



电力系统自动化

Automation of Electric Power Systems

ISSN 1000-1026, CN 32-1180/TP

## 《电力系统自动化》网络首发论文

题目: 考虑电池储能单元分组优化的微电网运行控制策略  
作者: 严干贵, 蔡长兴, 段双明, 李洪波, 刘莹, 李军徽  
收稿日期: 2020-04-16  
网络首发日期: 2020-08-27  
引用格式: 严干贵, 蔡长兴, 段双明, 李洪波, 刘莹, 李军徽. 考虑电池储能单元分组优化的微电网运行控制策略[J/OL]. 电力系统自动化.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200826.1640.003.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

## 考虑电池储能单元分组优化的微电网运行控制策略

严干贵, 蔡长兴, 段双明, 李洪波, 刘莹, 李军徽

(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(东北电力大学), 吉林省吉林市 132012)

**摘要:** 针对大规模电池储能系统参与微电网调节面临储能单元充放电路径优化选择问题, 基于对储能单元能量转换效率与运行功率关系的研究, 提出了以双电池储能系统(DBESS)控制策略为基础, 充、放电单元组可临时转换的控制方式, 以克服DBESS结构功率调节能力不足的问题。制定了储能单元间功率分配机制以降低储能单元启用数量, 改善了储能单元因功率分配不当而造成不必要的寿命衰减和能量损耗问题。构建了含8个储能单元的风光储共交流母线型微电网系统, 结合给定功率波动平抑需求, 对所提控制策略、DBESS控制策略和传统控制策略进行仿真分析, 从储能系统控制效果、循环寿命和能量转换效率的角度验证了所提策略的合理性和有效性。

**关键词:** 电池储能系统; 微电网; 储能单元; 循环寿命; 能量转换效率

### 0 引言

传统化石能源消耗带来的环境污染和全球升温问题制约着经济社会的可持续发展, 大力推进以清洁能源为主的分布式能源替代化石能源是缓解全球能源危机、减少环境污染的必由之路<sup>[1]</sup>。微电网是一种承接分布式能源的有效形态<sup>[2]</sup>, 分布式能源发电功率的间歇性和不确定性, 导致微电网瞬时功率变化较大, 降低了电力系统的抗干扰能力<sup>[3]</sup>。电池储能是支撑微电网安全运行的有效手段, 因其功率调节能力强、配置灵活, 是含高比例分布式能源微电网的重要调节电源<sup>[4-5]</sup>。储能技术的进步和可再生能源开发需求, 共同推动电池储能的应用愈加广泛。

电池储能系统(battery energy storage system, BESS)参与微电网调节控制的前期研究中通常被视为理想电源, 忽略了其本体性能约束<sup>[6-7]</sup>; 随着研究的深入, 一些学者开始结合储能本体性能约束设计BESS运行调控策略, 文献[8-9]设计了双电池储能系统(double battery energy storage system, DBESS)控制策略, 与BESS整体响应策略相比, 在很多应用场景下能够减少BESS充放电转换次数, 但BESS充、放电调节能力减半, 导致一些场景下功率调节能力不足。

事实上, 大规模BESS往往由多个电池储能单元(battery energy storage unit, BESU)组成<sup>[4,10]</sup>, 如

位于河北省张家口市的14 MW/63 MW·h张北风光储示范工程配置的磷酸铁锂BESS就是由5个2 MW/10.4 MW·h和4个1 MW/2.75 MW·h的BESU组成<sup>[11]</sup>。BESS参与微电网调节时的运行功率大部分场景下均远低于其额定功率<sup>[12]</sup>, 故调节功率在各BESU间存在很大的分配自由度。BESU的能量转换效率和循环寿命等特性会因其运行方式的不同而产生很大差异<sup>[13]</sup>, 在设计BESS功率调控策略时, 若忽略运行方式对BESU特性的影响, 将会劣化BESS的调节能力。因此, 结合储能本体性能约束制定BESU间合理的功率分配策略是充分发挥大规模BESS调控潜能的重要方向。现有研究较少涉及BESU间的功率细化分配研究, 文献[14]采用按各BESU的能量状态(state of energy, SOE)所占比例来分配充、放电功率的策略, 提升了各BESU的SOE一致性, 却降低了BESS的循环寿命和能量转换效率; 文献[15]针对混合储能系统提出了一种双层优化管理策略, 改善了BESU的SOE变化范围, 但未考虑充、放电功率对BESU能量转换效率的影响; 为延长BESS的循环寿命, 文献[13]基于电池充、放电状态对BESU设置不同优先级进行满功率充放电, 一定程度上避免了BESU频繁充放电转换, 但仍增加了BESS不必要的调节负担。

在上述研究基础上, 本文对多个储能单元参与微电网调节时的运行控制问题进行研究, 建立储能单元能量转换效率-运行功率水平模型, 分析储能单元运行功率与能量损耗间的关系, 提出充、放电单元组不完全分离的分组架构, 制定基于储能单元运

收稿日期: 2020-04-16; 修回日期: 2020-07-14。

国家自然科学基金资助项目(U1766204)。

行特性的储能系统功率分配机制。最后,构建含8个储能单元的风光储共交流母线型微电网系统,对所提控制策略进行仿真验证。

## 1 共交流母线型微电网系统

常见的微电网系统拓扑结构分为2种:共直流母线型和共交流母线型<sup>[16]</sup>。由于目前交流负荷仍占据绝大部分<sup>[17]</sup>,所以本文以共交流母线型拓扑结构建立了如附录A图A1所示的集中式微电网并网控制系统。

以附录A图A1中红色箭头标注的功率方向为正方向,可以得到微电网功率平衡关系,如式(1)所示。

$$\begin{cases} P_w(t) + P_p(t) + P_{BE}(t) + P_G(t) = P_D(t) + P_A(t) \\ P_{BE}(t) = \sum_{i=1}^n P_{B,i}(t) \\ \Delta P(t) = P_w(t) + P_p(t) - P_D(t) - P_A(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_w(t)$ ,  $P_p(t)$ ,  $P_{BE}(t)$ ,  $P_G(t)$ ,  $P_D(t)$ ,  $P_A(t)$ 分别为风电、光伏、BESS、交流电网、直流负荷和交流负荷在 $t$ 时刻的传输功率; $P_{B,i}(t)$ 为第 $i$ 个BESU在 $t$ 时刻的传输功率; $\Delta P(t)$ 为未采用储能时并网点不平衡功率。

受分布式能源和负荷功率随机波动影响, $\Delta P(t)$ 的波动幅值较大,为满足微电网并网点功率波动要求,需通过储能技术对 $\Delta P(t)$ 进行平抑,BESS待平抑波动功率 $P_{BE}^*(t)$ 如式(2)所示。

$$P_{BE}^*(t) = \Delta P(t) - P_G^*(t) \quad (2)$$

式中: $P_G^*(t)$ 为交流电网并网目标功率,为满足微电网并网点功率的波动要求,采用滑动平均法求取 $P_G^*(t)$ ,如式(3)<sup>[9]</sup>所示。

$$P_G^*(t) = \frac{1}{N} \sum_{t-\frac{N-1}{2}}^{t+\frac{N-1}{2}} \Delta P(t) \quad (3)$$

式中: $N$ 为滑动系数,其值取大于1的奇数。

## 2 BESU 特性分析

为保障微电网系统的安全性和稳定性,需要将多个BESU并联组成一个大规模BESS,每个BESU都由储能电池组和一套完整的电气设备(包括AC/DC变换器、变压器和辅助装置)构成,所以每个BESU可以独立运行<sup>[18]</sup>。

