

# 基于退役电池阈值设定和分级控制的弃风消纳模式

王凯丰<sup>1,2</sup>, 谢丽蓉<sup>1</sup>, 乔颖<sup>2</sup>, 王小芬<sup>3</sup>, 包洪印<sup>4</sup>

(1. 新疆大学 可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084;

3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106;

4. 中船重工海为(新疆)新能源有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:**考虑到风电并网波动性和不确定性造成大量弃风的弊端,为了提高风电场的综合效益,提出基于退役电池阈值设定和分级控制的弃风消纳模式以降低储能成本。考虑到退役电池状态的不一致性会导致整体储能的效率低下,控制效果很难达到预期的情况,对退役电池充放电深度与循环寿命之间的关系进行分析,利用分段概率分布函数设定理想退役电池的充放电阈值范围;为了延长退役电池的使用寿命,利用分级控制策略实现其分级实时动态切换储能功能。对所提策略进行算例分析,结果表明分级控制策略相较于整体控制策略具有更好的经济性,促进了弃风消纳。

**关键词:**退役电池;弃风消纳;充放电深度;阈值设定;分级控制;储能系统

**中图分类号:**TM 614

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202008033

## 0 引言

近年来,我国弃风率居高不下,2015—2018年间平均弃风率高达12.75%,利用储能减少弃风是一种值得尝试的方式<sup>[1-4]</sup>。目前我国新能源汽车产量和保有量约为全球总量的一半,据相关专家从电池寿命、车辆使用工况等方面推测,由于当电池的可用容量低于80%时需要更换,预计至2020年年底我国退役电池总量将达到25 GW·h左右。将低成本且具有高剩余容量的退役电池梯次利用于弃风消纳具有广阔的应用前景。

国内外学者对将储能或退役电池应用于风光消纳方面进行了一定的研究,文献[5-7]建立了考虑储能/混合储能动态效率的风储或风光储联合发电系统的运行优化模型,可有效提升风电的消纳效果,但储能成本较高;文献[8]提出将电动汽车的退役电池重组并应用于光伏电站的电池梯次利用方案,通过案例分析可知对电动汽车退役电池的梯次利用不但

可以降低电池的使用成本,还兼具资源循环利用和节能减排的社会效益;文献[9]提出了双向互补电池储能系统(BESS)的控制策略,确定了充放电临界荷电状态(SOC)的最佳限定区间为[0.2, 0.8],但策略的优化目标非退役电池;文献[10]提出了退役电池梯次利用储能系统成本竞争力评估方法,得出退役电池在容量保持率接近80%时具有成本竞争优势,但退役电池的剩余容量是否都能保持在80%左右有待考证;文献[11]建立了退役电池性能预测模型,并对其进行了验证,结果表明退役电池可梯次利用于储能领域的筛选重组和运行参数的设定,但未对退役电池的充放电临界SOC的最佳限定区间进行设定;文献[12-15]对多能互补运行的经济性影响因素进行了分析,结果表明储能的容量大小是影响储能经济性的主要因素之一,因此对退役电池容量兼顾充放电临界SOC最佳限定区间进行优化配置至关重要;文献[16]提出了一种考虑网架结构的以提高风电接纳能力与风电场运行效益为目标的电池储能系统配置双层优化模型,但未考虑电池频繁吞吐会影响其使用寿命的问题。

综上所述,如何在提高经济效益的情况下合理选择退役电池充放电临界阈值区间及其控制策略方面的研究鲜见报道。本文对退役电池充放电深度与循环寿命之间的关系进行了数据拟合,得出较为理想的充放电深度;采用分段概率分布函数建模统计方法,确定退役电池充放电阈值范围;提出了基于退役电池充放电临界阈值范围合理选择及分级控制的弃风消纳模式;将整体储能装置平均分成2个容量相同的储能装置,制定了分级储能吞吐模式动态切换的弃风消纳控制策略。最后进行了案例分析,并建

**收稿日期:**2019-11-17; **修回日期:**2020-06-26

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51667021);新疆维吾尔自治区区域协同创新专项(科技援疆计划)(2018E02072);新疆维吾尔自治区高校科研计划自然科学重点资助项目(XJEDU2020I004);新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJ2020G056)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51667021), Xinjiang Uygur Autonomous Region Regional Collaborative Innovation Project(Science and Technology Aids Program)(2018E02072), Xinjiang Uygur Autonomous Region Natural Science Key Project of University Research Program(XJEDU2020I004) and Xinjiang Uygur Autonomous Region Postgraduate Research and Innovation Project(XJ2020G056)

立评估体系模型对整体控制和分级控制这 2 种控制策略的相对经济性进行了对比分析,分析结果表明:本文所提弃风消纳模式既可促进风电消纳,又可延长退役电池的使用寿命。

## 1 退役电池特性及阈值设定

### 1.1 退役电池残余寿命特性

退役电池,顾名思义就是无法继续为电动汽车提供高密度能量的电池。一般情况下,电动汽车电池的健康使用条件是:剩余可用电池容量为电池额定容量的 80%~100%。当电动汽车的电池容量低于额定容量的 80% 时,因容量下降而需要频繁充电,导致后续行驶里程降低,从而不得不更换新的电池。现阶段,退役电池的主要类型以磷酸铁锂电池为主,其整体价值偏低且直接处理会对环境造成一定的污染。目前常规储能装置的成本最少为 3000 元/(kW·h),而退役电池的成本可降至 1000 元/(kW·h)以下。

