

2-15-2024

## Optimal Dispatch of Microgrid Clusters Considering Energy Storage Life and Communication Failures

Jianfang Jiao

*Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China,  
jiaojianfang@ncepu.edu.cn*

Anjie Wang

*Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China*

Guang Wang

*Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China,  
guang.wang@ncepu.edu.cn*

Jiale Xie

*Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact [xtfzxb@126.com](mailto:xtfzxb@126.com).

---

# Optimal Dispatch of Microgrid Clusters Considering Energy Storage Life and Communication Failures

## Abstract

**Abstract:** To ensure the economy and stability of microgrid operation, the power fluctuations of renewable energy source (RES) and the lifetime characteristics of battery energy storage system (BESS) should be considered. The influence of charging and discharging depth and rate on the lifetime of BESS is researched, a model of battery energy storage system for real-time optimal scheduling is established, and the alternating direction method of multipliers is adopted for the distributed optimal scheduling of microgrid clusters. The distributed optimization method does not require any global information and can protect the privacy of microgrid in the maximum extent. Simulation results show that the proposed method can make the energy storage battery operate in a high SoC and still can make the system stable and reliable in case of communication failure.

## Keywords

microgrid cluster, energy storage battery life, alternating direction method of multipliers, distributed optimization, communication failures

## Recommended Citation

Jiao Jianfang, Wang Anjie, Wang Guang, et al. Optimal Dispatch of Microgrid Clusters Considering Energy Storage Life and Communication Failures[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(2): 352-362.

## 考虑储能寿命和通信故障的微电网群优化调度

焦建芳, 王安杰, 王光\*, 谢家乐

(华北电力大学 自动化系, 河北 保定 071003)

**摘要:** 为保障微电网运行的经济性与稳定性, 需考虑可再生能源的功率波动和电池储能系统的寿命特性。探究充放电深度与速率对电池储能系统寿命的影响, 建立面向实时优化调度的储能电池系统模型, 采用交替方向乘子法对微电网集群进行分布式优化调度。该分布式优化方法不需要任何全局信息, 能最大程度上保护微电网的隐私。仿真结果表明: 所提方法能够使储能电池以较高荷电状态运行, 在出现通信故障时仍能使系统稳定、可靠地运行。

**关键词:** 微电网集群; 储能电池寿命; 交替方向乘子法; 分布式优化; 通信故障

中图分类号: TP319.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)02-0352-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1110

**引用格式:** 焦建芳, 王安杰, 王光, 等. 考虑储能寿命和通信故障的微电网群优化调度[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(2): 352-362.

**Reference format:** Jiao Jianfang, Wang Anjie, Wang Guang, et al. Optimal Dispatch of Microgrid Clusters Considering Energy Storage Life and Communication Failures[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(2): 352-362.

### Optimal Dispatch of Microgrid Clusters Considering Energy Storage Life and Communication Failures

Jiao Jianfang, Wang Anjie, Wang Guang\*, Xie Jiale

(Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** To ensure the economy and stability of microgrid operation, the power fluctuations of renewable energy source (RES) and the lifetime characteristics of battery energy storage system (BESS) should be considered. The influence of charging and discharging depth and rate on the lifetime of BESS is researched, a model of battery energy storage system for real-time optimal scheduling is established, and the alternating direction method of multipliers is adopted for the distributed optimal scheduling of microgrid clusters. The distributed optimization method does not require any global information and can protect the privacy of microgrid in the maximum extent. Simulation results show that the proposed method can make the energy storage battery operate in a high SoC and still can make the system stable and reliable in case of communication failure.

**Keywords:** microgrid cluster; energy storage battery life; alternating direction method of multipliers; distributed optimization; communication failures

## 0 引言

全球化石能源短缺以及其燃烧所带来的环境污染问题日益凸显, 以风能、太阳能等为主的可

再生能源的使用成为了解决上述问题的一种有效途径<sup>[1]</sup>。大规模部署具有随机性、间歇性的可再生能源也使微电网(microgrid, MG)在电能质量、系

收稿日期: 2022-09-20 修回日期: 2022-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(61973117, 52207235)

第一作者: 焦建芳(1987-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为综合能源系统的优化调度与性能监控。E-mail: jiaojianfang@ncepu.edu.cn

通讯作者: 王光(1986-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为锂电池建模、复杂工业系统故障诊断。E-mail: guang.wang@ncepu.edu.cn

