

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.226227

面向调频的锂电池储能建模及仿真分析

李建林¹, 郭兆东¹, 曾伟², 熊俊杰²

(1. 储能技术工程研究中心(北方工业大学), 北京 100144;
2. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要:“双碳”目标的提出, 确定了我国能源转型的战略方向, 给可再生能源并网提供了契机和动力。但随着高比例的可再生能源发电并网, 新型电力系统频率波动特性及调控趋于复杂, 调频难度进一步增大, 以至于传统调频方式无法满足新型电力系统调频需要, 而锂电池储能因具有充放电功率快速、精准的特性, 可以解决以上问题。因此, 以锂电池储能戴维南等效模型为基础, 建立了一个考虑容量衰减、环境温度、电流倍率等影响的电池单体的改进模型。同时给出了模型参数的辨识方法以及辨识理论和其他方面对参数的影响, 根据这些因素构成了一种面向调频的锂电池 SOC 的估计方法。最后通过 Matlab 的仿真对储能电池的模型进行了验证。仿真表明, 该模型准确性较高, 可以实现对储能锂电池的 SOC 等特性的实时估计。

关键词: 电池建模; 储能调频; 新型电力系统; 可再生能源; 仿真

Modeling and simulation analysis of lithium battery energy storage oriented to frequency modulation

LI Jianlin¹, GUO Zhaodong¹, ZENG Wei², XIONG Junjie²

(1. Energy Storage Technology Engineering Research Center (North China University of Technology), Beijing 100144, China;
2. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: The “dual-carbon” target determines the strategic direction of China’s energy transition and provides opportunities and impetus for the grid connection of renewable energy. However, with a high proportion of renewable energy generation connected to the grid, the frequency fluctuation characteristics and regulation of the new power system become increasingly complex. Also the difficulty of frequency modulation has further increased, so that traditional frequency modulation methods cannot meet the needs of new power systems. Lithium battery energy storage can solve the above problems with its fast and accurate charging and discharging. Therefore, based on the Thevenin equivalent model of lithium battery energy storage, an improved battery cell model considering the influence of capacity attenuation, ambient temperature, current rate, etc., is established. At the same time, the identification method and theory of model parameters are given. In terms of the impact on the parameters, a method for FM-oriented lithium battery SOC estimation is formed based on these factors. Finally, the model of the energy storage battery is verified by Matlab simulation. Simulation shows that the model has high accuracy and can realize real-time estimation of SOC and other characteristics of energy storage lithium batteries.

This work is supported by Beijing Natural Science Foundation Project (No. 21JC0026).

Key words: battery modeling; energy storage frequency modulation; new power system; renewable energy; simulation

0 引言

随着能源转型的不断推进, 电化学储能调频已逐渐成为主流的调频方式^[1-3]。以可再生能源为主体

的新型电力系统建设部署使得可再生能源出力占比增大, 电力电子设备应用增多, 强波动性、间歇性的可再生能源持续增长, 系统转动惯量将持续下降, 造成电力实时平衡难度的进一步增大。进而, 传统调频方式的固有缺陷也慢慢地显露出来, 可再生能源的出力是间断性的, 并且具有很强的波动性, 所以系统频率变化很厉害, 这就要求系统有很强的调

基金项目: 北京市自然科学基金项目资助(21JC0026); 国网江西省电力有限公司科技项目资助(52182020008K)

节能力和响应速度,但传统调频系统无法满足。电化学储能作为一种新的调频方式,能够弥补电网调频容量的不足,而已有的电池模型还不能完全反应电池特性,因此需要对储能电池进行更精准的建模与仿真^[4]。

锂电池具有功率高,反应迅速的优点,基于此构成的储能单体能够较好地满足电网的调频需求。相较于常规调频电源,它能够在 1 s 之内完成自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)调度指令^[5]。而常规调频电源均由具有旋转惯性的机械器件组成,其将一次能源转换成电能需要经过一系列复杂过程,例如,火电机组对有功功率的调节响应速度较慢,通常需要 1 min 以上,反应时间是锂电池储能的 60 倍以上。综上,锂电池储能系统调频效果远好于火电机组^[6]。相对而言,少量的储能就能够有效提升以火电为主的电力系统的整体 AGC 调频能力,提高频率及联络线功率的合格率,从而保证系统频率的稳定,提升电网运行的可靠性及安全性^[7]。

因此,面向调频服务需求的可再生能源+锂电池储能场站如何科学调控问题将是能源结构改革的重点。国内外学者针对电池储能调频方面进行了大量研究。文献[8]在智能电网框架的基础上,考虑大规模新能源并网的背景,引入含分布式储能、虚拟发电厂、动态响应负荷等调频响应对象在内的新型 AGC 调频结构,借助含融合节点服务器的通信网络架构,使各类调频源和能量管理中心即时通信,实时平衡区域电量。文献[9]在瑞士电力系统的 AGC 信号输出端引入三阶切比雪夫 I 型和一阶指数权重滑动平均滤波器滤波,利用调频源不同响应特性平衡各类信号分量。文献[10]在机组集散控制系统和电池储能之间增设协调控制器,实时弥补机组出力和 AGC 指令的偏差值。以上文献研究中在传统的调频设备中加入了电池,或在电网控制器中加入了电池,这些做法大大改善了系统或机组的调频效果。

在仿真和控制方面,目前对于锂电池储能应用的研究才刚刚起步,且目前主要是对锂电池储能系统辅助间歇性电源并网的动态行为的研究,但是实际的电网规模更大,计算更繁琐,需要考虑的特性更多,因此针对这方面需要进行更深入的研究^[11]。本文在锂电池储能系统参与调频的数学建模和荷电状态估计方面展开探索,主要以锂电池单体和成组建模为切入点,建立了锂电池储能单体的改进模型,并提出了基于改进模型的参数辨识方法,分析影响模型精度和复杂度的核心要素,进而以等效电路模

型辨识为基础,提出了一种时变参数校正的储能电池 SOC 估计方法,实现对储能电池荷电状态的准确估计,最后开展充放电仿真实验,验证方法的正确性,为调频控制研究奠定基础。

