第 52 卷 第 3 期：1159-1170 高电压技术 Vol.52, No.3: 1159-1170
2026 年 3 月 31 日 High Voltage Engineering March 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250508

分布式储能聚合建模及双层一致性调频策略

余 洋[1,2,3]，王 研[1,2]，吕廷彦[1,2]，钱学尧[1,2]，郭逸萱[1,2]，刘 鋆[3]
（1. 新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学(保定))，保定 071003；
2. 河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学(保定))，保定 071003；
3. 内蒙古电力集团蒙电经济技术研究院有限责任公司，呼和浩特 010020）

摘 要：分布式储能(distributed energy storage，DES)作为重要调频资源备受关注。然而，现有 DES 聚合方法难以兼顾模型精度与温度、通信可靠性等多影响因素，且调频策略无法持续维持集群可调度潜力。为此，提出考虑多影响因素的 DES 聚合建模方法及双层一致性调频策略。首先，构建含荷电状态区间双层离散化、健康状态修正及温度辅链的双马尔科夫链聚合模型。其次，设计双层调控策略：上层按荷电状态分组初步分配电网调频指令；下层将同组 DES 视为多智能体系统，提出动态拓扑下基于固定时间比例一致性算法的次级功率分配策略，并从理论上证明算法的稳定性。最后，DES 按功率指令进行响应，完成频率调节。

关键词：分布式储能；马尔科夫链；聚合建模；动态拓扑；固定时间比例一致性

Distributed Energy Storage Aggregation Modeling Considering Multiple Influencing Factors and Two-layer Consistent Frequency Regulation Strategy

YU Yang[1,2,3], WANG Yan[1,2], LYU Tingyan[1,2], QIAN Xueyao[1,2], GUO Yixuan[1,2], LIU Jun[3]
(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 2. Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid of Hebei Province(North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 3. Inner Mongolia Electric Power Group Mengdian Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Hohhot 010020, China)

Abstract：Distributed energy storage (DES) has garnered significant attention as a crucial frequency regulation resource. However, existing DES aggregation methods are difficult to compromise the model accuracy with multiple influencing factors such as temperature and communication reliability, and the frequency regulation strategy cannot consistently maintain the schedulable potential of the cluster. To address these issues, this paper proposes a DES aggregation modeling method with considering multiple influencing factors and a two-layer consistency-based frequency regulation strategy. First, a dual Markov chain aggregation model is constructed, incorporating SOC interval double-layer discretization, health state correction, and a temperature auxiliary chain. Second, a two-layer control strategy is designed as follows: the upper layer preliminarily allocates grid frequency regulation commands based on SOC grouping; the lower layer treats DES within the same group as a multi-agent system, a secondary power distribution strategy is proposed based on fixed-time proportion consistency algorithms under dynamic topology, and the algorithm stability is theoretically verified. Finally, DES responds according to the power command to achieve frequency regulation.

Key words：distributed energy storage; Markov chain; aggregation modeling; dynamic topology; fixed-time proportional consensus

0 引言

在“双碳”目标与传统能源日益稀缺的大背景下，新能源大规模并网，电力市场逐步开放[1-2]。截至 2024 年 12 月底，全国太阳能和风电的装机量分别达到 8.9 亿 kW(同比增长 45.2%)和 5.2 亿 kW(同比增长 18.0%)。然而，新能源的间歇性和随机性导致电力供需失衡，“弃风弃光”问题日益突出。分布式储能(distributed energy storage，DES)因其兼具电源和负荷的双重属性，并具备快速动态调频等能力，成为缓解电网压力的重要调频资源。然而，据中电

基金资助项目：国家自然科学基金(52077078)；河北省在读研究生创新能力培养资助项目(CXZZBS2025192)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52077078), Hebei Province Graduate Innovation Ability Training Funding Project (CXZZBS2025192).

联统计数据，新能源配套储能的平均利用率仅为31%，反映出DES集群的调节能力未能得到充分释放。作为DES的典型应用场景，除新能源配储外，电动汽车(electric vehicle，EV)与5G基站储能系统也面临类似问题：EV聚合体虽具备灵活充放电特性，但当前控制策略在其可调度潜力与电池荷电状态(state of charge，SOC)一致性的协调方面仍存不足；5G基站DES在动态拓扑环境下的稳定性与可靠性调控，也因现有研究对实际场景适配性的欠缺而难以发挥最优效能。这些场景共同凸显出规模化DES在复杂应用中存在瓶颈，因此，迫切需要针对大规模DES开展聚合建模研究，并优化调控策略，实现从单体到集群的协同优化，释放其调节潜力，提升其参与电网调控的效能。

对于DES聚合建模方法，当前研究可分为3类：基于物理模型的聚合建模方法、基于蒙特卡洛模拟的聚合建模方法和面向控制且精度不受DES数量限制的聚合建模方法。文献[3]先基于Thevenin模型对锂离子电池进行建模，该模型能近似模拟出锂离子电池的外部特性，但未考虑单体储能之间的不一致性。文献[4]充分考虑DES间的差异性，构建等效聚合模型与外部互动，提升了系统的精度。文献[5]建立了基于K-means聚类的DES系统优化调控模型，将聚合建模问题转化为规划问题，提高了运行过程中DES系统总体的调控潜力。文献[6]提出一种基于自适应均衡技术的DES聚合模型，充分表征储能单体动态调节能力，实现聚合体调节能力的相对均衡。然而，随着DES数量增加，现有方法在求解时面临“维数灾”问题，且求解大规模优化问题的速度较慢，难以满足电力系统调度调频等高实时性场景需求[7]。面向控制且精度不受DES数量限制的聚合建模方法能够有效解决上述问题。在EV领域，已有相关应用：文献[8]考虑EV的3种接入电网状态，将SOC状态空间划分，并构建EV集群状态空间模型。文献[7]采用SOC区间的双层离散化并考虑电池容量差异，构建了AEVS充放电负荷动态转移聚合模型，解决了文献[8]中SOC离散区间划分数量与精度无法协调的问题。在DES领域，采用上述方法进行聚合建模时，还需要考虑多重影响因素：DES容量随温度变化[9]，影响储能SOC值，进而对聚合效果产生较大影响；DES的健康状态(state of health，SOH)与SOC存在联系[10]，随着储能循环次数增加，SOH对SOC的影响加剧，影响聚合效果；通信可靠性决定了数据传输的有效性[11]，会影响DES聚合建模时一步转移概率的计算，从而影响建模精度。可见，当前对DES聚合建模方法的研究缺乏对内外部多重影响因素的考虑，导致聚合模型精度不高，难以应用于大规模DES场景。

对于面向调频的DES调控方法，当前研究主要集中于分层优化架构和多智能体一致性策略等方向。文献[12]提出了一种EV集群分层分布式调频策略，将充电负荷设为优化变量，以最小负荷方差为目标，对EV充电计划进行优化调控，但未考虑储能之间的容量差异，加大了集群控制的难度。文献[13]考虑EV用户需求和单体间的差异性，提出了EV分层调频管理策略。文献[14]在此基础上进一步提出了DES参与调频市场的调度策略，并基于鲁棒优化方法增强了调频能力。文献[15]进一步提出双层模型预测控制(model predictive control，MPC)架构，在上层实现调度的经济性，在下层实现控制的稳定性。然而，上述控制方法无法兼顾实现可靠性、稳定性同时最优，也无法同时计及SOC一致性。对此，有学者提出了基于多智能体一致性的调控方法解决上述问题，文献[16]提出了一种考虑SOC一致性的EV调频控制策略，使用含领导体的二阶多智能体一致性算法，使EV集群调频出力能够精确跟踪区域控制中心分配的参考功率，并在调频过程中实现各EV集群SOC趋于一致。文献[17]针对异构多智能体系统(multi-agent system，MAS)提出了有限时间二次调频策略，但其收敛时间依赖于初始条件，存在一定的局限性。为弥补这一缺陷，文献[18]引入了固定时间控制的概念，并建立了非线性MAS在固定时间内实现稳定性的充分条件。但在DES实际应用时，动态拓扑也是需要考虑的重要因素，当前动态拓扑的应用大多聚焦电网智能诊断技术[19]。可见，当前对规模化DES调控的研究无法在计及SOC一致性的前提下兼顾可靠性和稳定性，同时对面向实际应用场景的动态拓扑情况考虑欠佳。

