锂离子储能电池成组方式优化

严干贵,蔡长兴,段双明,李军徽,刘 莹

(东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室,吉林 吉林 132012)

摘要:电池组内单体电池的分散性问题降低了电池组的可用容量和循环寿命。针对电池成组方式对电池组 可用容量与循环寿命的影响问题,基于电池的Thevenin等效模型,分析了并联电池间不平衡电流交叉现象产 生的原因及作用;研究了不同成组方式对电池组可用容量的影响,提出了表征电池组容量分散性的容量极差 和容量分散度指标;通过仿真分析,得到了提升电池组可用容量的组合方式。搭建了电池组性能测试平台, 比较了6种拓扑结构锂离子电池模组的寿命衰减特征,遴选出了减缓电池组循环寿命衰减的成组结构。

0 引言

在现有的电池储能技术中,锂离子电池具有比 能量高、能量效率高和循环寿命长等优势,被广泛应 用于智能电网和电动汽车储能系统^[1-2]。由于单个 电池的电压和容量比较低,在储能系统中需要将 成百上千个单体电池串并联成高电压、大容量的电 池组^[3-4]。

电池成组方式包括电池成组的拓扑结构和电池 组中单体电池的组合方式。目前,电池最常见的串 并联成组拓扑结构有先串联后并联(SCM)结构和先 并联后串联(PCM)^[5]结构2种。例如青海省某地 15 MW / 18 MW · h 的储能系统由 28 560 节 200 A · h 的磷酸铁锂电池经SCM方式组成^[4];特斯拉S型号 电动汽车内的储能系统是由8000多节18650小容 量单体电池(即直径为18 mm、高为65 mm的圆柱形 电池)经PCM结构组成^[6]。众多实践应用已证实,在 安全性、可靠性和管理性等方面,小容量单体电池成 组比大容量电池具有更明显的优势[67]。电池的工 作电压、内阻和可用容量等方面的差异导致成组电 池单体间存在一定的分散性。受电池制造工艺的影 响,储能电池出厂时存在固有的分散性;运行工况和 充放电路径的差异又进一步扩大了成组电池间的分 散性,从而导致在运行过程中性能差的"短板电池" 制约了电池组可用容量和循环寿命的有效利用。生 产工艺的改进在一定程度上能减小电池组的固有分 散性^[8],却始终无法做到使所有电池参数完全一致; 而电池组在运行过程中的分散性则是难以避免

收稿日期:2020-08-20;修回日期:2021-01-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1766204);东北电力 大学博士科研启动基金资助项目(BSJXM-2019101)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(U1766204) and the Doctoral Research Foundation of Northeast Electric Power University(BSJXM-2019101) 的^[9]。随着循环次数的增加,电池组的分散性进一步扩大,电池组的性能衰减速度远大于单体电池的 衰减速度,最终导致电池组的可用容量和循环寿命 无法得到充分发挥^[10]。

事实上,除了工作环境和运行方式之外,电池成 组方式也是影响其安全性、可靠性、效率和成本的关 键因素^[11]。文献[7]通过3个性能相似的同类型 18650电池和一个其他类型的18650电池分别构建 PCM和SCM结构,结果表明PCM结构的放电容量大 于SCM结构的放电容量,但没有考虑电池组中单体 电池不同的组合方式对电池组性能的影响;文献 [12]从经济性的角度分析指出,SCM结构的电池组 的经济性不如PCM结构的电池组;为了降低成本并 延长电池组的循环寿命,文献[13]提出了可重构电 池组的概念,结果表明PCM结构的可靠性优于SCM 结构。

综上所述,目前对电池组的研究主要集中在分析电池组的整体性能,却忽略了电池组内单体电池的分散性对电池组可用容量和循环寿命的影响。本文从电池 Thevenin 等效模型的角度,分析并联电池 组不平衡电流交叉现象产生的原因及作用,提出表 征电池组容量分散性的指标;然后,建立电池组的仿 真模型,得到优化电池组可用容量的成组方案;最 后,搭建电池组的性能测试平台,对比6种不同结构 电池模组的循环寿命衰减曲线,遴选出减缓电池组 循环寿命衰减的成组结构。