1 锂电池储能建模及参数辨识

1.1 单体锂电池等效模型

电池模型是描述电池影响因素与工作特性的数学关系,考虑荷电状态(State of Charge, SOC)、电压、温度等。电池建模的方法有很多,如:等效电路模型、电化学模型等。在这些建模方法中,等效电路具有描述能力强,适应性好,应用广泛等优点。目前广泛使用的电池模型有戴维南模型、新一代汽车伙伴关系模型和阻抗模型等^[12]。为了能够更准确地描述锂电池外特性以及运行时间特性,暂态和稳态响应特性,图 1 给出了一种改进的综合模型,此模型可反映其直流特性,也可反映交流特性,且模型简单明了,方便与多种影响因素相结合。

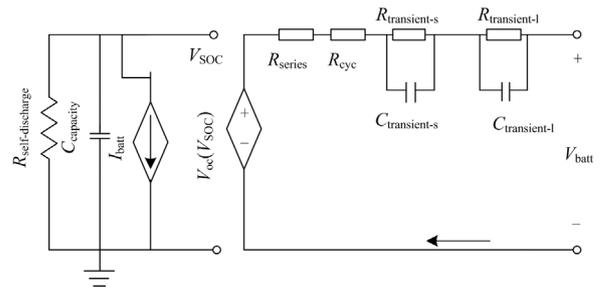


图 1 单体锂电池综合等效模型

Fig. 1 Comprehensive equivalent model of lithium battery cell

图 1 所示模型左侧电路描述电池的运行特性: C_{capacity} 为等效模型的可用容量, $R_{\text{self-discharge}}$ 为自放电电阻, V_{SOC} 为输出电压;右侧电路描述其动态响应: V_{oc} 为开路电压, R_{series} 为电池内阻的总和, R_{cyc} 为电池老化后的内阻增加量;两个 RC 并联网络分别表示电池在阶跃响应中较短和较长的两个时间常数的响应,也就是浓差电阻电容和极化电阻电容。两侧以 SOC 连接,各元件理论上均为相关影响因素的非线性或线性函数。

左侧电路的实质是跟踪电流计算 SOC,基于安时法计算 SOC 如式(1)所示,其中: SOC_{init} 为初始荷电状态; I_{batt} 为端电流; C_{use} 为可用容量。

$$SOC = SOC_{\text{init}} - \int \frac{I_{\text{batt}}}{C_{\text{use}}} dt \quad (1)$$

以 RC 电压作状态量可得电路的数学模型,如式(2)所示。

$$\begin{cases} \dot{U}_{\text{tran-s}} = -\frac{U_{\text{tran-s}}}{R_{\text{tran-s}} C_{\text{tran-s}}} + \frac{I_{\text{batt}}}{C_{\text{tran-s}}} \\ V_{\text{batt}} = V_{\text{oc}} - U_{\text{tran-s}} - U_{\text{tran-l}} - I_{\text{batt}} (R_{\text{cyc}} + R_{\text{series}}) \\ \dot{U}_{\text{tran-l}} = -\frac{U_{\text{tran-l}}}{R_{\text{tran-l}} C_{\text{tran-l}}} + \frac{I_{\text{batt}}}{C_{\text{tran-l}}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $U_{\text{tran-s}}$ 、 $U_{\text{tran-l}}$ 分别为两类内阻两端电压值。

1.2 锂电池单体模型参数确定及辨识

1.2.1 SOC 估算及 C_{use} 确定

SOC 是电池建模中最关键的状态量, SOC 的准确程度不仅直接影响模型的精度, 同时影响储能电池的控制过程, 在核心公式(1)中可用容量 C_{use} 是直接影响安时法计算 SOC 准确程度的关键要素之一, 但是其受诸多因素影响, 为此需要对可用容量 C_{use} 进行单独建模分析。由于锂电池随着活性 Li^+ 下降, 正极结构规则度降低, 负极石墨化度下降、隔膜孔隙减少等因素的影响, 容量将衰减。一般分为循环衰减和日历衰减, 二者共同决定 C_{use} , 运行时还受温度、电流倍率等因素影响^[13]。具体分析如下。

1) 循环容量衰减

循环衰减描述电池容量随循环次数增加而减少的特性, 该过程多为不可逆。循环衰减受电流、温度、放电深度等因素影响, 综合改进模型的容量建模是研究电池容量衰减到初始值 80% 前的情况。

锂电池容量衰减与循环次数呈近似线性关系, 并且温度越高衰减越快。在此仅考虑最重要的温度影响因素, 其衰减规律符合 Arrhenius 方程。Arrhenius 方程是描述化学反应速率与温度的经验公式, 如式(3)所示。

$$\begin{cases} dM/dt = A \exp(-E_a/RT) \\ \ln M = \ln A - E_a/RT \end{cases} \quad (3)$$

式中: dM/dt 为反应速率; A 为实验常数; E_a 为活化能; R 为气体摩尔常数($8.3145 \text{ J} \cdot \text{K}/\text{mol}$)。该式为循环容量数据拟合提供了一个有理论支持的函数形式, 建模时将式(3)改写为

$$C_{\text{cyc}} \% = A \exp(-E_a/(R \cdot T))(I^{\text{PR}})^z \quad (4)$$

式中: $C_{\text{cyc}} \%$ 为循环容量衰减比; I^{PR} 为循环中电流绝对值积分的总和; z 为实验参数; T 为环境温度(K)。

2) 日历容量衰减

日历衰减主要由自放电造成, 多为可逆过程。日历衰减受温度、SOC 和贮存电压等因素影响, 不过锂电池自放电率低, 日历容量衰减较小。

与循环容量变化规律相似, 容量衰减与贮存时长接近线性关系。工程中直接采用实验曲线拟合的方法, 本文中通过分析实测数据发现, 以 40°C 分段

建立其函数关系, 利用 Matlab 处理发现以下形式拟合效果较好, 可提高精度有助于估计性能提升。

$$C_{\text{sto}} \% = \begin{cases} (a_1 T + b_1) \log_{10}(t) - (c_1 T + d_1) & T \leq 40^\circ\text{C} \\ (a_2 T + b_2) \log_{10}(t) - (c_2 T + d_2) & T > 40^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $C_{\text{sto}} \%$ 为日历衰减容量比; a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 、 d_1 和 d_2 为拟合参数, 由实验数据拟合得到。