基于上述分析以及规模化DES参与电网调频服务的实际需求，本文完成了以下创新工作：

(1)提出双马尔科夫链动态耦合聚合建模方法：构建主链（SOC状态转移）与辅链（温度动态演化）协同的双层建模框架，融合储能SOH修正、参数异构性及通信可靠性表征，突破传统单链模型精度受DES数量限制的问题，实现多时间尺度下集群状态的精准映射，解决规模化聚合中的“维数灾”与

实时性矛盾。

(2)设计动态拓扑下双层分布式协同调控策略：上层基于 SOC 区间划分实现调频指令的自适应分组分配；下层构建多智能体固定时间比例一致性算法通过非线性控制协议设计，确保 DES 集群在拓扑动态变化中实现 SOC 比例一致性与功率指令的固定时间收敛，同步提升集群的可调度潜力与 DES 的利用率，解决传统策略在动态场景下的一致性维持难题。

1　本文研究框架

附录 A 图 A1 展示了本文的研究框架，简述如下：

(1)综合考虑影响 DES 聚合的多重因素，分别构建马尔科夫主链和辅链，求解基于天鹰优化算法(aquila optimizer，AO)的 DES 集群区间划分优化模型，结合双马尔科夫链理论，构建规模化 DES 马尔科夫双链聚合模型，为后续的聚合调控奠定基础。

(2)根据可调度潜力对聚合后的 DES 集群进行分组处理，依据电网的调频指令完成上层初级功率分配。

(3)下层将不同分组内的 DES 等效为多智能体系统，提出动态拓扑下固定时间比例一致性控制算法，并从理论上证明其动态拓扑下的稳定性，得到控制矩阵，完成不同组内 DES 的调控。

(4)最终实现 DES 聚合调频。

2　基于双马尔科夫链的 DES 聚合建模

2.1　多运行状态下 SOC 区间的双层离散化

DES 接入电网后有 3 种状态：充电状态、等待状态和放电状态。单体 DES 在 3 种不同接入电网状态下的 SOC 状态变化过程是关于时间 t 的随机过程，并且 DES 的未来 SOC 状态仅依赖于当前状态，满足马尔可夫性。

2.1.1　离散化划分过程分析

在规模化分 DES 聚合建模中，SOC 作为连续变化的核心状态变量，直接采用连续空间描述会导致计算维度爆炸且难以适配实时调控需求。因此，对 SOC 进行离散化划分是实现大规模 DES 动态行为有效建模的关键。

首先将 DES 的 SOC 变化范围[$S_{\min}$, $S_{\max}$]划分为 N 个连续的 SOC 状态组(组号为：0,1,2，…，N−1)，考虑到 DES 接入电网的 3 种状态，将每个状态组进一步划分为 3 个状态子区间，每个状态子区间对应于在特定接入电网状态(充电、等待或放电)下，处于该组 SOC 范围内的 DES 数量。通过这种方式，整个 SOC 状态区间被划分为 3N 个状态子区间，其中每种接入状态对应 N 个状态子区间，如图 1 所示。

将各状态子区间进一步划分为 n 个小区间，通过动态转移概率来刻画 DES 在不同状态之间的动态转移过程。相邻 SOC 区间的概率转移过程如附录 A 图 A2 和图 A3 所示。

对于任意 DES 单体，可以根据其接入电网时的状态和 SOC 值，确定该单体所属的状态区间。

对于划分的 3N 个 DES 状态区间，可以构造出一组描述规模化 DES 状态分布的状态变量 $\boldsymbol{X}(t)$，为 3N×1阶的状态列向量，$\boldsymbol{X}(t)$ 的结构式为：

$$\boldsymbol{X}(t)=[x_1(t),x_2(t),\cdots,x_j(t),\cdots,x_{3N}(t)]^{\mathrm{T}} \quad (1)$$

2.1.2　引入 SOH 修正 SOC 离散化区间

由于电池储能的 SOH 与 SOC 存在关联，随着储能循环次数增加，SOH 对 SOC 的影响逐渐加剧。因此，在划分 SOC 区间时，需要考虑 SOH 的影响。本节采取 DES 集群的 SOH 平均值来修正主链 SOC，DES 单体的 SOH 值作为已知量在附录 C 表 C1 中给出，储能集群 SOH 平均值计算方法如下：

$$S_{\mathrm{OH}}^{\mathrm{ave}}=\frac{\sum_{k=0}^{n}S_{\mathrm{OH},k}}{n} \quad (2)$$

式中：$S_{\mathrm{OH},k}$ 为第 k 个 DES 的 SOH。

对于电池储能，其 SOC 与 SOH 呈反比关系[20]：

$$S=\frac{Q}{C_T\cdot S_{\mathrm{OH}}} \quad (3)$$

式中：Q 为储能装置目前的电量，不参与本文具体计算；C_T 为温度 T 时电池的容量；S_{OH} 为储能装置的健康状态。

得到集群 SOH 平均值后，进一步得出考虑 SOH 修改后的集群 SOC 与原 SOC 的比例关系，修正后 SOC 可表示为：

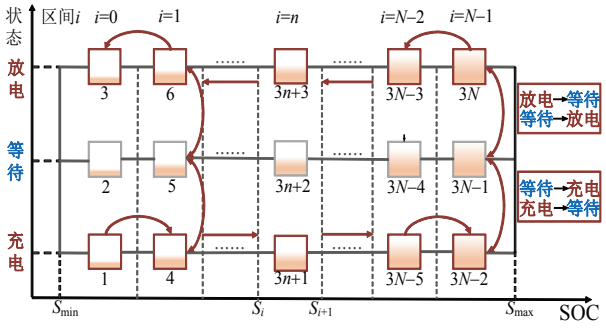


图 1　DES 状态空间

Fig.1　DES state space

$$S_i' = \frac{S_i}{S_{\mathrm{OH}}^{\mathrm{ave}}} \tag{4}$$

式中：S_i'为修改后组号为i的SOC区间下限的SOC值(i=0, 1, 2, …, N−2)。修改后的状态空间如附录A图A4所示。

2.1.3 双层离散化维度优化确定

为兼顾聚合建模精度、算力消耗及双层离散化维数的需求，针对传统方法通过试凑法确定N与n时存在繁琐性及主观性问题，以双层离散化区间数量N与n为优化变量，本研究设计了一种基于AO算法的DES集群双层离散化区间划分优化求解模型，该模型的目标函数f_{m}为：

$$f_{\mathrm{m}} = \chi_1 \cdot \sum_{t=1}^{N_{\mathrm{m}}} \left| P_t^{\mathrm{M}} - P_t^{\mathrm{MSM}} \right| + \chi_2 \cdot N + \chi_3 \cdot n \tag{5}$$

式中：t为调度时刻数；N_{m}为调度周期内的时刻数量；P_t^{M}与P_t^{MSM}分别为t时刻本聚合方案的聚合功率与蒙特卡洛模拟的聚合功率；χ_1、χ_2和χ_3为权重系数。

上述模型所需优化的变量数量为2，但由于待优化变量的取值范围较大，对优化算法的迭代速度与精度提出了较高要求。考虑到AO具有较快的收敛速度、较高的收敛精度、较强的全局寻优能力以及大规模数据处理能力，本文选取AO作为算法求解器，并将目标函数作为AO的适应度函数。

2.2 多状态区间内SOC一步转移概率求取

规模化DES在状态区间之间的转移过程如下：

$$\boldsymbol{X}(t+1) = \boldsymbol{A}^{\mathrm{m}} \cdot \boldsymbol{X}(t) \tag{6}$$

