

一种基于参数校正器的串联型电池系统等效电路模型

以锂离子电池为载体的电池储能系统为可再生能源大规模接入电网提供了一种有效的方式。多个电池单体经串联可扩大电池系统容量，即串联型电池系统。以磷酸铁锂电池为研究对象，针对因电池单体性能参数不一致导致串联型电池系统工作特性难以被准确表征的问题，分析电池单体性能参数与电池系统性能参数的扩展关系及串联电路工作特性，提出一种基于性能参数校正器的串联型电池系统等效电路建模方法；在Matlab/Simulink环境下搭建电池系统仿真平台，仿真与试验数据对比结果验证了所提出建模方法的准确性。

彭思敏¹ 窦真兰² 辅小荣¹ 王秀琳¹ / 1. 盐城工学院电气工程学院 2. 国网上海市电力公司电力科学研究院



彭思敏 / 讲师

关键词/Keywords

电池系统 ·
串联 ·
等效电路法 ·

近年来，锂离子电池因具有能量密度高、循环寿命长、低自放电和无记忆效应等特点，已越来越广泛地应用于解决风力发电、光伏发电等可再生能源大规模接入电网瓶颈问题^[1]。

同时，由于锂离子电池单体的额定容量、额定电压等相对较小，为适应可再生能源大规模应用时对电池系统在容量、电压等级等方面的要求，电源系统通常由多个电池单体经串并联而成^[2]。由多个电池单体经串联而成的电池系统，即串联型电池系统（Series-connected Battery System, SBS），可实现电池系统容量及电压等级的扩大，但其最大充放电电流大小取决于电池单体充放电电流大小。通过电池单体并联而成的电池

系统，即并联型电池系统，其充放电电流大小为各支路电流之和。本文暂以串联型电池系统为研究对象，并联型电池系统将在后续工作中进行研究。

由于受电池材料、制造工艺和使用环境等因素影响，使电池单体存在不一致性；同时，锂离子电池充放电过程是一个复杂的非线性过程，其性能参数（如电池端电压、内阻和容量等）易受充放电倍率、温度和生产工艺等因素影响，导致含大量电池单体的串联型电池系统的工作特性难以准确表征，严重制约电池系统的开发与应用。因此，建立准确的串联型电池系统模型以有效预测其工作特性及性能参数，对其设计、控制及工程应用至关重要。

目前，国内外关于电池建模的研究多集中在电池单体方面，其主要建模方法有等效电路模型、电化学模型、分析模型和高级算法模型（如神经网络、卡尔曼滤波）等，其中，等效电路模型因其模型简单、直观及物理意义明确，已被广泛应用于电气工程领域。然而，关于串联型电池系统的建模研究成果相对较少。文献[3]建立了一种电池性能参数时不变的电池系统等效电路模型，但未考虑电池性能参数的时变性；文献[4]通过建立一阶电池模型来定性分析铅酸电池系统性能参数变化，但未考虑电池单体参数变化对其影响；文献[5]提出了一种基于迭代法的串/并电池模块建模方法，但参数多、算法复杂；文献[6]提出了一种可表征电池单体串并联工作特性

国家自然科学基金（51507150），江苏省自然科学基金项目（BK20150430），江苏省高校自然科学研究面上项目（15KJB480004），江苏省科技支撑计划项目（BY2015057-26）。

的多电池单体放电模型,但其获取电气性能参数算法复杂,模型参数可扩展性差;文献[7]提出二阶时变串联型电池系统等效电路模型,但未考虑电池单体的不一致对电池系统工作特性的影响。可见,各国学者对考虑电池单体不一致性的串联型电池系统等效电路模型的研究甚少。针对电池单体不一致导致串联型电池系统工作特性及性能参数难以被准确表征的问题,展开详细的建模研究及仿真分析,通过仿真结果与试验数据的对比来验证所提出模型的有效性。

串联型电池系统的构成及简化

所研究的串联型电池系统的系统结构如图1所示。串联型电池系统由多个电池模块通过串联而成,每个模块又由多个锂离子电池单体通过并联而成。

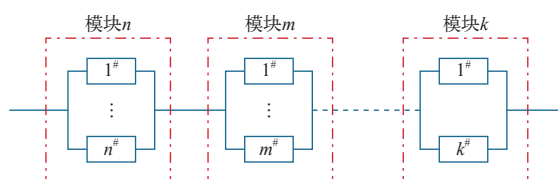


图1 串联型电池系统结构图

一般地,通过电池模块的串联可提高电池系统的端电压,同时,电池模块中电池单体的并联可提高电池模块的最大可放电电流,即串联型电池系统最大电流。因此,通过电池模块的串联及模块中电池单体的并联,实际提高了电池系统的容量。从理论上说,任意电池系统都可以简化为一个串联型电池系统或一个并联型电池系统,而每个电池模块又由多个电池单体并联而成,反之亦然。以串联型电池系统为例,其简化模型如图2所示。

