及等效电阻等关键参数进行拟合并得到函数关系。在此基础上, 以戴维南等效电路作为仿真模型主电路, 控制模块计算状态参量的变化值, 并以受控源和受控电阻的方式将状态参量变化实时反馈到主电路, 同时将储能系统过载运行的运行特点嵌入到所建模型中。最后, 通过 Matlab/Simulink 搭建所提模型并仿真运行。仿真运行结果与实测数据对比表明该模型可有效描述储能系统运行外特性, 具有较高的工程应用价值。

关键词: 全钒液流电池; 储能系统; 仿真建模; 外特性; 过载运行; 参数拟合

Modelling and simulation considering external characteristics of large scale VFB energy storage system

GE Weichun¹, SUN Kai², GE Yanfeng¹, LIU Zonghao², SHI Songjie³, ZHOU Boran⁴, HUANG Jiawei⁴,
LIU Jinghao², ZHANG Rongrong⁴

(1. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110000, China; 2. Dalian Conspark Energy Co., Ltd., Dalian 116025, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China; 4. Dalian Electric Power Company, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Dalian 116023, China)

Abstract: The Energy Storage System (ESS) external characteristics of Vanadium Flow Battery (VFB) are studied, and the ESS is simulated based on the VFB electrochemical properties in this paper. Based on the systematic analysis of the actual operation data of ESS and the evaluation of the influence of the overload operation of ESS on the scheduling control, the function relationship is obtained by combining the key parameters such as State of Charge (SOC), electromotive force and equivalent resistance. On this basis, the Thevenin's equivalent circuit is used as the main circuit of the simulation model, and the state parameter change is fed back to the main circuit in real time by means of controlled source and controlled resistance, and the running characteristics of the overload operation of ESS are embedded in the model. Finally, the proposed model is built and simulated by Matlab/Simulink. The comparison between the simulation results and the measured data show that the model can effectively describe the external characteristics of ESS and has high engineering application value.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1766204), Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 2018ZX-10), and Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China "Key Technology and Application of Super Capacity Battery ESS Grid-connected Operation".

Key words: vanadium flow battery (VFB); energy storage system (ESS); simulation modeling; external characteristics; overload operation; parameters fitting

0 引言

可再生能源是能源体系的重要组成部分, 是有

基金项目: 国家自然科学基金(U1766204); 国家电网公司科技项目(2018ZX-10); 国家电网公司总部科技项目“超大容量电池储能电站并网运行关键技术及应用”

利于人与自然和谐发展的能源资源。当前, 可再生能源发展已成为世界各国保障能源安全、加强环境保护、应对气候变化的重要措施。随着我国经济社会的发展, 能源资源和环境问题日益突出, 可再生能源发展已成为我国应对日益严峻的能源环境问题的必由之路。我国颁布的《可再生能源法》明确对可再生能源发电给予全额上网的政策扶持^[1]。随着

可再生能源发电技术日趋成熟, 可再生能源发电在电源侧占比日渐增大^[2]。此外, 有源配电网以及各类分布式能源技术不断发展, 使可再生能源在配网侧渗透率也日益提升^[3-8]。但可再生能源发电比如风力发电和光伏发电出力均具有不确定性和间歇性的特点, 已对电力系统运行的安全稳定性带来风险。储能技术的应用是在传统电力系统基础上增加一个存储电能的环节, 使电力系统变得更加柔性, 很大程度上提升电网运行的安全性、可靠性。随着储能系统在全球范围内的装机规模日渐增大, 大规模储能技术在增强电网对可再生能源发电调度控制能力的积极作用日益凸显^[9-10]。作为大规模储能技术重要技术路线之一, 全钒液流电池因具有寿命长、安全性高、功率与容量可独立设计等优势在电力系统受到越来越高的重视^[11-17]。全钒液流电池电气模型对于探究储能电站工程应用后的影响以及对调度策略的制定都有着重要的指导意义与作用, 但针对适用于电力系统的全钒液流电池储能系统电气模型研究较少。因此, 结合全钒液流电池储能系统实际运行情况, 搭建准确反映全钒液流电池储能系统外特性的电气模型是一个重要的课题。

目前, 对全钒液流电池储能系统电气模型的搭建主要分为两个思路: 一是基于储能电池内部拓扑结构进行电气建模^[18], 二是基于储能系统外部运行特性对电池建模^[19-24]。前者将储能系统电堆内因欧姆极化和浓差极化产生的电化学电阻以及系统内各分支管路的等效电阻进行单节电池的建模与仿真, 进而通过电路的串并联精确得到系统仿真模型。但当对储能系统仿真时, 电气量增多以致矩阵维度扩大影响仿真效率, 使模型在工程应用上受到局限。后者从储能系统运行的角度出发, 以电化学理论为基础, 确定电气量与状态量的相关关系进行电气建模。其中, 文献[25]采用电容与受控电流源并联的电气结构并用电容电压反映系统的 SOC, 以电容电荷量评估系统 SOC 变化, 与液流电池以电能对 SOC 评估的标准并不一致, 不能完全反映液流电池的特性; 文献[26-27]对液流电池进行了细致严谨的研究, 研究表明储能系统不同串并联结构对等效电阻有很大影响, 而对 SOC 以及充放电电流对储能系统影响未开展进一步研究。上述研究从不同角度对全钒液流电池储能电池建模开展研究并取得有效成果, 但对储能系统外特性以及过载运行的影响考虑较少。