马尔科夫状态转移矩阵$\boldsymbol{A}^{\mathrm{m}}$是由一步转移概率组成的。

规模化DES状态转移概率受DES额定充电功率、充电效率和电池容量的影响[14]，具体一步转移概率求取过程详见附录B。

根据3种接入电网状态情况下的马尔科夫链的一步转移概率，可以构建规模化DES系统的马尔科夫状态转移矩阵$\boldsymbol{A}^{\mathrm{m}}$。

2.3 考虑多影响因素的聚合建模

2.3.1 通信可靠性建模

假设每个DES配备一个基站，各DES需要交换彼此的能量需求，并通过基站获取控制信号。通过计算得出各个DES与基站间的通信可靠性，并将其作为聚合建模影响因素之一。仅当微网与基站之间的通信可靠性超过特定阈值α时，信息传输才有效。通信可靠性的计算式[21]为：

$$\beta^{v-k} = (1 - Q^1(\sqrt{2S_{\mathrm{NR}}^{v-k}\frac{B}{v_{\mathrm{s1}}}}))^l \tag{7}$$

式中：S_{NR}^{v-k}表示第k个DES访问基站v时的信噪比；$Q^1(\cdot)$为标准高斯分布的积分尾函数。依据积分尾函数的特性，较高的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)意味着通信可靠性较强；B为无线传输收发器的噪声带宽；l表示数据包的长度，通常为125 b；v_{s1}为数据传输速度。

通信可靠性为DES聚合建模的外部影响因素，将其引入2.2节一步转移概率式具体推导过程详见附录B。

2.3.2 温度辅链模型

对于DES，不同温度下电池性能会有所不同，例如容量会随温度变化而改变。这种容量变化会影响储能的SOC值，从而对DES参与调频服务产生较大影响。附录A图A5给出了$LiFePO_4$电池容量随温度的变化情况[22]。

不失一般情形，设25 ℃为分布式电池储能标准容量下的参考温度，则不同温度下电池容量可表示为：

$$C_T = Z_T C_{25} \tag{8}$$

式中：Z_T为温度T时电池的容量百分数；C_{25}为电池的标准容量；C_T为温度T时电池的实际容量。

假设储能所处温度状态的变化这一随机过程满足马尔可夫性[23]，则可以将DES所处的环境温度变化过程转换为马尔科夫链过程，形成辅链。

结合研究时段的多气象因素，首先获取该时段的温度最高值与最低值，并将二者差值划分为F等分，然后计算未来时刻温度由当前温度转移至其他区间的概率，同时形成辅链的状态转移概率矩阵$\boldsymbol{A}^{\mathrm{f}}$，获取马尔科夫辅链状态转移过程：

$$\boldsymbol{x}(k+1) = \boldsymbol{A}^{\mathrm{f}} \cdot \boldsymbol{x}(k) \tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{x}(k)$为k时刻DES温度状态。

得到温度辅链马尔科夫转移矩阵$\boldsymbol{A}^{\mathrm{f}}$。

2.3.3 聚合模型

考虑温度对聚合建模影响后，结合之前构建的主链和辅链，将上一时刻辅链形成的状态转移概率矩阵与主链当前时刻状态转移概率矩阵进行结合，最终获取双链马尔科夫过程状态转移概率矩阵$\boldsymbol{A}$，即：

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{A}^{\mathrm{f}} \cdot \boldsymbol{A}^{\mathrm{m}} \tag{10}$$

根据DES接入电网后的4种转换模式以及得到的双链马尔科夫状态转移矩阵$\boldsymbol{A}$，得到考虑多因素

影响的双链 DES 聚合模型为：

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{u}(k)\\ \boldsymbol{y}(k)=\boldsymbol{D}\cdot\boldsymbol{x}(k)\end{cases}\tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{B}$ 为 $3N\times3N$ 个 DES 所对应的输入控制矩阵；$\boldsymbol{u}$ 为 $3N\times1$ 的 DES 对应的输入列向量；$\boldsymbol{y}$ 为 $1\times3N$ 的 DES 所对应的输出列向量；$\boldsymbol{D}$ 为 $1\times3N$ 的 DES 所对应的输出控制矩阵。

该聚合模型能够反映多时间尺度下 DES 在预测温度值任意时刻所处的状态，通过设计输入控制矩阵，可以实现对 DES 4 种转换模式的表现；同时通过对输出控制矩阵的设计，可以使该聚合模型输出需要的输出功率。

聚合模型各矩阵元素详见附录 B。

3　聚合 DES 参与调频的双层调控策略

3.1　调控框架

本研究提出的 DES 参与调频的双层一致性调控策略如附录 A 图 A6 所示，具体阐述如下：

(1)上层：基于 SOC 区间划分，将聚合后的 DES 集群动态划分为充电、备用、放电 3 类功能组，通过自适应分组机制实现电网调频指令的分层式初级分配。

(2)下层：根据初级分配结果，将同一分组内的 DES 视为多智能体系统，提出一种动态拓扑下基于固定时间比例一致性算法的 DES 次级功率分配策略，通过理论分析论证该策略在动态拓扑结构中的稳定性，完成频率调节。

3.2　上层 DES 初级功率分配

3.2.1　DES 分组

DES 按照当前 SOC 值不同分为 3 类：处于 $S_{\min}\le S\le S_1$ 为充电组；$S_2\le S\le S_{\max}$ 为放电组；处于 $S_1<S<S_2$ 为备用组，其中 S_1 和 S_2 为分组阈值。

3.2.2　各组可调容量分析

将各组中 DES 容量之和作为该组别容量，并依据各组储能数量变化对其容量进行动态更新。具体如下：

(1)充电组

计算其 t 时刻最大可充电功率 $P_{1\mathrm{cmax}}(t)$ 和最大可放电功率 $P_{1\mathrm{fmax}}(t)$ 可表示为：

$$P_{1\mathrm{c\,max}}(t)=\sum_{i=1}^{c_{\mathrm{dz}}}x_i(t)\cdot(1-S_i)\cdot Q^{i\cdot\mathrm{ave}}\tag{12}$$

$$P_{1\mathrm{f\,max}}(t)=\sum_{i=f_{\mathrm{dz}}}^{3N}x_i(t)\cdot S_i\cdot Q^{i\cdot\mathrm{ave}}\tag{13}$$

式中：c_{dz} 和 f_{dz} 分别为上层 DES 分组中充电组和放电组对应的 SOC 状态区间号，即分组阈值 S_1、S_2 在 SOC 状态区间上所对应的区间号，由离散化维度 N 以及分组阈值确定；$Q^{i.\mathrm{ave}}$ 为组号为 i 的储能组的平均容量。

(2)放电组

计算其 t 时刻最大可充电功率 $P_{2\mathrm{cmax}}(t)$，最大可放电功率 $P_{2\mathrm{fmax}}(t)$，计算式与充电组一致。

(3)备用组

计算其 t 时刻最大可充电功率 $P_{3\mathrm{cmax}}(t)$，最大可放电功率 $P_{3\mathrm{fmax}}(t)$，计算式与充电组一致。

3.2.3　初级功率分配过程

获取电网功率调控指令 $P_{\mathrm{r}}(t)$，分别按照充电和放电过程，分析其功率分配过程如下。

(1)充电过程功率分配

当 $P_{\mathrm{r}}(t)>0$ 时，DES 需执行充电命令，电池组的动作顺序为：充电组→备用组→放电组，具体过程如下。

若 $P_{\mathrm{r}}(t)<P_{1\mathrm{cmax}}(t)$，充电组独自承担；若 $P_{1\mathrm{cmax}}(t)\le P_{\mathrm{r}}(t)<(P_{1\mathrm{cmax}}(t)+P_{3\mathrm{cmax}}(t))$，充电组与备用组共同承担；其余情况时，充电组、备用组与放电组共同承担。

(2)放电过程功率分配

放电过程与充电过程相反，即当 $P_{\mathrm{r}}(t)<0$ 时，DES 需放电，电池组的动作顺序为：放电组→备用组→充电组。同样，根据电网调频指令与各电池组功率指令的大小比较以确定参与放电过程的组别，不再赘述。

3.3　下层 DES 次级功率分配

3.3.1　多智能体固定时间比例一致性算法

将分组后某个组别视为一个多智能体系统，其中处于某个 SOC 区间的 DES 为该系统中的一个智能体，并被视为网络中的一个独立节点。智能体之间的信息交流活动通过连接这些节点的边来体现，从而构成一个既反映智能体存在又详细描绘其复杂信息交互模式的图。

