

# 液流储能电池系统支路电流的建模与仿真分析

李蓓, 郭剑波, 陈继忠, 惠东

(中国电力科学研究院, 北京市海淀区 100192)

## Modelling and Simulating of Shunt Current in Redox Flow Battery

LI Bei, GUO Jianbo, CHEN Jizhong, HUI Dong

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** Shunt current loss of vanadium redox flow battery (VRB) was researched and analyzed. The equivalent circuit of shunt current was modelling, and the value and distribution of shunt current were obtained by simulation; and then the shunt current influence on the external characteristics of VRB was analyzed. Based on the classic battery model and controlled unit, the VRB model including shunt current factor was established. From the simulation, the influence on battery system external characteristics became obvious with the large-scale application of VRB. To reduce the loss of shunt current can improve the efficiency of VRB and be useful to keep the consistency of voltage of battery internal modules. Study on shunt current of large scale VRB system has very practical significance, especially for project pre-planning and its operation and maintenance.

**KEY WORDS:** vanadium redox flow battery; shunt current; battery characteristics; simulation; battery modeling

**摘要:** 对全钒液流电池所特有的支路电流损耗进行理论分析和研究, 建立支路电流等效电路模型, 通过仿真计算对支路电流进行量化分析, 并得出支路电流的分布规律及其对全钒液流电池外特性的影响。同时基于化学电池的经典三阶模型, 通过引入受控元件的思想, 提出包含支路电流损耗因素的全钒液流电池模型, 并通过仿真对比分析发现, 大规模全钒液流电池系统的支路电流损耗对电池系统外特性影响显著。尽可能地消减支路电流损耗, 对于提高电池储能系统的效率和保障电池系统内部模块的电压一致性至关重要, 尤其在电力系统领域大规模应用全钒液流储能电池时, 支路电流的研究对于工程前期规划设计和系统运行的操作维护, 均具有实际应用价值。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50907067); 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2010CB227206)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50907067); The National Basic Research Program of China (973 Program)(2010CB227206)。

**关键词:** 全钒液流电池; 支路电流; 电池特性; 仿真; 电池建模

## 0 引言

随着可再生能源发电的推广以及智能电网研究的兴起, 将电力储能技术作为电力系统安全稳定运行的补充环节的必要性日益凸现, 以化学电池为代表的化学储能方式因其规模灵活、造价适中、安装维护简便等优势在电力系统中拥有广泛的应用空间。全钒液流电池(以下简称全钒电池)作为新兴化学电池<sup>[1-5]</sup>的代表, 具有成本低、寿命长、功率与能量规模可独立设计、借助物理手段可实现瞬时充电等特点, 成为近期大规模推广的主要电力储能方式之一。

全钒电池包括电堆和电解液两部分, 电堆内部通过单电池的串并联实现满足需求的功率规模和电压等级; 液路管道则一律采用并联结构, 保障电堆内部电解液的一致性。为提高电池能量密度, 全钒电池内部通常采用双极性结构, 而电解液则不断往复循环, 以便提供反应物并带走反应产物和热量。然而, 串联的单电池之间的液路通道会造成离子短路, 会产生不经主回路而通过液流支路和总管路的支路电流<sup>[6-7]</sup>, 从而导致电能的损失和电池系统效率的下降。从电化学专业角度分析, 这一寄生反应只事关电池效率; 而从电气工程应用角度而言, 大功率、高容量的电池系统规模将使这一负面影响放大, 除了浪费能量、影响效率, 还可能导致电堆内部各单电池一致性的不均衡, 甚至加速液流管道腐蚀而影响整个储能系统的安全可靠性。可见, 用于电力领域的全钒电池系统的支路电流问题, 是不可忽视的研究要点。

关于支路电流的研究，最早在 20 世纪 80 年代初美国航天总署 NASA 开展的铁铬系液流电池研究<sup>[6,8]</sup>中有所提及并简单介绍了支路电流的实验测试方法及消减影响的途径等；文献[9]针对液流电池的特有结构分析了支路电流在规模化电池系统中对系统效率的影响，并介绍了降低支路电流损耗的方法；文献[10]基于锌溴系液流电池搭建了支路电流等效电路模型，并总结了支路电流的分布规律；文献[11]针对双极堆式电池的支路电流现象，从电化学专业角度将电堆内部各因素对支路电流的影响进行了定性、定量分析。可见，前人已对支路电流的成因及其影响因素进行了深入细致地研究<sup>[6-13]</sup>并得到共识，关于电池建模也早已形成几种经典模型<sup>[14-19]</sup>，然而，国内相关专业近十几年来对液流电池体系支路电流的研究却几乎处于空白，并且在众多等效电路模型中，也未见有人将不可忽略的支路电流损耗问题引入液流电池储能系统建模分析。为了搭建能够更加接近真实地反映液流电池系统特性的电池模型，本文针对液流电池体系所存在的支路电流损耗展开了详细的建模研究及仿真分析。