本文综述已有研究成果, 以储能系统运行外特性数据为建模基础, 对电气模型的关键参数进行深入分析和参数拟合, 最后结合受控源理论以戴维南等效电路为主电路搭建模型, 提出计及全钒液流电

池储能系统外特性的仿真模型, 并通过仿真验证模型的有效性。

1 全钒液流电池储能系统运行原理

全钒液流电池是通过钒离子的价态变化, 实现化学能与电能的往复转换, 从而实现电能的存储与释放的一种储能技术^[9]。由于全钒液流电池具有安全性好、循环寿命长功率和容量独立设计等优点而在可再生能源消纳, 提升电网的调峰、调频, 提高供电可靠性等方面发挥积极的作用。图 1 为全钒液流电池运行原理图, 正负极电解液通过电泵的推动在电堆中循环, 并在电堆中发生电化学反应完成电能的存储与释放。式(1)、式(2)分别为全钒液流电池正极和负极发生氧化还原反应的反应式。

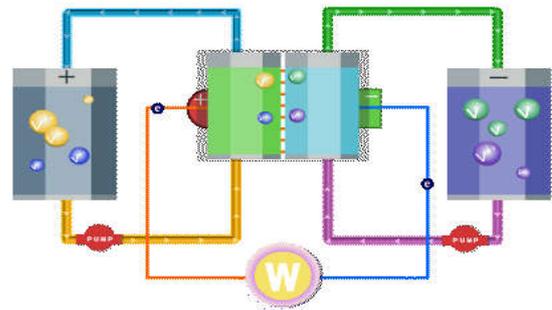
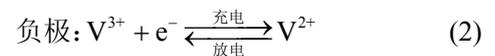
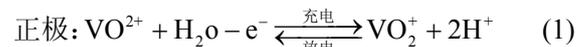


图 1 全钒液流电池运行原理图

Fig. 1 Operating schematic diagram of VFB



为满足大容量储能系统的需求, 全钒液流电池储能系统通常由若干的电堆经过一定串并联电气连接而组成, 具有统一的正负极母线, 后经储能变流器与电网相连。全钒液流电池储能系统与锂电池、铅酸电池储能系统不同, 电解液通过管道分配到各个电堆, 各电堆间通过具有离子导电性能的电解液形成导电通路, 而各电堆串联形成的电势差, 最终会在电解液管路上产生漏电电流, 从而会对全钒液流电池储能系统外特性产生影响。所以基于系统外部运行特性的建模思路更满足运行与工程的需要。

综合分析已有建模特点, 如图 2 所示。本文选择能够准确反映储能系统各方面性能特点的戴维南等效电路进行建模^[20]。同时, 考虑到主电路的电动势和等效电阻受储能系统运行状态即 SOC 和充放电电流影响。因此结合受控源理论, 采用受参数控制电压源作为电路电动势以及用受控电阻作为模型

的等效电阻, 电动势与等效电阻的数值由控制模块动态计算后实时赋值更新。

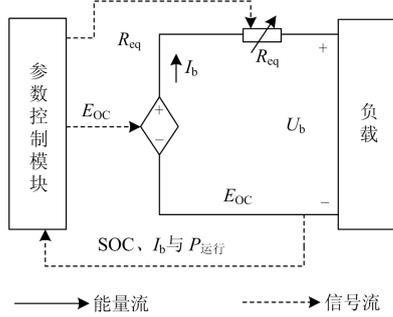


图2 全钒液流电池等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of VFB

考虑到储能系统运行过程中存在较多的影响参量, 因此在建模过程中考虑主要的影响因素而做出如下合理性假设^[25]:

- 1) 不计辅助系统(电泵、液流管路系统等)的能量损耗;
- 2) 忽略储能容量的变化;
- 3) 外部环境温度恒定。

2 全钒液流电池关键参数整定

2.1 全钒液流电池储能系统 SOC

影响全钒液流电池建模准确性的因素很多, 每种因素对预测精度的影响不尽相同。其中, SOC 是表征全钒液流电池运行状态的关键指标, 对于电力系统有效调度电池储能系统具有至关重要的指导意义和作用。国标《GB/T 29840-2013 全钒液流电池 术语》对全钒液流电池 SOC 进行了定义, 即电池实际(剩余)可放出的瓦时容量与实际可放出的最大瓦时容量的比值^[28]。本文参照国标建立 SOC 数学模型, 如式(3)所示。

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{\eta \int P_i dt}{E_{cap}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: P_i 为 t 时刻储能系统的充放电功率; E_{cap} 为储能系统额定容量; η 为储能系统充放电效率。当储能系统充电时 P_i 为正, 当放电时 P_i 则为负。