假设有 e 个智能体的网络 $\boldsymbol{\Phi}=\{\boldsymbol{U},\boldsymbol{E},F\}$，其中：$\boldsymbol{U}=\{u_1,u_2,\cdots,u_e\}$ 表示节点集；$\boldsymbol{E}\subseteq\boldsymbol{U}\times\boldsymbol{U}$ 表示连边集；$\boldsymbol{F}=[q_{pj}]\in\mathbf{R}^{e\times e}$ 表示网络 $\boldsymbol{\Phi}$ 的邻接矩阵。此外，用 $\boldsymbol{D}=[d_{pj}]\in\mathbf{R}^{e\times e}$ 表示网络 $\boldsymbol{\Phi}$ 的入度矩阵，若 $p\ne j$，则 $d_{pj}=0$；用 $\boldsymbol{L}_{\boldsymbol{\Phi}}$ 表示网络 $\boldsymbol{\Phi}$ 的 Laplacian 矩阵，则有：$\boldsymbol{L}_{\boldsymbol{\Phi}}=\boldsymbol{D}-\boldsymbol{F}$。

引理 1[24]：如果 $V(x)$ 是一个正定函数，且满足

关系：

$$\dot{V}(x) \le -g_1 V(x)^{\alpha} - g_2 V(x)^{\beta} \tag{14}$$

其中，$g_1>0$，$g_2>0$，$0<\alpha<1$ 且 $\beta>1$，取值参考文献[25]。那么，收敛时间上界 $T_{\max}$ 可表示为：

$$T_{\max} \le \frac{1}{g_1(1-\alpha)} + \frac{1}{g_2(\beta-1)} \tag{15}$$

考虑到含有若干个智能体组成的系统，其状态表达式满足如下形式：

$$\dot{h}_p(t) = u_p(t),\ p \in I_e, I_e = \{1,2,\cdots,e\} \tag{16}$$

式中：$h_p \in \mathbf{R}$ 是第 p 个智能体的状态；$u_p \in \mathbf{R}$ 是第 p 个智能体的控制协议。

定义 1：对于系统(16)，若 t_{1p} 表示第 p 个智能体的比例，如果在任意初始状态 $h_p(0)$下满足以下条件：

$$\lim_{t\to T_z} t_{1p} h_p(t) = \pm h_{\pi}, t \ge T_z, \forall p \in I_e, I_e = \{1,2,\cdots,e\} \tag{17}$$

式中：h_{π} 为领导节点的输入。

则称式(16)中 MAS 能在固定时间 T_z 内实现比例一致性。

3.3.2 动态拓扑下基于固定时间比例一致性的 DES 次级功率分配

每个组中，该组 DES 的数量已知，($\boldsymbol{X}(t)=[x_1(t), x_2(t), \cdots, x_j(t), \cdots, x_{3N}(t)]^{\mathrm{T}}$)，但每个 DES 的 SOC 未知。根据初级分配得到的功率，计算各储能组间 DES 的转移情况，从而聚合模型中的控制矩阵 $\boldsymbol{u}(t)$。

固定时间比例一致性相关定义如下：

定义 2：对于指定的控制器 $u_p(p=1,2,\cdots,e)$，若对于任意初始值 $h_p\{0\}(p=1,2,\cdots,e)$均存在一个与初始值相关的正数 $T>0$ 以及一个固定常数 $T_{\max}>0$，且满足 $T<T_{\max}$。当对于任意的 $p.\ j=1,2,\cdots,e$，满足以下条件时：$\lim_{t\to T} |w_p h_p(t) - w_j h_j(t)| = 0$，$\lim_{t\to T} v_p(t) = 0$，$w_p h_p(t) = w_j h_j(t)$，$v_p(t) = v_j(t)$，$\forall t \ge T$，则称闭环系统达到了固定时间比例一致性，其中 $w_p(p=1,2,\cdots,e)$为比例系数。

对充电组、备用组和放电组 3 组分别进行多智能体控制，处于同一 SOC 区间的 3 个状态变量构成一个多智能体，并进行固定时间比例一致性控制。

对于 $S<0.5$ 的储能组/多智能体(充电组，部分备用组)的储能数量($x_p(t)$)，其比例系数为 $\frac{t_{1p}}{t_{1j}} = \frac{S_p}{S_j}$，其中 S_p，S_j 为对应多智能体所处的 SOC 区间值，及与 SOC 区间值成正比。

对于 $S>0.5$ 的储能组/多智能体(放电组，部分备用组)的储能数量，其比例系数为 $\frac{t_{1p}}{t_{1j}} = \frac{S_p}{S_j}$，及与 SOC 区间值成反比。

智能体 p 的动力学方程为：

$$\dot{h}_p(t) = u_p(t) \tag{18}$$

经过固定时间比例一致性控制后，可以得到每个多智能体(处于该 SOC 区间 DES 数量)的变化，从而得到该时刻的控制矩阵 $\boldsymbol{u}(t)$,代入聚合模型计算出下一时刻的状态 $\boldsymbol{X}(t+1)$。

由于各智能体间的拓扑结构是动态变化的，本文提出了一种动态拓扑下(算法执行前拓扑可变)的固定时间比例一致性控制协议，以实现固定时间下的功率分配，该控制协议表达式如下：

$$\begin{aligned} u_p = &-\mathrm{sign}\Big(\sum_{j=1}^{e}(q_{pj}(\mathrm{sign}(q_{pj})w_q x_q - w_j x_j))\Big)\cdot \\ &\Big|\sum_{j=1}^{e}(q_{pj}(\mathrm{sign}(q_{pj})w_q x_q - w_j x_j))\Big|^{\phi} - \\ &\mathrm{sign}\Big(\sum_{j=1}^{e}(q_{pj}(\mathrm{sign}(q_{pj})w_q x_q - w_j x_j))\Big)\cdot \\ &\Big|\sum_{j=1}^{e}(q_{pj}(\mathrm{sign}(q_{pj})w_q x_q - w_j x_j))\Big|^{\varphi} \end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{cases} \phi > 1 \\ -1 < \varphi \le 1 \end{cases} \tag{20}$$

式中：u_p 为第 p 个智能体的控制协议；ϕ 和 φ 均为常数，它们的取值满足式(20)；sign(·)为符号函数。

动态拓扑下，在控制协议(19)下，对于系统(18)能够实现固定时间比例一致性进行证明见附录 B[26]，最终，各 DES 在满足各类功率约束的条件下，响应各自功率指令，实现频率跟踪。

4 算例分析

4.1 仿真参数设置

4.1.1 DES 集群聚合建模数据

对 DES 集群聚合模型进行仿真分析，假设所有 DES 单体额定充电功率等于其额定放电功率，且充电效率等于放电效率，DES 的额定容量、功率、效率都是相互独立的变量，仿真参数设置为：DES 数量为 10 000 台；聚合时仿真步长选择为 0.5 h；通过 AO 得到双层离散化维度 $N=n=10$；DES 的参数分布规律如附录 C 表 C1 所示。

选取 5G 基站为 DES 研究对象，基站的额定发射功率为 33 kW，基站的最小发射功率和最大发射

功率设置为额定功率的 0.7 倍和 1.2 倍。基站的详细参数如附录 C 表 C2 所示[27]，最低通信可靠性要求为 Γ=0.95。各 DES 均匀分布在直径 50 km 的范围内[21]，以获取 DES 与基站间的距离。

4.1.2　DES 集群调频数据

采用某地典型日 AGC 指令信号进行仿真，采样时间为 2 s，整日信号详见附录 A 图 A7。

4.2　聚合建模效果及分析

4.2.1　考虑 SOH 修正 SOC 区间效果分析

在 DES 聚合建模中引入储能单体 SOH 的影响，修正前后 DES 集群 SOC 区间及误差请见附录 C 表 C3。可见，引入储能单体 SOH 改变了 SOC 区间划分值，该划分方法通过动态反映不同 SOH 单体的实际 SOC，减少个体性能差异导致的建模偏差，从而提升聚合模型对储能集群行为的拟合精度。