### 2.1 储能单元充放电转换次数

BESU充放电转换次数是衡量其循环寿命的重要指标之一<sup>[19]</sup>,在一个调度周期内BESU的充放电转换越频繁,越不利于BESS的循环寿命<sup>[20]</sup>。为便

于统计各BESU的充放电转换次数,将BESU出力方向的改变定义为其充放电状态发生1次转换,以当前 $t$ 时刻与 $t-1$ 时刻SOE差值 $\Delta S_i$ 之积的正负作为判断该BESU动作次数的依据,并可进一步求得整个BESS的充放电转换次数,具体表示如下:

$$A_i(t) = \begin{cases} A_i(t-1) + 1 & \Delta S_i(t) \Delta S_i(t-1) < 0 \\ A_i(t-1) & \Delta S_i(t) \Delta S_i(t-1) \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$A_{BE}(t) = \sum_{i=1}^n A_i(t) \quad (5)$$

式中: $A_i(t)$ 为第 $i$ 个BESU从初始阶段到 $t$ 时刻经历的充放电转换次数; $A_{BE}(t)$ 表示整个BESS经历的充放电转换次数; $\Delta S_i(t)$ 为第 $i$ 个BESU在 $t$ 时刻的SOE与 $t-1$ 时刻的SOE之差。

### 2.2 BESU 充、放电效率模型

能量转换效率是用来表征BESU在充放电过程中能量损耗的关键性能指标,BESU损耗主要来源于储能电池组和电气设备<sup>[21-22]</sup>。由于不同SOE对BESU的影响非常小,可以忽略不计,所以充、放电功率是影响BESU能量转换效率的主要原因<sup>[21,23]</sup>。BESU工作时,充、放电状态通常是分开的,并且前一时刻的充电功率和下一时刻的放电功率一般也不会相等,所以本文将BESU充放电全过程的能量转换效率分成充电效率和放电效率2个部分。附录A图A2为BESU能量转换效率电路示意图,BESU充电效率 $\eta_{Bc}(P_c)$ 是指以功率 $P_{Bc}(t)$ 充电时,存入电池组的电量与注入BESU电量之比;BESU放电效率 $\eta_{Bd}(P_d)$ 是指以功率 $P_{Bd}(t)$ 放电时输出BESU电量与电池组消耗电量之比。BESU充放电全过程各部分能量和效率的关系式如式(6)和式(7)所示。

$$\begin{cases} P_{Bc}(t)t = P_{bc}(t)t + E_{loss,ec}(t) \\ P_{bc}(t)t = \Delta E_c(t) + E_{loss,bc}(t) \\ P_{Bd}(t)t = P_{bd}(t)t - E_{loss,ed}(t) \\ P_{bd}(t)t = \Delta E_d(t) - E_{loss,bd}(t) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \eta_B(P) = \eta_{Bc}(P_c) \eta_{Bd}(P_d) \\ \eta_e(P) = \eta_{ec}(P_c) \eta_{ed}(P_d) \\ \eta_b(P) = \eta_{bc}(P_c) \eta_{bd}(P_d) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\Delta E_c(t)$ 和 $\Delta E_d(t)$ 分别为充放电过程存入、输出电池组电量; $E_{loss,ec}(t)$ ,  $E_{loss,ed}(t)$ 和 $E_{loss,bc}(t)$ ,  $E_{loss,bd}(t)$ 分别为充、放电过程中在电气设备和电池组上的能量损耗; $\eta_B(P)$ ,  $\eta_e(P)$ 和 $\eta_b(P)$ 分别为充放电全过程整个BESU、电气设备和电池组的能量转换效率; $\eta_{ec}(P_c)$ ,  $\eta_{bc}(P_c)$ 和 $\eta_{ed}(P_d)$ ,  $\eta_{bd}(P_d)$ 分别表示电气设备和电池组的充、放电效率; $\eta_{Bc}(P_c)$ 和

$\eta_{bd}(P_d)$ 分别为BESU充、放电效率,其计算式如式(8)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{bc}(P_c) = \frac{\Delta E_c(t)}{P_{bc}(t)t} \times 100\% = \eta_{ec}(P_c)\eta_{bc}(P_c) = \\ \frac{P_{bc}(t)t \Delta E_c(t)}{P_{bc}(t)t P_{bc}(t)t} \times 100\% \\ \eta_{bd}(P_d) = \frac{P_{bd}(t)t}{\Delta E_d(t)} \times 100\% = \eta_{bd}(P_d)\eta_{ed}(P_d) = \\ \frac{P_{bd}(t)t P_{bd}(t)t}{\Delta E_d(t) P_{bd}(t)t} \times 100\% \end{array} \right. \quad (8)$$

BESU能量转换效率与运行功率密切相关,为了更好地比较不同运行功率对BESU能量转换效率的影响,设BESU额定功率和该储能单元对应电池组的额定功率分别为 $P_{BN}$ 和 $P_{bN}$ ,以 $P_{BN}$ 作为基准得到BESU运行功率标么值,记为 $P_B^*$ 。

$P_B^*$ 对BESU能量转化效率的影响关系如附录A图A3所示<sup>[21]</sup>,绿色和蓝色虚线表示容量为20 kW/20 kW·h( $P_{BN} = P_{bN}$ )锂离子BESU的 $\eta_b(P)$ 和 $\eta_e(P)$ 与 $P_B^*$ 之间的关系。由于微电网配置的BESS的额定容量通常是额定功率的4~6倍<sup>[12]</sup>,结合式(7),可以得到容量为20 kW/80 kW·h( $P_{BN} = P_{bN}/4$ )的锂离子BESU充放电全过程能量转换效率 $\eta_b(P)$ 与 $P_B^*$ 之间的关系如图A3中粉色虚线所示,红色曲线是对粉色虚线的拟合曲线,拟合函数如式(9)所示。

$$\eta_b(P_B) = \left( \frac{22.03P_B^*}{1.5293 + 20P_B^*} - 0.15615P_B^* \right) \times 100\% \quad (9)$$

由附录A图A3可知,电气设备是影响BESU充放电全过程能量转换效率 $\eta_b(P)$ 的主要因素,由于电气设备空载损耗相对较大,所以 $\eta_e(P)$ 在低功率运行时偏低,但 $\eta_e(P)$ 随着 $P_B^*$ 的增大而增大,而锂离子电池组的能量转换效率 $\eta_b(P)$ 相对较高,并且 $\eta_b(P)$ 随着 $P_B^*$ 的增大而减小,所以最终使得 $\eta_b(P)$ 呈现先增大后缓慢减小的趋势,并在 $P_B^* = 0.66$ 时取得最大值。当 $P_B^* < 0.2$ 时,BESU的充放电转换效率将小于76.56%,能量损耗将高达这部分波动能量的1/4,所以应尽可能避免BESU在充、放电功率小于 $0.2P_{BN}$ 的情况下运行。

由于BESU在充、放电过程中的功率都需要流经储能电池组和电气设备,而当充电功率与放电功率相同时, $\eta_{bc}(P_c) \approx \eta_{bd}(P_d)$ , $\eta_{ec}(P_c) \approx \eta_{ed}(P_d)$ <sup>[23]</sup>,所以充电效率与放电效率差异很小,因此本文简化处