分别采集出租车和公交大巴 2 种类型汽车的退役电池各 55 个,由其组成电池模块的剩余容量如图 1 所示。由图可知,退役电池一般拥有 70% 以上的剩余容量,仍具有利用价值<sup>[17]</sup>。但是经过串并联后组成储能装置的各退役电池的规格不尽相同,会出现同组中各退役电池剩余容量不同的情况。退役电池状态的不一致性会导致整体储能的效率低下,控制效果很难达到预期。同时部分退役电池会出现电量溢出或过度放电的情况,给退役电池的使用寿命造成了很大的影响。

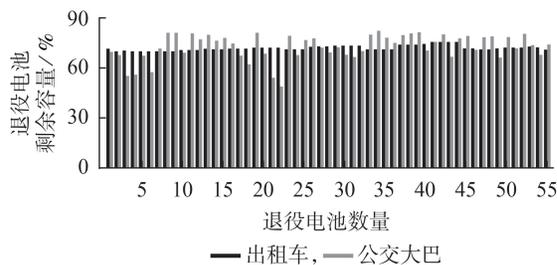


图 1 退役电池的剩余容量

Fig.1 Remaining capacity of retired battery

由图 1 可得,出租车退役电池的剩余容量偏差较小,分布较为集中,而公交大巴退役电池的剩余容量偏差较大,需筛选残余寿命较高的退役电池来促进风电消纳。

按照文献<sup>[18-20]</sup>的数据分析不同剩余容量与残余寿命之间的关系,其中不同剩余容量退役电池的残余寿命已折算为新电池在充满满放状态下的标准循环次数,分析拟合结果见附录中图 A1(图中残余寿命次数按新电池满标准循环次数折算)。

由图 A1 可知,文献<sup>[18-20]</sup>的数据分布呈指数

形式,不同剩余容量的残余寿命数据较为集中,其中文献<sup>[18]</sup>的数据拟合曲线介于 3 条曲线之间,将其作为典型数据曲线进行分析,拟合结果如式(1)所示。

$$L_b = a_1 e^{-[(R_c - b_1)/c_1]^2} \quad (1)$$

其中, $L_b$ 为残余寿命; $R_c$ 为退役电池的剩余容量; $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 为拟合系数,按图 A1 中的数据分别取值为 2856、1.072、0.4249。

并且由图 A1 可知,随着剩余容量的减少,残余寿命呈快速减少状态,当剩余容量从 75% 降至 70% 时,残余寿命减少了 376 次,而残余寿命过少将影响风电场的收益。

根据图 A1 中的数据,选取剩余容量约为 70% 的退役电池的残余寿命数据为例,对单体退役电池充放电深度与循环寿命之间的关系进行了拟合分析<sup>[18]</sup>,其中循环寿命为某一固定充放电深度下未折算的循环寿命,退役电池充放电次数与循环寿命之间的关系拟合曲线见附录中图 A2。

图 A2 显示数据分布呈负指数形式,拟合结果如式(2)所示。

$$N_{\text{cfl}}(D_{\text{DoD}}) = a_2 e^{-[(D_{\text{DoD}} - b_2)/c_2]^2} \quad (2)$$

其中, $N_{\text{cfl}}(D_{\text{DoD}})$ 为电池的循环次数; $D_{\text{DoD}}$ 为电池的充放电深度; $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$ 为拟合系数,按图 A2 中数据分别取值为 3976、-0.1644、1.316。

由图 A2 可知,随着退役电池充放电深度的增加,其循环次数和使用寿命急剧减少;而较浅的充放电深度可以增加电池的循环寿命,但其消纳弃风的能力将会被大幅削弱,因此退役电池存在一个较为理想的充放电临界阈值。在该充放电临界阈值范围内,弃风消纳能力和循环寿命将达到平衡状态。

为了寻找较为理想的充放电临界阈值范围,根据式(3)计算较为理想的充放电深度。

$$F = QD_{\text{DoD}}pp - C/N_{\text{cfl}}(D_{\text{DoD}}) \quad (3)$$

其中, $F$ 为净收益; $Q$ 为储能容量; $p$ 为风电价格; $\rho$ 为电池的充放电效率; $C$ 为储能成本。

由上文数据及式(3)计算分析可得,磷酸铁锂退役电池在目前数据情况下的充放电深度为 55%。

### 1.2 退役电池充放电临界阈值设定

由于电池具有较为理想的充放电深度,当充放电深度较深时,充放电阈值范围较大,消纳弃风能力较强,但同时其循环寿命将会急速下降且满足此充放电阈值范围的退役电池较少;反之,当充放电深度较浅时,充放电阈值范围较小,循环寿命将会增大,但弃风消纳能力较弱。因此,充放电临界阈值的设定同时影响弃风消纳效果和退役电池的有效使用。需分析不同类型退役电池所剩残余寿命情况,以此为依据进行退役电池充放电阈值设定。利用分段概