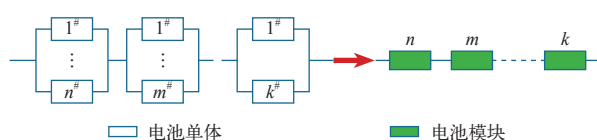


图2 串联型电池系统简化模型

假设用 P 表示电池并联模型, S 表示电池串联模型, y 表示电池单体模型,则图2模型可表示为

$$M_a = S\{P[y(I_1, SOC_1), \dots, y(I_n, SOC_n)], P[y(I_1, SOC_1), \dots, y(I_m, SOC_m)], P[y(I_1, SOC_1), \dots, y(I_k, SOC_k)]\} \quad (1)$$

式中, I 、 SOC 分别为电池单体的放电电流与荷电状态。

串联型电池系统的建模

1. 锂离子电池单体模型

电池单体是构成串联型电池系统的基本单元,其模型的准确度直接关系着电池系统模型的准确性。采用的单体等效电路模型如图3所示。模型采用含两个 RC 并联电路的等效模型来描述电池单体充放电动态特性,具有较高的准确度。图3中, U_0 为电池单体开路端电压; R 为电池内阻; C_s 和 C_1 、 R_s 和 R_1 分别为描述电池单体暂态响应特性的电容与电阻。

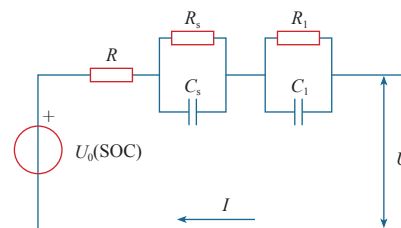


图3 电池单体等效电路模型

根据单体电池模型电路结构及充放电工作特性,其等效模型的数学表达式为

$$\begin{cases} SOC(t) = SOC_0 - \int I(t)dt + Q_u(t)/Q_0 \\ U_0[SOC(t)] = a_0 e^{-a_1 SOC(t)} + a_2 + a_3 SOC(t) - a_4 SOC^2(t) + a_5 SOC^3(t) \\ U(t) = U_0[SOC(t)] - I(t)[R(t) + R_s(t)/R_s(t)]j\omega C_s(t) + R_1(t)/R_1(t)j\omega C_1(t) \\ R(t) = b_0 e^{-b_1 SOC} + b_2 + b_3 SOC(t) - b_4 SOC^2(t) + b_5 SOC^3(t) \\ R_s(t) = c_0 e^{-c_1 SOC(t)} + c_2 \\ C_s(t) = d_0 e^{-d_1 SOC(t)} + d_2 \\ R_1(t) = e_0 e^{-e_1 SOC(t)} + e_2 \\ C_1(t) = f_0 e^{-f_1 SOC(t)} + f_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $a_0 \sim a_5$ 、 $b_0 \sim b_5$ 、 $c_0 \sim c_2$ 、 $d_0 \sim d_2$ 、 $e_0 \sim e_2$ 和 $f_0 \sim f_2$ 均为模型系数,可由电池测量数据经拟合而得, SOC 的表达式为

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}_0 - \frac{\int I(t)dt + Q_u(t)}{Q_0} \quad (3)$$

式中, SOC_0 为 SOC 初始值; Q_0 为电池额定容量; $Q_u(t)$ 为电池不可用容量。

2. 串联型电池系统模型

为便于分析, 假设图1所示电池系统中每个电池模块都是由单个电池单体构成(电池模块中电池单体并联情况将在后续研究中进行), 可得串联型电池系统简化结构如图4所示。图4中, U_s 为电池系统端电压。