### 1 全钒电池系统的支路电流模型

#### 1.1 支路电流模型

建模求解支路电流的原因有两点。首先，对于大规模封装成型的液流电池系统，采用实验方法测量支路电流的方法可执行度较低，若建立其等效电路模型，则可借助程序计算快速获得结论；其次，由于全钒电池液路管道的布局与设计对支路电流影响较大，例如管道直径和长度等，支路电流过大将对电池系统特性带来不良影响，因此有必要预先估算某设计方案是否满足支路电流损耗的参数要求，因此需要借助支路电流的仿真模型和计算程序

进行参数计算。

液流电池体系的支路电流成因比较简明。以全钒电池为例，其双极堆式结构如图 1 所示。正负极电解液经过液路集总管道和分流支路管道分别进入各半电池，使得不同电池间具有离子通道；同时电池的电气连接，使得电池间具有电子通道。当电子通道与离子通道构成闭合回路时，即使外电路断开，仍有电流产生。该电流不经过有效负载，属于漏电流，在液流氧化还原电池体系中也称为支路电流。

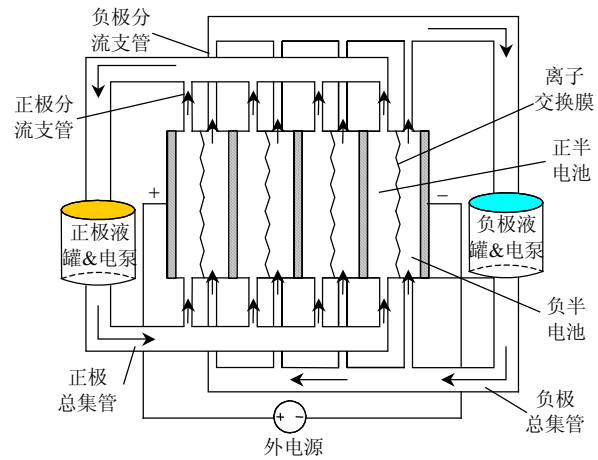


图 1 双极堆式全钒电池结构示意图

Fig. 1 Description of bipolar pile-type VRB

当电池两极外接电源时，流经电池内部的总电流  $I_T$  经电池正极端进入第一节单电池的正半电池溶液，其等效内阻记作  $R_e/2$ 。然后随着  $I_T$  继续传递，大部分流入电池的负半电池，但存在小分支电流通过连接各单电池的分流支管道汇集到集总管道，形成支路电流。基于图 1 以及支路电流的形成原理，可以得到支路电流的等效电路模型见图 2。为方便描述，将总电流  $I_T$  在正极端开始流经的第一个  $R_e/2$  与在负极终端流出时的  $R_e/2$  相连接，因此在等效电