率分布函数的概率统计计算方法,对退役电池剩余容量进行概率划分,综合概率系数对充放电阈值进行合理设定。

分段概率分布函数描述了退役电池剩余容量序列中各剩余容量数值落在被划分为一定数量区间段剩余容量区间内的概率,如式(4)所示<sup>[21]</sup>。

$$\beta_{F,e_i} = F(e_i, u, v) = \frac{\sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=1}^N |e_i|}{N_{\text{num}}} \quad (4)$$

其中,  $\beta_{F,e_i}$  为分段概率,表示退役电池剩余容量序列  $E$  中的元素  $e_i$  落在区间  $[\min\{e_i\} + uZ_{\text{zone}}, \min\{e_i\} + vZ_{\text{zone}}]$  内的概率,  $u, v$  为比例系数,  $Z_{\text{zone}}$  为各分段的长度,由式(5)计算所得;  $N_{\text{num}}$  为  $E$  中元素的总数;  $N$  为退役电池剩余容量值域被划分的段数。

$$Z_{\text{zone}} = \frac{\max\{e_i\} - \min\{e_i\}}{N} \quad (5)$$

## 2 退役电池储能控制策略及优化

### 2.1 控制策略建模

风电累计装机容量增加加剧了电力系统的调峰难度,为了确保风电出力满足负荷需求,调度中心需实时对风电场的出力进行分配。而风电出力的波动性和随机性无法保证风电场出力精确跟随调度指令,致使产生弃风现象<sup>[22]</sup>。

本文以利用退役电池进行风电消纳为主要目标,当风电场的理论发电量超过电网限电量,即产生弃风时,利用退役电池存储弃风电量;当风电场的理论发电量低于电网限电量时,利用退役电池储存的电量进行并网,使其尽量达到所限电量的要求。退役电池的充电、放电控制函数分别如式(6)和式(7)所示。

$$P_{\text{ch}} = \begin{cases} P_L - P_{\text{sw}} & P_L > P_{\text{sw}} \ \& \ \beta_{\text{min}} \leq S_{\text{SOC}} < \beta_{\text{max}} \\ 0 & P_L > P_{\text{sw}} \ \& \ S_{\text{SOC}} = \beta_{\text{max}} \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{\text{disch}} = \begin{cases} P_{\text{sw}} - P_L & P_L < P_{\text{sw}} \ \& \ \beta_{\text{min}} < S_{\text{SOC}} \leq \beta_{\text{max}} \\ 0 & P_L < P_{\text{sw}} \ \& \ S_{\text{SOC}} = \beta_{\text{min}} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $P_L$  为理论发电量;  $P_{\text{sw}}$  为实际并网电量;  $S_{\text{SOC}}$  为储能电池的 SOC;  $P_{\text{ch}}$  为退役电池的充电功率;  $P_{\text{disch}}$  为退役电池的放电功率;  $\beta_{\text{min}}, \beta_{\text{max}}$  分别为充放电最低、最高阈值。

### 2.2 控制策略优化

为了使退役电池运行在最佳状态下,本文提出一种基于退役电池的分级储能吞吐模式动态切换优化控制策略,其基本原理如下:基于总容量将退役电池分为2个容量相同的分级储能装置 A、B,其中储能装置 A 的功能为存储弃风电量(充电),储能装置 B 的功能为释能并网(放电),当达到所设定的条件

时,储能装置 A、B 的充放电状态将进行切换,通过控制策略层实现分级储能装置 A、B 功能的实时动态切换。

分级储能装置 A 的充电功率、B 的放电功率分别如式(8)和式(9)所示。

$$P_{\text{Ach}} = \begin{cases} P_L - P_{\text{sw}} & P_L > P_{\text{sw}} \ \& \ \beta_{\text{min}} \leq S_{\text{SOC}}^{\text{Ach}} < \beta_{\text{max}} \\ 0 & P_L > P_{\text{sw}} \ \& \ S_{\text{SOC}}^{\text{Ach}} = \beta_{\text{max}} \end{cases} \quad (8)$$

$$P_{\text{Bdisch}} = \begin{cases} P_{\text{sw}} - P_L & P_L < P_{\text{sw}} \ \& \ \beta_{\text{min}} < S_{\text{SOC}}^{\text{Bdisch}} \leq \beta_{\text{max}} \\ 0 & P_L < P_{\text{sw}} \ \& \ S_{\text{SOC}}^{\text{Bdisch}} = \beta_{\text{min}} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $P_{\text{Ach}}$  为分级储能装置 A 的充电功率;  $P_{\text{Bdisch}}$  为分级储能装置 B 的放电功率;  $S_{\text{SOC}}^{\text{Ach}}, S_{\text{SOC}}^{\text{Bdisch}}$  分别为分级储能装置 A 充电、B 放电时的 SOC。