理,当充电功率等于放电功率时,将BESU充电效率与放电效率视为相等,根据式(9)继而得到容量为20 kW/80 kW·h的BESU充、放电效率与 $P_B^*$ 的代数表达式和变化曲线分别如式(10)和附录A图A4所示。

$$\eta_{bc}(P_{Bc}) = \eta_{bd}(P_{Bd}) = \eta_B(P_B)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{22.03P_B^*}{1.5293 + 20P_B^*} - 0.15615P_B^* \right)^{\frac{1}{2}} \times 100\% \quad (10)$$

通过式(10)和图A4可知,运行功率水平增加到一定程度之后,功率的增加不会再对充、放电效率产生很大影响,并且 $\eta_{bc}(P_{Bc})$ 和 $\eta_{bd}(P_{Bd})$ 仍在 $P_B^* = 0.66$ 时取得最大值,其值为94.03%。

### 3 BESU分组优化控制策略

由于频繁的充放电转换会降低BESS的循环寿命,DBESS结构控制策略虽可延长BESS的使用寿命<sup>[8-9]</sup>,但却将整个BESS分成了2个子系统,一个只能单独承担充电任务,另一个只能单独承担放电任务,在相同容量配置下,DBESS的充、放电调节能力只有传统控制策略的一半,导致在一些工况下的调节能力不足。因此,本文以DBESS控制策略为基础,将BESS中所有的BESU划分成充、放电状态可临时转换的充电单元组和放电单元组,即在某一单元组调节功率不足时,将选择另一单元组部分(或全部)BESU临时承担相应的调节任务,以提高BESS的功率调节能力,并利用本节所提BESU间的协调控制策略来提升BESS的能量转换效率和循环寿命。

#### 3.1 系统约束条件

本文所提策略主要是针对BESS中BESU间的功率分配,因此对风电、光伏发电和交直流负荷的运行和使用情况不做约束,仅对各BESU的SOE和最大功率状态进行约束。由于各BESU的容量和工作环境一致,假设各BESU的运行特性相同。

SOE作为反映各BESU电池组剩余能量大小的指标<sup>[24]</sup>,其准确计算是保障BESS安全稳定运行的基础,以附录A图A1功率流动方向为正方向(放电方向为正方向),SOE计算式如下:

$$S_{b,i}(t) = (\beta_{i,c} + \epsilon_{i,cd}) \left( S_{b,i}(t-1) - \frac{(\lambda_{i,c} + \epsilon_{i,cd})P_{B,i}(t)\eta_{B,i,c}(P)\Delta t}{E_{b,i}} \right) + (\beta_{i,d} + \epsilon_{i,dc}) \cdot \left( S_{b,i}(t-1) - \frac{(\lambda_{i,d} + \epsilon_{i,dc})P_{B,i}(t)\Delta t}{\eta_{B,i,d}(P)E_{b,i}} \right) \quad (11)$$

式中： $S_{b,i}(t)$ 和 $S_{b,i}(t-1)$ 分别为第 $i$ 个BESU在 $t$ 时刻和 $t-1$ 时刻的SOE值； $E_{b,i}$ 表示第 $i$ 个BESU的最大可接受电量； $\eta_{b,i,c}$ 和 $\eta_{b,i,d}$ 分别为通过式(10)计算得到的第 $i$ 个BESU在 $t$ 时刻的充、放电效率； $\beta_{i,c}$ 和 $\beta_{i,d}$ 为第 $i$ 个BESU充、放电单元组状态标志位， $\beta_{i,c}=1$ 表示该BESU所属充电单元组， $\beta_{i,d}=1$ 表示该BESU所属放电单元组，且有 $\beta_{i,c}+\beta_{i,d}=1$ ； $\epsilon_{i,dc}$ 和 $\epsilon_{i,cd}$ 分别为第 $i$ 个BESU是否进行充、放电状态转换标志位，其值为1表示状态发生转变，其值为0表示保持原有状态； $\lambda_{i,c}$ 和 $\lambda_{i,d}$ 分别为第 $i$ 个BESU是否执行充、放电任务标志位，其值为1表示执行，其值为0表示待机，BESS执行充电任务时，执行放电任务标志位 $\lambda_{i,d}$ 全部置0，BESS执行充电任务时，执行放电任务标志位 $\lambda_{i,d}$ 全部置0。当第 $i$ 个BESU属于充电单元组时， $\beta_{i,c}=1$ ， $\beta_{i,d}=0$ ， $\epsilon_{i,dc}=0$ ；当第 $i$ 个BESU属于放电单元组时， $\beta_{i,c}=0$ ， $\beta_{i,d}=1$ ， $\epsilon_{i,cd}=0$ 。

为保证各BESU的安全性和可靠性，需对BESU的SOE和传输功率进行限制，如式(12)和式(13)所示。

$$S_{\min} \leq S_i(t) \leq S_{\max} \quad (12)$$

$$-P_{\text{BN}} \leq P_{b,i}(t) \leq P_{\text{BN}} \quad (13)$$

式中： $S_{\max}$ 和 $S_{\min}$ 分别为单个BESU运行时的最大和最小SOE。

### 3.2 BESU分组优化协调控制策略

为提高BESS整体循环寿命和能量转换效率，本文提出BESU分组协调控制策略以实现减小BESS充放电次数和提升能量转换效率的目的。由于一个调度周期内BESS待平抑波动功率的正负波动概率和波动能量基本相等<sup>[12]</sup>，假设BESS中共有 $n$ 个BESU，初始阶段充电单元组的BESU数量 $j$ 与放电单元组的BESU数量 $k$ 相等，并且始终有 $n=j+k$ ，所以充电单元组的额定功率为 $jP_{\text{BN}}$ ，放电单元组的额定功率为 $kP_{\text{BN}}$ ，整个BESS的额定功率为 $nP_{\text{BN}}$ 。

BESS通常处于3种运行状态：充电、放电和待机状态。 $P_{\text{BE}}<0$ 时为充电状态， $P_{\text{BE}}>0$ 时为放电状态， $P_{\text{BE}}=0$ 时为待机状态，为了兼顾减少BESS充放电转换次数、提高BESS功率调节能力和能量转换效率的目的，本文以BESS能量转换效率最大为目标，结合第2章所提的BESU能量转换效率模型，建立如式(14)和式(15)所示的目标函数，以确定各BESU的功率分配量。

$$\max \eta_{\text{BE}}(P_{\text{BE}}) = \max \frac{\sum_{i=1}^N \eta_i(P_{b,i}) P_{b,i}(t)}{P_{\text{BE}}(t)} \quad (14)$$

$$P_{\text{BE}}(t) = \sum_{i=1}^N P_{b,i}(t) \quad (15)$$

当BESS传输功率 $P_{\text{BE}}(t)<0$ 时，BESS执行充电任务， $\eta_{\text{BE}}(P_{\text{BE}})$ 和 $\eta_i(P_{b,i})$ 分别表示整个BESS和第 $i$ 个BESU充电效率，当 $P_{\text{BE}}(t)>0$ 时，BESS执行放电任务，BESU均处于放电状态， $\eta_{\text{BE}}(P_{\text{BE}})$ 和 $\eta_i(P_{b,i})$ 分别表示整个BESS和第 $i$ 个BESU放电效率。

对BESS制定分组优化控制策略如下。

1) BESS处于非放电状态下的策略( $P_{\text{BE}}(t) \leq 0$ )