1 电池Thevenin等效电路模型

储能电池的内部电化学特性比较复杂,外部表现为电路特性,通常采用等效电路模型表征电池的静态和动态特性^[14]。针对锂离子电池在实际应用中需要提供电池的荷电状态SOC(State Of Charge)和端口电气量等参数,本文采用一阶Thevenin模型对锂离子电池进行研究,等效电路如图1所示。图中,

 U_{oc} 为开路电压,随着 SOC 的减小而减小; U_1 为端电 压; R_o 为欧姆内阻,表征电池极板、电解液和间隔板 的电阻,随着电池老化程度的增加而不断增大; U_o 为 欧姆内阻 R_o 上的压降; R_p 和 C_p 分别为极化电阻和极 化电容,二者并联表征电池的极化反应,流经电池的 电流越大,极化现象越明显,极化电压 U_p 越大;I为 电池电流,以充电时的流向为正。



图 1 Thevenin 模型的等效电路 Fig.1 Equivalent circuit of Thevenin model

由基尔霍夫电压定律(KVL)、基尔霍夫电流定 律(KCL)和电容电压与电流之间的关系可得:

$$U_{1} = U_{1} - IR - U_{2} = U_{1} - \Delta U \qquad (1)$$

$$\dot{U}_{p} = -\frac{1}{C_{p}R_{p}}U_{p} + \frac{1}{C_{p}}I$$
(2)

其中, ΔU 为电池的内部压降, $\Delta U = IR_{o} + U_{po}$

根据SOC的定义,采用一阶Thevenin模型时电池SOC的表达式为:

$$S_{\text{soc}}(t) = S_{\text{soc}}(t-1) + \frac{\eta \int_{t-1}^{t} I \, \mathrm{d}t}{C_e}$$
(3)

其中, $S_{\text{soc}}(t)$ 、 $S_{\text{soc}}(t-1)$ 分别为电池在t和t-1时刻的SOC; C_e 为电池的最大可接受容量,单位为A·h; η 为电池的充放电效率。

在标准条件下,电池从充满状态以一定的电流 放电至截止电压,所发出的电量 $C_{\rm M}$ 与电池的额定容 量 $C_{\rm N}$ 之间的比值为电池的健康状态 SOH(State Of Health)。SOH为表征电池老化程度的指标,一般认 为当电池的SOH为80%时,电池将处于完全老化状 态,无法正常使用^[15]。SOH的计算式为:

$$S_{\rm SOH} = \frac{C_{\rm M}}{C_{\rm N}} \times 100 \,\% \tag{4}$$

2 电池组的容量分散性分析

电池组的容量分散性是指成组电池间容量的差 异性,其直接影响电池组的实际可用容量。理想电 池组中各单体电池的可用容量都是一致的,而在实 际应用中,电池容量的分散性是必然存在的,且随着 循环次数的不断累积,电池组中的部分电池可能长 期处于浅充浅放状态,另一部分电池长期处于满充 满放状态,从而进一步扩大电池组的分散性,最终劣 化电池组的调节能力^[16]。

2.1 不平衡电流交叉现象

并联电池组的分散性导致并联电池在运行过程 中产生不平衡电流^[78,11,17],图2为2个同类型锂离子 电池在常温(25 °C)条件下以1C(放电倍率)恒定电 流并联放电时的电流和SOC变化曲线(图中, I_1 , I_2 分 别为电池1、2的电流,电流为负值表示电池处于放 电状态; S_{socr} , S_{socr} 分别为电池1、2的SOC)。其中电 池1的SOH为95.1%,电池2的SOH为86%。





由图2可以看出,两并联电池的分散性导致流 经2个并联电池的电流不等于平均电流(放电电流 的1/2),产生了不平衡电流,且在2750s时出现了不 平衡电流交叉现象。将图2中的整个放电过程分为3 个阶段:阶段1为[0,250)s,是开始放电阶段;阶段2 为[250,2750)s;阶段3为2750s到放电结束时刻。

为了进一步说明图2中不平衡电流交叉现象产 生的原因和作用,建立如图3所示的并联等效电路 模型(图中的下标1、2分别表示电池1、2的物理量), 根据KCL和KVL可得到式(5)。

$$\begin{cases} U_{oc1} - \Delta U_{1} = U_{oc2} - \Delta U_{2} \\ I = I_{1} + I_{2} \\ \Delta U_{1} = I_{1} R_{o1} + U_{p1} \\ \Delta U_{2} = I_{2} R_{o2} + U_{p2} \\ \Delta U_{oc} = U_{oc2} - U_{oc1} \end{cases}$$
(5)