2.2 全钒液流电池储能系统电动势

依据电化学 Nernst 方程可得

$$E_{OC} = E^\theta + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{C[VO_2^+][V^{2+}][H^+]^2}{C[VO^{2+}][V^{3+}]} \right) + K \quad (4)$$

式中: E_{OC} 为单节电池电动势; E^θ 为正负极标准电极电位差; $C[V]$ 为各价钒离子浓度; K 为与活度

系数相关的常数。假设正负极电解液的初始总浓度及配比相同, 且在充放电过程中不发生离子迁移和副反应, 随着充放电过程的进行, 正负极电解液的 $SOC_{理论}$ 应相同, 因此将 $SOC_{理论}$ 定义代入 Nernst 方程中, 则有

$$E_{OC} = E^\theta + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{SOC_{理论}^2 \cdot C[H^+]^2}{(1 - SOC_{理论})^2} \right) + K \quad (5)$$

单电池电动势 E_{OC} 与 $SOC_{理论}$ 间的关系为储能系统电动势计算提供理论上的支持, 即已知当前时刻的 SOC 由二者间的函数关系可计算得到储能系统的电动势。在储能系统实际运行中, 全钒液流电池的电解液初始浓度及配比往往并不相同, 且钒离子迁移以及副反应发生等因素, 使得电池电动势与 SOC 的关系需要积累大量数据并进行修正。

图3是 E_{OC} 与 SOC 的实际运行数据分布和拟合函数曲线的关系图。由图3可知, 单节电池电动势 E_{OC} 与 SOC 线性化程度与相关性较高。采用多项式函数对参数进行拟合的方法对 E_{OC} 与 SOC 的关系进行表达, 如式(6)所示。通常情况下, 全钒液流电池运行在一定的 SOC 理论区间内, 根据储能系统运行要求, 设置当单节电池电动势为 1.25 V 时, SOC 对应数值为 0, 而当单节电池电动势为 1.5 V 时, SOC 对应数值为 100%。

$$E = \sum_{i=0}^n A_i \cdot SOC^i \quad (6)$$

式中, 多项式系数如表1所示。

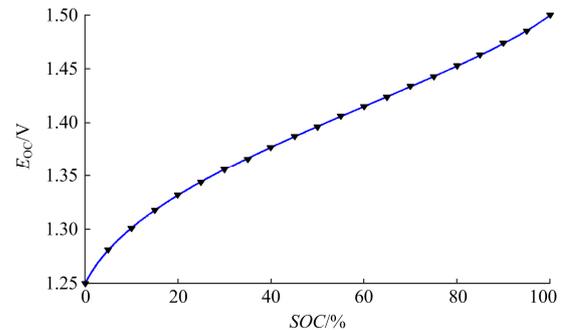


图3 单电池电动势与 SOC 关系图

Fig. 3 Diagram of single cell-stack E_{OC} and SOC

表1 E_{OC} 与 SOC 多项式函数系数

Table 1 Function coefficient of E_{OC} and SOC

参数	数值	参数	数值
A_0	1.25	A_5	58.18
A_1	0.74	A_6	-54.73
A_2	-3.43	A_7	27.77
A_3	14.04	A_8	-5.82
A_4	-36.51	—	—

2.3 全钒液流电池储能系统等效电阻

在全钒液流电池储能系统中，欧姆电阻、浓差极化电阻和电化学反应电阻是电池内阻的三个组成部分。欧姆内阻由电解液电阻、极板电阻、离子交换膜电阻以及其间的接触电阻等组成。其中电解液电阻由于充放电反应的进行，离子价态发生变化，且伴随着H⁺的产生和消失，均会导致电解液电阻发生变化，同时电化学反应极化电阻和浓差极化电阻也会随着SOC的变化而变化。综合考虑以上因素，在储能系统建模过程中，将导致系统运行内部电压降落的综合因素等效为一个受控电阻，用该等效电阻反映储能系统运行过程中的静态特性。

$$R_{eq} = (E_{OC} - U_b) / I_b \quad (7)$$

式(7)是等效电阻与电动势以及充放电电流的关系式。式中， R_{eq} 为储能系统的等效电阻； U_b 与 I_b 分别为储能系统运行时输出端口电压和充放电电流。

由 E_{OC} 与SOC具有函数关系可知 R_{eq} 与SOC和 I_b 是多元函数的关系。通过储能系统实际充放电运行，发现储能系统分别处于充电和放电两种运行状态时，等效电阻分布规律各不相同。因此对充放电两种运行状态的等效电阻进行多元函数拟合，图4是储能系统放电时运行数据与拟合曲面。