4.2.2　聚合模型效果对比

充、放电状态下，将本研究聚合模型与文献[7]构建的基于马尔科夫单链聚合模型进行对比，结果分别如附录 A 图 A8 和图 A9 所示。

以放电状态为例，在放电状态下，DES 集群中原本处于充电和等待状态的储能单体会全部切换至放电状态。不计外部指令干涉，集群的运行特性表现为逐渐向较低的 SOC 区间转移，直至所有单体放电至最小 SOC 区间并进入等待状态。通过引入温度辅链的双链聚合模型，能够更精准地反映集群动态特性，与单链模型相比，聚合精度提升了 5.65%。

在仿真时间 t=5 h 时，DES 两种状态采用两种聚合方法得到的集群聚合模型如图 2 所示。

在放电状态下，t=5 h 后，DES 集群持续向较低的 SOC 区间转移。引入温度辅链的双马尔科夫链模型，相比传统单链模型，在描述集群状态时具有更高的精度，能够更准确地表达集群所处状态，从而为后续的调控策略提供更可靠的依据。

4.3　双层调频策略有效性验证

4.3.1　上层初级功率分配策略

通过 AO 得到双层离散化维度 N=n=10，根据该离散程度给出分组结果，即，充电组：$S_{\min}\leq S\leq S_4$；放电组：$S_6\leq S\leq S_{\max}$；备用组：$S_4<S<S_6$。

将 DES 按 SOC 区间划分为放电、充电和等待 3 种状态，同一 SOC 区间内的 DES 可以在 3 种状态间相互切换。

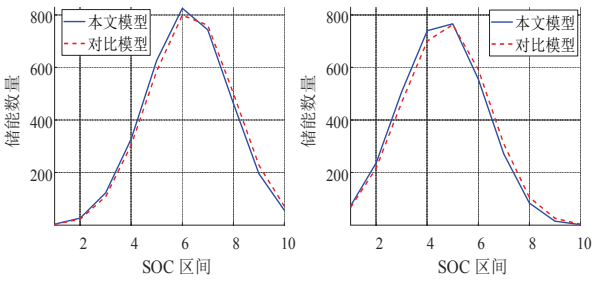
基于分组结果，选取典型日某一时间段进行 DES 集群上层调控，分组后的初级功率分配结果如图 3 所示。图 3 显示，DES 集群通过上层功率分配，明确划分为充电组、等待组和放电组，并完成了功率的初级分配，将调频指令有效分配至 3 个 DES 组中，验证了分组调控方法的可行性和有效性。

4.3.2　下层动态拓扑下固定时间比例一致性控制

以充电组为例，充电组中有 4 个多智能体，仿真验证所提控制策略在多智能体动态拓扑下的调控结果，在一次算法结束后充电组拓扑发生改变，充电组初始状态和下一时刻状态示意图详见附录 A 图 A10。

根据上一节中获取的上层初级分配结果，得到 DES 集群分组功率指令，以充电组为例进行分析，采用动态拓扑下的固定时间比例一致性控制进行次级功率分配，结果如图 4 所示。

由图 4 可知，下层基于多智能体系统架构，将功率指令按比例一致性原则动态分配至各组内各个多智能体。在各智能体中，DES 的充电、放电行为数量相应变化，从而满足电网 AGC 指令，实现调频功能。该结果验证了所提策略在动态拓扑下实现固定时间比例一致性控制的有效性，显著提高了规



(a) 充电状态结果　　(b) 放电状态结果

图 2　充/放电状态下 t=5 h 时 DES 集群状态结果对比

Fig.2　Comparison of DES cluster status results at t=5 h in charge/discharge state

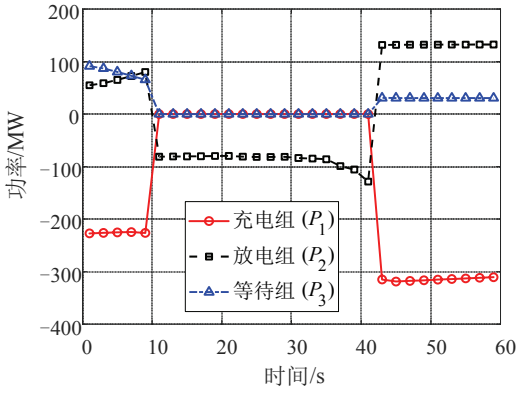


图 3　DES 集群功率初级分配

Fig.3　Primary allocation of DES cluster power

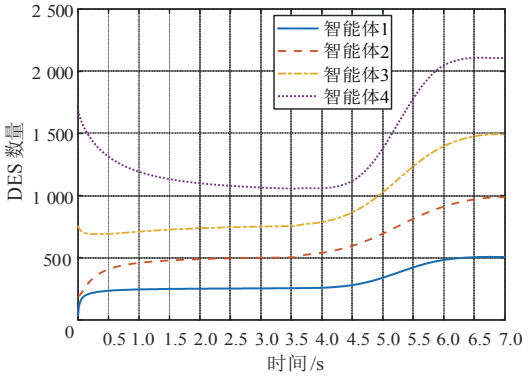


图 4 充电组动态拓扑下固定时间比例一致性控制

Fig.4 Fixed time proportional consistency control under dynamic topology of charging group

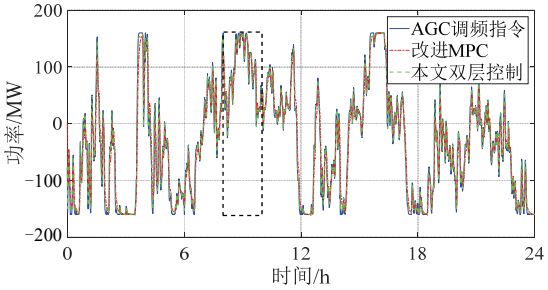


图 5 规模化 DES 参与调频结果

Fig.5 Scale up DES participation in frequency modulation results

模化 DES 的利用率及可调潜力。

4.3.3 调频结果

将本研究的双层调频策略与文献[28]提出的改进 MPC 策略进行对比，两种策略下规模化 DES 参与电网调频的结果及误差分别如图 5 和附录 A 图 A11、A12 所示。

由图 5 和附录 A 图 A11、A12 可知，本文双层控制下规模化 DES 能够有效跟踪电网 AGC 调频指令，调频误差与改进 MPC 相比较低，调频跟踪功率误差控制在±2%以内。同时，DES 的利用率提升 38.34%，相较于传统方法提升了 7.34%。在所提的动态拓扑下固定时间比例一致性控制策略下，规模化 DES 能够稳定可靠地完成电网辅助调频服务。

通过典型场景的调频验证，可以看出，在该聚合建模及调控策略下，规模化 DES 能够有效提升利用率，并以较低误差跟踪电网 AGC 调频指令。这充分证明了所提策略在规模化 DES 参与电网调频时的可靠性和稳定性。

5 结论

本文面向调频，提出了考虑多影响因素的 DES 聚合建模方法及动态拓扑下双层一致性调频策略，研究结论：

1）基于双马尔科夫链构建了 DES 聚合模型，该模型综合考虑了储能单体参数差异、SOH、温度及通信可靠性等内外部多影响因素，有效改善了传统单链模型聚合精度，经仿真对比，本文模型下聚合精度提升了 5.65%，能够更准确地描述 DES 集群状态。

2）设计了聚合 DES 参与电网调频的双层一致性调控策略，该策略通过上层一致性分组与下层比例一致性控制的协同，实现了 DES 集群对调频指令的固定时间比例跟踪，将调频跟踪功率误差控制在 2%以内，同时有效维持了 DES 集群可调度潜力。

3）通过聚合建模方法与双层调控策略的结合，实现了 DES 集群的高精度聚合与高效调频响应。仿真结果表明，该方法显著提升了 DES 的利用率，较传统策略提高 7.34%，为 DES 高效参与电网调频提供了可行的路径。

本文研究中未考虑 DES 运行的经济性，未来可结合电力市场对研究进一步深化。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 杨水丽，来小康，丁 涛，等. 新型储能技术在弹性电网中的应用与展望[J]. 储能科学与技术，2023，12(2)：515-528.
YANG Shuili, LAI Xiaokang, DING Tao, et al. Application and prospect of new energy storage technologies in resilient power systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(2): 515-528.