在阶段1,相较于平均电流,*I*₁和*I*₂呈现发散趋势,这是因为电池2的SOH更低,导致电池2的欧姆内阻和极化电阻均大于电池1的欧姆内阻和极化电阻,所以*I*₁增大,*I*₂减小,这是为了增大Δ*U*₁及降低

 ΔU_2 ,从而维持并联电压相等。

150

在阶段2,相较于平均电流, I_1 和 I_2 呈现收敛趋势,这是因为经历了阶段1后,电池2的SOC逐渐大于电池1的SOC,导致 $U_{oc1} < U_{oc2}$,这在一定程度上弥补了 ΔU_1 与 ΔU_2 之间的差距,所以 I_1 和 I_2 呈现收敛趋势,但仍有 $I_1 > I_2$ 。

在阶段3, I_1 和 I_2 的大小发生改变,经历了前2个 阶段之后,电池1的SOC明显小于电池2的SOC,2个 电池之间的 ΔU_{∞} 进一步增大,为了平衡并联电压, 需要使 $\Delta U_1 < \Delta U_2$,所以 I_1 进一步减小, I_2 进一步增 大,从而出现了循环电流交叉现象,使 $I_1 > I_2$ 转变为 $I_1 < I_2$ 。

所以,不平衡电流交叉现象在放电后期减缓了 电池1的SOC下降速率,加快了电池2的SOC下降速 率,最终使2个电池的SOC达到基本相等的状态。

若并联电池组在到达截止电压之前就停止放电进入静置状态,电池1和电池2会因为SOC的不同而产生循环电流^[1,3],即SOC大的电池2会给SOC小的电池1充电,最终使2个电池的SOC趋于相等。2个电池内部循环电流*I*₁₂的表达式为:

 $I_{12} = (U_{oc1} - U_{oc2} + U_{p2} - U_{p1}) / (R_{o1} + R_{o2})$ (6)

由式(6)可看出,循环电流的大小随着两电池参数之间差异的减小而减小。

所以,对于并联电池组而言,不论是运行过程中 的不平衡电流交叉现象还是静置时的循环电流现象, 最终都是为了使并联电池的SOC趋于相等。这2种 并联结构所特有的现象实现了电池组的自均衡,减 缓了并联电池组容量分散性进一步增大的趋势。

2.2 电池组的可用容量

电池组由容量和电压非常有限的单体电池经 串、并联构成,各单体电池的分散性将导致电池组因 个别电池首先达到运行极限而制约其他单体电池调 节能力的利用,故电池组是由"短板电池"制约的受 限调节电源。设单体电池*i*的电压为*u_i*,单体电池允 许的最高和最低电压分别为*U_{max}、U_{min}*,为了防止由*p* 个单体电池组成的电池组过充过放,电池组在充放 电过程中须满足如下约束条件:

$$\begin{cases} \max\{u_1, u_2, \cdots, u_p\} \in U_{\max} \quad 充电 \\ \min\{u_1, u_2, \cdots, u_p\} \ge U_{\min} \quad 放电 \end{cases}$$
(7)

单体电池的充 / 放电容量是指以(1/3)C工作电 流从电池当前状态充 / 放电至截止状态所吸收 / 释 放的容量。电池组的可用容量是指以(1/3)C放电电 流从电池组内某一节单体电池达到允许最高电压的 情况下放电直到组内某一节单体电池达到允许最低 电压时所能够释放的电量^[18]。当电池串联时,串联 电池组的容量为电池组容量最小电池的放电容量与 容量最大电池的充电容量之和;当电池并联时,并联 电池组的容量为各单体电池可用容量之和^[19]。所 以,由m个电池先并联成一个模块,再将n个并联模 块串联组成PCM结构(mPnS)的电池组的可用容量 C_{mPnS} 的计算式如式(8)所示;由n个电池先串联成一 簇,再将m个电池簇并联所组成SCM结构(nSmP)的 电池组的可用容量 C_{nSmP} 的计算式如式(9)所示。

$$C_{mPnS} = C_{mPnS,d} + C_{mPnS,c} = \min\{C_{P,1}S_{SOC,P,1}, C_{P,2}S_{SOC,P,2}, \cdots, C_{P,n}S_{SOC,P,n}\} + \min\{C_{P,1}(1-S_{SOC,P,1}), C_{P,2}(1-S_{SOC,P,2}), \cdots, C_{P,n}(1-S_{SOC,P,n})\}$$
(8)