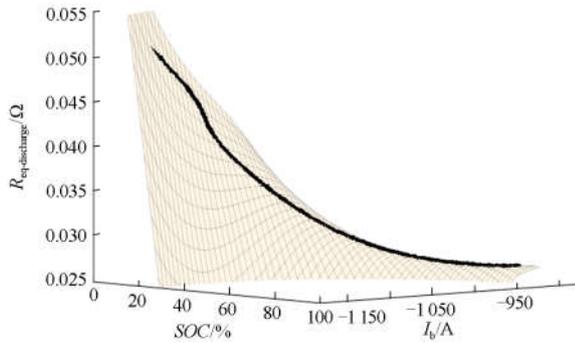


图4 储能系统放电等效电阻变化趋势图

Fig. 4 Diagram of ESS discharge equivalent resistance change

$$R_{discharge} = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^3 B_{ij} \cdot \overline{SOC}^i \cdot \overline{I_b}^j \quad (8)$$

式(8)是放电时储能系统等效电阻的函数关系式。其中， \overline{SOC} 和 $\overline{I_b}$ 分别为SOC与 I_b 的修正值，修正方程如下所示：

$$\overline{SOC} = (SOC - 42.95) / 18.82 \quad (9)$$

$$\overline{I_b} = (I_b + 965.3) / 51.08 \quad (10)$$

式中，多项式函数系数如表2所示。

表2 放电时等效电阻函数系数

Table 2 Function coefficient of equivalent resistance as discharging

参数	数值	参数	数值
B_{00}	0.027 19	B_{02}	-0.004 898
B_{10}	-0.005 116	B_{21}	-0.000 581
B_{01}	0.003 3 8	B_{12}	0.000 129 2
B_{20}	-0.002 024	B_{03}	-0.000 909 1
B_{11}	0.009 041	B_{30}	0.000 301 8

而当储能系统运行在充电过程中时，储能系统等效电阻分布与拟合函数分布如图5所示。

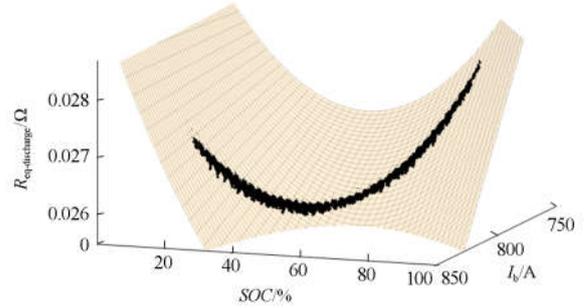


图5 储能系统充电等效电阻变化趋势图

Fig. 5 Diagram of ESS charge equivalent resistance change

储能系统充电时等效电阻经参数拟合得到的函数为

$$R_{charge} = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^3 C_{ij} \cdot \overline{SOC}^i \cdot \overline{I_b}^j \quad (11)$$

$$\overline{SOC} = (SOC - 47.3) / 18.81 \quad (12)$$

$$\overline{I_b} = (I_b - 794.2) / 19.55 \quad (13)$$

式中，多项式函数系数如表3所示。

表3 充电时等效电阻函数系数

Table 3 Function coefficient of equivalent resistance as charging

参数	数值	参数	数值
C_{00}	0.025 75	C_{02}	0.001 102
C_{10}	-0.000 659 8	C_{21}	0.018 84
C_{01}	-0.000 796 6	C_{12}	0.018 79
C_{20}	0.001 47	C_{03}	0.006 255
C_{11}	0.001 894	C_{30}	0.006 255

由于储能系统的电阻是关于SOC与充放电电流的多元函数，且充放电工况下的电阻特性也有较大差异，因此有必要对拟合的结果进行数学评价。本文选用SSE、R-square、Adjusted R-square以及RMSE四个指标评价拟合效果。其中，SSE表示误差的平方和，指标值越小拟合效果越好；R-square为决定系数是在区间0到1的数，数值越接近1，

说明拟合程度越高, 而 Adjusted R-square 是校正决定系数, 其作用与 R-square 相似; RMSE 为误差的均方根值, 其值越小则拟合效果越好。故得到的拟合评价指标表 4 所示。

表 4 拟合评价指标

拟合评价指标	放电电阻拟合	充电电阻拟合
SSE	2.43e-05	3.429e-05
R-square	0.999 8	0.988 9
Adjusted R-square	0.999 8	0.988 9
RMSE	6.511e-05	6.957e-05

分析比较表中拟合指标数据, 各项指标均反映较好, 这说明拟合得到函数值与运行真值相比较误差较小, 得到的多元函数可以应用于全钒液流电池的模型搭建, 建模结果可靠性高。

2.4 全钒液流电池储能系统过载运行

随着可再生能源的大规模并网, 其出力的不确定性对储能系统运行提出更多的要求, 其中储能系统过载运行是出现频率较高的运行工况。而储能系统的过载运行最直接的外部影响是不同过载工况下 SOC 的上下限发生了改变, 即其可利用的充放电容量不再是系统的标称容量。

图 6 是不同过载工况下的实际运行 SOC 上下限值。图中倍率是指系统实际运行功率与额定功率的比值。由图可见, 随着储能系统运行倍率的增加, 储能系统充电实际可达到的 SOC 上限在逐渐下降, 同时储能系统放电实际可达到的 SOC 下限在不断上升, 综合反映出随着储能系统运行倍率的增加储能系统可利用容量在不断减少。通过分析实际运行数据, 当储能系统运行倍率为 2 时, SOC 的上限为 63%, 下限则为 14%, 可利用的 SOC 区间由额定功率下 90%降为此时的 49%。这一特性对储能系统的运行管理以及控制调度策略的制定都会产生影响。因此, 对储能系统建模有必要考虑储能系统的过载运行。