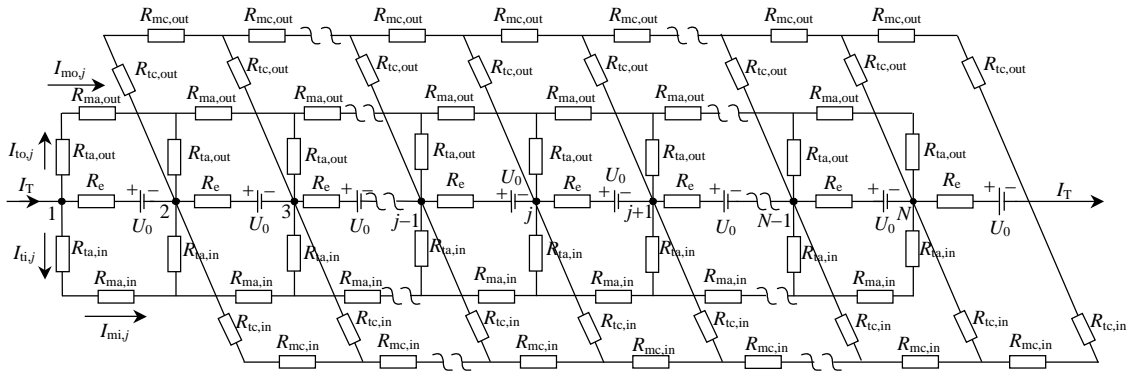


图 2 支路电流等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of shunt current



在已知  $I_T$ ,  $U_0$ ,  $R_c$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  和  $N$  的情况下, 借助基本运算工具即可获得  $I_{e,j}$ ,  $I_{2,j}$  和  $I_{3,j}$ , 进而推算出系统支路电流。

支路电流的影响因素很多。根据欧姆定律, 凡对电堆电压或液相电阻有影响的因素均对支路电流有一定影响, 除了液路管道的直径和长度等, 还包括电池的极化、温度、电池内阻、单体串联节数等。而对于既定电池系统, 支路电流可以简单看作是系统电压以及充放电电流的函数, 以便在电池系统建模研究中的应用。

## 2 支路电流模型仿真分析

通过实验测试方法获得的关于支路电流的定性分析结论, 可以作为其仿真研究中的校验依据。实验手段可以见证支路电流现象的存在<sup>[20]</sup>, 却便于测出所有电池结构下的支路电流数值。要想量化支路电流, 则可根据支路电流模型进行计算。

本文以功率容量为 10kW 的全钒电池模块为例分析支路电流特性及其对电池系统特性的影响。模型各参数参见表 1。

表 1 模型参数

Tab. 1 Example parameters

参数	数值
电池串联节数 $N$	40
总电流 $I_T/A$	180
模块开路电压/V	56
电池单体内阻 $R_c/\Omega$	0.036
分流支路管道电阻 $R_2/\Omega$	550
集总管道电阻 $R_3/\Omega$	60

本文通过支路电流模型仿真运算, 得到与实验相一致的结论。如图 4、5 所示, 支路电流随串联电池节数  $N$  的增大而增大, 其所占电池总电流  $I_T$  的比例也增大; 支路电流的大小几乎呈对称分布, 位于串联结构中位置的单位电池的支路电流略高于位于两端位置的单位电池。而值得注意的是, 当电池串联节数超过一定数值时, 支路电流所占比例不再显著增加, 如图 5 所示, 这对于电池成组设计中需要通过串联较多电池单体来实现较高电压平台方面而言, 是个有利的技术实施依据。

同时, 支路电流不仅受电池串联节数  $N$  的显著影响, 还与电池充放电电流有关。支路电流的方向始终与充电电流相反, 而与放电电流一致。如图 6 所示, 充电过程中的支路电流大于放电过程中的支