实时动态切换控制策略如下:①当  $t_{S_{\text{SOC}}^{\text{Ach}} = \beta_{\text{max}}} = t_{S_{\text{SOC}}^{\text{Bdisch}} = \beta_{\text{min}}}$  或者  $t_{S_{\text{SOC}}^{\text{Ach}} = \beta_{\text{max}}} \neq t_{S_{\text{SOC}}^{\text{Bdisch}} = \beta_{\text{min}}}$  且  $S_{\text{SOC}}^{\text{Bdisch}} = \beta_{\text{min}}$  时,储能装置 A 和 B 进行功能切换;②当  $S_{\text{SOC}}^{\text{Ach}} = \beta_{\text{min}}$  且  $S_{\text{SOC}}^{\text{Bdisch}} = \beta_{\text{min}}$  时,储能装置 A 和 B 停止功能切换,储能装置 A 的充放电状态进行转换,此时  $P_{\text{Ach}} = P_{\text{Bdisch}} = \frac{1}{2} Q \beta_{\text{min}}$ ;③当  $S_{\text{SOC}}^{\text{Ach}} = \beta_{\text{max}}$  且  $S_{\text{SOC}}^{\text{Bdisch}} = \beta_{\text{max}}$  时,储能装置 A 和 B 停止功能切换,此时  $P_{\text{Ach}} = P_{\text{Bdisch}} = 0$ 。其中,  $t_{S_{\text{SOC}}^{\text{Ach}} = \beta_{\text{max}}}, t_{S_{\text{SOC}}^{\text{Bdisch}} = \beta_{\text{min}}}$  分别为分级储能装置 A、B 达到充放电阈值的时刻。

退役电池分级切换控制主要分为以下3种情况。

(1)情况1:总控制层实时采集2个分级退役电池储能装置的 SOC 及容量,当存储弃风电量储能装置和释能并网储能装置的 SOC 同时达到所设置的阈值时,互换存储弃风电量储能装置 A 与释能并网储能装置 B 的功能,依此循环往复。

(2)情况2:当存储弃风电量储能装置和释能并网储能装置的 SOC 未同时达到所设置的阈值时,以释能并网储能装置的 SOC 所达到阈值的时刻作为优先级进行存储弃风电量储能装置和释能并网储能装置的功能切换,依此循环往复。

(3)情况3:为防止控制系统宕机,设定强制执行指令,当存储弃风电量储能装置和释能并网储能装置的 SOC 均已达到最低阈值  $\beta_{\text{min}}$  或最高阈值  $\beta_{\text{max}}$  时,若仍需进行弃风电量并网或储存,此时储能装置强制执行停机工作,直至接收到下一个并网指令。

优化后3种情况的控制策略流程图见图2。图中,  $S_{\text{SOC}}^{\text{A}}, S_{\text{SOC}}^{\text{B}}$  分别为分级储能装置 A、B 的 SOC;  $S_{\text{SOC}}^{\text{Adisch}}, S_{\text{SOC}}^{\text{Bch}}$  分别为分级储能装置 A 放电、B 充电时的 SOC。

## 3 算例分析

### 3.1 数据选取及相关参数设定

#### 3.1.1 风电数据选取

本文选取新疆地区某装机容量为 50 MW 风电

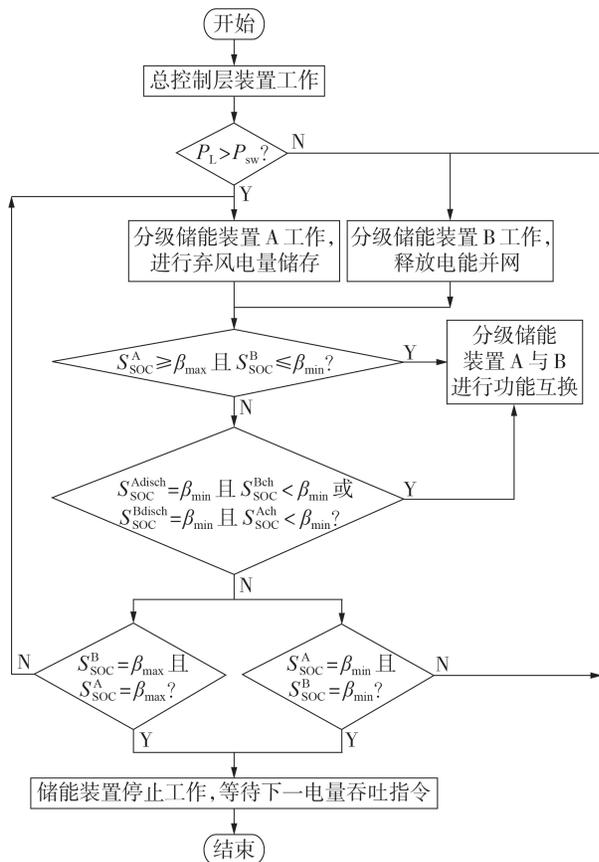


图 2 控制策略优化流程图

Fig.2 Flowchart of optimization control strategy

场的 800 组分钟级数据,为了便于数据的处理计算,将其归算为小时级数据。风电场数据包括小时级风电场理论发电量、电网指令等,具体见附录中图 A3。

### 3.1.2 退役电池充放电阈值设定

为了进一步说明不同类型退役电池的剩余容量特性基本一致,本文选取图 1 中的 2 组不同类型退役电池进行剩余电量的数理统计,根据式(4)和式(5)进行概率密度计算,并给出阈值选取的理由,结果分别如图 3 所示。