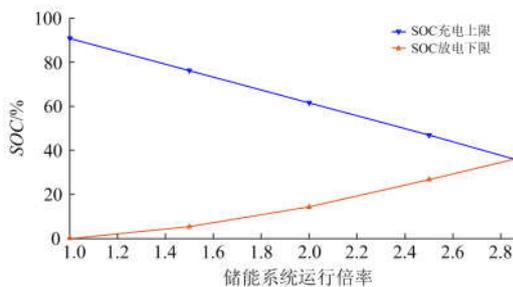


图 6 储能系统过载运行 SOC 上下限分布

Fig. 6 Distribution diagram of ESS' SOC bound as overload operation

考虑到系统过载倍率与 SOC 上下限相关性比较高, 故对此进行参数拟合。

$$SOC_{up} = \sum_{i=1}^6 a_i \lambda^i + 80.8 \quad (15)$$

$$SOC_{down} = \sum_{i=1}^6 b_i \lambda^i + 5.464 \quad (16)$$

$$\lambda = \frac{P_{运行}}{P_{标称}} \times 100\% \quad (17)$$

式中: λ 是储能系统的过载倍率; $P_{运行}$ 和 $P_{标称}$ 分别为储能系统的实际充放电功率和系统标称功率。式中函数参数如表 5 所示。

表 5 过载运行 SOC 上下限拟合函数系数

Table 5 Function coefficient of SOC bound as

overload operation			
SOC 上限参数	数值	SOC 下限参数	数值
a_1	96.78	b_1	-16.25
a_2	-160.4	b_2	10.14
a_3	103.6	b_3	1.244
a_4	-35.87	b_4	-0.504
a_5	6.309	b_5	-0.072 13
a_6	-0.441 3	b_6	0.022 89

3 模型仿真

3.1 模型搭建流程

为验证本文所建的全钒液流电池储能系统模型的可行性以及考虑储能系统过载运行等外特性的必要性, 本文以某公司所研制的 250 kW/1 000 kWh 的全钒液流电池储能系统, 该系统共由 8 个电堆经 4 串 2 并后组成, 其中单个电堆有 52 节单电池组成, 电池系统的直流侧充放电电压范围为 208~312 V。该储能系统在充放电仪上进行 SOC 由 0 到 100%再从 100%到 0 的充放电循环运行若干次, 获取运行数据。根据已获得的数据进行分析作为建模仿真的基础数据, 并在 Matlab/Simulink 仿真平台搭建全钒液流电池储能系统的仿真模型, 其中储能系统电动势、等效电阻和 SOC 等参数变化以控制模块的方式进行参数传递。

模型仿真流程如图 7 所示。给定 SOC 的初始值以及储能系统的基础参数和仿真参数设置; 基于初始 SOC 计算得到等效电阻 R 与电动势 E , 运行主电路, 采集端电压 U_b 和端电流 I_b 并计算系统运行功率 $P_{实际}$; 根据 $P_{实际}$ 计算 ΔT 内系统充放电电量并更新 SOC 值及其上下限; 判断是否满足系统终止条件, 如果满足则停止运行, 如果不满足则进行迭代直至满足条件停止。

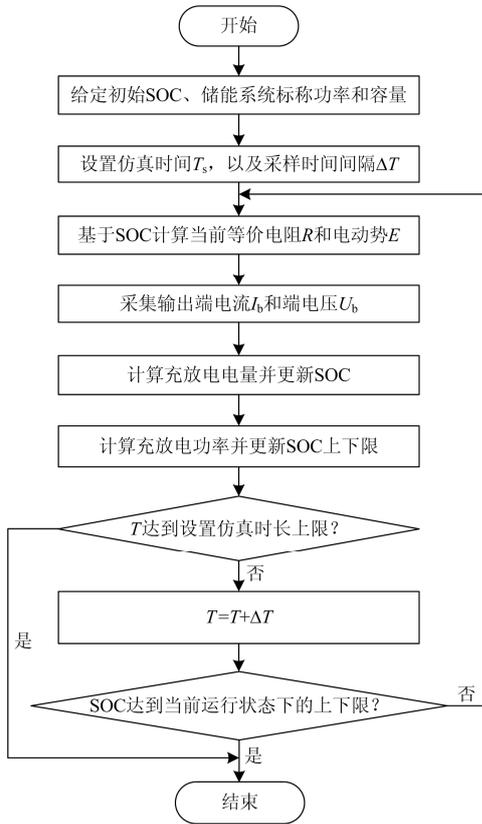


图 7 储能系统模型仿真运行流程图

Fig. 7 Flow chart of ESS model simulation running

3.2 模型仿真结果分析

图 8、图 10 分别为储能系统由初始 SOC 为 50% 分别进行充电和放电过程中的系统 SOC 的变化趋势图。图 9、图 11 分别展示了充电和放电过程中，充放电功率的变化。如图 9 所示，充电过程中并不时刻都是额定功率，所以储能系统 SOC 的可利用边界也在随之动态变化。当储能系统终止运行时，此时充电功率为 316 kW，使得 SOC 终止运行上限为 83%，而不能继续充电，如果要进一步利用 SOC 从 83%到 100%的储能空间，就必须降功率运行。