①当 $|P_{\text{BE}}(t)| \leq jP_{\text{BN}}$ 时

充电单元组的额定功率能满足BESS功率需求时，不需放电单元组中的BESU临时加入充电单元组执行充电任务，所以放电单元组中的BESU放电转充电标志位 $\epsilon_{i,dc}$ 全为0。当 $P_{\text{BE}}=0$ 时，所有BESU处于待机状态，所有充电单元组BESU的执行充电任务标志位 $\lambda_{i,c}$ 为0；当 $0 < |P_{\text{BE}}| \leq 0.2P_{\text{BN}}$ 时，由2.2节分析可知，此时的能量转换效率比较低，若BESS对这部分功率进行平抑，导致BESS的能量损耗偏高，因此BESS不对这部分功率进行平抑，而将其添加到交流电网的平抑功率中，因为这部分的充电功率非常小，而交流电网将平抑的波动功率相对较大，所以即使交流电网添加了这一小部分功率也不会影响其正常运行，此时充电单元组所有BESU的执行充电任务标志位 $\lambda_{i,c}$ 为0；当 $0.2P_{\text{BN}} < |P_{\text{BE}}| \leq jP_{\text{BN}}$ ，取 $N=j$ ，对式(14)和式(15)进行求解可得， $P_{b,i}(t)<0$ 的个数即为需启动执行充电任务的BESU数量，从充电单元组中依次选取SOE较低的BESU执行充电任务，将被选中的BESU的执行充电任务标志位 $\lambda_{i,c}$ 置1，其余 $\lambda_{i,c}$ 置0。

②当 $jP_{\text{BN}} < |P_{\text{BE}}(t)| \leq nP_{\text{BN}}$ 时

充电单元组的额定功率无法满足系统功率需求，将启动放电单元组中的BESU临时加入充电单元组对充电剩余功率( $|P_{\text{BE}}| - iP_{\text{BN}}$ )进行吸收，以共同实现对充电功率 $P_{\text{BE}}$ 的平抑，取 $N=n$ ，对式(14)和式(15)进行求解可得， $P_{b,i}(t)<0$ 的个数即为需启动执行充电任务的BESU数量，记为 $s_c$ ，充电单元组中所有BESU的执行充电任务标志位 $\lambda_{i,c}$ 全为1；放电单元组中启动BESU的数量为 $s_c - j$ 个，为尽可能保证BESU充放电过程的完整性，减少BESS充放电转换次数，优先选择放电单元组中前期执行过临时充电任务后仍未执行放电任务的BESU，其次选择SOE较小的BESU临时承担充电任务，并将被选中临时承担充电任务的BESU的放电转充电标志

位  $\epsilon_{i,dc}$  置 1,其余置 0。

2) BESS 处于放电状态下的策略 ( $P_{BE}(t) > 0$ )

① 当  $0 < P_{BE}(t) < kP_{BN}$  时

放电单元组的额定功率能满足 BESS 功率需求时,不需充电单元组中的 BESU 临时加入充电单元组执行放电任务,所以充电单元组中的 BESU 充电转放电标志位  $\epsilon_{i,cd}$  全为 0。当  $0 < P_{BE} \leq 0.2P_{BN}$ ,与充电状态相同,由于放电功率比较低,导致运行效率偏低,加大了微电网系统的能量损耗,因此 BESS 也不对这部分功率进行平抑,而将其添加到交流电网的平抑功率中;当  $0.2P_{BN} < P_{BE} \leq iP_{BN}$  时,取  $N=k$ ,对式 (14) 和式 (15) 进行求解可得,  $P_{B,i}(t) > 0$  的个数即为需启动执行放电任务的 BESU 数量,为保证放电单元组中各 BESU 运行状态的均衡性,从放电单元组中依次选取 SOE 较大的 BESU 执行放电任务,将被选中 BESU 的执行放电任务标志位  $\lambda_{i,d}$  置 1,其余  $\lambda_{i,d}$  置 0。

② 当  $kP_{BN} < P_{BE}(t) \leq nP_{BN}$  时

放电单元组的额定功率无法满足 BESS 功率需求,将由启动充电单元组中的 BESU 临时加入放电单元组补足放电剩余功率 ( $P_{BE} - kP_{BN}$ ),以共同实现对放电功率  $P_{BE}$  的平抑,取  $N=n$ ,对式 (14) 和式 (15) 进行求解可得,  $P_{B,i}(t) > 0$  的个数即为需启动执行放电任务的 BESU 数量,记为  $s_d$ ,放电单元组中所有 BESU 的执行放电任务标志位  $\lambda_{i,d}$  全为 1;充电单元组中启动 BESU 的数量为  $s_d - k$  个,优先选择充电单元组中前期执行过临时放电任务后仍未执行充电任务的 BESU,其次选择充电单元组中 SOE 较高的 BESU 临时承担放电任务,并将被选中临时承担充电任务的 BESU 的放电转充电标志位  $\epsilon_{i,cd}$  置 1,其余置 0。

在 BESS 运行过程中,任意单元组中存在 BESU 的 SOE 达到如式 (12) 所示的上、下限阈值时,则该 BESU 的充、放电单元组状态标志位  $\beta_{i,c}$  和  $\beta_{i,d}$  发生改变,即原为充电单元组中的 BESU,转变为放电单元组中的 BESU,原为放电单元组中的 BESU,转变为充电单元组中的 BESU。为了保证充、放电单元组中的 BESU 尽可能多地同时转变所属充放电单元组状态,对充、放电单元组状态标志位发生改变的 BESU 的充放电次序进行特殊处理,即该 BESU 充、放电次序排于同状态组其余 BESU 之后,直到原充放电单元组中全部 BESU 的充放电状态都发生转变为止。若充电单元组的 BESU 都达到充电上限,此时所有 BESU 都为放电单元,即  $j=0$ ,此时充电功率将由放电单元组来承担任务;放电单

元组的 BESU 都达到放电下限也同理。

根据上述分析可得储能单元分组协调控制策略流程图,如图 1 所示。

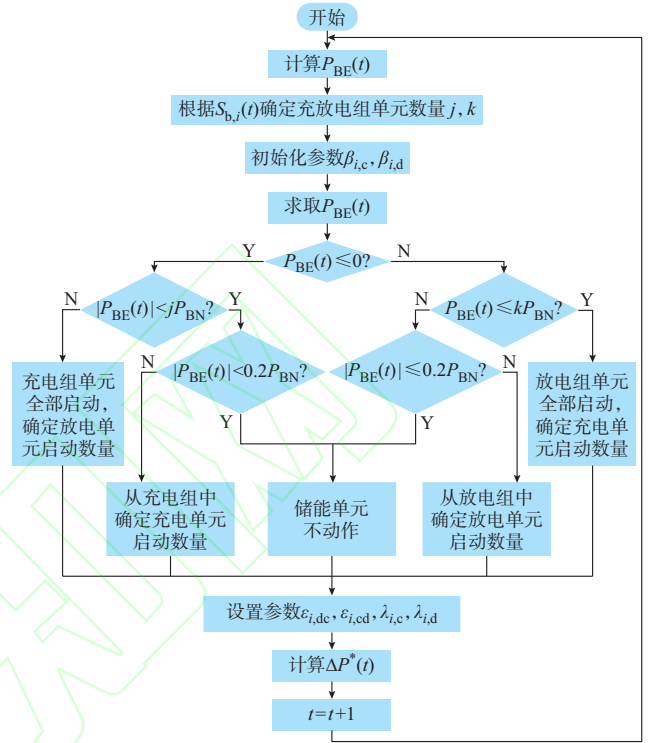


图 1 控制策略流程图

Fig. 1 Flow chart of control strategy

## 4 算例分析

为验证所提协调控制策略的有效性,选用附录 B 表 B1 所示的某一典型日微电网示范平台实测数据及常规交、直流负荷 24 h 实测数据进行仿真分析,其中风力发电的额定装机容量  $P_{WN}$  为 600 kW、光伏发电额定的装机容量  $P_{PN}$  为 350 kW。根据式 (1) 一式 (3) 可求得一个调度周期 ( $T=24$  h) 内  $\Delta P(t)$  和  $P_G^*(t)$  的波动情况如附录 A 图 A5 所示, BESS 待平抑功率  $P_{BE}^*(t)$  的波动情况如附录 A 图 A6 所示。