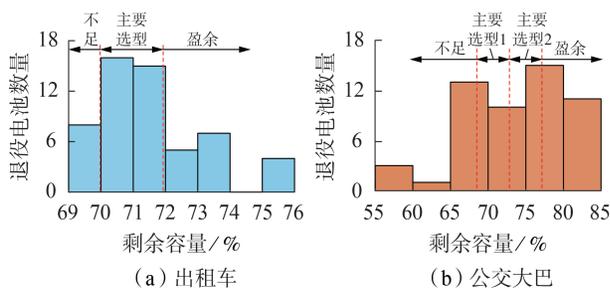


图 3 退役电池的剩余容量分布

Fig.3 Distribution of remaining capacity for retired batteries

由图 3 可知,2 种类型退役电池的剩余容量大多分布在 65%~75% 之间,其中剩余容量为 70% 左右的出租车退役电池的数量占总数量的 50% 以上,剩

余容量不足或盈余的退役电池可重新组合应用。而剩余容量为 65%~70% 的公交大巴退役电池的占比约为 40%,分散性较强,需分成数组进行储能策略分析;与出租车退役电池类似,剩余容量不足或盈余的公交大巴退役电池可重新组合应用。考虑到分析方法及控制策略基本一致,本文仅选取剩余容量约为 70% 的退役电池进行储能策略分析。退役电池的残余寿命与剩余容量之间的关系曲线见图 4,其中出租车退役电池的剩余容量分布较为集中,而公交大巴退役电池的剩余容量分布较为分散。由图 4 可知,当剩余容量小于 70% 时,残余寿命下降速度较快,因此可以剔除剩余容量低于 70% 的退役电池,本文仅选取剩余容量约为 70% 的退役电池为例进行案例分析,其余剩余容量盈余或者不足的退役电池可组合后进行利用。以剩余容量约为 70% 的退役电池为例,为了延长退役电池的使用寿命,根据式(2)、式(3)及附录中图 A1 和图 A2,本文设置退役电池的充放电阈值下限  $\beta_{min}=10%$ , 阈值上限  $\beta_{max}=65%$ 。

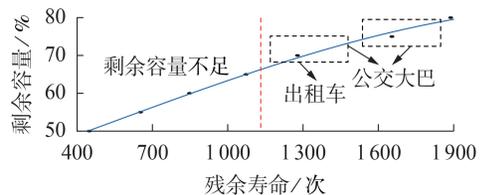


图 4 退役电池的残余寿命与剩余容量之间的关系曲线

Fig.4 Relationship curve between residual life and remaining capacity of retired batteries

### 3.2 控制策略验证

为了对比整体储能策略与本文所提分级储能策略的不同之处,选取 25 MW / 50 MW·h 的退役电池对 2 种控制策略下储能装置的 SOC 和吞吐电量进行仿真分析。

#### 3.2.1 整体储能控制策略

由附录中图 A3 可以看出,不同时段产生的弃风电量或并网不足电量有所不同。当采用整体储能控制策略进行储能配置时,储能装置的 SOC 和吞吐电量如图 5 所示。

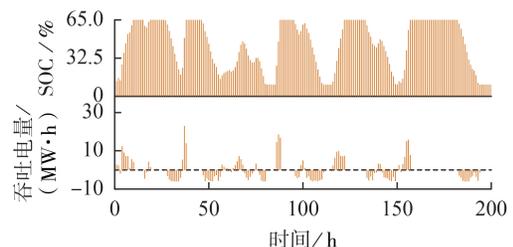


图 5 整体储能控制策略下储能装置的 SOC 和吞吐电量

Fig.5 SOC and throughput capacity of energy storage device under overall energy storage control strategy

### 3.2.2 分级储能控制策略

当采用本文所提分级储能控制策略(切换储能策略)时,将整体储能装置分为2个容量相同的分级储能装置A和B,其储能阶段储能装置的SOC和吞吐电量如图6所示。

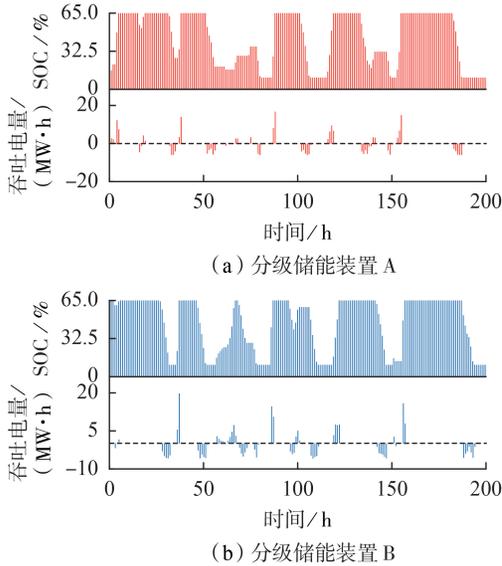


图6 分级储能控制策略下储能装置的SOC和吞吐电量

Fig.6 SOC and throughput capacity of energy storage device under hierarchical energy storage control strategy

### 3.2.3 对比分析

根据图5和图6可以得到整体储能控制策略和分级储能控制策略下的充放电深度、充放电切换次数,结果如表1所示。

表1 2种控制策略下储能的充放电深度、充放电切换次数

Table 1 Charging and discharging depth and switching number of energy storage under two control strategies