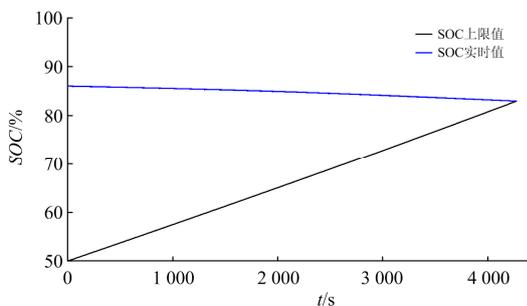


图 8 储能系统充电时 SOC 变化

Fig. 8 Diagram of ESS' SOC change trend as charging

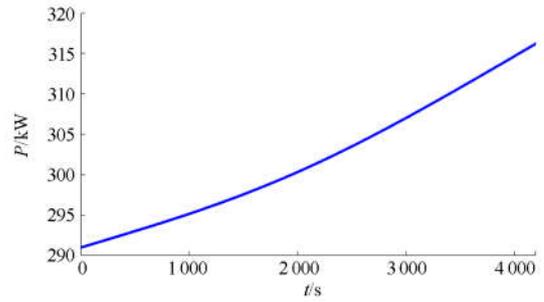


图 9 储能系统充电时功率变化趋势

Fig. 9 Diagram of ESS' power change trend as charging

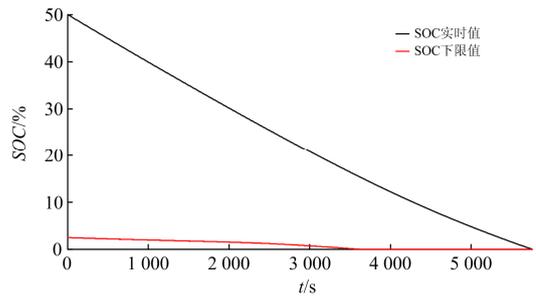


图 10 储能系统放电时 SOC 变化

Fig. 10 Diagram of ESS' SOC discharge trend as discharging

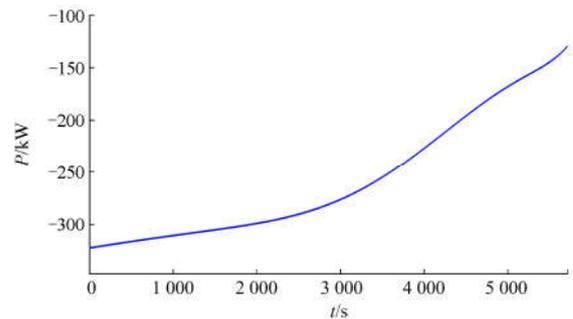


图 11 储能系统放电时功率变化趋势

Fig. 11 Diagram of ESS' power change trend as discharging

图 12、图 13 分别为储能系统充电过程中等效电阻与系统电动势的变化趋势。

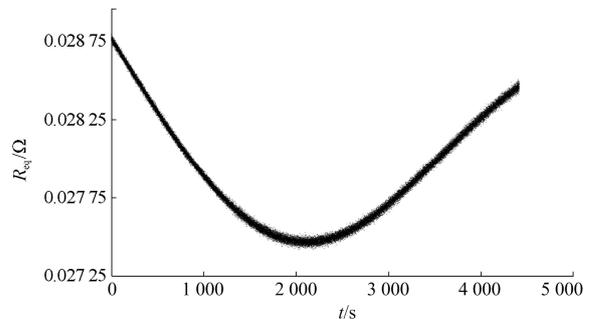


图 12 充电过程中等效电阻变化趋势

Fig. 12 Diagram of ESS equivalent resistance change trend as charging

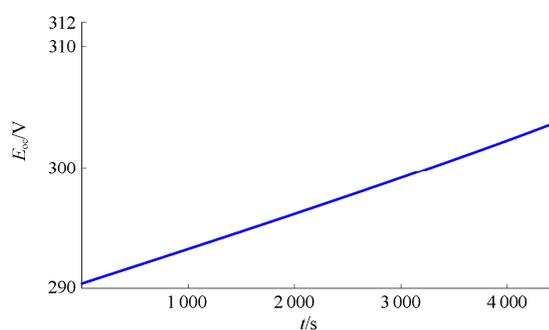


图 13 充电过程中储能系统电动势变化趋势

Fig. 13 Diagram of ESS' E_{OC} change trend as charging

从图 12 可以看出, 在充电过程中, 电池等效内阻呈现先下降后上升的变化趋势。究其原因, 在充电过程中, 正极溶液钒离子由 4 价充电至 5 价, 负极溶液钒离子由 3 价充电至 2 价。由于这一反应过程释放 H^+ , 这将导致溶液电导率升高, 进而使溶液电阻明显下降。当电池充电接近满电状态时, 电解液中可利用的反应物离子浓度急剧下降, 电池电极表面反应物不足, 此时由浓差造成的电阻急剧增加, 该电阻增加幅度超过由于电解液电阻降低的变化幅度, 使得电池整体电阻变化趋势由降低转为增加。由图 12 还可以看出, 在充电过程中, 由于 SOC 以及充电电流的变化, 仿真中等效电阻变化趋势与实际运行的规律相同。