3) 温度对容量影响

上述关于循环、日历容量衰减分析是对电池使用前容量进行分析, 具体到某次运行中, 容量也需实时确定。某锂电池不同温度下的放电曲线如图 2, 温度越高, 电池可放电容量越大, 但是 20°C 以上时电池电解液活性物质分解完全, 可放电容量不再增加。

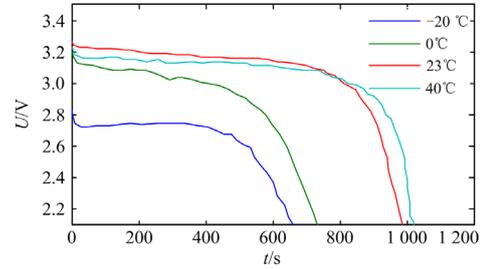


图 2 不同温度放电曲线图

Fig. 2 Discharge curves at different temperatures

反复进行不同温度下的放电实验表明温度对可放电容量的影响可用式(6)表示。

$$C_{\text{Tem}} = C_n e^{k_1(1/(T-k_2)) - 1/(T_{\text{ref}} - k_2)} \quad (6)$$

式中: T_{ref} 和 T 分别为电池工作参考温度和环境温度; C_n 和 C_{Tem} 分别为标准和实际温度下的可放电容量(Ah), 参数需实验拟合。

4) 电流倍率对容量影响

电流倍率通过影响电池极化效应作用容量, 倍率大导致极化严重, 系统偏离平衡, 容量就小, 电压降低。图 3 是某锂电池在不同电流倍率下的放电曲线,

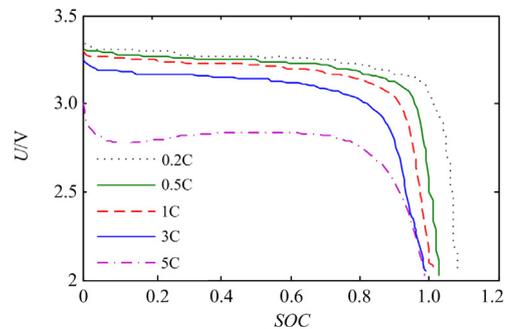


图 3 不同电流倍率放电曲线

Fig. 3 Discharge curves of different current rates

可看出锂电池在电流倍率上的性能优越, 无论哪种电流倍率放电曲线都比较平稳。

该现象可用 Peukert 方程经变形描述, 如式(7)所示^[14]。

$$C_1 = C_s (I_s / I)^{n-1} \quad (7)$$

式中: C_s 为额定电流 I_s 的放电容量; n 为电池常数, 铁锂电池 n 的经验取值 0.981, 也可由实验数据拟合得到。

综合上述内容就能确定电池在某次运行时的实际可用容量 C_{use} , 即电池经历了 n 次循环、 t 天贮存, 在温度 T 、电流倍率 I_c 时的可用容量可用式(8)表示。

$$C_{use} = Q_0 (1 - C_{cyc} \%) (1 - C_{sto} \%) \cdot (I_s / I)^{n-1} e^{k_1(1/(T-k_2)) - 1/(T_{ref}-k_3)} \quad (8)$$

上述方法的过程繁琐, 辨识工作量较大。文献[15]提出通过实验得到电流倍率、温度对容量的影响因子 $\alpha[i(t)]$ 和 $\beta[T(t)]$, 在 SOC 计算中嵌入, 并将 t 看做定值, SOC 计算式如式(9)所示。该法适用于短期即容量变化不大情况, 但容量瞬时值不可知。

$$SOC = SOC_{init} - \frac{\int \alpha[i(t)] \beta[T(t)] i(t) dt}{C_{use}} \quad (9)$$

1.2.2 电路阻抗元件的确定及辨识方法

该部分建立了电池瞬态响应模型, 需要确定的参数有: 开路电压 V_{oc} 、欧姆电阻 R_{series} , 循环阻抗 R_{cyc} 和两个 RC 并联网络的阻值 ($R_{transient-s}$, $C_{transient-s}$, $R_{transient-l}$ 和 $C_{transient-l}$)。

这里充分考虑电池的 SOC、温度、电流倍率、循环次数因素对电池瞬态响应的影响。方法同样是基于实验实测数据, 同时结合等效电路理论建模。这里包含两方面内容, 首先是在常温、标准电流倍率下各阻抗基本值的确定; 其次是在此基础之上, 考虑温度等因素对电池的影响, 外在即显示为电压的改变, 对内则是对电池相关阻抗的影响。

对于电路各元件参数基本值的确定, 需要对锂电池进行专业实验测试, 得到电池电压、电流及内部 SOC 及其他相关因素等数据, 结合等效电路的数学模型进行参数辨识^[16]。

1) 开路电压

开路电压 V_{oc} 即电池的电动势, 主要是由电池荷电状态 SOC 决定的, 数值上呈一一对应的关系, 由此衍生出了 SOC 的一种估测方法即开路电压法。在本文的建模研究中 SOC 通过安时法得到, 然后以得到的 SOC 计算 V_{oc} 。研究表明开路电压 V_{oc} 的变化受温度影响不大, 因此这里研究确定 V_{oc} 的时候不考虑

温度的影响, 即影响 V_{oc} 的只有 SOC 一个因素。

V_{oc} 的测量方法如下: 针对电池进行脉冲动态试验, 每个脉冲充/放电之后将电池断路静置至少一小时至稳态, 测量该状态 SOC 点和对应的开路电压, 然后恒流充放电至下一个 SOC 点, 以此方法测量该 SOC 点对应的 V_{oc} , 得到确定 V_{oc} 所需的数据。如果要准确测量开路电压, 电池由动态状态到稳定状态真正所需的时间长达数小时, 整个实验将需要花费数天的时间, 耗时过长。文献[16]提供了一种基于复合脉冲试验快速确定 V_{oc} 与 SOC 函数关系的方法, 在数小时内便可得出 V_{oc} 和 SOC 的基本对应关系。 V_{oc} 与 SOC 的函数关系没有固定的形式, 简单起见可以采用多阶多项式和指数函数结合形式表示, 如式(10)。

$$V_{oc}(SOC) = a_1 \exp(a_2 SOC) + a_3 + a_4 / SOC + a_5 \exp(a_6 / (1 - SOC)) \quad (10)$$