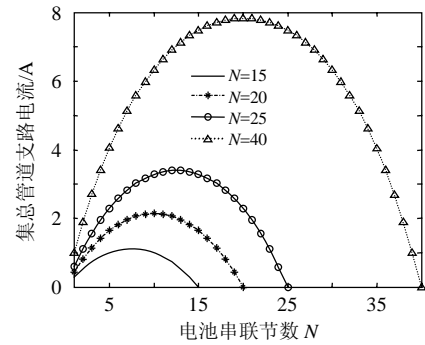


图 4 支路电流随  $N$  的变化

Fig. 4 Shunt current changes with different  $N$

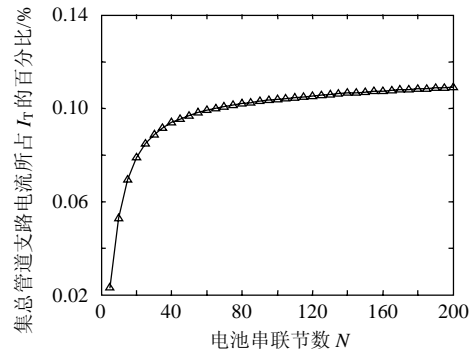


图 5 支路电流所占  $I_T$  比例随  $N$  的变化

Fig. 5 Ratio of shunt current changes with  $N$

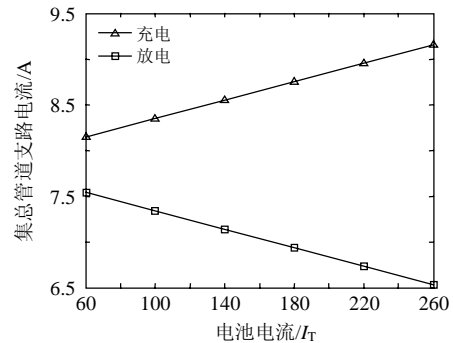


图 6 支路电流随充放电电流的变化

Fig. 6 Shunt current changes with total current

路电流; 充电时, 支路电流随着充电电流的增加而增加, 放电时, 支路电流随着放电电流的增加而减小。这是因为电池充放电电流越大, 极化现象越显著, 而极化电压造成的过电势也越大。因此若忽略电池系统在充放电过程中内阻的差异性, 根据欧姆定律, 充电过程中的支路电流将显著大于放电过程中的支路电流。因此充电电流增大, 过电势则增大, 而电压平台越高、支路电流就越大; 而放电反之。此外, 从这一角度也可以解释随着电流增大、极化影响显著, 电池库仑效率反而会升高的结论。

支路电流间接影响电池库仑效率和能量效率，却对电压效率影响不大。但是支路电流却会干扰电池系统内部单位电池或单位模块的电压一致性。实验中可以发现，在  $N$  个串联结构的单电池或单模块中，位于中间位置的单位电池电压略低于位于两端位置的单位电池。而通过支路电流的模型仿真，得到了相似结果，如图 7 所示，显然，由于支路电流呈现抛物线变化规律而导致单位电池电压呈现中间低、两头翘的不均衡现象。显然，支路电流对电压一致性的影响，不利于电池成组系统性能的有效发挥，并影响电池成组设计方案的选择。因此，在全钒电池储能系统规划前期就应该谨慎分析支路电流问题。

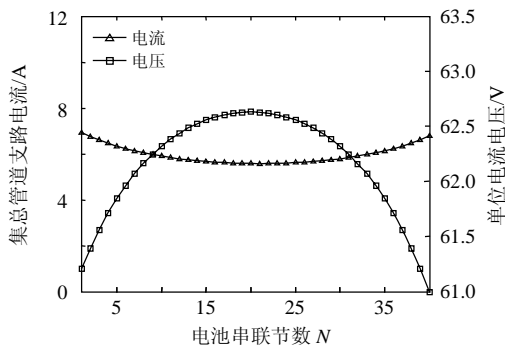


图 7 与支路电流对电压一致性的影响

Fig. 7 Voltage compliance influenced by shunt current

此外，支路电流还对电池系统整体运行特性有所干扰。在低压电力系统运行过程中，难免会产生短路故障。电池储能系统一旦发生短路，相关电气量会发生急剧变化，如电流突增、电压骤降等，极可能损坏电池储能系统，因此需要掌握全钒电池堆短路电流的大小及其变化规律，这对于继电保护的配置和电气设备的选择都非常重要。然而，由于支路电流的存在而容易误导数据分析的结论。例如，根据实验显示串联电堆数越多则短路电流越大，经分析知这是因为串联较多的电堆而导致支路电流较大，从而使得电流分流效应显著，若此时错误的理解为电池系统所能承受的短路电流也会越强，将导致串联电路两端的电池承受更大的短路电流，从而增大电池损坏的几率；此外，实验现象会显示短路电流将随电池荷电状态(state of charge, SOC)的增加而增大，这同样是由于支路电流也会随 SOC 增加而增大，若此时也错误理解为系统承受短路电流的能力将增强，同样会增加电池的损坏几率。以上分析再次说明在电力系统应用中，支路电流对大

规模全钒电池储能系统的影响不宜忽略。

### 3 包含支路电流的全钒电池模型

#### 3.1 全钒电池模型

全钒电池与其他化学电池的工作原理基本相同，区别在于其电解液在电堆体外储存，从而实现全钒电池的功率与能量可分别独立设计，但却需要借助外力不断将电解液泵入电堆内，于是特有的液流管道结构使得全钒电池具有支路电流这一干扰项。而当电池储能系统规模较大时，其干扰将被放大，因此在电池系统建模时不得不予以考虑。本文基于电池的经典三阶模型，补充了支路电流寄生环节，提出包含支路电流损耗的全钒电池模型，如图 8 所示。