统安全等方面面临严峻考验。由于单个MG的电池储能系统(battery energy storage system, BESS)能力有限,当可再生能源大量接入时会加快电池储能系统的寿命损耗,增加微电网的运行成本,同时也会使系统的弃风、弃光现象加剧。因此,研究人员将不同地域毗邻的微电网互联成一个微电网集群(microgrid cluster, MGC)系统,通过协调各MG间的传输功率,实现发电资源的协调互补,降低电池储能系统的损耗,增强系统的可靠性与稳定性<sup>[2-3]</sup>。

国内外对微电网集群的研究大多集中在能量管理和调度策略优化等方面。文献[4]基于共生生物搜索算法和改进的多智能体共识算法来降低微网的弃风、弃光率,实现了可再生能源的最大消纳。文献[5]基于交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)将微电网集群系统分为网内优化和网间优化,网间优化负责各MG的网间功率交换,网内优化则通过协调各MG内部可控电源功率来满足微网的供需平衡,但其优化策略忽略了储能系统的运行成本。文献[6]采用ADMM算法与模型预测控制算法求解MGC的最优调度策略,通过一个控制中心来控制MGC间的信息交互,其直接将电池储能系统成本等效为二次函数,忽略了对电池储能系统的成本优化。

储能电池作为平抑可再生能源波动、提高电能质量的有效技术,其成本来自于每次充放电时的老化损耗。文献[7]建立了船舶运行的蓄电池寿命损耗模型,并利用列与约束生成算法求解该模型,避免了蓄电池的高充高放。文献[8]考虑储能不同荷电状态(state of charge, SoC)下的损耗,利用加权系数法得出储能电池的寿命损耗模型。文献[9]基于深度强化学习建立了储能运行效率和容量衰减的详细模型,并根据储能的当前状态对其充放电策略进行实时优化。文献[10]根据电池中活性材料的退化半径,建立了储能电池放电深度与循环老化之间的损耗模型。文献[11]考虑电池频

繁充放电带来的循环损耗,通过设置一个电池功率水平阈值以延缓电池老化。文献[12]考虑储能电池的退化成本,并假设电池退化与循环周期大致成比例关系,但该假设忽略了电池深度放电下的加速老化和过早报废,与电池的实际退化不符。然而,上述文献大都致力于建立储能充放电深度与循环老化间的损耗模型,并未考虑充放电速率对电池储能系统的影响。

针对现有研究的不足,本文在考虑储能充放电深度的基础上,进一步探究充放电速率对电池储能系统的影响,建立了面向实时优化调度的电池储能系统模型。考虑到微电网运行的隐私性,文中采用同步型ADMM算法求解该分布式模型,各MG在通信时仅将传输功率信息进行交换,无需交换其他任何信息,在保护微电网隐私的同时,也大大降低了微电网的通信需求与负担。

## 1 微电网群系统基本模型

将毗邻的多个微电网互联构成一个孤岛多微电网系统,各微电网间相互连接,并未与大电网相连,其系统结构如图1所示。

每个微电网内部包括光伏(photovoltaic, PV)、风机(wind turbine, WT)、柴油发电机(diesel generator, DG)等分布式能源及电池储能系统。其中,光伏、风机等可再生能源为不可控单元,其输出功率受当地辐射强度、温度、风速影响,柴油发电机和电池储能系统则作为可控单元来平抑电网功率波动,提高电能质量。

### 1.1 柴油发电机模型

柴油发电机输出稳定、发电可控、响应快速,能够作为备用电源在可再生能源供电不足时平抑电网的功率波动。其运行成本为<sup>[13]</sup>

$$C_{DG}(P_{DG}) = c_{fuel}(a_g P_{DG}^2 + b_g P_{DG} + c_g) \quad (1)$$

式中:  $P_{DG}$  为柴油发电机的输出功率;  $c_{fuel}$  为燃料价格,元/L;  $a_g$ 、 $b_g$ 、 $c_g$  为燃料消耗系数。