2) 阻抗值

阻抗参数的获取一般是通过加脉冲电流的方式, 可得到室温下的电压电流响应等。实验中 SOC 以 5% 为间隔。图 4 给出了放电脉冲下响应示意图。

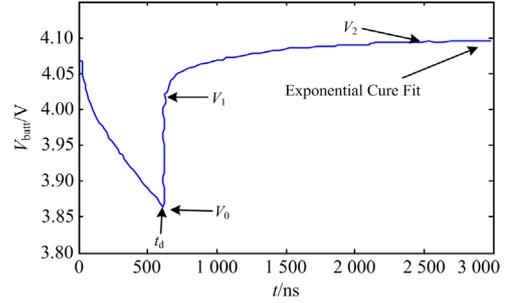


图 4 放电脉冲下电压响应

Fig. 4 Voltage response under discharge pulse

卸载放电电流瞬间, 电压瞬时回升, 这由电池的欧姆内阻作用产生, 即模型中的 R_{series} 。因此有:

$$R_{series}(SOC) = (V_1 - V_0) / I \quad (11)$$

将端电压 $V_{cell}(t)$ 指定为式(12)所示形式, 其中 a, b 为电流响应系数, τ_s 和 τ_l 为时间辨识系数。

$$V_{cell}(t) = a(1 - e^{-t/\tau_s}) + b(1 - e^{-t/\tau_l}) + V_1 \quad (12)$$

由式(13)可计算出阻抗值。

$$\begin{cases} R_{transient-s} = a / I \\ C_{transient-s} = (1 / R_{transient-s}) \cdot \tau_s \\ R_{transient-l} = b / I \\ C_{transient-l} = (1 / R_{transient-l}) \cdot \tau_l \end{cases} \quad (13)$$

该实验忽略 R_{cyc} 的影响 (R_{cyc} 数值小, 短期内影响不大)。其中 τ 辨识是关键, 应该选用合适的 τ_2 , 且其越接近于 1, 得到的参数越准确。

在得到这些阻抗后, 和 SOC 结合起来, 便可得到式(14)形式的具体函数。

$$\begin{cases} R_{\text{serise}}(SOC) = b_0 \exp(b_1 SOC) + b_2 + b_3 SOC + b_4 SOC^2 + b_5 SOC^3 \\ R_{\text{Transien}_s}(SOC) = c_0 e^{c_1 SOC} + c_2 \\ C_{\text{Transien}_s}(SOC) = d_0 e^{d_1 SOC} + d_2 \\ R_{\text{Transien}_L}(SOC) = e_0 e^{e_1 SOC} + e_2 \\ C_{\text{Transien}_L}(SOC) = f_0 e^{f_1 SOC} + f_2 \end{cases} \quad (14)$$

上述实验是在标准条件下(室温, 标准电流倍率)进行。实验表明 $0.2 < SOC < 0.8$ 时阻抗变化平稳接近常数, 两端变化剧烈。

3) 温度

温度对电池参数影响较大, 需要多方面考虑。考虑温度因素对电池影响的建模有两种方法。

第一种方法是选取多个电池单体, 通过在不同温度下重复上述的 HPPC 实验, 测量不同温度下各个 SOC 对应的阻抗, 然后在参数基本值的基础上加上温度的补充修正, 一般而言是在原有函数的基础上加上一个关于温度差的多项式^[17]。该方法能够深入到电池内部, 具有较强的机理性和很好的适用性, 但是大大增加了实验次数、参数辨识和曲线拟合的过程, 数据浩大、工作量繁重, 并且在数学处理的过程中会产生一些额外的误差。分析发现, 上述综合电路各个阻抗参数在考虑温度之后的拟合函数形式如式(15)所示时, 具有最佳拟合效果。

$$\begin{cases} R_{\text{serise}}(SOC, T) = R_{\text{serise}}(SOC) b_{t1} \exp(b_{t2} / (T - b_{t3})) \\ R_{\text{Transien}_s}(SOC, T) = R_{\text{Transien}_s}(SOC) + c_{t1} (T - T_{\text{ref}}) + \\ \quad c_{t2} (T - T_{\text{ref}}) SOC \\ C_{\text{Transien}_s}(SOC, T) = C_{\text{Transien}_s}(SOC) + \\ \quad d_{t1} (T - T_{\text{ref}}) SOC + d_{t2} (T - T_{\text{ref}}) \\ R_{\text{Transien}_L}(SOC, T) = R_{\text{Transien}_L}(SOC) + \\ \quad g_{t1} (T - T_{\text{ref}}) \exp(g_{t2} SOC) + g_{t2} SOC \\ C_{\text{Transien}_L}(SOC, T) = C_{\text{Transien}_L}(SOC) h_{t1} \exp(h_{t2} / T) \end{cases} \quad (15)$$

式中: T_{ref} 表示电池工作参考温度; b_{t1} 、 b_{t2} 、 b_{t3} 、 c_{t1} 、 c_{t2} 、 d_{t1} 、 d_{t2} 、 g_{t1} 、 g_{t2} 、 h_{t1} 、 h_{t2} 为待辨识系数。

第二种方法仍然通过上述的温度试验得到不同温度下各 SOC 点对应的端电压, 不同的是该方法是直接研究端电压与温度的关系, 通过在电池模型出口修正输出而不再考虑电池内部阻抗的变化情况, 即加上一个电压的温度修正因子 $\Delta E(T)$, 如式(16)所示。该方法减少了大量的参数辨识和曲线拟合的

数学处理过程, 在实际操作中具有很强的可行性。

$$V_{\text{batt}} = V_{\text{oc}} - I_{\text{batt}} Z_{\text{eq}} + \Delta E(T) \quad (16)$$

4) 电流倍率对参数的影响

大量研究表明, 电流倍率在电池动态仿真中对电池端电压的影响相对较小(主要是对充放电容量的影响), 很多情况下可以忽略该因素^[14]。如果精度要求比较高, 则电流倍率对电池端电压的影响实验方法与温度对电池端电压影响的研究方法是类似的: 将温度设为标准值, 对电池进行不同电流倍率下的充/放电实验, 获得各参数阻抗值并拟合函数。研究表明电流倍率在模型各阻抗的影响中仅对 R_{Transien_L} 影响较大, 其他阻抗基本没有任何改动, 下面给出考虑到电流倍率后电阻 R_{Transien_L} 的函数形式。

$$R_{\text{Transien}_L}(SOC, T, I_c) = R_{\text{Transien}_L}(SOC, T) \cdot (g_{i1} (I_c^{g_{i2}} + g_{i3}) SOC + I_c^{g_{i4}}) \quad (17)$$