[2] 陈海生，李 泓，徐玉杰，等. 2023 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术，2024，13(5)：1359-1397.
CHEN Haisheng, LI Hong, XU Yujie, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2023[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(5): 1359-1397.

[3] 汪贵芳，王顺利，于春梅. 结合 Thevenin 和 PNGV 模型的电池等效电路建模改进[J]. 自动化仪表，2021，42(2)：45-49，55.
WANG Guifang, WANG Shunli, YU Chunmei. Improvement of battery equivalent circuit modeling combined with Thevenin and PNGV models[J]. Process Automation Instrumentation, 2021, 42(2): 45-49, 55.

[4] 周建宇. 独立电力系统中分布式储能协同控制与聚合表征方法研究[D]. 武汉：华中科技大学，2022.
ZHOU Jianyu. Coordinated control and aggregated characterization for distributed energy storage systems in isolated power systems[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2022.

[5] 尹渠凯，米增强，贾雨龙，等. 基于改进 K-means 聚类的电力市场下分布式储能系统经济性调控模型[J]. 电力建设，2019，40(5)：20-27.
YIN Qukai, MI Zengqiang, JIA Yulong, et al. Economy regulation method for distributed energy storage in distribution network according to K-means clustering[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(5): 20-27.

[6] 叶　鹏，刘思奇，关多娇，等. 基于自适应均衡技术的分布式储能聚合模型及评估方法[J]. 上海交通大学学报，2021，55(12)：1689-1699.
YE Peng, LIU Siqi, GUAN Duojiao, et al. An aggregation model and evaluation method of distributed energy storage based on adaptive equalization technology[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2021, 55(12): 1689-1699.

[7] 董　锴，蔡新雷，崔艳林，等. 基于马尔科夫链的电动汽车聚合建模及多模式调频控制策略[J]. 电网技术，2022，46(2)：622-631.
DONG Kai, CAI Xinlei, CUI Yanlin, et al. Aggregation modeling based on Markov chain and multi-mode control strategies of aggregated electric vehicles for frequency regulation[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 622-631.

[8] 金永天，谢　俊，周翠玉，等. 基于 IFCM 算法的电动汽车群聚合调峰方法[J]. 高电压技术，2024，50(7)：3080-3089.
JIN Yongtian, XIE Jun, ZHOU Cuiyu, et al. Peak-regulating method of aggregating electric vehicle groups based on IFCM algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 3080-3089.

[9] 刘泳斌，徐雅婷，吴　明，等. 半互穿网络结构提升聚偏氟乙烯基材料储能温度稳定性[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2374-2381.
LIU Yongbin, XU Yating, WU Ming, et al. Enhanced temperature stability of energy storage performance in semi-interpenetrating crosslinked PVDF-blends[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2374-2381.

[10] 余　洋，吴玉威，陈东阳，等. 面向风电波动平抑基于改进 C-DCA 的电池储能分组控制策略[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4096-4108.
YU Yang, WU Yuwei, CHEN Dongyang, et al. Battery energy storage grouping control strategy based on improved C-DCA for wind power fluctuation suppression[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4096-4108.

[11] 顾本硕，林湘宁，李正天，等. 基于负序量排序及 5G 通信的主动配电网有界面保护原理[J]. 电力系统保护与控制，2024，52(18)：12-23.
GU Benshuo, LIN Xiangning, LI Zhengtian, et al. The principle of bounded area-protection for an active distribution network based on negative sequence quantity sorting and 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 12-23.

[12] DENG X S, ZHANG Q, LI Y, et al. Hierarchical distributed frequency regulation strategy of electric vehicle cluster considering demand charging load optimization[C]//Proceedings of 2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS). Jinan, China: IEEE, 2020: 959-969.

[13] 孙　杰，赵国瑾，刘顺桂，等. 基于改进时间延迟环节的集群电动汽车参与电网调频的动态特性研究[J]. 电网技术，2019，43(2)：470-479.
SUN Jie, ZHAO Guojin, LIU Shungui, et al. Research on dynamic characteristics of electric vehicles participating in frequency regulation of power system based on improved time delay[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 470-479.

[14] DENG X S, ZHANG Q, LI Y, et al. Hierarchical distributed frequency regulation strategy of electric vehicle cluster considering demand charging load optimization[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 720-731.

[15] 廖小兵，刘开培，乐　健，等. 基于双层模型预测结构的跨区域 AGC 机组协同控制策略[J]. 中国电机工程学报，2019，39(16)：4674-4685.
LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, LE Jian, et al. Coordinated control strategy for AGC units across areas based on bi-level model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4674-4685.

[16] 李嘉兴. 基于分布式控制的电动汽车辅助调频策略研究[D]. 北京：北京交通大学，2024.
LI Jiaxing. Research on auxiliary frequency regulation strategy for electric vehicles based on distributed control[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2024.

[17] 马溪原，王鹏宇，杨铎炯，等. 基于有限时间事件驱动协同的微电网频率恢复和荷电状态平衡控制[J]. 高电压技术，2024，50(12)：5457-5467.
MA Xiyuan, WANG Pengyu, YANG Duotong, et al. Finite-time event-driven microgrid secondary frequency regulation and state of charge balance control[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5457-5467.

[18] 王志超. 非线性多智能体系统的有限时间和固定时间二分跟踪一致性[D]. 青岛：青岛大学，2024.
WANG Zhichao. Finite time and fixed time binary tracking consistency of nonlinear multi-agent systems[D]. Qingdao, China: Qingdao University, 2024.

[19] 张津铭，赵　健，唐维溢，等. 动态拓扑下基于终端数据挖掘的配电网异常节点检测[J]. 智慧电力，2024，52(7)：1-9.
ZHANG Jinming, ZHAO Jian, TANG Weiyi, et al. Abnormal node detection in distribution network based on terminal data mining in dynamic topology[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 1-9.

[20] 熊　庆，邸振国，汲胜昌. 锂离子电池健康状态估计及寿命预测研究进展综述[J]. 高电压技术，2024，50(3)：1182-1195.
XIONG Qing, DI Zhenguo, JI Shengchang. Review on health state estimation and life prediction of lithium-ion batteries[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1182-1195.

[21] 郑予容. 计及通信可靠性的分布式储能共享优化运营模式[J]. 海峡科学，2024(4)：51-57.
ZHENG Yurong. DES shared optimization operation mode considering communication reliability[J]. Strait Science, 2024(4): 51-57.

[22] 李　哲，韩雪冰，卢兰光，等. 动力型磷酸铁锂电池的温度特性[J]. 机械工程学报，2011，47(18)：115-120.
LI Zhe, HAN Xuebing, LU Languang, et al. Temperature characteristics of power $LiFePO_4$ batteries[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(18): 115-120.

[23] 刘凤鸣，杨秀媛，陈麒宇. 一种平抑反弹效应的集群空调负荷控制方法[J]. 电网技术，2021，45(12)：4759-4767.
LIU Fengming, YANG Xiuyuan, CHEN Qiyu. Control method for suppressing rebound effect of air conditioning loads[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4759-4767.

[24] LI G F, LI Q, WU Y J, et al. Leader-following cooperative guidance law with specified impact time[J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(11): 2349-2356.

[25] 鲁　力. 多智能体系统的固定时间和预设时间一致性研究[D]. 黄石：湖北师范大学，2023.
LU Li. Research on fixed-time and predefined-time consensus of multi-agent systems[D]. Huangshi, China: Hubei Normal University, 2023.

[26] HUANG B H, LIU Y, GLIELMO L, et al. Fixed-time distributed robust optimization for economic dispatch with event-triggered intermittent control[J]. Science China Technological Sciences, 2023, 66(5): 1385-1396.

[27] KONG P Y, SONG Y. Joint consideration of communication network and power grid topology for communications in community smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(5): 2895-2905.