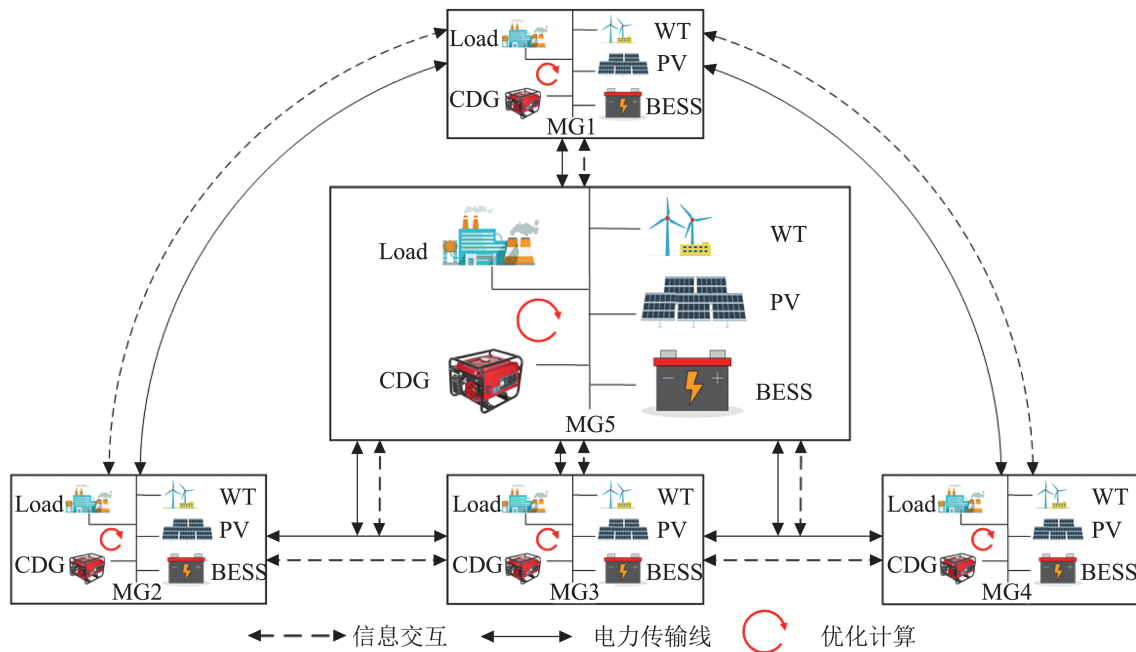


图 1 微电网集群结构  
Fig. 1 Microgrid cluster structure

### 1.2 储能电池模型

储能电池在日常运行中不直接产生成本，但其每一次的充放电都会损耗其使用寿命<sup>[12]</sup>。因此，微电网运行时需要建立合理的储能电池模型，来延缓储能电池损耗，降低系统运行成本。

储能电池的寿命损耗可以根据每次充放电循环内的等效转移能量来评估：

$$A_{\text{loss}} = A_{\text{eff}}/A_{\text{total}} \quad (2)$$

式中： $A_{\text{loss}}$ 为储能电池每次充放电时产生的损耗，当累计损耗为1时电池报废； $A_{\text{eff}}$ 为当次循环内储能电池的等效转移能量； $A_{\text{total}}$ 为储能电池寿命周期内的能量转移总量，可由Symons假设进行计算。

本文选择成本低廉、原材丰富、制造技术成熟的铅酸蓄电池作为每个微电网的储能载体。图2展示了铅酸蓄电池在不同放电速率下的实际容量变化情况，从图2可以看到，过高的放电速率会加剧电池腐蚀，降低储能的使用年限。为此，本文综合考虑充放电深度与速率对储能电池的影响，得到储能电池每个循环周期内的等效转移能量<sup>[12]</sup>：

$$A_{\text{eff}} = (D_A/D_R)^{u_0} \cdot e^{u_1(D_A/D_R - 1)} \cdot E_R/E_A \cdot A_{\text{act}} \quad (3)$$

式中： $A_{\text{act}}$ 为储能电池的实际转移能量； $D_R$ 为额定放电深度； $D_A$ 为实际放电深度； $E_R$ 为额定容量； $E_A$ 为实际容量； $u_0$ 、 $u_1$ 为电流拟合参数。