式中, g_{i1} 、 g_{i2} 、 g_{i3} 、 g_{i4} 均为待辨识系数。

5) 循环次数对参数影响

随着电池循环使用容量衰减, 欧姆内阻也增大, R_{cyc} 即表示该特性, 可用经验函数描述为

$$R_{\text{cyc}} = kNZ \quad (18)$$

式中: k 为经验系数, 取值如表 1(其他温度插值计算); N 为循环次数; Z 为可调系数(常取 0.5)。

表 1 循环欧姆系数表

Table 1 Cyclic Ohm coefficient table	
循环运行温度 $T/^\circ\text{C}$	经验系数 k
25	1.5×10^{-3}
50	1.7×10^{-3}

1.3 考虑锂电池单体差异性的成组等效模型

由锂电池单体串并联组成的大容量电池系统(Large Capacity Battery System, LCBS)中, 考虑锂电池单体的参数非线性及容量不一致性等特点, 结合串/并联电路工作特性, 提出 LCBS 等效电路建模方法的关键因素。

表征锂电池单体性能的参数, 如: 剩余容量、端电压、内阻、使用寿命等, 易受放电电流、温度、生产工艺等因素影响, 且锂电池的不同连接方式易使 LCBS 中并联电池电流或串联电池电压不均衡, 因此, 在考虑单体成组建模时必须考虑上述相关因素, 锂电池单体成组结构图如图 5 所示。研究 LCBS 的准确建模以便有效地预测其性能参数, 对 LCBS 的优化、设计及控制至关重要。

由图 5 可知, 多个单体模型可串联成电池串, 考虑其端电压及电流、阻抗和荷电状态, 可将电池串等效成一个单体模型, 该等效单体模型可再次进

行串联, 提高 LCBS 的端电压。同理, 并联型电池串也可等效为一个单体后再进行并联, 增大 LCBS 的容量, 即提高最大可放电电流。串并联型模块可分解为串联和并联模块, 进行同样的等效处理。从理论上说, 任何 LCBS 都可以简化为一个串联型 LCBS 或一个并联型 LCBS。

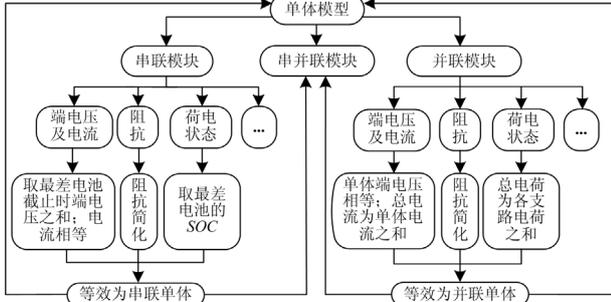


图 5 锂电池单体成组结构图

Fig. 5 Lithium battery cell group structure diagram

2 时变参数下锂电池储能荷电状态估算方法

由储能锂电池建模过程可以看出, 锂电池参数多、受影响因素广泛且复杂, 模型表现出强烈的非线性、时变、因素耦合的特性。而且锂电池荷电状态对于参数的影响巨大, 尽管温度存在较大影响, 但其为可测变量, 可以通过合理测量和推算, 但是锂电池荷电状态无法直接测量, 大多基于安时法计算估计^[18]。在时变参数影响下, 其估计值将发生大幅度偏差, 将直接影响锂电池的科学合理应用。因此, 围绕锂电池模型开展分析, 建立行之有效的估计方法, 将是储能锂电池发展的重点。

卡尔曼滤波是一种运算速度快、精度高且占用内存空间小的数据估计方法, 常用于对锂电池的 SOC 状态以及 SOH 状态进行估计^[19]。基于建立的锂电池状态空间方程以及锂电池量测方程, 是从真实情况考虑对电池荷电状态及电压变化进行的建模, 卡尔曼估计需要在人为观测角度建立模型。由于电池模型表现出强烈的非线性、时变、强耦合特点, 在对电池的荷电状态的实际估计中, 采用拓展卡尔曼估计, 其结构示意图如图 6 所示^[20]。

拓展卡尔曼估计法在卡尔曼估计法的基础上对非线性系统进行建模, 因此可以应用于实际工程中。其对非线性系统建模得到系统方程式(19)。

$$\begin{cases} C_{soc}(k+1) = f[C_{soc}(k), I(k)] + w_k \\ U_i(k) = h(C_{soc}(k)) + v_k \end{cases} \quad (19)$$

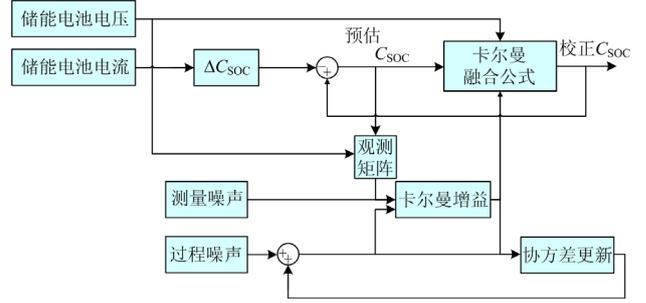


图 6 基于扩展卡尔曼的 SOC 估计结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of SOC estimation structure based on extended Kalman

利用上述的电池组模型, 可以使用拓展卡尔曼滤波进行锂电池的 SOC 估计。由于计算过程中需要使用 A 矩阵以及 H 矩阵, 因此根据函数 $f[C_{soc}(k), I(k)]$ 以及 $h(C_{soc}(k))$ 可以计算出 A 矩阵与 H 系数矩阵。

$$A = \frac{df[\hat{C}_{soc}(k), I(k)]}{d\hat{C}_{soc}(k)} \quad (20)$$

$$H = \frac{dh(\hat{C}_{soc}(k)^-)}{d\hat{C}_{soc}(k)^-} \quad (21)$$

拓展卡尔曼增益如下:

$$K_k = P(k) \cdot H(k)^T [H(k) \cdot P(k) \cdot H(k)^T + Q]^{-1} \quad (22)$$

由于拓展卡尔曼滤波的电池荷电状态方程为非线性方程, 因此其最优荷电状态估计如式(23)所示。

$$\hat{C}_{soc}(k+1) = \hat{C}_{soc}(k)^- + K_k \{U_i(k) - f[\hat{C}_{soc}(k)^-, I(k)^-]\} \quad (23)$$