由图 13 可以看出, 充电过程中, 随着 SOC 逐渐增加, 储能系统电动势也随之增加, 由于储能系统处于过载运行, 影响 SOC 的上限值, 因此其电动势也不能达到最大值 312 V。

综上, 该模型能够较好地反映储能系统关键参数的变化趋势, 考虑储能系统过载运行特性的模型更加符合储能系统的实际运行情况, 仿真的结果对储能系统管理以及调度策略制定都具有指导意义, 对全钒液流电池储能系统的工程应用起到积极作用。

4 结论

全钒液流电池储能技术对促进解决可再生能源并网消纳问题具有积极意义。而建立准确反映全钒液流电池实际运行外特性的电气模型是其在电力系统中应用的前提与基础。本文基于全钒液流电池外特性建立储能系统的仿真模型, 具有如下优点:

1) 模型以全钒液流电池储能系统的实际运行数据作为建模的基础。模型中以储能系统作为建模主体, 考虑了 SOC, 储能系统电动势, 以及等效电阻等因素的影响, 并依据实测数据拟合得到参数间

函数关系式。

2) 建模过程中, 以含受控源的戴维南等效电路作为模型的主电路, 并根据参量间关系确定主电路和控制模块参数传递关系。根据对充放电功率积分准确计算 SOC 当前值, 进而计算电动势与等效电阻, 动态的仿真储能系统运行状态, 使得该模型更加贴近储能系统的运行的外特性。

3) 在储能系统中仿真运行中, 考虑储能系统过载运行影响, 根据储能系统运行过载倍率计算出 SOC 的可用上下限, 为制定合理的储能系统调度运行策略提供基础。模型更加符合储能系统的实际运行情况, 对全钒液流电池储能系统的工程应用起到积极作用。

参考文献

- [1] 周玮, 彭昱, 孙辉, 等. 含风电场的电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 13-18.
ZHOU Wei, PENG Yu, SUN Hui, et al. Dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 13-18.
- [2] 丁明, 陈忠, 苏建徽, 等. 可再生能源发电中的电池储能系统综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 19-25.
DING Ming, CHEN Zhong, SU Jianhui, et al. An overview of battery energy storage system for renewable energy generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 19-25.
- [3] 李振坤, 陈思宇, 符杨, 等. 基于时序电压灵敏度有源配电网储能优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4630-4640.
LI Zhenkun, CHEN Siyu, FU Yang, et al. Optimal allocation of ESS in distribution network containing DG based on timing-voltage-sensitivity analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4630-4640.
- [4] ADEL M, KHANDKER M A, HUSSEIN I, et al. Energy management and control system for laboratory scale microgrid based wind-PV-battery[J]. Sustainable Energy, 2017, 8: 145-154.
- [5] 刘天琪, 江东林. 基于储能单元运行方式优化的微电网经济运行[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 45-50.
LIU Tianqi, JIANG Donglin. Economic operation of microgrid based on operation mode optimization of energy storage unit[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 45-50.
- [6] 王向红, 钱文姝. 基于改进 PSO 算法的微电网调度方