对附录 A 图 A6 功率波动进行概率统计可得,有 73.96% 的功率波动值小于 80 kW,但仅有 1.04% 的功率波动值大于 160 kW,功率波动最大值为 194.34 kW。较为合理的容量配置方法是要求 BESS 在绝大多数情况下能平抑  $P_{BE}^*(t)$  的功率波动,根据本文功率波动情况,参照文献 [12] 中基于功率波动概率统计的 BESS 容量配置方法,本文的锂离子 BESS 容量配置为 160 kW/0.64 MW·h (容量配置参数取 4),共分成 8 个容量为 20 kW/80 kW·h 的 BESU, BESU 的  $S_{max}$  和  $S_{min}$  分别为  $0.95 \pm 0.03$  和

0.2 ± 0.03, 均为标么值。

为验证所提 BESU 分组协调控制策略的有效性, 下面分别从 BESS 控制效果、充放电转换次数和能量转换效率 3 个方面进行分析。

### 1) 控制效果

设初始时刻充电单元组 BESU 数量与放电单元组 BESU 数量相等, 即  $j = k = 4$ , 充电单元组 BESU (1号至4号) 初始 SOE 分别为 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 放电单元组 BESU (5号至8号) 初始 SOE 分别为 0.55, 0.65, 0.75, 0.85。对比 BESS 在相同容量配置下本文策略、DBESS 策略和传统策略对 1 个调度周期内功率波动的平抑效果, 结果如附录 A 图 A7 所示。传统控制策略主要有按最大功率分配策略<sup>[13]</sup>和按比例分配策略<sup>[14]</sup>, 按最大功率分配策略是在低负荷时休眠部分 BESU, 其余 BESU 依次按最大充、放电功率分配待平抑功率的控制方式; 按比例分配策略是根据各 BESU 的 SOE 比例分配待平抑功率的控制方式。

根据“多类型储能协调控制技术及其示范”<sup>[25]</sup>中规定在 30 min 内采用储能之后的并网点功率波动幅值  $\Delta P^*(t)$  与微电网中分布式能源总装机容量之比  $\gamma(t)$  应小于等于 7%, 功率波动率  $\gamma(t)$  具体表达式如式(16)所示。由此可以得到本文策略、DBESS 策略和传统策略的  $\gamma(t)$ , 如图 2 所示。

$$\gamma(t) = \frac{|\Delta P(t) - P_{BE}(t)|}{P_{WN} + P_{PN}} \times 100\% = \frac{\Delta P^*(t)}{P_{WN} + P_{PN}} \times 100\% \quad (16)$$

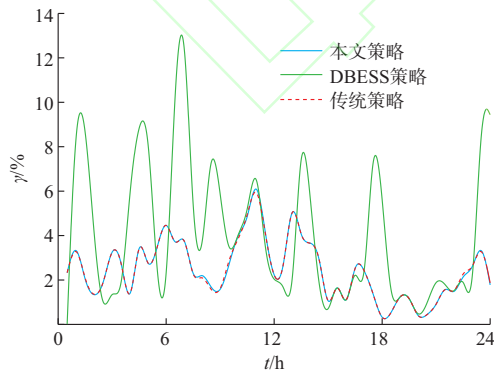


图 2 不同策略的功率波动率比较  
Fig. 2 Comparison of power fluctuation rate among different strategies

由图 2 可以看出, 本文策略和传统策略的 BESS 都能在需要时整体承担调节任务, 所以这 2 种策略下的  $\gamma(t)$  都小于 7%, 可有效抑制并网点功率波动, 符合并网点功率波动要求; 而 DBESS 策略将 BESS

一分为二, 在相同容量配置下, DBESS 策略的功率调节能力是其他 2 种策略的一半, 导致一些场景下功率调节能力不足, 存在  $\gamma(t) > 7\%$  的情况, 无法满足并网点功率波动要求。

图 3 为本文策略在 4 个调度周期下 8 个 BESU 的 SOE 变化情况。从图 3 中可以看出, 本文策略拓展了各 BESU 的可用容量, 并尽可能保证了部分 BESU 长期处于充电状态, 另一部分 BESU 长期处于放电状态, 提升了各 BESU 充放电状态的有序性, 维持了充、放电单元组的充放电能力相当, 保障了充、放电单元组 SOE 不会出现严重收缩的情况, 提升了 BESS 运行的灵活性, 避免了充、放电单元组因充、放电能力不足而进入极端运行状态。

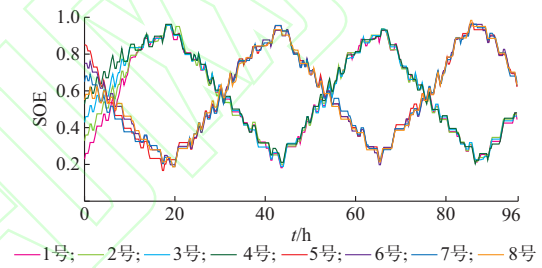


图 3 多调度周期各 BESU 的 SOE 控制效果  
Fig. 3 SOE control effect of BESU in multiple scheduling periods

### 2) 储能单元充放电转换次数

通过式(4)分别对本文策略、最大功率分配策略和按比例分配策略控制下的各 BESU 在 4 个调度周期内的充放电转换次数进行统计, 统计结果如图 4 所示。并通过式(5)可以得到, 本文所提策略、最大功率分配策略和按比例分配策略的 BESS 充放电转换次数分别为 380 次、616 次和 944 次, 所以本文所提策略的 BESS 充放电转换次数是最大功率分配策略的 3/5, 是按比例分配策略的 2/5, 延长了 BESS 循环寿命。

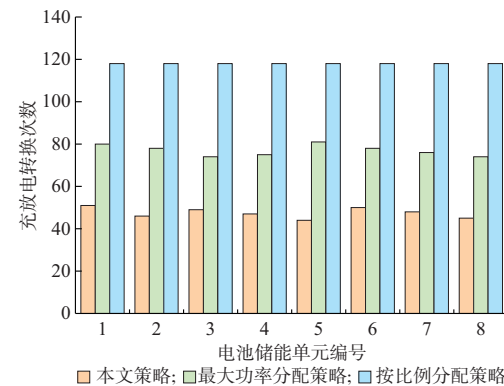


图 4 不同策略充放电转换次数比较  
Fig. 4 Comparison of charging and discharging switching times of different strategies