$$C_{nSmP} = C_{nSmP,d} + C_{nSmP,c} = \sum_{j=1}^{m} C_{S,j,d} + \sum_{j=1}^{m} C_{S,j,c}$$
(9)

$$\begin{cases} C_{P,k} = \sum_{i=1}^{m} C_{P,ki} \quad k = 1, 2, \cdots, n \\ S_{SOC,P,k} = \frac{\sum_{i=1}^{m} C_{P,ki} S_{SOC,P,ki}}{C_{P,k}} \quad k = 1, 2, \cdots, n \\ C_{S,j} = \sum_{j=1}^{m} C_{S,j,d} + \sum_{j=1}^{m} C_{S,j,c} = \\ \min \{ C_{S,j1} S_{SOC,S,j1}, C_{S,j2} S_{SOC,S,j2}, \cdots, C_{S,jn} S_{SOC,S,jn} \} + \\ \min \{ C_{S,j1} (1 - S_{SOC,S,j1}), C_{S,j2} (1 - S_{SOC,S,j2}), \cdots, \\ C_{S,jn} (1 - S_{SOC,S,jn}) \} \quad j = 1, 2, \cdots, m \end{cases}$$
(10)

其中, $C_{mPns,d}$ 、 $C_{mPns,c}$ 分别为mPns结构电池组的放电容量、充电容量; $C_{nsmP,d}$ 、 $C_{nsmP,c}$ 分别为nSmP结构电池 组的放电容量、充电容量; $C_{P,k}$ 、 $S_{SOC,P,k}$ 分别为第k个 并联电池模块的容量、SOC; $C_{P,ki}$ 、 $S_{Soc,P,ki}$ 分别为第k个并联电池模块中第i个电池的容量、SOC; $C_{s,j}$ 为第 j个串联电池簇的容量; $C_{s,j}$ 、 $S_{Soc,S,j}$ (q=1,2,...,n)分 别为第j个串联电池簇中第q个电池的容量、SOC。

2.3 PCM与SCM结构的放电容量比较

PCM结构是将已并联的电池模块串联成电池 组,各并联模块相互独立、互不影响,并联电池之间 单独发生自均衡;而SCM结构是将已串联的电池簇 并联成电池组,各电池簇之间产生循环电流,串联电 池簇整体参与自均衡。为了比较PCM与SCM结构 的放电容量,对附录中图A1所示的3P3S和3S3P拓 扑结构进行分析,图A1中的电池组由9个容量互异 的电池按照相同的组合方式构成,由于并联结构的 电压相等,电池之间会产生循环电流,且电压与容量 存在唯一对应关系,最终使电池组中各单体电池的 放电容量发生变化,从而影响整组电池的放电容量。 3P3S和3S3P结构的电池组在自均衡前、后各单体电 池的容量变化情况如附录中图A1所示。

经历自均衡之后,根据式(8)—(10)可以得到 3P3S结构电池组的放电容量为12.3 A·h,而3S3P结 构电池组的放电容量为12.1 A·h。由此可知,SCM 结构是每簇电池整体发生自均衡,其均衡效果比较差,而PCM结构的自均衡发生在各并联单体电池之间,更有利于电池组可用容量的充分发挥。

2.4 电池组容量分散性指标

为了更好地描述电池组的容量分散性,本文提 出电池组的容量极差和容量分散度来表征电池组的 容量分散性,其定义如下:

$$\mu = \max\{C_i\} - \min\{C_j\} \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(C_i - \bar{C}\right)^2}{N - 1}} \times 100\%$$
(12)

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} C_i \tag{13}$$

其中, μ 为电池组的容量极差; ϵ 为电池组的容量分 散度; C_i 、 C_j 分别为单体电池i、j的容量;N为电池组 中单体电池的数量; \overline{C} 为电池组的平均容量。