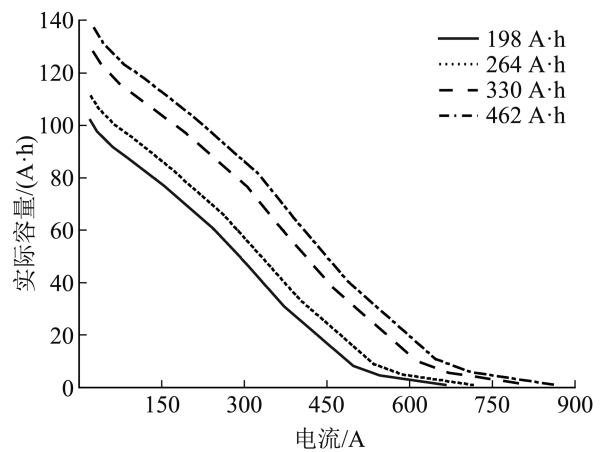


图 2 铅酸蓄电池在不同放电速率下的实际容量  
Fig. 2 Actual capacity of lead-acid batteries at different discharge rates

根据储能容量比  $\frac{E_R}{E_A} = \frac{A_R t}{A_{\text{act}} t} = \frac{A_R}{A_{\text{act}}}$  和放电深度  $D_A = 1 - S$ ， $S$ 为储能电池的荷电状态，得到 $A_{\text{eff}}$ 的SoC函数形式：

$$A_{\text{eff}} = (1-S)^{u_0} e^{\left(-\frac{u_1}{D_R}\right)^S} e^{u_1 \left(\frac{1}{D_R} - 1\right)} \frac{A_R}{D_R^{u_0}} \quad (4)$$

令  $k_0 = \frac{A_R}{D_R^{u_0}} \times e^{u_1 \left(\frac{1}{D_R} - 1\right)}$ , 式(4)可以写为

$$A_{\text{eff}} = k_0 (1-S)^{u_0} e^{\left(-\frac{u_1}{D_R}\right)^S} \quad (5)$$

研究表明, 储能电池的等效转移能量还与其运行的 SoC 值有关<sup>[14]</sup>。例如, 在  $S=0.5$  时, 从电池中去除 1 A·h 等同于从其寿命累积总量中去除 1.3 A·h。但在  $S=1$  时, 从电池中去除 1 A·h 等同于从寿命累积总量中去除 0.55 A·h。这也表明储能电池应该在较高  $S$  下运行以优化其寿命。

在初始投资已知的情况下, 储能电池每个循环周期的损耗成本为

$$C_{\text{BESS}} = \lambda_{\text{SoC}} A_{\text{loss}} C_{\text{all}} \quad (6)$$

式中:  $\lambda_{\text{SoC}}$  为有效权重因子;  $C_{\text{all}}$  为储能电池系统的初始投资。当储能电池的  $S > 0.5$  时, 有效权重因子与 SoC 近似呈线性关系<sup>[15]</sup>, 可表示为

$$\lambda_{\text{SoC}} = -1.5 \times S + 2.05 \quad (7)$$

将式(7)化简得到储能电池每次循环损耗的 SoC 函数形式:

$$C_{\text{BESS}} = \lambda_{\text{SoC}} \cdot C_{\text{all}} \cdot \frac{k_0 (1-S)^{u_0} e^{\left(-\frac{u_1}{D_R}\right)^S}}{A_{\text{total}}} \quad (8)$$

式(8)得到的函数关系仍是一个复杂的非线性指数方程, 为降低计算复杂度, 对方程的指数部分进行泰勒级数展开:

$$C_{\text{BESS}} = k_0 \frac{C_{\text{all}}}{A_{\text{total}}} (-1.5 \times S + 2.05) \times \left[ 1 - u_0 S + \frac{u_0(u_0-1)}{2} S^2 + o(S^2) \right] \times \left[ 1 - \frac{u_1}{D_R} S^2 + \frac{u_1^2}{2D_R^2} S^2 + o(S^2) \right] \quad (9)$$

将式(9)简化, 省去高阶无穷小  $o(S^2)$ , 得

$$\alpha_{\text{SoC}} = \frac{k_0 C_{\text{all}}}{A_{\text{total}}} \left[ 1.5 \left( u_0 + \frac{u_1}{D_R} \right) + 2.05 \left( \frac{u_0(u_0-1)}{2} + \frac{u_0 u_1}{D_R} + \frac{u_1^2}{2D_R^2} \right) \right]$$

$$\beta_{\text{SoC}} = \frac{k_0 C_{\text{all}}}{A_{\text{total}}} \left[ 1.5 + 2.05 \left( u_0 + \frac{u_1}{D_R} \right) \right]$$

$$\gamma_{\text{SoC}} = \frac{k_0 C_{\text{all}}}{A_{\text{total}}} \times 2.05$$