[28] 余　洋，向小平，李梦璐，等. 面向电网调峰的聚合温控负荷多目标优化控制方法[J]. 电力自动化设备，2024，44(11)：164-170，186.
YU Yang, XIANG Xiaoping, LI Menglu, et al. Grid peaking oriented multi-objective optimal control method for aggregated thermostatically controlled load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(11): 164-170, 186.



余　洋(通信作者)
1982—，男，博士，教授
主要从事电力储能技术及柔性负荷建模与调度的研究工作
E-mail: ncepu_yy@163.com

YU Yang
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-04-14　在线出版日期　2025-08-22　　编辑　陈　蔓

附录 A

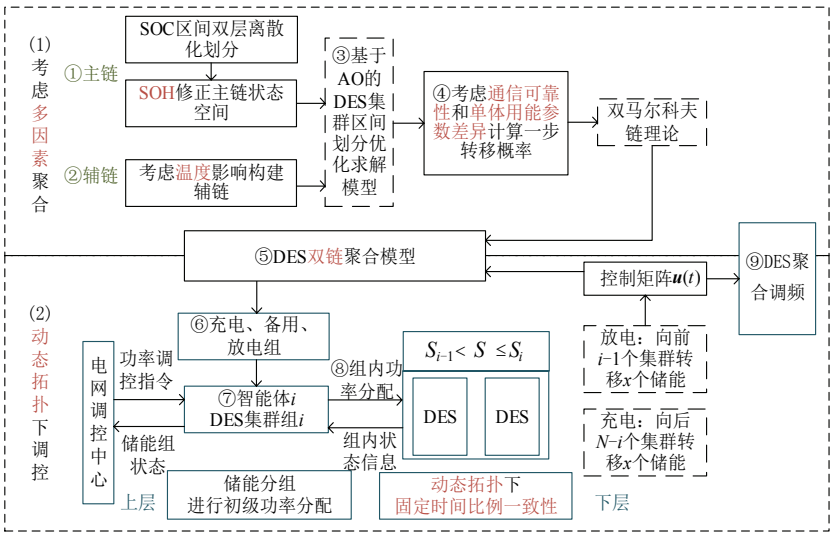


图 A1　本文研究框架

Fig. A1　The research framework of this article

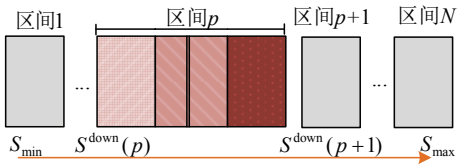


图 A2　充电状态二层划分下相邻区间转移过程

Fig.A2　Charging state transition process between adjacent intervals under two-level partitioning

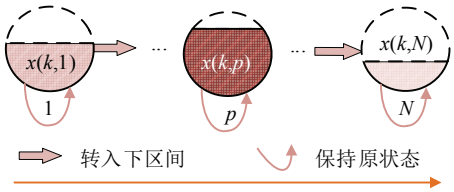


图 A3　充电状态动态演化过程

Fig. A3　Charging state dynamic evolution process

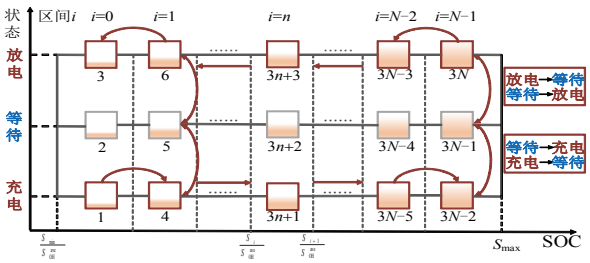


图 A4　考虑 SOH 修正后的 DES 状态区间

Fig.A4　SOH-corrected DES state interval

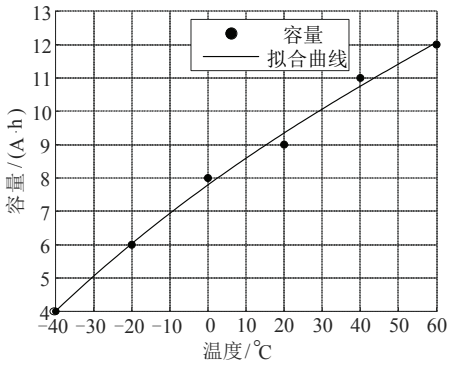


图 A5　电池容量随温度变化

Fig.A5　Battery capacity varies with temperature

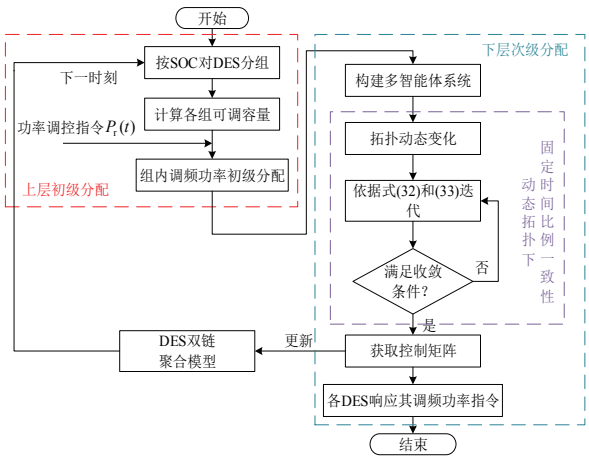


图 A6　DES 参与调频的双层一致性调控策略流程图

Fig.A6　Flow chart of Double layer consistency regulation strategy for DES participation in frequency modulation

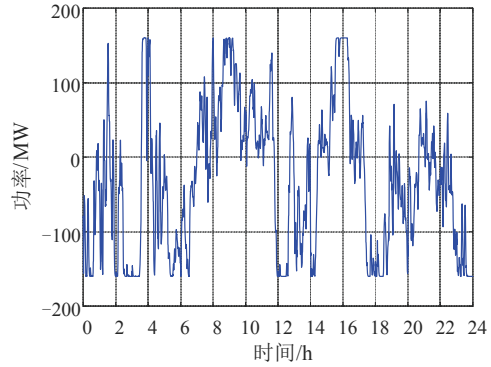


图 A7　典型日 AGC 信号

Fig.A7　Typical daily AGC signal

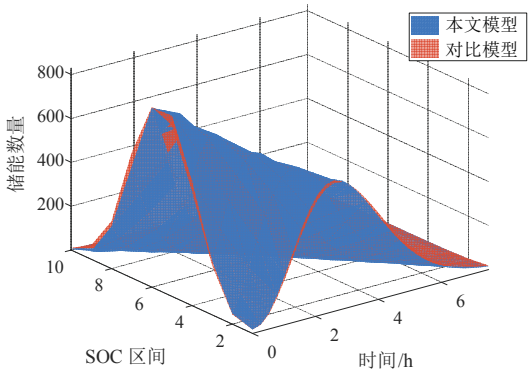


图 A8　放电状态下 DES 聚合模型

Fig.A8　DES aggregation model under discharge state

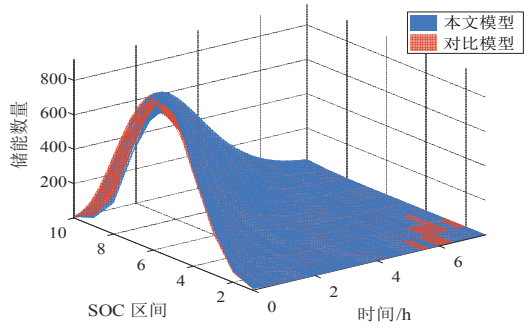


图 A9　充电状态下 DES 聚合模型

Fig.A9　DES aggregation model in charging state

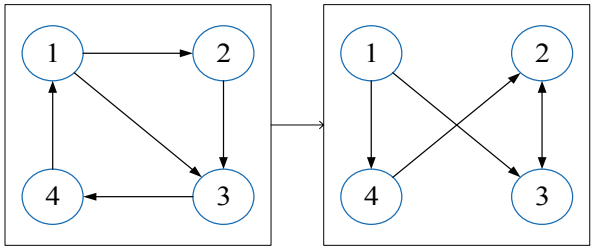


图 A10　充电组拓扑动态转移示例

Fig.A10　Example of dynamic transfer of charging group topology

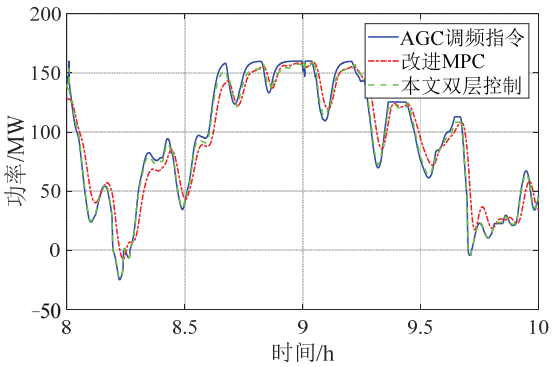


图 A11　规模化 DES 参与调频局部放大图

Fig.A11　A detailed diagram of frequency modulation participation by DES at a local scale.