图4表明,在本文控制策略下,各BESU的充放电转换次数最少并且均等,说明各BESU的寿命折损几乎相同,可以避免BESS单独更换某一BESU,节省成本。

### 3) 储能系统能量转换效率

图5为1个调度周期内本文策略、按最大功率分配策略和按比例分配策略的充放电效率比较图。上述3种控制策略的BESS充放电效率平均值分别为93.57%,92.69%和84.88%,本文所提策略的BESS充、放电效率平均值相比于最大功率分配策略提升了0.88%,相比于按比例分配策略提升了8.69%,所以本文所提控制策略减小了因功率分配不当而产生的能量损耗。

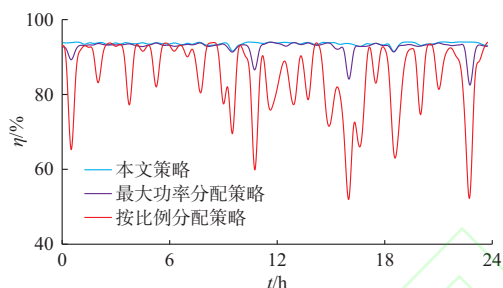


图5 不同策略能量转换效率比较  
Fig. 5 Comparison of energy conversion efficiency of different strategies

由上述分析可知,BESS在相同容量配置下,由于DBESS控制策略的充、放电调节功率是其他控制策略的一半,导致一些场景下功率调节能力不足,无法满足并网要求;按比例分配策略每次调节都由全部BESU共同完成,出现了多个BESU同时小功率充放电现象,劣化了BESS的循环寿命和能量转换效率;按最大功率分配策略在低载荷时休眠了部分BESU,一定程度上遏制了多个BESU同时以小功率频繁充放电,所以该策略在能量转换效率和充放电转换次数方面优于按比例分配策略,但BESU依次按最大功率分配待平抑功率的方式和充放电状态的无序性仍增加了BESU不必要的能量损耗和充放电转换;本文所提的分组优化协调控制策略在保证有效抑制交流母线功率波动的同时,提升了各BESU充放电状态的有序性,减少了BESU充放电转换次数,避免了BESU小功率充放电现象,达到了延长BESS循环寿命和提升BESS能量转换效率的效果,并且在本文控制策略下的BESS仍能整体运行,所以工况的改变不会影响本文策略的有效性。

## 5 结语

本文针对BESS参与微电网调节时储能单元间

功率分配不当会劣化储能本体性能的问题,提出了以DBESS控制策略为基础,充、放电单元组不完全分离的储能系统控制方式,制定了多个储能单元间的协调运行控制策略。仿真结果表明,本文提出的协调控制策略具有如下优势。

1)在不影响储能系统额定调节功率的情况下,实现了充、放电单元组的有序运行,拓展了各储能单元的可用容量,提升了储能系统功率分配的灵活性。

2)避免了储能系统频繁充放电转换,充放电转换次数是最大功率分配策略的3/5,是按比例分配策略的2/5,延长了BESS循环寿命。

3)消除了多个储能单元同时以小功率充放电现象,提升了储能系统充、放电效率,充、放电效率平均值相比于最大功率分配策略和按比例分配策略提升了0.88%和8.69%,减小了因功率分配不当而产生的能量损耗。

为进一步提升储能电站的可靠性与经济性,后续工作将引入功率型储能系统,研究混合储能系统的优化控制策略。

本文研究得到东北电力大学博士科研启动基金项目(BSJXM-2019101)的资助,特此感谢!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 参考文献

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.
- [2] 谢桦,滕晓斐,张艳杰,等.风/光/储微网规划经济性影响因素分析[J].电力系统自动化,2019,43(6):70-76.  
XIE Hua, TENG Xiaofei, ZHANG Yanjie, et al. Analysis of economic influence factors in wind-photovoltaic-storage microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 70-76.
- [3] 米阳,纪宏澎,何星塘,等.多储能独立直流微电网自适应分级协调控制[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1980-1989.  
MI Yang, JI Hongpeng, HE Xingtang, et al. Adaptive hierarchical coordinated control of multi-energy storage in isolated DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1980-1989.
- [4] 郭伟,赵洪山.基于改进分布式一致性算法的电池储能阵列分组控制策略[J].电工技术学报,2019,34(23):4991-5000.  
GUO Wei, ZHAO Hongshan. Grouping control strategy of battery energy storage array system based on an improved



- distributed consensus algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(23): 4991-5000.
- [5] 严干贵,朱微,段双明,等.考虑铅炭电池组一致性的储能系统功率控制策略[J].电力系统自动化,2020,44(11):61-67.  
YAN Gangui, ZHU Wei, DUAN Shuangming, et al. Power control strategy of energy storage system considering consistency of lead carbon battery pack [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 61-67.
- [6] 娄素华,吴耀武,崔艳昭,等.电池储能平抑短期风电功率波动运行策略[J].电力系统自动化,2014,38(2):17-22.  
LOU Suhua, WU Yaowu, CUI Yanzhao, et al. Operation strategy of battery energy storage system for smoothing short-term wind power fluctuation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 17-22.
- [7] 吕超贤,李欣然,卢龙辉,等.基于小波分频与双层模糊控制的多类型储能系统平滑策略[J].电力系统自动化,2015,39(2): 21-29.  
LYU Chaoxian, LI Xinran, HU Longhui, et al. A smoothing strategy for hybrid energy storage system based on wavelet frequency allocation and two-level fuzzy control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 21-29.
- [8] 林莉,金鑫,朱丽云,等.考虑充放电能量不平衡的双电池系统状态评估与控制策略[J].电力系统自动化,2018,42(10): 128-134.  
LIN Li, JIN Xin, ZHU Liyun, et al. State evaluation and control strategy of dual-battery system considering unbalance of charging and discharging energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 128-134.
- [9] 严干贵,李洪波,段双明,等.基于双铅碳电池储能系统的微电网优化运行控制策略[J].电力系统自动化,2019,43(13):46-53.  
YAN Gangui, LI Hongbo, DUAN Shuangming, et al. Optimal operation control strategy of microgrid based on double-lead carbon battery energy storage system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 46-53.
- [10] CHOI J, CHOI I, AHN G, et al. Advanced power sharing method to improve the energy efficiency of multiple battery energy storages system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1292-1300.
- [11] 高明杰,惠东,高宗和,等.国家风光储输示范工程介绍及其典型运行模式分析[J].电力系统自动化,2013,37(1):59-64.  
GAO Mingjie, HUI Dong, GAO Zonghe, et al. Presentation of national wind/photovoltaic/energy storage and transmission demonstration project and analysis of typical operation modes [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 59-64.
- [12] 张新松,顾菊平,袁越,等.基于电池储能系统的风功率波动平抑策略[J].中国电机工程学报,2014,34(28):4752-4760.  
ZHANG Xinsong, GU Juping, YUAN Yue, et al. Strategy of smoothing wind power fluctuation based on battery energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4752-4760.
- [13] 刘春阳,王秀丽,吴雄.考虑蓄电池分组优化的风储系统多层次调度策略[J].电网技术,2016,40(10):3029-3037.  
LIU Chunyang, WANG Xiuli, WU Xiong. A multi-layer dispatch strategy of combined wind-storage systems considering optimization of battery units [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3029-3037.
- [14] HINTZ A, RAJASHEKARA K, PRASANNA R. Controller for combined peak-load shaving and capacity firming utilizing multiple energy storage units in a microgrid [C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 18-22, 2016, Milwaukee, USA: 7p.
- [15] 苏浩,张建成,王宁,等.基于分层优化的大容量混合储能系统能量管理策略[J].高电压技术,2018,44(4):1177-1186.  
SU Hao, ZHANG Jiancheng, WANG Ning, et al. Energy management strategy of large-scale hybrid energy storage system based on layered optimization [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1177-1186.
- [16] 马伟,王玮,吴学智,等.光储协调互补平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.
- [17] 刘子文,苗世洪,范志华,等.孤立交直流混合微电网双向AC/DC换流器功率控制与电压波动抑制策略[J].中国电机工程学报,2019,39(21):6225-6237.  
LIU Ziwen, MIAO Shihong, FAN Zhihua, et al. Power control and voltage fluctuation suppression strategy of the bidirectional AC/DC converter in the islanding hybrid microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6225-6237.
- [18] SCHIMPE M, PIESECH C, HESSE H, et al. Power flow distribution strategy for improved power electronics energy efficiency in battery storage systems: development and implementation in a Utility-Scale system [J]. Energies, 2018, 11(3): 533.
- [19] 李滨,粟祎敏,莫新梅,等.跟踪风电计划偏差的风储系统联合控制策略[J].电网技术,2019,43(6):2102-2108.  
LI Bin, SU Yimin, MO Xinmei, et al. Control strategy of hybrid wind-ES power system for tracking wind power planning deviation [J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2102-2108.
- [20] 高飞,杨凯,惠东,等.储能用磷酸铁锂电池循环寿命的能量分析[J].中国电机工程学报,2013,33(5):41-45.  
GAO Fei, YANG Kai, HUI Dong, et al. Cycle-life energy analysis of LiFePO<sub>4</sub> batteries for energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(5): 41-45.
- [21] BETZIN C, WOLFSCHMIDT H, LUTHER M. Electrical operation behavior and energy efficiency of battery systems in a virtual storage power plant for primary control reserve [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 97:138-145.
- [22] SCHIMPE M, NAUMANN M, TRUONG N, et al. Energy efficiency evaluation of a stationary lithium-ion battery container storage system via electro-thermal modeling and detailed component analysis [J]. Applied Energy, 2018, 210: 211-229.