控制策略	充放电深度 / %	切换次数	控制策略	充放电深度 / %	切换次数
整体储能	[0, 10]	8	分级储能	[0, 10]	4
	(10, 20]	3		(10, 20]	3
	(20, 30]	1		(20, 30]	2
	(30, 40]	3		(30, 40]	2
	(40, 50]	0		(40, 50]	0
	(50, 60]	1		(50, 60]	2
	(60, 70]	2		(60, 70]	2
	(70, 80]	7		(70, 80]	17
	(80, 90]	0		(80, 90]	0
	(90, 100]	0		(90, 100]	0

综合考虑充放电切换次数与循环寿命,根据式(10)和式(11)对2种控制策略进行综合评估。

$$L_1 = \sum_{i=1}^{10} C \frac{f_{D_{\text{DoD}i}}}{N_{\text{ctf}}} \quad (10)$$

$$L_2 = \sum_{i=1}^{10} (C_A f_{D_{\text{DoD}i, A}} / N_{\text{ctf}} + C_B f_{D_{\text{DoD}i, B}} / N_{\text{ctf}}) \quad (11)$$

其中,  $L_1, L_2$  为所消耗退役电池的循环寿命(基准值为1);  $f_{D_{\text{DoD}i}}$  为整体储能在充放电深度为  $D_{\text{DoD}i}$  时的充放电切换次数;  $f_{D_{\text{DoD}i, A}}, f_{D_{\text{DoD}i, B}}$  分别为当分级储能装置A和B的充放电深度为  $D_{\text{DoD}i}$  时储能装置A、B的充放电切换次数;  $C_A, C_B$  分别为分级储能装置A和B的成本。

$L_1, L_2$  的取值越小,说明所消耗退役电池的循环寿命越少,经济性越好。根据图A2和式(10)、(11)求得200h内整体储能控制策略下  $L_1 = 0.0083$ , 分级储能控制策略下  $L_2 = 0.0060$ , 折算成一年后的循环寿命,分级储能控制策略所消耗的循环寿命比整体储能控制策略减少了27.7%,可见采用分级储能控制策略会延长退役电池的使用寿命,即分级储能控制策略的相对经济性要优于整体储能控制策略。风电消纳效果如图7所示。由图7可以看出,利用退役电池可以促进弃风消纳,所消纳弃风量为300.08 MW·h。但风电波动性和随机性的特点使得在部分时间储能无法为电网提供所需电量,同时部分时间内的电网需求量与理论出力之间差距过大,造成弃风无法被完全消纳。

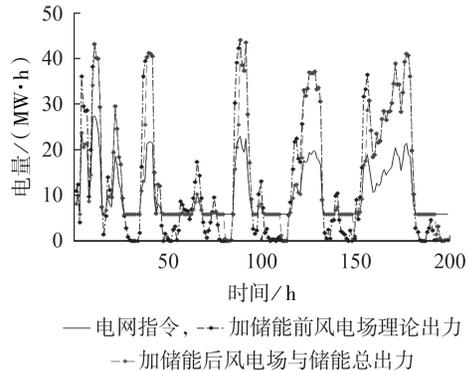


图7 风电消纳效果

Fig.7 Consumption effect of wind power

## 4 结论

本文根据风电并网需求,从风电场理论出力出发,提出了基于退役电池阈值设定和分级控制的弃风消纳模式,利用基于退役电池梯次利用的储能装置进行弃风消纳和满足风电并网需求,所得结论如下。

(1)相较于其他储能装置,采用退役电池弃风消纳,对成本的要求略低,而且当储能装置的使用寿命结束后,退役电池可继续进入下一利用梯次,降低了退役电池的回收成本。

(2)针对退役电池状态不一致会导致整体储能效率低下、控制效果很难达到预期的缺陷,利用充放电深度与循环寿命之间的关系以及分布概率密度函数对退役电池的充放电阈值进行了合理设定。

(3)考虑到退役电池的寿命因素,提出了切换储能控制策略并对其进行案例分析。分析结果表明:整体储能控制策略和分级储能控制策略均消纳了300.08 MW·h的弃风电量,但分级储能控制策略所消耗的循环寿命比整体储能控制策略减少了27.7%,具有更好的经济性。