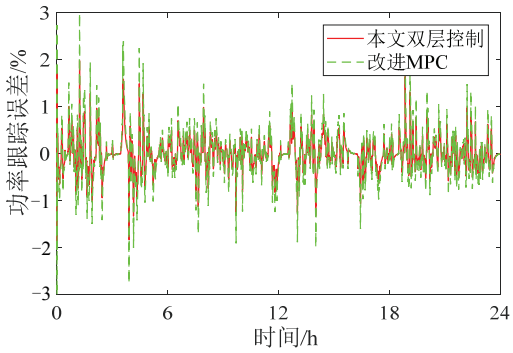


图 A12　规模化 DES 参与调频的误差分析

Fig.A12　Large scale DES participation in frequency modulation error analysis

附录 B

1）一步转移概率推导

以充电状态的 DES 为例，假设 DES 在每个状态区间均匀分布，计算该马尔科夫链的一步转移概定义规模化 DES 从 SOC 状态值 S_θ 转移到 SOC 状态值 S_ε 的概率为 $p(S_\varepsilon|S_\theta)$，该概率受 DES 额定充电功率、充电效率和电池容量的影响，即：

$$p(S_\varepsilon \mid S_\theta) = p(\Delta S) = f_{\mathrm{L}}(P^{\mathrm{c}},\eta^{\mathrm{c}},Q) \quad \text{(B1)}$$

式中：$\theta,\varepsilon \in [1,N]$；$P^{\mathrm{c}},\eta^{\mathrm{c}},Q$ 分别为 DES 的额定充电功率、充电效率、电池容量；$f_{\mathrm{L}}(P^{\mathrm{c}},\eta^{\mathrm{c}},Q)$ 为变量 $P^{\mathrm{c}},\eta^{\mathrm{c}},Q$ 的联合概率密度函数；ΔS 为单位时间间隔内 DES 的 SOC 状态变化。

规模化 DES 从状态区间 $[S_{i_\theta},S_{i_{\theta+1}})$ 转移到状态区间 $[S_{i_\varepsilon},S_{i_{\varepsilon+1}})$ 的概率，在充电状态下的一步转移概率为：

$$p(S_{i_\varepsilon} \le S_\varepsilon \le S_{i_{\varepsilon+1}} \mid S_{i_\theta} \le S_\theta \le S_{i_{\theta+1}}) = \int_{S_{i_\theta}}^{S_{i_{\theta+1}}} \int_{S_{i_\varepsilon}-S_\theta}^{S_{i_{\varepsilon+1}}-S_\theta} p(\Delta S)\cdot \mathrm{d}(\Delta S)\cdot \mathrm{d}S_\theta \tag{B2}$$

处于空闲状态的 DES，其状态转移概率为 0。

处于放电状态的 DES，其对应的一步转移概率的求法与充电状态下的求法一致，可通过上述过程得到。

2）通信可靠性推导

通信可靠系数与 SNR 呈正相关，SNR 反映有效接收信号强度与噪声信号强度的比率，将 S_{NR}^{v-k} 引入式（B2），可得：

$$p(S_\theta \mid S_\varepsilon) = p(\Delta S) = \alpha \cdot f_{\mathrm{L}}(P^{\mathrm{c}}, \eta^{\mathrm{c}}, Q) + \beta \cdot f_{\mathrm{W}}(R) \tag{B3}$$

第 1 项表示 DES 内部影响因素，采用用能参数的联合概率密度函数；第 2 项表示外部影响因素，反映储能与基站间的通信可靠性。其中，$f_w(R)$表示通信可靠性的概率密度函数；a，β 分别为比例系数，用于表征内部影响因素和外部影响因素对 DES 聚合建模的影响程度，且满足 a+β=1。

3）聚合模型各矩阵元素

下面确定各矩阵元素。

输入控制矩阵 $\boldsymbol{B}$ 为：

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{I}_{3N\times 3N} \tag{B4}$$

式中：$\boldsymbol{I}_{3N\times 3N}$为 $3N\times 3N$ 的单位矩阵。

输出控制矩阵 $\boldsymbol{D}$ 为：

$$\boldsymbol{D} = [\mathbf{1}_{1\times N}\cdot P_{\mathrm{c,ave}}, \mathbf{0}_{1\times N}, \mathbf{1}_{1\times N}\cdot P_{\mathrm{d,ave}}] \tag{B5}$$

式中：$\mathbf{1}_{1\times N}$为 $1\times N$ 的 **1** 矩阵；$\mathbf{0}_{1\times N}$为 $1\times N$ 的 **0** 矩阵；$P_{\mathrm{c,ave}}$为 DES 额定充电功率的平均值；$P_{\mathrm{d,ave}}$为 DES 额定放电功率的平均值。

4）固定时间比例一致性证明

令：

$$u_p = v_{1p} + v_{2p} \tag{B6}$$

$$V(x) = \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}\boldsymbol{x} = \frac{1}{2}\sum_{p=1}^{e}\sum_{j=1}^{e}\left(\left|q_{pj}\right|(t_p x_p - \mathrm{sign}(q_{pj})t_j x_j)^2\right) \tag{B7}$$

根据引理 1，收敛时间 $T_{\max}$ 应满足：

$$T_{\max} \le \frac{1}{g_1(1-\alpha)} + \frac{1}{g_2(\beta-1)} \tag{B8}$$

因此，在所提控制协议下，系统能够在 T_{f} 内实现动态拓扑下的固定时间比例一致性。

附录 C

表 C1　DES 参数分布规律

Table C1　Distribution pattern of DES parameters

参数	参数含义	参数分布
Q_k	额定容量/MWh	U(2.0,5.0)
$P_k^{\mathrm{c}}(t)/P_k^{\mathrm{d}}(t)$	额定充电/放电功率/kW	U(200.0,500.0)
$\eta_k^{\mathrm{c}}(t)/\eta_k^{\mathrm{d}}(t)$	充电/放电效率	U(0.85,0.95)
S_k^0	DES 初始 SOC 状态	N(0.5,0.15) ∈[0.05,0.95]
S_{OH}^k	DES 的 SOH	N(0.975,0.025) ∈[0.95,1.0]
T_k	初始环境温度/℃	N(25,2) ∈[20,30]

表 C2　基站参数

Table C2　Base station parameters

参数	B	B_N	l	R
数值	10 MHz	1.449 MHz	125 b	1 000 Mb/s
参数	α	a	b	PL(路径损耗)
数值	90%	70.22	894.54	11.6+39.1lg(d_{n-i})

表 C3　修正前后 SOC 区间及误差

Table C3　SOC interval and error before and after correction

编号	传统 SOC 区间	引入 SOH 修正 SOC 区间	误差
S_0	0	0	0
S_1	0.1	0.102 6	0.002 6
S_2	0.2	0.205 2	0.005 2
S_3	0.3	0.307 8	0.007 8
S_4	0.4	0.410 4	0.010 4
S_5	0.5	0.512 9	0.012 9
S_6	0.6	0.615 5	0.015 5
S_7	0.7	0.718 1	0.018 1
S_8	0.8	0.820 7	0.020 7
S_9	0.9	0.923 3	0.023 3
S_{10}	1.0	1.000 0	0