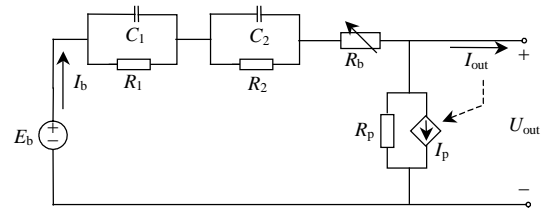


图 8 全钒电池模型

Fig. 8 Equivalent circuit model of VRB

根据第 2 节对全钒电池支路电流特性的研究与分析，本文借鉴受控元件的工作原理，引入流控电流源  $I_p$  用来描述电池系统的支路电流损耗；此外，用电压源  $E_b$  描述电池容量； $U_{out}$  描述电池输出电压； $R_1//C_1$  与  $R_2//C_2$  两个阻容网络描述由于电池的极化现象；可变电阻  $R_b$  描述电池内阻。

#### 3.2 模型仿真分析

1)  $I_p=0$ 。

当忽略支路电流损耗时，电池系统描述为：

$$U_{out} = E_b + U_{11} + U_{22} + I_b R_b \quad (16)$$

$$\dot{U}_{11} = \frac{I_b}{C_1} - \frac{U_{11}}{C_1 R_1} \quad (17)$$

$$\dot{U}_{22} = \frac{I_b}{C_2} - \frac{U_{22}}{C_2 R_2} \quad (18)$$

开路状态下电池电势为

$$U(t) = E_b + I_b R_1 e^{-t/(R_1 C_1)} + I_b R_2 e^{-t/(R_2 C_2)} + I_b R_b \quad (19)$$

借助仿真平台测得此时电池系统的放电曲线如图 9 所示。

2)  $I_p=f(I_{out}, U_{out})$ 。

考虑支路电流的影响时，根据 1.2 节描述的支

路电流模型, 将其抽象为流控电流源并带入电池系统模型, 假设电池系统结构已确定, 则受控源的控制量可以只考虑电池的输入输出总电流  $I_T$ , 在图 8 中用  $I_{out}$  表示是与电池外部相通的电流。包含支路电流模型的电池系统放电曲线见图 10。

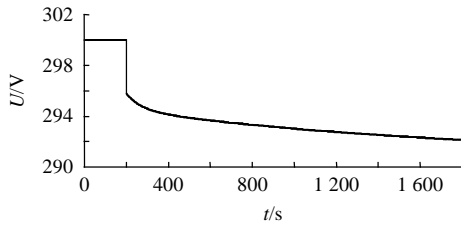


图 9 不计支路电流时的电池放电曲线  
Fig. 9 Without shunt current

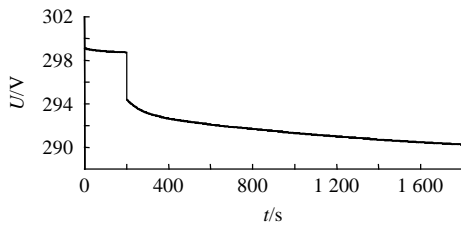


图 10 计及支路电流时的电池放电曲线  
Fig. 10 Consider about the shunt current

对比图 9、10 可见, 当考虑支路电流损耗时, 即使外电路断开, 没有充放电操作, 电池系统内部仍有电能损耗, 表现为电压降落; 而当正常放电时, 两种情况下的放电特性差异也很明显。尤其当全钒电池储能系统规模较大时, 根据第 2 节结论, 支路电流损耗的负面影响会被放大, 可见, 支路电流损耗在电力系统应用范畴中, 不再是可以被忽略的液流体系电池固有特性问题, 而应当予以充分的研究与讨论, 并尽可能的采取措施消减其负面效应。

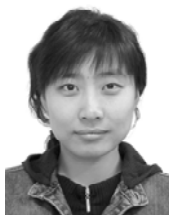
## 4 结论

本文通过建立支路电流等效电路模型提出量化支路电流的方法, 通过算例得出与实验结论相一致的支路电流分布规律, 并解释了支路电流对电池外特性的影响现象; 本文借助受控元件的思想对全钒电池的支路电流损耗加以描述, 更加接近真实地反映了电池外特性, 并通过仿真说明支路电流对大规模电池系统性能的影响不宜忽略, 应当在前期系统的规划与设计过程中就给予考虑, 包括管路的设计与布局、电堆成组结构设计、电池工作模式及参数设定等多方面, 从而将电池系统的特性发挥到最优。