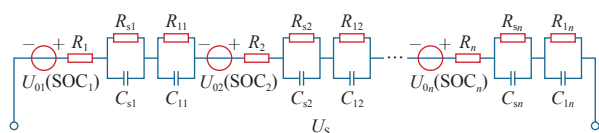


图4 串联型电池系统简化结构图

由于实际应用中, 电池系统中的电池单体通常需经筛选后再用于串联而得。文献[8]采用过程筛选法发现组建电池系统的各电池单体的对应阻抗参数近似相等, 然而, 由于电池单体存在不一致性, 其电池模型准确度受限。因而, 提出一种基于电池性能参数校正器的建模方法来确定SBS的阻抗, 其主要思想为: 首先采用过程筛选法来建立一个电池均值模型, 该模型中电池系统的各电池单体对应阻抗参数相等, 然后通过检测SBS的端电压实际值 U^* 与均值模型端电压 U_s 进行比较, 其差值再利用锂离子电池在其工作平台区内(通常取电池容量的20%~80%时对应的电池电压区间)电池端电压 U_s 与 SOC 近似成线性关系, 得到校正值 ΔSOC , 最后与电池均值模型所得的 SOC_i 相加, 作为式(8)中各电池性能参数 SOC_b 的新输入量。图5为基于参数校正器的电池系统模型结构图。

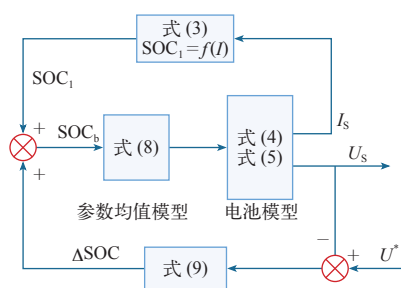


图5 基于参数校正器电池系统模型结构图

具体建模步骤如下。

(1) 建立电池均值模型

1) 电池模型。根据串联电路工作特性, SBS 中电池单体电流 I_n (n 为自然数) 均相等、且等于电池系统电流 I_s ; 而SBS端电压 U_s 等于各电池单体端电压 U_n (n 为自然数) 之和; 对应SBS开路电压 U_{s0} 等于各电池单体开路电压 U_{0n} 之和。即

$$\begin{cases} I_s(t) = I_1(t) = I_2(t) = \dots = I_n(t) \\ U_s(t) = U_1(t) + U_2(t) + \dots + U_n(t) \\ U_{s0}(t) = U_{01}(t) + U_{02}(t) + \dots + U_{0n}(t) \end{cases} \quad (4)$$

同时, 根据基尔霍夫电压定理Kvl得

$$U_s(t) = U_0[\text{SOC}(t)] - I(t)Z_b[\text{SOC}(t)] \quad (5)$$

2) 阻抗参数均值模型。由串联电路工作特性可得, SBS的阻抗 Z_b 等于各电池单体阻抗之和, 即

$$Z_b = \sum_{i=1}^n R_i(t) + \sum_{i=1}^n \frac{R_{si}(t)}{R_{si}(t)j\omega C_{si}(t) + 1} + \sum_{i=1}^n \frac{R_{li}(t)}{R_{li}(t)j\omega C_{li}(t) + 1} \quad (6)$$

又因利用电池筛选法而得到的电池单体, 其电池性能参数近似相等, 即

$$\begin{cases} R_1(t) \approx R_2(t) \approx \dots \approx R_n(t) = R(t) \\ R_{s1}(t) \approx R_{s2}(t) \approx \dots \approx R_{sn}(t) = R_s(t) \\ C_{s1}(t) \approx C_{s2}(t) \approx \dots \approx C_{sn}(t) = C_s(t) \\ R_{l1}(t) \approx R_{l2}(t) \approx \dots \approx R_{ln}(t) = R_l(t) \\ C_{l1}(t) \approx C_{l2}(t) \approx \dots \approx C_{ln}(t) = C_l(t) \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)中, 并化简可得

$$Z_b = R_b(t) + \frac{R_{bs}(t)}{R_{bs}(t)j\omega C_{bs}(t) + 1} + \frac{R_{bl}(t)}{R_{bl}(t)j\omega C_{bl}(t) + 1} \quad (8)$$

式中, $R_b(t) = \sum_{i=1}^n R_i(t)$; $R_{bs}(t) = \sum_{i=1}^n R_{si}(t)$; $C_{bs}(t) =$

$$\frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n C_{si}(t); R_{bl}(t) = \sum_{i=1}^n R_{li}(t); C_{bl}(t) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n C_{li}(t)。$$