则有

$$C_{\text{BESS}}(S) = \alpha_{\text{SoC}} S^2 - \beta_{\text{SoC}} S + \gamma_{\text{SoC}} \quad (10)$$

式中:  $\alpha_{\text{SoC}}$ 、 $\beta_{\text{SoC}}$  和  $\gamma_{\text{SoC}}$  均为常数。

## 2 微电网群系统优化调度模型

### 2.1 优化目标

对于图1所示的MGC系统, 其优化目标是在平抑可再生能源功率波动、保障电网功率平衡的同时最小化MGC系统的运行成本。MGC系统优化调度的目标函数可表示为

$$\min F^{\text{MG}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [C_{\text{DG}}(P_{i,t}^{\text{DG}}) + C_{\text{BESS}}(S_{i,t}) + C_{\text{EX}}(P_{i,t}^{\text{ex}}) + C_1(P_{i,t}^{\text{ch}}, P_{i,t}^{\text{dis}})] \quad (11)$$

$$C_{\text{EX}}(P_{i,t}^{\text{ex}}) = \sum_{j \in N_i} K_i^{\text{ex}} (P_{i,t}^{\text{ex}})^2 \quad (12)$$

$$C_1(P_{i,t}^{\text{ch}}, P_{i,t}^{\text{dis}}) = K_i^1 (P_{i,t}^{\text{ch}} + P_{i,t}^{\text{dis}} + \tilde{P}_{i,t}^{\text{WT}} + \tilde{P}_{i,t}^{\text{PV}}) \quad (13)$$

式中:  $T$  为调度周期;  $N$  为微电网数量;  $N_i$  为与微电网  $i$  存在功率传输的微网子集;  $P_{i,t}^{\text{ex}}$  为微电网  $i$  与  $j$  之间的传输功率, 微电网输出功率时为正, 输入功率时为负;  $P_{i,t}^{\text{ch}}$  为 BESS 的充电功率;  $P_{i,t}^{\text{dis}}$  为 BESS 的放电功率;  $\tilde{P}_{i,t}^{\text{WT}}$  为风机的实际功率;  $\tilde{P}_{i,t}^{\text{PV}}$  为光伏的实际功率;  $K_i^{\text{ex}}$ 、 $K_i^1$  分别为微电网  $i$  的传输功率成本系数和 DC/AC 逆变器的运维成本系数;  $C_{\text{EX}}(P_{i,t}^{\text{ex}})$  为微电网  $i$  传输功率成本;  $C_1(P_{i,t}^{\text{ch}}, P_{i,t}^{\text{dis}})$  为 DC/AC 逆变器运维成本。

### 2.2 约束条件

微电网集群的最优调度问题是指在满足微电网日常运行约束的情况下, 使系统总的运行成本最小。对于柴油发电机组, 考虑到频繁的大功率变化会对其造成严重的损害。为此, 柴油发电机在运行时除需考虑功率约束外, 还需考虑其在每个优化周期内的功率变化情况。

$$P_{i,\min}^{DG} \leq P_{DG,i} \leq P_{i,\max}^{DG} \quad (14)$$

$$P_{i,t}^{DG} - P_{i,t-1}^{DG} \leq u_{i,t-1}^g P_{i,t-1}^{up} + (1 - u_{i,t-1}^g) P_{i,\min}^{DG} \quad (15)$$

$$P_{i,t-1}^{DG} - P_{i,t}^{DG} \leq u_{i,t}^g P_{i,t}^{down} + (1 - u_{i,t}^g) P_{i,\min}^{DG} \quad (16)$$

式中： $P_{i,\min}^{DG}$  和  $P_{i,\max}^{DG}$  为 DG 的功率下限和上限； $P_{i,t-1}^{up}$  和  $P_{i,t}^{down}$  为 DG 爬坡率的上限和下限； $u_{i,t}^g$  为 DG 的启停状态。