在扩展卡尔曼滤波中, 一方面考虑充放电电压数据的噪声估计误差和计算速度, 通过观察电池充放电时电压随时间变化的曲线, 可知电池的充放电曲线的形状是近似相同的, 可采用尺度变换的方法, 将电池的充放电曲线归一化^[21]。

$$U_u = (U - U_c) / (U_p - U_c) \quad (24)$$

$$T_u = (T - T_c) / (T_p - T_c) \quad (25)$$

归一化后充放电时间和电压都约束在范围(0,1)内。将不同倍率、不同温度下的充放电曲线归一化处理之后, 选取基准曲线, 就可根据充放电过程中的端电压实时估算电池的 SOC^[22]。

另一方面, 为了实现 SOC 的校准, 结合电池模型, 通过对电池充放电曲线及恢复曲线的分析, 拟合出电池开路电压的计算公式, 如式(26)所示。

$$V_{oc}(SOC) = a_1 \exp(a_2 SOC) + a_3 + a_4 / SOC + a_5 \exp(a_6 / (1 - SOC)) \quad (26)$$

基于某项目的历史数据, 其中 $a_1 = 0.1298$ 、 $a_2 = 0.08058$ 、 $a_3 = 3.279$ 、 $a_4 = -0.2154$ 、 $a_5 = -1.054 \times 10^{-6}$ 、 $a_6 = 0.3979$ 。归一化曲线+OCV 曲线簇可以很好地实现单体 SOC 的实时在线估算和校准, 且考虑了电流倍率、温度、端电压等多种因素, 估算精度更高^[23]。

3 锂电池储能建模仿真分析

以实测数据为基础, 对上述电池建模参数进行整定分析, 同时根据非线性时变参数下扩展卡尔曼状态估计设计方法, 建立锂电池仿真性能测试与分析, 仿真模型如图 7 所示, 具体过程如下。

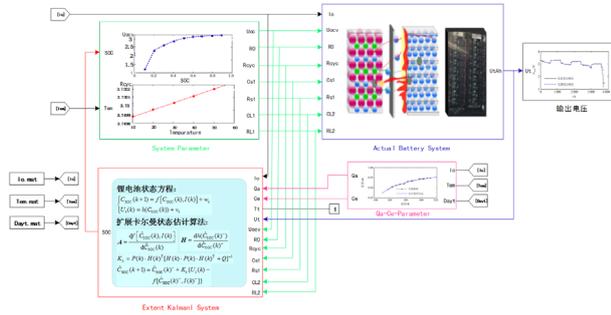


图 7 储能电池建模与荷电状态估计仿真结构图

Fig. 7 Energy storage battery modeling and state-of-charge estimation simulation structure diagram

基于上述理论参照 18650HP-Fe 电池辨识参数, 在 Matlab/Simulink 中搭建电池单体模型, 并进行仿真验证, 该电池储能系统由 240 个串联和 6 个并联的磷酸铁锂电池单体构成, 具体参数如表 2。

表 2 18650HP-Fe 电池参数表

Table 2 18650HP-Fe battery parameter table

指标	参数
典型容量/mAh	1 100
最小容量/mAh	1 050
交流内阻/mΩ	≤18
标称电压/V	3.20
电芯重量/g	35
充电截止电压/V	3.60
充电截止电流/A	5
放电截止电压/V	2.00
充电时间/h	8.0
最大持续放电电流/A	20
脉冲放电电流/A	40
额定功率/W	>70
循环性能/次	≥500
充电温度/°C	0~45
放电温度/°C	-30~45
存储温度/°C	-30~45

1) 静态仿真

20°C, $SOC_{init} = 1$, 各电流倍率放电及 0.3C, $SOC_{init} = 1$, 各温度恒流放电电压响应仿真曲线分别如图 8 和图 9 示。

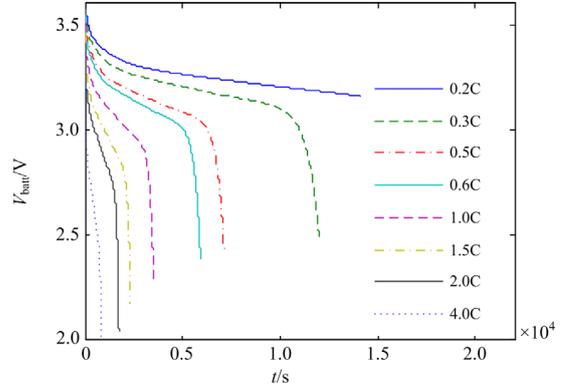


图 8 模型常温各倍率放电曲线图

Fig. 8 Discharge curve diagram of each rate of model at room temperature

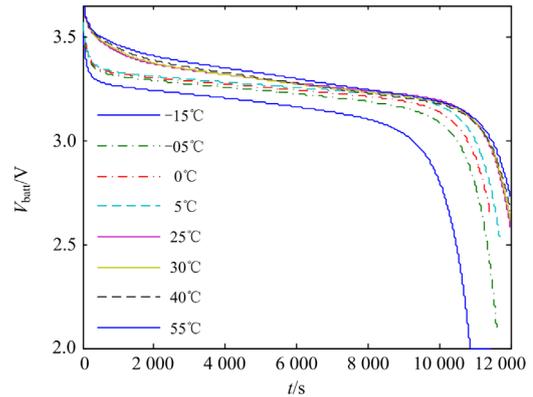


图 9 模型各温度下 0.3C 放电曲线

Fig. 9 0.3C discharge curve at each temperature of the model

图 8、图 9 所表现的电池特性与实际吻合, 由于曲线较多没有给出对比图。

2) 容量仿真

日历和循环容量衰减仿真与实测数据对比验证分别如图 10 和图 11 所示。图 10 曲线从下至上依次为 10°C、25°C、45°C、55°C。

图 12 是 -10~50°C 下仿真容量与实测对比, 实测容量是标准温度电流放电所得。以上仿真与实测数据基本吻合, 部分稍有出入, 表明本文容量模型准确度较高^[24]。