由式(11)和式(12)可以看出,当电池组内单体 电池的容量完全一致时,电池组的容量极差和分散 度都为0,所以µ和ε的值越小,表示电池组的容量 分散性越小。

3 电池组的放电容量比较

3.1 放电容量仿真分析

为了比较 PCM 和 SCM 结构在放电容量方面的 差异,分别对由 6个容量各不相同的单体电池构建 的 3P2S 和 2S3P 结构电池组进行仿真建模,每种拓 扑结构共有 6!=720 种不同的组合方式。6个单体电 池当前放电容量分别为 1.341、1.369、1.402、1.487、 1.521、1.598 A·h,2种结构电池组的放电容量如附录 中图 A2 所示。由图 A2 可以看出,3P2S 结构的放电 容量 C_{3P25} 始终不低于 2S3P 结构的放电容量 C_{2S3P}。

为了更好地挖掘放电容量与μ和ε之间的关系, 对图 A2 中 3P2S 和 2S3P结构电池组的放电容量进行 统计,并求得相应的μ和ε,由于ε的数值较小,为了 便于比较,将ε的数值扩大40倍,然后将电池组按照 放电容量从小到大的顺序进行组合,结果见图4。



图4 电池组的放电容量与 μ 和 ε 的关系

Fig.4 Relationship between discharging capacity of battery pack and values of μ and ε

由图4(a)可知,3P2S结构的μ和ε数值总是随 着放电容量的增加而减小,当μ和ε达到最小值时, 3P2S结构的放电容量最大;由图4(b)可知,2S3P结 构的μ和ε数值随着放电容量的增加整体呈现下降 趋势,当容量分散性最小时,放电容量最大。

本文又分别对由 8 个容量各不相同的单体电池 构建的 2P4S 和 4S2P结构电池组进行仿真建模,比 较了 8!=40 320 种不同组合方式的放电容量,2 种结 构电池组的放电容量比较如附录中图 A3 所示。由 图 A3 同样可以看出,2P4S结构的放电容量 C_{2P4S} 始 终不低于 4S2P结构的放电容量 C_{4S2P} 。2P4S 和 4S2P 结构电池组的放电容量与 $\mu \pi \varepsilon$ 之间的变化关系见 附录中图 A4。图 A4 所示结果与图 4 一致,当 $\mu \pi \varepsilon$ 取得最小值时,电池组的放电容量达到最大。不同 组合方式下 3P2S 和 2S3P、2P4S 和 4S2P结构电池组 的放电容量比较结果如表 1 所示。

表1 不同组合方式下电池组放电容量比较

Table 1	Com	parison	of discha	rging	capacity	of
battery	packs	among	different	group	oing mod	les

容量比较	组合 方式数	占比 / %	容量比较	组合 方式数	占比 / %
$C_{3P2S} > C_{2S3P}$	360	50	$C_{2P4S} > C_{4S2P}$	30240	75
$C_{3P2S} = C_{2S3P}$	360	50	$C_{2P4S} = C_{4S2P}$	10080	25
$C_{3P2S} < C_{2S3P}$	0	0	$C_{2P4S} < C_{4S2P}$	0	0

由表1可以看出,当单体电池的组合方式相同时,PCM结构的放电容量始终不低于SCM结构的放 电容量,且随着成组电池数量的增加,PCM结构电池 组的放电容量大于SCM结构电池组的放电容量的 组合方式数量也在增加。

综合上述分析可知,串并联电池组采用容量分 散性最小的PCM结构更有利于充分发挥电池组的 可用容量。

3.2 实验验证

在单体电池的容量和组合方式一致的情况下, 比较 3P2S 和 2S3P 结构电池组的实际放电容量与仿 真结果,随机选择附录中图 A2 中的 3 种组合方式进 行实验,对比结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,放



电容量的实验结果与仿真结果基本一致,最大误差 只有1.13%,验证了3.1节中仿真结果的正确性。

4 电池组的循环寿命比较

采用同型号同批次的锂电池进行实验,锂离子电池单体的电压上、下限分别为4.2、2.75 V,额定容量为1.7 A·h,先对大量锂电池进行3次充放电循环预实验,选择出分散性较小的电池作为实验电池。

将实验电池按单体、双电池串联、双电池并联、 三电池并联、3P2S、2S3P这6种结构搭建电池模组, 为保证温度等环境因素对不同结构电池模组产生的 影响一致,在实验室同时对6个电池模组以(1/3)C 的恒定电流进行充电,直到整体达到电压上限或某 一单体电池达到充电截止电压时停止充电;静置2h 后再对电池以(1/3)C的恒定电流进行放电,直到整 体达到电压下限或某一单体电池达到放电截止电压 时停止放电,然后再静置2h;依此循环,直到某一电 池模组完全老化为止。各电池模组的SOH衰减情 况如图6所示。