- [23] NOYANBAYEV N K, FORSYTH A J, FEEHALLY T. Efficiency analysis for a grid-connected battery energy storage system [J]. *Materials today. Proceedings*, 2018, 5 (11) : 22811-22818.
- [24] GONZALEZ-CASTELLANOS A, POZO D, BISCHI A. Detailed Li-ion battery characterization model for economic operation [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 116: 105561.
- [25] 孙玉树,李星,唐西胜,等.应用于微网的多类型储能多级控制策略[J].*高电压技术*,2017,43(1):181-188.  
SUN Yushu, LI Xing, TANG Xisheng, et al. Multi-level control strategy of multi-type energy storages for microgrid[J].

*High Voltage Engineering*, 2017, 43(1): 181-188.

严干贵(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向: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,硕士研究生,主要研究方向: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,通信作者,博士,实验师,主要研究方向:新能源发电运行控制。E-mail:duansm@neepu.edu.cn

(编辑 蔡静雯)

## Microgrid Operation Control Strategy Considering Grouping Optimization of Battery Energy Storage Units

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

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

**Abstract:** Aiming at the issue of optimal selection of charging and discharging paths of energy storage units when large-scale battery energy storage systems participate in microgrid regulation, this paper studies the relationship between energy conversion efficiency and operation power of energy storage units. Based on the control strategy of double battery energy storage system (DBESS), this paper proposes a control method in which charging and discharging unit groups can be temporarily converted, to solve the problem of insufficient power regulation capability of DBESS. And a power distribution mechanism among energy storage units is formulated to reduce the number of energy storage units in operation and improve the unnecessary life attenuation and energy loss problems caused by improper power distribution of energy storage units. A wind-solar-storage-common AC bus microgrid system with 8 energy storage units is constructed. Combined with the given power fluctuation suppression demand, the proposed control strategy, DBESS control strategy and conventional control strategy are simulated and analyzed. The rationality and effectiveness of the proposed strategy are verified from the control effect, cycle life and energy conversion efficiency of the energy storage system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1766204).

**Key words:** battery energy storage systems; microgrid; energy storage unit; cycle life; energy conversion efficiency



### 附录 A

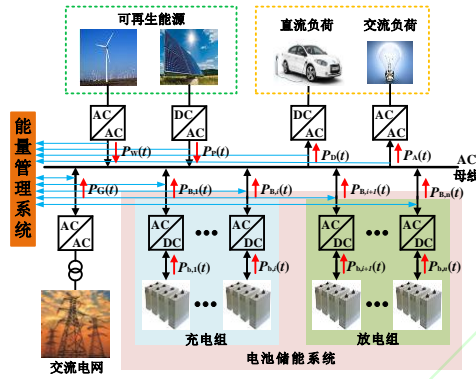


图 A1 共交流母线型微电网系统  
Fig. A1 Common AC bus microgrid system

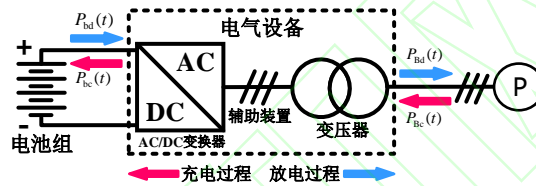


图 A2 BESU 能量转换效率电路示意图  
Fig. A2 Schematic diagram of BESU energy conversion efficiency circuit

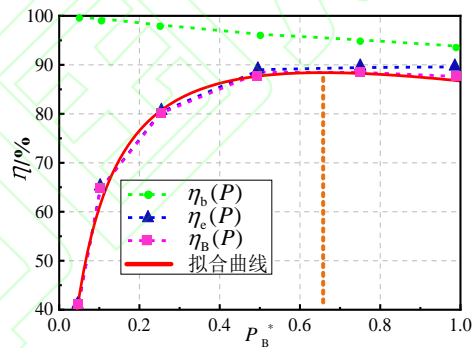


图 A3 BESU 能量转换效率与  $P_{B^*}$  关系  
Fig. A3 Relationship between BESU energy conversion efficiency and  $P_{B^*}$

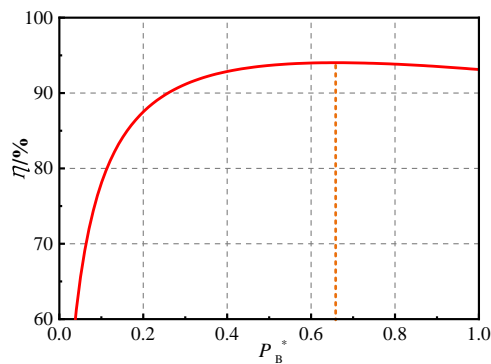


图 A4 BESU 充、放电转换效率与  $P_{B^*}$  关系  
Fig. A4 Relationship between charge and discharge conversion efficiency of BESU and  $P_{B^*}$