3) 稳、动态充放电仿真

25°C, 0.5C 放电和 0.2C 倍率充电得到仿真实测对比, 如图 13 和图 14 示。

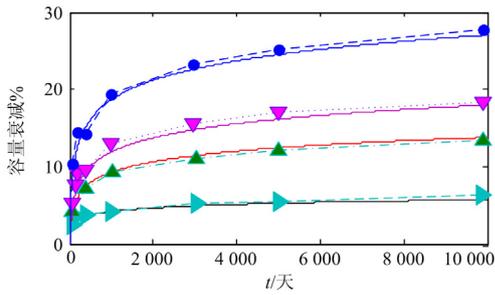


图 10 日历衰减对比

Fig. 10 Simulation comparison of calendar attenuation capacity ratio

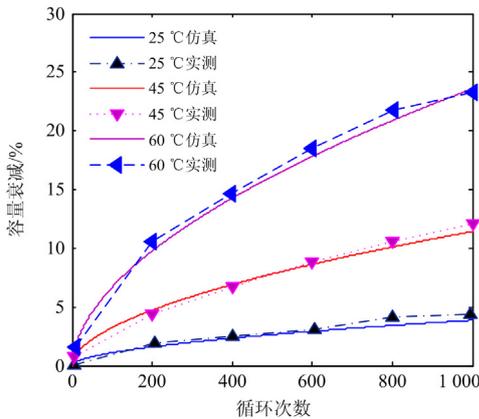


图 11 循环衰减对比

Fig. 11 Simulation comparison of cyclic attenuation capacity ratio

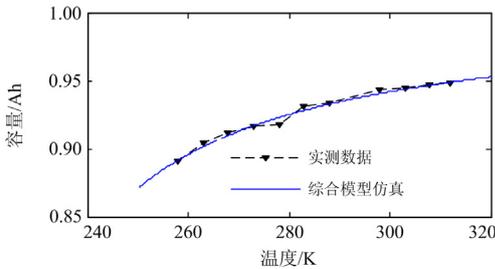


图 12 温度对容量影响曲线

Fig. 12 Temperature influence curve on capacity

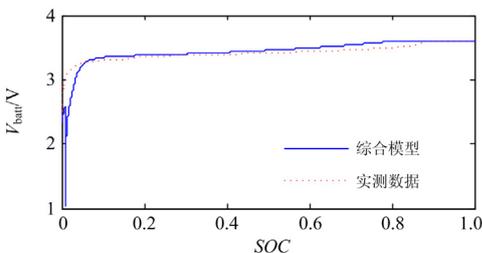


图 13 0.5C 放电电压对比

Fig. 13 0.5C discharge voltage comparison

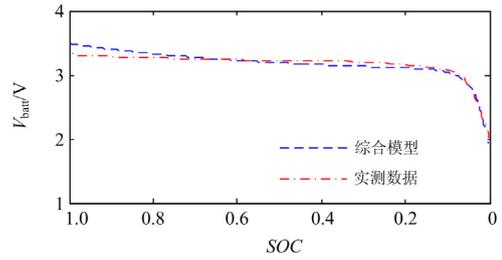


图 14 0.2C 充电电压对比

Fig. 14 0.2C charging voltage comparison

$SOC_{init} = 1$ 对电池施加 1.86C, 周期 1 200 s 的脉冲电流如图 15, 模型与实测电压对比图如图 16。

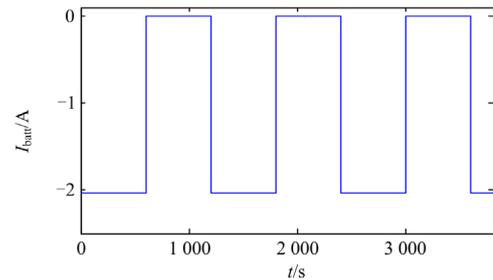


图 15 动态脉冲电流曲线图

Fig. 15 Dynamic pulse current curve

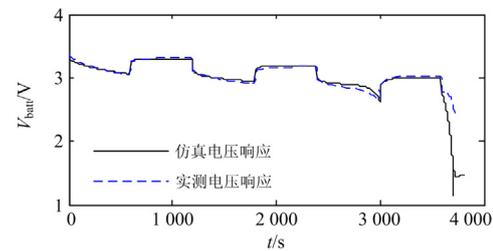


图 16 动态电压响应对比

Fig. 16 Dynamic voltage response comparison

通过上述稳、动态仿真对比表明: 模型能够准确描述电池动稳态特性, 仿真电压曲线与实测电压曲线吻合度良好。

基于上述电池模型, 设置锂电池已不同功率完成充放电工程, 其充放电电流如图 17(a)所示, 在 0~900 s、901~1 800 s 和 1 801~2 700 s 分别以 10 kW、4 kW 和 6 kW 放电, 而在 2 701~3 600 s、3 601~4 500 s 和 4 501~5 400 s 分别以 2 kW、10 kW 和 8 kW 充电, 并以此为周期循环充放电过程, 观测本文所提方法的荷电状态估计结果, 如图 17(b)所示。