图6 不同电池模组的SOH曲线

Fig.6 SOH curves of different battery modules

由图6可知,经过171次循环实验,2S3P结构电 池模组的SOH首先达到80%,此时双电池串联结 构、3P2S结构、双电池并联结构、三电池并联结构、 单体结构的SOH分别为82.05%、85.63%、89.69%、 90.22%、90.90%。可以看出,单体电池结构的寿命 衰减速度最慢,说明不论是串联结构还是并联结构 都将加速电池组的老化:从单体、双电池并联和三电 池并联结构的SOH变化曲线可以看出,单体结构电 池模组的寿命衰减速度比并联结构电池模组寿命更 慢,说明并联电池间的不平衡电流交叉现象和循环 电流现象在降低了电池容量分散性的同时,一定程 度上也加剧了电池模组循环寿命的衰减,而并联电 池数量的增加会减小循环电流对电池模组寿命的影 响;从单体结构、双电池串联结构、三电池并联结构 和3P2S结构的SOH变化曲线可以看出,电池串联结 构对电池 SOH 的影响最大, 串联结构是电池组循环 寿命衰减的主要原因;对比 3P2S 结构和 2S3P 结构 的SOH曲线可以看出,独立的并联模块更有利于电

池间的一致性,所以相比于SCM结构,PCM结构更 有利于延长串并联电池组的循环寿命。

由第3节和第4节的仿真与实验分析结果可知, 电池组采用容量极差μ和容量分散度ε最小的PCM 结构能最有效地优化电池组的可用容量,并延长电 池组的循环寿命。

5 结论

本文以锂离子电池作为研究对象,针对电池成 组方式对电池组可用容量与循环寿命的影响问题, 从等效模型的角度研究了并联电池组不平衡电流交 叉现象产生的原因及作用,分析了PCM和SCM结构 在可用容量上的差异,提出了表征电池组容量分散 性的指标;建立了电池组的仿真模型,得到了电池组 采用容量极差和容量分散度最小的组合方式更有利 于充分发挥电池组容量的结论;搭建电池组性能测 试平台,对6种不同结构电池模组的寿命衰减曲线 进行了分析比较,结果表明PCM结构比SCM结构具 有更长的循环寿命。因此,电池组采用容量极差和 容量分散度最小的PCM结构能最大化地提升电池 组的可用容量和循环寿命。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- 张维戈,时玮,姜久春,等.动力锂离子电池串并联仿真技术研 究[J]. 电网技术,2012,36(10):70-75.
 ZHANG Weige,SHI Wei,JIANG Jiuchun, et al. Numerical simulation technique of series-parallel power lithium ion battery
 [J]. Power System Technology,2012,36(10):70-75.
- [2] 彭飞,刘志祥,任敬国,等.新型无均衡管理光伏锂电储能发电模组及其 MPPT 控制策略[J].电力自动化设备,2017,37(4): 73-81.
 PENG Fei,LIU Zhixiang,REN Jingguo, et al. PV / Li-ion energystorage power module based on non-balancing cell management and its MPPT control[J]. Electric Power Automation Equip-

[3] 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.
 [4] 郭伟,赵洪山. 基于 DMPC 加权一致性算法的电池储能阵列分 组控制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(1):133-140.
 GUO Wei,ZHAO Hongshan. Grouping control strategy of battery energy storage array based on DMPC weighted consensus algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2020, 40(1):133-140.
- [5] MIYATAKE S, SUSUKI Y, HIKIHARA T, et al. Discharge characteristics of multicell lithium-ion battery with nonuniform cells[J]. Journal of Power Sources, 2013, 241:736-743.
- [6] BERDICHEVSKY G, KELTY K, STRAUBEL J B, et al. The tesla roadster battery system[J]. Tesla Motors, 2006, 1(5): 1-5.
- [7] 慈松. 能量信息化和互联网化管控技术及其在分布式电池储 能系统中的应用[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3643-3648.

CI Song. Energy informatization and Internet-based manage-

152

ment and its applications in distributed energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3643-3643.