但现阶段储能的成本相对较高,利用其进行弃风消纳的经济性较差,因此无法做到完全消纳弃风。若储能成本下降到一定的程度,或可解决弃风问题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [ 1 ] 张刘冬,袁宇波,孙大雁,等. 基于两阶段鲁棒区间优化的风储联合运行调度模型[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):59-66,93.  
ZHANG Liudong,YUAN Yubo,SUN Dayan,et al. Joint operation model of wind-storage system based on two-stage robust interval optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(12):59-66,93.
- [ 2 ] 雷金勇,郭祚刚,陈聪,等. 考虑不确定性及电/热储能的综合能源系统两阶段规划-运行联合优化方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):169-175.  
LEI Jinyong,GUO Zuogang,CHEN Cong,et al. Two-stage planning-operation co-optimization of IES considering uncertainty and electrical/thermal energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):169-175.
- [ 3 ] 马静,石建磊,李文泉,等. 基于功率多频率尺度分析的风光水气储联合系统日前调度策略[J]. 电网技术,2013,37(6):1491-1498.  
MA Jing,SHI Jianlei,LI Wenquan,et al. A day-ahead dispatching strategy for power pool composed of wind farms,photovoltaic generations,pumped-storage power stations,gas turbine power plants and energy storage systems based on multi frequency scale analysis[J]. Power System Technology,2013,37(6):1491-1498.
- [ 4 ] 叶鹏,李山,何森,等. 风储孤网系统运行与控制研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(9):163-170.  
YE Peng,LI Shan,HE Miao,et al. Review of operation and control of the wind storage isolated network system[J]. Power System Protection and Control,2018,46(9):163-170.
- [ 5 ] 伍俊,鲁宗相,乔颖,等. 考虑储能动态充放电效率特性的风储电站运行优化[J]. 电力系统自动化,2018,42(11):41-47,101.  
WU Jun,LU Zongxiang,QIAO Ying,et al. Optimal operation of wind farm with hybrid storage devices considering efficiency characteristics of dynamic charging and discharging[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(11):41-47,101.
- [ 6 ] 于东霞,张建华,王晓燕,等. 并网型风光储互补发电系统容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(10):59-65.  
YU Dongxia,ZHANG Jianhua,WANG Xiaoyan,et al. Optimal capacity configuration of grid-connected wind-PV-storage hybrid power generation system[J]. Proceedings of the CSU-EPSS,2019,31(10):59-65.
- [ 7 ] 李建林,郭斌琪,牛萌,等. 风光储系统储能容量优化配置策略[J]. 电工技术学报,2018,33(6):1189-1196.  
LI Jianlin,GUO Binqi,NIU Meng,et al. Optimal configuration strategy of energy storage capacity in wind/PV/storage hybrid system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(6):1189-1196.
- [ 8 ] 刘怡,穆苗苗,张友琅,等. 退役动力电池在光伏储能中应用[J]. 电源技术,2019,43(1):126-128,132.  
LIU Yi,MU Miaomiao,ZHANG Youlang,et al. Energy storage application of EV retired batteries in distributed PV generation[J]. Chinese Journal of Power Sources,2019,43(1):126-128,132.
- [ 9 ] 张娅,张斌,籍天明,等. 基于双向互补的储能系统控制策略及经济性分析[J]. 电力建设,2016,37(8):96-101.  
ZHANG Hua,ZHANG Bin,JI Tianming,et al. Control strategy and economic analysis of energy storage system based on bidirectional complementary[J]. Electric Power Construction,2016,37(8):96-101.
- [ 10 ] 李建林,修晓青,刘道坦,等. 计及政策激励的退役动力电池储能系统梯次应用研究[J]. 高电压技术,2015,41(8):2562-2568.  
LI Jianlin,XIU Xiaoqing,LIU Daotan,et al. Research on second use of retired electric vehicle battery energy storage system considering policy incentive[J]. High Voltage Engineering,2015,41(8):2562-2568.
- [ 11 ] 李娜,白恺,王开让,等. 电动车退役电池梯次利用之储能性能及预测[J]. 电源技术,2019,43(3):445-449.  
LI Na,BAI Kai,WANG Kairang,et al. Performance and prediction of retired electric vehicle battery recycling in electric energy storage condition[J]. Chinese Journal of Power Sources,2019,43(3):445-449.
- [ 12 ] 马伟,王玮,吴学智,等. 光储协调互补平滑抑功率波动策略及经济性分析[J]. 电网技术,2018,42(3):730-737.  
MA Wei,WANG Wei,WU Xuezhi,et al. Coordinated control strategy of photovoltaics and energy storage for smoothing power fluctuations of photovoltaics and economic analysis[J]. Power System Technology,2018,42(3):730-737.
- [ 13 ] 熊文,刘育权,苏万煌,等. 考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):118-126.  
XIONG Wen,LIU Yuquan,SU Wanhuang,et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(1):118-126.
- [ 14 ] 夏永洪,吴虹剑,辛建波,等. 考虑风/光/水/储多源互补特性的微网经济运行评价方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):63-69.  
XIA Yonghong,WU Hongjian,XIN Jianbo,et al. Evaluation of economic operation for microgrid with complementary DGs and energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(7):63-69.
- [ 15 ] 凌开元,赵乐冰,张新松,等. 基于双储能系统的主动配电网储能配置[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):171-176.  
LING Kaiyuan,ZHAO Lebing,ZHANG Xinsong,et al. Storage allocation of active distribution network based on double-storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(5):171-176.
- [ 16 ] 徐国栋,程浩忠,方斯顿,等. 用于提高风电场运行效益的电池储能配置优化模型[J]. 电力系统自动化,2016,40(5):62-70.  
XU Guodong,CHENG Haozhong,FANG Sidun,et al. An optimization model of battery energy storage system configuration to improve benefits of wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(5):62-70.
- [ 17 ] 钜大锂电. 简述退役磷酸铁锂电池容量一致性及衰减特征研究[EB/OL]. (2018-11-06)[2019-08-12]. <http://www.juda.cn/news/32650.html>.
- [ 18 ] 邹幽兰. 基于退役锂电池容量、内阻和荷电状态的建模与