从图 17 中可以看出, 所提方法可以精确地估计出锂电池荷电状态值, 估计误差小, 电池特性描述准确, 仿真电压曲线与实测电压曲线吻合度良好^[25]。

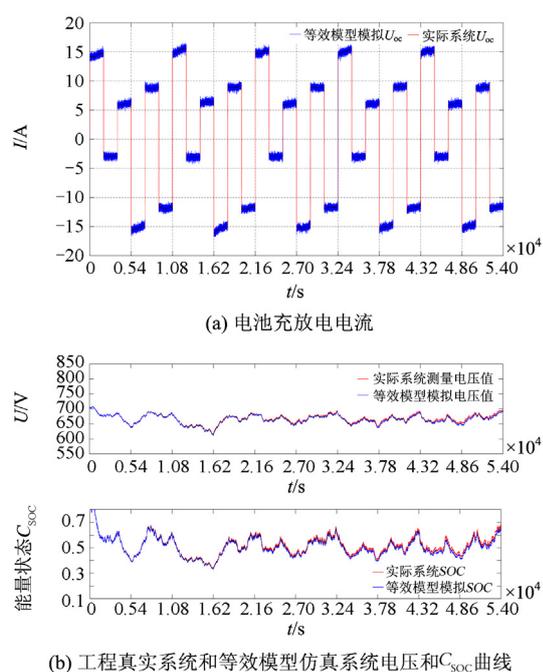


图 17 电池荷电状态仿真结果

Fig. 17 Simulation results of battery state of charge

4 结论

1) 本文在锂电池储能戴维南等效模型的基础上, 提出了一种考虑容量衰减、环境温度、自身温升、循环次数、电流倍率等影响的优化的储能单体, 实现了较为准确的建模。

2) 在建模的基础上, 本文考虑多种影响因素, 给出了确定其中各个参数的方法, 并以此为基础形成了一种时变参数校正的储能电池 SOC 估计方法, 实现对储能电池荷电状态实时、准确估计, 最后通过 Matlab/Simulink 仿真验证了模型的准确性与实用性。

3) 本文提出的电池模型可实现对面向调频的储能电池单体较为准确的描述, 运用扩展卡尔曼对锂电池的 SOC 状态以及 SOH 状态进行估计, 结果可信度高, 给未来电池建模的进一步研究打下良好基础。

参考文献

[1] 胡静, 黄碧斌, 蒋莉萍, 等. 适应电力市场环境下的电化学储能应用及关键问题[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 100-107.
HU Jing, HUANG Bibin, JIANG Liping, et al. Application and major issues of electrochemical energy storage under the environment of power market[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 100-107.

[2] 黄昊, 吴继平, 滕贤亮, 等. 基于 Fréchet 算法的电化学储能 AGC 控制性能评价指标[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 108-114.
HUANG Hao, WU Jiping, TENG Xianliang, et al. Performance indices of electrochemical energy storage for AGC control based on the discrete Fréchet algorithm[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 108-114.

[3] 孙诚斌, 李兆伟, 李碧君, 等. 电化学储能参与电网低频第三道防线的控制策略[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 27-34.
SUN Chengbin, LI Zhaowei, LI Bijun, et al. A control strategy for the low frequency third defense line of power grid containing the electrochemical energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 27-34.

[4] 李建林, 屈树慷, 黄孟阳, 等. 锂离子电池建模现状研究综述[J]. 热力发电, 2021, 50(7): 1-7.
LI Jianlin, QU Shukang, HUANG Mengyang, et al. A review of the current status of lithium-ion battery modeling[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(7): 1-7.

[5] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. A review of power system frequency regulation under high wind power penetration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.

[6] 程时杰, 文劲宇, 孙海顺. 储能技术及其在现代电力系统中的应用[J]. 电气应用, 2005, 24(4): 1-8.
CHENG Shijie, WEN Jinyu, SUN Haishun. Energy storage technology and its application in modern power systems[J]. Electrical Application, 2005, 24(4): 1-8.

[7] 吴佳梁, 曾赣生, 余铁辉. 风光互补与储能系统[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.

[8] 李宏仲, 段建民, 王承民. 智能电网中蓄电池储能技术及其价值评估[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

[9] COPPEZ G, CHOWDHURY S, CHOWDHURY S P. The importance of energy storage in renewable power generation: a review[C] // 45th International Universities Power Engineering Conference, August 31 – September 3, 2010, Cardiff, UK: 1-5.

[10] PARKHIDEH B, ZENG Jie, BAEK S, et al. Improved wind farm's power availability by battery energy storage systems: modeling and control[C] // 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, November 10-13, 2008, Orlando, FL, USA: 784-789.

[11] TOSHIHARU M, ICHIRO T, HISAO N, et al. A collaborative operation method between new energy-type

dispersed power supply and EDLC[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(3): 590-598.

[12] 李妍, 荆盼盼, 王丽, 等. 通用储能系统数学模型及其 PSASP 建模研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 51-57.
LI Yan, JING Panpan, WANG Li, et al. Research on the mathematical model of general energy storage system and its PSASP modeling[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 51-57.

[13] LIANG Liang, LI Jianlin, HUI Dong, et al. An optimal energy storage capacity calculation method for 100 MW wind farm[C] // 2010 International Conference on Power System Technology, October 24-28, Hangzhou, China: 1-4.

[14] YANG Hongxing, ZHOU Wei, LOU Chengzhi. Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system[J]. Applied Energy, 2009, 86(2): 163-169.

[15] YANG Hongxing, ZHOU Wei, LU Lin, et al. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm[J]. Solar Energy, 2008, 82(4): 354-367.

[16] LI J, GAO F, YAN G, et al. Modeling and SOC estimation of lithium iron phosphate battery considering capacity loss[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 61-69.

[17] ASANO H, WATANABE H, BANDO S. Methodology to design the capacity of a microgrid[C] // IEEE International Conference on System of Systems Engineering, April 16-18, 2007, San Antonio, TX, USA: 1-6.

[18] LI Q, CHOI S S, YUAN Y, et al. On the determination of battery energy storage capacity and short-term power dispatch of a wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(2): 148-158.

[19] MURTY V V S N, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-20.

[20] MAKAROV Y V, NYENG P, YANG B, et al. Wide-area energy storage and management system to balance intermittent resources in the Bonneville Power Administration and California ISO control areas[R]. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory, 2008.

[21] 周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 147-152.

ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. A review of research on microgrid energy storage technology[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147-152.

[22] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Calculation method of transmitting-end system transient overvoltage under DC bipolar blocking fault[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.

[23] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.

[24] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119-127.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Hybrid DC transmission system fault isolation method based on coordination of current limiter and circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.

[25] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.
SUN Liming, YANG Bo. Non-linear robust fractional-order control of battery/superconducting hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.

收稿日期: 2021-11-17; 修回日期: 2022-02-23

作者简介:

李建林(1975—), 男, 博士, 教授, 研究方向为大规模储能技术; E-mail: dkyjl@163.com

郭兆东(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为大规模储能技术; E-mail: 2806223793@qq.com

曾伟(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源及储能技术. E-mail: ZEJXDKY@163.com

(编辑 葛艳娜)