- [8] GONG X Z, XIONG R, MI C C. Study of the characteristics of battery packs in electric vehicles with parallel-connected lithium-ion battery cells[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1872-1879.
- [9] 郭杰,王小鹏,孙春霞,等.动力电池串并联结构重组的均衡充 电方法[J].电力自动化设备,2019,39(5):163-168.
 GUO Jie,WANG Xiaopeng,SUN Chunxia, et al. Balanced charging method of power batteries with reconstructed series-parallel structure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5):163-168.
- [10] ZHOU L, ZHENG Y J, OUYANG M G, et al. A study on parameter variation effects on battery packs for electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2017, 364:242-252.
- [11] BRAND M J, HOFMANN M H, STEINHARDT M, et al. Current distribution within parallel-connected battery cells[J]. Journal of Power Sources, 2016, 334: 202-212.
- [12] PLETT G L, KLEIN M J. Simulating battery packs comprising parallel cell modules and series cell modules [C] // 24th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition 2009. Stavanger, Norway: IEEE, 2009: 146-162.
- [13] GANESAN N, BASU S M, HARIHARAN K S, et al. Physics based modeling of a series parallel battery pack for asymmetry analysis, predictive control and life extension[J]. Journal of Power Sources, 2016, 322:57-67.
- [14] 黄凯,郭永芳,李志刚.基于信息反馈粒子群的高精度锂离 子电池模型参数辨识[J].电工技术学报,2019,34(增刊1): 378-387.

HUANG Kai, GUO Yongfang, LI Zhigang. High precision parameter identification of lithium-ion battery model based on feedback particle swarm optimization algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34 (Supplement 1): 378-387.

[15] 焦东升,王海云,朱洁,等.基于离散Fréchet距离的电动汽车 电池健康状态诊断方法[J].电力系统保护与控制,2016,44 (12):68-74.

JIAO Dongsheng, WANG Haiyun, ZHU Jie, et al. EV battery SOH diagnosis method based on discrete Fréchet distance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12):68-74.

- [16] 张娥,徐成,王康丽,等. 电池组分段混合均衡控制策略[J].
 电力自动化设备,2020,40(3):168-173.
 ZHANG E,XU Cheng,WANG Kangli, et al. Segmented hybrid equalization control strategy for battery packs[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(3):168-173.
- [17] BAUMANN M,WILDFEUER L,ROHR S,et al. Parameter variations within Li-ion battery packs-theoretical investigations and experimental quantification[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 18:295-307.
- [18] 郑岳久. 车用锂离子动力电池组的一致性研究[D]. 北京:清 华大学,2014.
 ZHENG Yuejiu. Study on cell variations of lithium ion power

battery packs in electric vehicles [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.

[19] YE M, SONG X, XIONG R, et al. A novel dynamic performance analysis and evaluation model of series-parallel connected battery pack for electric vehicles [J]. IEEE Access, 2019, 7:14256-14265.

作者简介:



严干贵

严干贵(1971—),男,江西鹰潭人,教 授,博士,主要研究方向为新能源发电运行 控制、大规模储能技术应用和电力系统稳定 与控制等(E-mail:yangg@neepu.edu.cn);

蔡长兴(1995—),男,江西贛州人,硕士 研究生,主要研究方向为电池储能技术在 电力系统中的应用(**E-mail**:caichangxing85@ 163.com);

段双明(1984-),男,吉林长春人,实

验师,博士,通信作者,主要研究方向为新能源发电运行控制 (E-mail:duansm@neepu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Grouping mode optimization of lithium-ion energy storage battery

YAN Gangui, CAI Changxing, DUAN Shuangming, LI Junhui, LIU Ying

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,

Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The dispersity of single cells in the battery pack reduces the available capacity and cycle life of the battery pack. Aiming at the above problem, based on the Thevenin equivalent model of battery, the cause and effect of unbalanced current crossover among parallel cells are analyzed. The influence of different grouping modes on the available capacity of battery pack is studied, and the capacity range and capacity dispersion degree indexes representing the capacity dispersity of the battery pack are proposed. The performance test platform of battery pack is built, the life attenuation characteristics of six lithium-ion battery modules with different topological structures are compared, and the grouping structures which can reduce the cycle life attenuation of battery pack are selected.

Key words: lithium-ion energy storage; battery pack; dispersity; available capacity; cycle life; capacity range; capacity dispersion degree

附 录





Fig.A4 Relation between discharging capacity battery pack and values of μ and ε