(2) 电池参数校正

电池性能参数校正是由校正值 ΔSOC 经阻抗参数模型来实现的, 即电池性能参数校正的实质是 SOC 的校正。

$$\Delta\text{SOC} = k_{\text{SOC}} \frac{U^* - U_s}{U^*} \quad (9)$$

式中, k_{SOC} 为校正系数。

将校正值与均值模型的 SOC_1 相加, 即得所求 SOC_b , 即

$$\text{SOC}_b = \Delta \text{SOC} + \text{SOC}_1 \quad (10)$$

式中, SOC_1 为电池均值模型 SOC。

仿真及试验验证

为验证所提出的串联型电池系统模型的准确性, 在 Matlab/Simulink 环境下进行了建模与仿真, 并将校正前后的仿真结果与试验数据进行对比分析。同时, 对由 3 个串联型电池系统并联而成的串并联模组与其对应等效模组的仿真结果进行对比分析, 以进一步验证所提建模方法的准确性。仿真试验主要包括恒流与脉冲两种工况。恒流放电时电池放电电流为 0.8 A; 脉冲放电时负载电流变化为: 开始时刻以 0.8 A 恒流工作 600 s, 之后静置 600 s 后, 再以 0.8 A 恒流工作 600 s, 如此循环。考虑到模型的代表性及成本, 串联型电池系统以 3×1 (3 串 1 并) 电池系统为例。电池仿真及试验参数见下表。

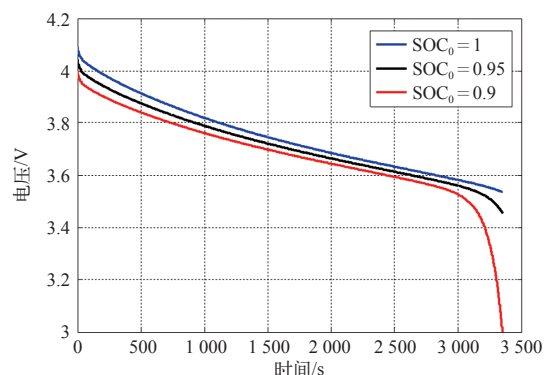
表 锂离子电池参数

电池仿真参数		
额定电压: 3.7 V	额定容量: 860 mA·h	截止电压: 3 V
$a_0 = -0.915$	$a_1 = -40.867$	$a_2 = 3.632$
$a_3 = 0.537$	$a_4 = -0.499$	$a_5 = 0.522$
$b_0 = -0.1463$	$b_1 = -30.27$	$b_2 = 0.1037$
$b_3 = 0.0584$	$b_4 = 0.1747$	$b_5 = 0.1288$
$c_0 = 0.1063$	$c_1 = -62.49$	$c_2 = 0.0437$
$d_0 = -200$	$d_1 = -138$	$d_2 = 300$
$e_0 = 0.0712$	$e_1 = -61.4$	$e_2 = 0.0288$
$f_0 = -3.083$	$f_1 = -180$	$f_2 = 5.088$

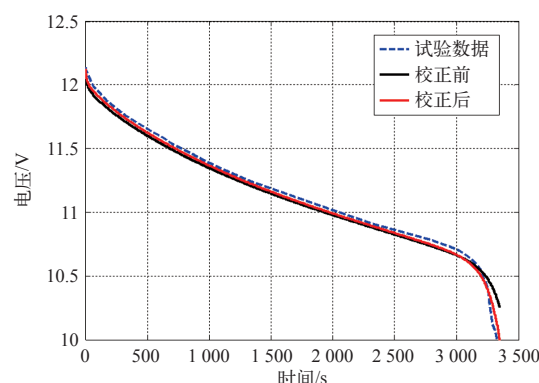
图6为 SOC_0 不同时电池恒流放电特性。电池系统放电初始时刻, 其 3 个电池单体的初始容量并不相同, 其 SOC_0 分别为 1、0.95 和 0.9。由图 6a 可知, 放电初始时刻, 由于各电池单体的 SOC_0 并不相同, 其对应端电压初值也不同, SOC_0 越高, 其端电压初值越高; 当开始恒流放电后, 其各电池单体端电压与放电时间基本呈线性关系下降; 当放电将要结束时, 各电池单体端电压与放电时间基本呈指数关系下降; 特别地, SOC_0 最小的电池单体最

先到达放电截止电压 (3 V), 而结束放电。

由图 6b 可知, 当 SOC_0 最小的电池单体停止放电时, 串联型电池系统也结束放电; 整个放电过程中, 采用电池性能参数校正器后的仿真结果更接近试验数据, 尤其是放电末期, 证明了所提模型的准确性。