- 法[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(7): 53-57.
WANG Xianghong, QIAN Wenshu. A new scheduling method of microgrid based on improved PSO algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(7): 53-57.
- [7] 张旭升, 李瑞生, 黄利军, 等. 基于分层储能的主动配电网需求响应控制策略研究及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 41-49.
ZHANG Xusheng, LI Ruisheng, HUANG Lijun, et al. Research and application on demand response based on hierarchical power storage[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 41-49.
- [8] 毕大强, 葛宝明, 王文亮, 等. 基于钒电池储能系统的风电场并网功率控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13): 72-78.
BI Daqiang, GE Baoming, WANG Wenliang, et al. VRB energy storage system based power control of grid-connected wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(13): 72-78.
- [9] 许汉平, 李姚旺, 苗世洪, 等. 考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源-荷-储”协调互动优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 18-25.
XU Hanping, LI Yaowang, MIAO Shihong, et al. Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on “source-load-energy storage” coordination in power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 18-25.
- [10] 吴雅仪, 陈红坤, 徐坤领, 等. 考虑双时间尺度调度周期的储能最优容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 106-113.
WU Yayi, CHEN Hongkun, XU Kunling, et al. Optimal capacity allocation of energy storage system considering two time scale scheduling cycles[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 106-113.
- [11] MEHDI Z, MOHAMAD E H G, JOSEP M G, et al. Distributed control of battery energy storage systems for voltage regulation in distribution networks with high PV penetration[J]. Smart Grid, 2018, 9: 3582-3593.
- [12] 刘宗浩, 张华民, 高素军, 等. 风场配套用全球最大全钒液流电池储能系统[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(1): 71-77.
LIU Zonghao, ZHANG Huamin, GAO Sujun, et al. The world's largest all-vanadium redox flow battery energy storage system for a wind farm[J]. Energy Storage Science and Technology, 2014, 3(1): 71-77.
- [13] 王哲, 刘聪, 迟建福, 等. 光储联合单元在区域配电网的优化配置研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(5): 104-108.
WANG Zhe, LIU Cong, CHI Jianfu, et al. Research on PV-ESS capacity optimization in distribution system[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(5): 104-108.
- [14] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等. 独立光伏系统光储容量优化配置方法[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1271-1276.
WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Optimized capacity configuration of photovoltaic generation and energy storage device for stand-alone photovoltaic generation system[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1271-1276.
- [15] 李国杰, 唐志伟, 聂宏展, 等. 钒液流储能电池建模及其平抑风电波动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 115-119.
LI Guojie, TANG Zhiwei, NIE Hongzhan, et al. Modelling and controlling of vanadium redox flow battery to smooth wind power fluctuations[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 115-119.
- [16] JIN T, ZHANG Y C. Coordinated control strategy of a battery energy storage system to support a wind power plant providing multi-timescale frequency ancillary services[J]. Sustainable Energy, 2017, 8: 1140-1153.
- [17] 胡国珍, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于液流电池储能的光伏发电系统容量配置及成本分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 260-267.
HU Guozhen, DUAN Shanxu, CAI Tao, et al. Sizing and cost analysis of photovoltaic generation system based on vanadium redox battery[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 260-267.
- [18] 李蓓, 郭剑波, 陈继忠, 等. 液流储能电池系统支路电流的建模与仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 1-7.
LI Bei, GUO Jianbo, CHEN Jizhong, et al. Modelling and simulation of shunt current in redox flow battery[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(27): 1-7.
- [19] 周文源, 袁越, 傅质馨, 等. 全钒液流电池电化学建模与充放电分析[J]. 电源技术, 2013, 37(8): 1349-1353.
ZHOU Wenyuan, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Electrochemical model of all vanadium redox flow battery and its charge/discharge analysis[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(8): 1349-1353.
- [20] 王亚光, 王秋源, 陆继明, 等. 大容量液流电池系统数

- 学模型与仿真[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 72-78.
- WANG Yaguang, WANG Qiuyuan, LU Jiming, et al. Mathematical model of LCFBS and simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 72-78.
- [21] MIN C, GABRIEL A, RINCON M, et al. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(2): 504-511.
- [22] 迟晓妮, 朱敏刚, 吴秋轩. 基于等效模型的全钒液流电池运行优化控制研究[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(3): 530-538.
- CHI Xiaoni, ZHU Mingang, WU Qiuxuan. Research on optimal operation control based on the equivalent model of VFB system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(3): 530-538.
- [23] 邱亚, 李鑫, 魏达, 等. 全钒液流电池的柔性充放电控制[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(1): 78-84.
- QIU Ya, LI Xin, WEI Da, et al. Flexible charge-discharge control of vanadium redox battery[J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(1): 78-84.
- [24] 刘湘东, 刘承志, 杨梓杰, 等. 基于无迹卡尔曼滤波的全钒液流电池状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1769-1777.
- LIU Xiangdong, LIU Chengzhi, YANG Zijie, et al. States estimation of vanadium redox flow battery based on unscented kalman filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1769-1777.
- [25] 李蓓, 田立亭, 靳文涛, 等. 规模化全钒储能电池系统级建模[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2194-2201.
- LI Bei, TIAN Liting, JIN Wentao, et al. Modeling of scaled vanadium redox flow battery system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2194-2201.
- [26] 陆秋瑜, 胡伟, 郑乐, 等. 多时间尺度的电池储能系统建模及分析应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 86-93.
- LU Qiuyu, HU Wei, ZHENG Le, et al. Modeling and analysis of battery energy storage systems in multi-time scales application[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 86-93.
- [27] 彭亚凯, 刘飞, 李爱魁, 等. 全钒液流电池电气模型建模与验证[J]. 水电能源科学, 2012, 30(5): 188-190.
- PENG Yakai, LIU Fei, LI Aikui, et al. Electrical modeling and validation of vanadium redox battery[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(5): 188-190.
- [28] 中国国家标准化管理委员会. 全钒液流电池术语: GB/T 29840—2013[S]. 北京: 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 2013.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Vanadium flow battery terminology: GB/T 29840—2013[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2013.

收稿日期: 2018-09-18; 修回日期: 2018-12-29

作者简介:

葛维春(1961—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统分析计算及科技管理工作; E-mail: gwc@ln.sgcc.com.cn

孙 恺(1990—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为含新能源与储能电力系统经济调度。E-mail: kai.sun@ronghuienergy.com

(编辑 姜新丽)