- 参数估计[D]. 长沙:中南大学,2014.
- ZOU Youlan. Modeling and parameter estimation of retired lithium-ion power battery based on capacity, resistance and the state of charge[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [19] 张乾. 电动车回收电池再利用机理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2012.
- ZHANG Qian. Research on the mechanism of recycling of battery for electric vehicle[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2012.
- [20] WANG J S, LIU P, HICKSGARNER J, et al. Cycle-life model for graphite-LiFePO<sub>4</sub> cells[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3942-3948.
- [21] 胡亚伟, 李江, 胡立强, 等. 基于风电出力预测误差补偿度与经济效益的最佳储能容量配置[J]. 中国电力, 2016, 49(5): 141-148.
- HU Yawei, LI Jiang, HU Liqiang, et al. Optimized energy storage capacity allocation based on prediction error compensation degree and economic benefits of wind power[J]. Electric Power, 2016, 49(5): 141-148.
- [22] 路朋, 叶林, 汤涌, 等. 基于模型预测控制的风电集群多时间尺

度有功功率优化调度策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6572-6582.

LU Peng, YE Lin, TANG Yong, et al. Multi-time scale active power optimal dispatch in wind power cluster based on model predictive control [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6572-6582.

#### 作者简介:



王凯丰

王凯丰(1996—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为控制系统优化和新能源发电(E-mail: 861554820@qq.com);

谢丽蓉(1969—),女,湖南衡阳人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为控制系统优化以及新能源发电(E-mail: 541391018@qq.com);

乔颖(1983—),女,江苏宿迁人,副教授,博士,主要研究方向为新能源、分布式发电、电力系统稳定与控制(E-mail: qiaoying@tsinghua.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

### Curtailed wind consumption mode based on threshold setting and hierarchical control of retired batteries

WANG Kaifeng<sup>1,2</sup>, XIE Lirong<sup>1</sup>, QIAO Ying<sup>2</sup>, WANG Xiaofen<sup>3</sup>, BAO Hongyin<sup>4</sup>

(1. Engineering Research Center for Renewable Energy Power Generation and Grid Technology of Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

4. CSIC of Haiwei(Xinjiang) New Energy Co., Ltd., Urumqi 830002, China)

**Abstract:** Considering the disadvantages of large-scale curtailed wind caused by the volatility and uncertainty of grid-connected wind power, in order to improve the comprehensive benefits of wind farms, a curtailed wind consumption mode based on threshold setting and hierarchical control of retired batteries is proposed to reduce the costs of energy storage. Considering that the inconsistent state of retired batteries will lead to low efficiency of the overall energy storage and the control effect is difficult to reach the expected situation, the relationship between the depth of charging and discharging of retired battery and its cycle life is analyzed, and the segmental probability distribution function is used to set the charging and discharging threshold ranges of the ideal retired battery. In order to prolong the service life of retired batteries, the hierarchical control strategy is used to realize the real-time dynamic switching energy storage function. The proposed strategy is simulated and analyzed, and the results show that the hierarchical control strategy is more economical than the overall control strategy and promotes the curtailed wind consumption.

**Key words:** retired batteries; curtailed wind consumption; depth of charging and discharging; threshold setting; hierarchical control; energy storage system

# 附录

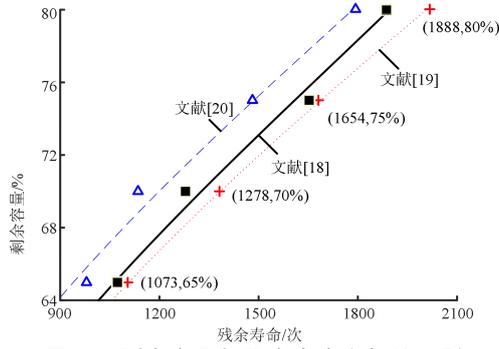


图 A1 剩余容量与残余寿命之间的关系

Fig.A1 Relationship between residual capacity and residual life

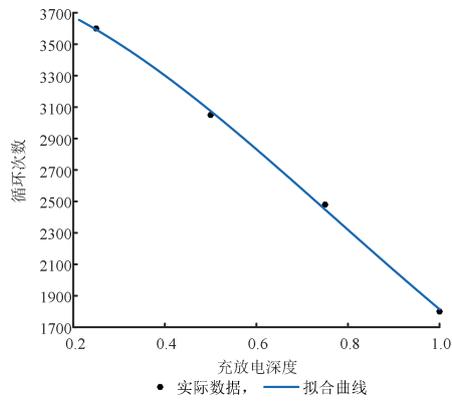


图 A2 不同充放电深度下的循环寿命次数

Fig.A2 Cycle life times under different charging and discharging depths

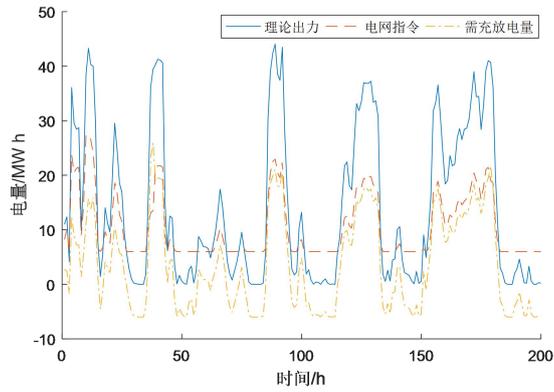


图 A3 风电场数据

Fig.A3 Wind farm data