(a) 电池单体端电压

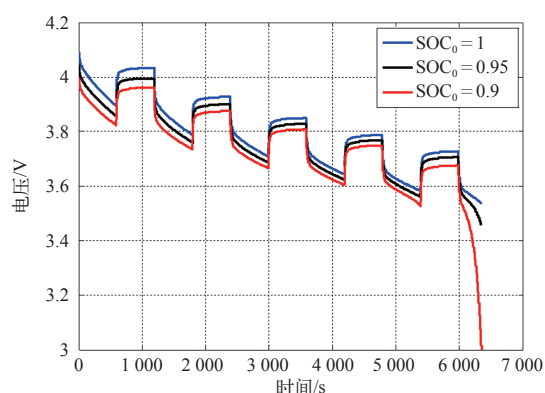


(b) 不同模型电池系统端电压对比

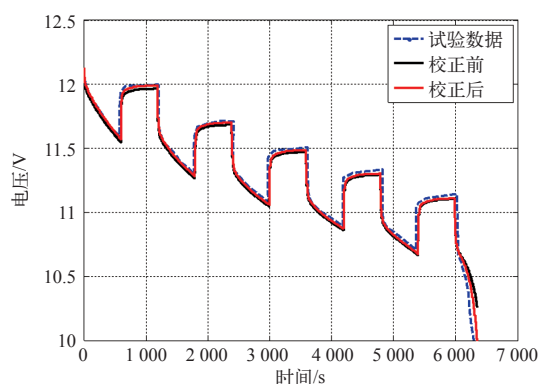
图6 SOC_0 不同时电池恒流放电特性

图7为 SOC_0 不同时电池脉冲放电特性。由图 7a 可知, 因 SOC_0 的不同, SOC_0 最小的电池单体最先达到截止电压而结束放电; 除初始端电压不同外, 3 个电池单体放电特性基本一致。由图 7b 可知, 整个放电过程中, 校正后的电池模型仿真结果始终更接近试验数据, 尤其是在放电末期, 进一步验证了所提出模型在脉冲工况也能准确预测串联型电池系统工作特性。

图8为串并联模组与对应等效模组的仿真对比。由图 8 可知, 串并联模组与对应等效模组的仿真结果基本一致; 同时, 由于进行了电池参数的修正, 因而在放电末期两者存在一定偏差。



(a) 电池单体端电压



(b) 校正前后电池系统端电压对比

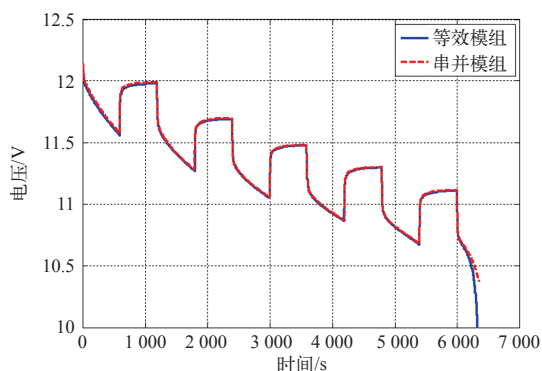
图7 SOC₀不同时电池脉冲放电特性

图8 串并联模组与对应等效模组仿真对比

结束语

针对因电池单体性能参数不一致导致串联型电池系统工作特性难以被准确表征的问题,首先介绍了串联型电池系统的构成及其简化形式,分析了电池单体性能参数与电池系统性能参数的扩展关系及串联电路工作特性,提出一种基于性能参数校正器的串联型电池系统等效电路建模方

法。在Matlab/Simulink环境下搭建了串联型电池系统的仿真平台,通过不同SOC₀时在恒流与脉冲两种工况下仿真结果和试验数据对比分析验证了所提出等效模型的正确性。所提出的模型适宜于对串联型电池系统进行电气设计、仿真及应用研究,为其控制与应用提供了理论基础。

参考文献

- [1] 沈枢,张沛超,李中豪,等. 平抑长短期风电功率波动的风储协调运行方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 12-18.
- [2] 彭思敏,曹云峰,蔡旭. 大型蓄电池储能系统接入微电网方式及控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 38-43.
- [3] 张步涵,曾杰,毛承雄,等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 54-58.
- [4] Carter R, Cruden A, Hall P J, et al. An improved lead-acid battery pack model for use in power simulations of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(1): 21-28.
- [5] Wu M S, Lin C Y, Wang Y Y, et al. Numerical simulation for the discharge behaviors of batteries in series and or parallel-connected battery pack[J]. Electrochimica Acta, 2006, 52(3): 1349-1357.
- [6] Zhang J C, Ci S, Sharif H, et al. Modeling discharge behavior of multicell battery[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2010, 25(4): 1133-1141.
- [7] 彭思敏,施刚,蔡旭,等. 基于等效电路法的大容量蓄电池系统建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 11-18.
- [8] Kim J, Shin J, Chun C, et al. Stable configuration of a li-ion series battery pack based on a screening process for improved voltage/SOC balancing[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2012, 27(1): 411-424.

(收稿日期: 2015-07-30) EA