## 参考文献

- [1] Tokuda N, Kumamoto T, Shigematsu T, et al. Development of a redox flow battery system[J]. SEI Technical Review, 1998, 1(45): 88-94.
- [2] Shibata A, Sato K. Development of vanadium redox flow battery for electricity storage[J]. Journal of Power Engineering, 1999, 13(3): 130-135.
- [3] Skyllas Kazacos M, McDermott R. Vanadium charging cell and vanadium dual battery system[R]. AU: 2815289, 1998-07-051.
- [4] Rychcik M, Skyllas Kazacos M. Characteristics of new all-vanadium redox flow battery[J]. Journal Power Sources, 1988(22): 59-67.
- [5] Skyllas Kazacos M, Kasherman D, Hong R, et al. Characteristics and performance of 1kW vanadium redox battery[J]. Journal of Power Sources, 1991(35): 399-404.
- [6] Stalnaker D K, Lieberman A. Design and assembly considerations for redox cells and stacks[R]. DOE/NASA/12726-10, NASA TM-82672, 1981.
- [7] 蔡年生. 双极堆式电池中的漏电电流[J]. 电池, 1993, 23(5): 234-237.  
Cai Niansheng. Leaked current in bipolar pile-type battery[J]. Battery, 1993, 23(5): 234-237(in Chinese).
- [8] Norman Hagedorn, Hoberecht M A. NASA redox cell stack shunt current, pumping power, and cell performance tradeoffs[R]. Final Report(NASA), DOE/NASA/12726-11, NASA TM-82686, 1982.
- [9] 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(7): 668-674.
- [10] Kanari K, Nozaki K, Kaneko H, et al. Numerical analysis on shunt current in flow batteries[J]. Proceedings of the 25th Intersociety, 1990, 3(12-17): 326-331.
- [11] 桂长清. 蓄电池组的连接方式与可靠性[J]. 通信电源技术, 2003, 3(1): 10-15.  
Gui Changqing. Study on grouping technology and reliability of batteries[J]. Telecom Power Technologies, 2003, 3(1): 10-15(in Chinese).
- [12] 王震坡. 不一致性对动力电池组使用寿命影响的分析[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(7): 577-580.  
Wang Zhenpo. An analysis on the influence of inconsistencies upon the service life of power battery packs[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(7): 577-580(in Chinese).
- [13] Rangarajan S K, Yegnanarayanan V. Current losses in a bipolar cell-an analysis of the Tafel regime [J]. Electrochimica Acta, 1997, 42(1): 153-165.

- [14] Lu C F, Liu C C, Wu C J. Dynamic modelling of battery energy storage system and application to power system stability[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1995, 142(4): 429-435.
- [15] Jantharamin N, Zhang L. A new dynamic model for lead-acid batteries[C]//Power Electronics, Machines and Drives, 4th IET Conference, New York, 2008.
- [16] Scammana D P, Reade G W, Roberts E P L. Numerical modelling of a bromide-polysulphide redox flow battery, part 1: modelling approach and validation for a pilot-scale system[J]. Journal of Power Sources, 2009, 189(12): 1220-1230.
- [17] Scammana D P, Reade G W, Roberts E P L. Numerical modelling of a bromide-polysulphide redox flow battery, part 2: evaluation of a utility-scale system[J]. Journal of Power Sources, 2009, 189(12): 1231-1239.
- [18] Shah A A, Watt-Smith M J, Walsh F C. A dynamic performance model for redox-flow batteries involving soluble species[J]. Electrochimica Acta, 2008(53): 8087-8100.
- [19] Li M H, Funaki T, Hikiyara T. A study of output terminal voltage modeling for redox flow battery based on charge and discharge experiments[C]//Power Conversion Conference, Nagoya, 2007.
- [20] 李蓓, 郭剑波, 惠东, 等. 液流储能电池在电网运行中的效率分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(35): 1-6.
- Li Bei, Guo Jianbo, Hui Dong, et al, Efficiency analysis of redox flow battery applied in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(35): 1-6(in Chinese).



李蓓

收稿日期: 2011-05-16。

作者简介:

李蓓(1980), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统自动化及储能技术的应用研究, libei@epri.ac.cn;

郭剑波(1960), 男, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统规划、运行和电网可靠性及能量转换技术等研究。

(责任编辑 张媛媛)