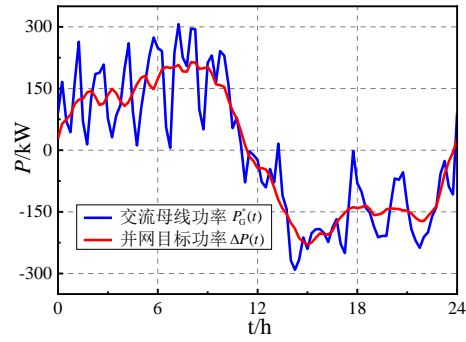


图 A5 交流母线功率和并网目标功率  
Fig. A5 AC bus power and grid-connected target power

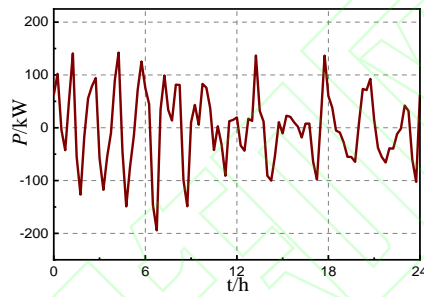


图 A6 BESS 待平抑功率  
Fig. A6 Power to be stabilized in BESS

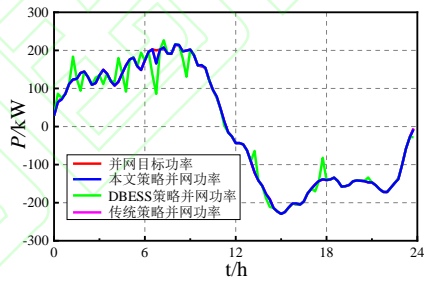


图 A7 不同策略对功率的平抑效果比较  
Fig. A7 Comparison of different strategies for power stabilization

## 附录 B

表 B1 某一典型日实测数据  
Table B1 Measured data of a typical day

时间	风电发电 功率/kW	光伏发电 功率/kW	交流负 荷/kW	直流负荷/ kW	时间	风电发电 功率/kW	光伏发电 功率/kW	交流负 荷/kW	直流负荷/ kW
0:00—0:15	326.2	0	12.86	222.73	12:00—12:15	188.78	154.28	26.04	341
0:15—0:30	402.94	0	13.1	223.59	12:15—12:30	173.96	127.52	26.32	352.22
0:30—0:45	308.52	0	13.34	224.45	12:30—12:45	138.94	150.92	28.14	352.22
0:45—1:00	280.58	0	13.38	223.59	12:45—13:00	111.54	220.92	28.36	349.63
1:00—1:15	400.58	0	13.5	223.59	13:00—13:15	148.72	141.14	28.78	339.27
1:15—1:30	501.08	0	13.54	223.81	13:15—13:30	106.82	266.3	29.1	328.05
1:30—1:45	308.52	0	13.6	224.45	13:30—13:45	100.66	145.58	29.1	327.19
1:45—2:00	251.28	0	13.64	223.59	13:45—14:00	74.42	134.82	29.12	323.73
2:00—2:15	365.74	0	14.04	223.59	14:00—14:15	18.2	57.88	28.94	315.1
2:15—2:30	423.34	0	14.38	223.59	14:15—14:30	2.68	47.78	28.88	312.51
2:30—2:45	428.22	0	14.38	225.32	14:30—14:45	39.08	39.5	29.04	315.96
2:45—3:00	448.82	0	14.38	226.18	14:45—15:00	66.12	63.06	29.06	312.51
3:00—3:15	316.52	0	14.14	225.32	15:00—15:15	4.04	80.96	29.92	295.24
3:15—3:30	270.9	0	14.14	225.32	15:15—15:30	0	127.9	30.06	299.56
3:30—3:45	326.2	0	14.26	227.91	15:30—15:45	20.94	118.82	30.02	302.15
3:45—4:00	350.98	0	14.4	227.04	15:45—16:00	32.7	101.52	30	296.11
4:00—4:15	438.76	0	15.3	226.18	16:00—16:15	42.14	83.28	40.7	286.61
4:15—4:30	500.11	0	15.52	224.45	16:15—16:30	54.22	46.78	41.44	283.16
4:30—4:45	336.08	0	15.74	225.32	16:30—16:45	87.5	49.72	41.4	284.88
4:45—5:00	249.12	0.12	15.76	221.86	16:45—17:00	106.9	41.2	41.38	274.52
5:00—5:15	340.3	1.92	18.12	221.86	17:00—17:15	39.22	34.8	43.1	258.99
5:15—5:30	402.94	4.22	18.76	221.86	17:15—17:30	19.9	30.12	44.78	255.53
5:30—5:45	462.88	8.08	18.94	221.86	17:30—17:45	144.38	27.18	45	253.81
5:45—6:00	501.01	12.08	18.96	220.14	17:45—18:00	240.56	44.16	45.1	241.72
6:00—6:15	470.02	18.36	22.1	217.55	18:00—18:15	163.82	36.4	46.78	233.95
6:15—6:30	455.18	26.8	22.62	218.41	18:15—18:30	153.76	24.3	47.5	231.36
6:30—6:45	271.8	32.58	22.78	225.32	18:30—18:45	125.62	10.74	47.32	228.77
6:45—7:00	212.5	40.38	22.86	224.45	18:45—19:00	113.64	4.14	47.22	222.73
7:00—7:15	427.62	57.6	26.44	221.86	19:00—19:15	69.8	0	43.08	212.37
7:15—7:30	530.3	39.56	29.08	234.25	19:15—19:30	47.96	0	42.2	217.55
7:30—7:45	442.5	63.24	29.04	251.22	19:30—19:45	50.22	0	42.18	216.68
7:45—8:00	408.28	79.22	29.02	253.81	19:45—20:00	46.86	0	42.16	213.23
8:00—8:15	493.24	92.16	30.82	258.99	20:00—20:15	117.38	0	39.6	211.51
8:15—8:30	520.2	87.32	31.48	281.43	20:15—20:30	187.34	0	39.58	216.68
8:30—8:45	358.04	72.58	31.3	300.42	20:30—20:45	186.98	0	39.7	219.27
8:45—9:00	288.12	99.28	31.1	305.6	20:45—21:00	199.1	0	39.72	213.23
9:00—9:15	394.72	153.92	28.8	307.33	21:00—21:15	113.64	0	36.16	209.78
9:15—9:30	455.82	133.62	28.44	330.64	21:15—21:30	52.02	0	35.44	208.92
9:30—9:45	431.92	111.14	28.42	348.77	21:30—21:45	33.48	0	35.56	217.55
9:45—10:00	436.88	177.24	28.42	344.45	21:45—22:00	13.94	0	35.58	215.82
10:00—10:15	424.56	174.04	25.06	343.59	22:00—22:15	37.96	0	32.3	216.68
10:15—10:30	420.3	108.08	23.78	345.31	22:15—22:30	46.24	0	29.46	216.68
10:30—10:45	307.52	126.88	23.38	357.4	22:30—22:45	88.86	0	29.44	220.14

续表

时间	风电发电 功率/kW	光伏发电 功率/kW	交流负 荷/kW	直流负荷/ kW	时间	风电发电 功率/kW	光伏发电 功率/kW	交流负 荷/kW	直流负荷/ kW
10:45—11:00	149.54	313.18	23.18	360.49	22:45—23:00	111.28	0	29.44	220.14
11:00—11:15	180.92	208.22	23.08	351.36	23:00—23:15	184.82	0	23.44	219.27
11:15—11:30	114.7	181.36	23	351.36	23:15—23:30	218.02	0	21.5	222.73
11:30—11:45	192.44	183.7	24.82	353.95	23:30—23:45	146.84	0	12.4	222.73
11:45—12:00	229.32	133.56	25.42	348.77	23:45—24:00	127.6	0	11.74	223.59