作为平抑电网功率波动的重要单元，BESS 在可再生能源充足时进行充电，在可再生能源匮乏时进行放电，实现削峰填谷，降低系统的运行成本。电池储能系统荷电状态更新和运行约束为<sup>[16]</sup>

$$S_{i,t} = S_{i,t-1} + \frac{\eta_i^{ch} P_{i,t}^{ch} \Delta t}{E_i^{BESS}} - \frac{P_{i,t}^{dis} \Delta t}{\eta_i^{dis} E_i^{BESS}} \quad (17)$$

$$S^{\min} \leq S_{i,t} \leq S^{\max} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{ch} \leq P_{i,\max}^{ch}, 0 \leq P_{i,t}^{dis} \leq P_{i,\max}^{dis} \quad (19)$$

$$P_{i,t}^{ch} \cdot P_{i,t}^{dis} = 0 \quad (20)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{ch} \leq P_{i,\max}^1, 0 \leq P_{i,t}^{dis} \leq P_{i,\max}^1 \quad (21)$$

$$0 \leq \tilde{P}_{i,t}^{WT} \leq P_{i,\max}^1, 0 \leq \tilde{P}_{i,t}^{PV} \leq P_{i,\max}^1 \quad (22)$$

式中： $E_i^{BESS}$  为 BESS 装机容量； $S^{\min}$  和  $S^{\max}$  分别为 BESS 荷电状态的下限和上限； $\eta_i^{ch}$  和  $\eta_i^{dis}$  分别为 BESS 的充放电效率； $P_{i,\max}^{ch}$ 、 $P_{i,\max}^{dis}$ 、 $P_{i,\max}^1$  分别为 BESS 的最大充放电功率和 DC/AC 逆变器的最大输出功率。

此外，每个优化周期内 BESS 应满足始末荷电状态平衡，以保证调度策略的可持续性<sup>[17]</sup>。

$$S_T = S_0 \quad (23)$$

功率平衡约束：

$$\tilde{P}_{i,t}^{load} = \eta_i^1 \tilde{P}_{i,t}^{WT} + \eta_i^1 \tilde{P}_{i,t}^{PV} + u_{i,t}^g P_{i,t}^{DG} + \eta_i^1 (P_{i,t}^{dis} - P_{i,t}^{ch}) - \sum_{j \in N_i} P_{j,t}^{ex} \quad (24)$$

备用容量约束：

$$\eta_i^1 \tilde{P}_{i,t}^{WT} + \eta_i^1 \tilde{P}_{i,t}^{PV} + u_{i,t}^g P_{i,\max}^{DG} + \eta_i^1 P_{i,\max}^{dis} \geq \left( \sum_{j \in N_i} P_{j,t}^{ex} + \tilde{P}_{i,t}^{load} \right) (1 + L_i) \quad (25)$$

式中： $\tilde{P}_{i,t}^{load}$  为实际负荷； $\eta_i^1$  为 DC/AC 逆变器的转换效率； $L_i$  为微电网  $i$  的储备率。

### 2.3 考虑风光功率的不确定

考虑太阳能、风能等可再生资源发电功率的

随机性以及对其气候变化的依赖性<sup>[18]</sup>。为使日前能量管理方案对风光功率的不确定性具有鲁棒性，借用最小—最大鲁棒优化技术，将原始约束转换为对应的鲁棒约束。具体来说，可再生能源功率的不确定性可表示为

$$\tilde{P}_{i,t}^{WT} \in [\bar{P}_{i,t}^{WT} + \hat{P}_{i,t,\min}^{WT}, \bar{P}_{i,t}^{WT} + \hat{P}_{i,t,\max}^{WT}] \quad (26)$$

$$\tilde{P}_{i,t}^{PV} \in [\bar{P}_{i,t}^{PV} + \hat{P}_{i,t,\min}^{PV}, \bar{P}_{i,t}^{PV} + \hat{P}_{i,t,\max}^{PV}] \quad (27)$$

式中： $\hat{P}_{i,t,\max}^{WT}$ 、 $\hat{P}_{i,t,\min}^{WT}$  分别为风机功率预测误差的上限和下限； $\hat{P}_{i,t,\max}^{PV}$ 、 $\hat{P}_{i,t,\min}^{PV}$  分别为光伏功率预测误差的上限和下限； $\bar{P}_{i,t}^{WT}$ 、 $\bar{P}_{i,t}^{PV}$  分别为风机、光伏的功率预测值。

将式(24)中的等号右侧代入式(25)，得

$$\{u_{i,t}^g P_{i,\max}^{DG} + \eta_i^1 P_{i,\max}^{dis} - [u_{i,t}^g P_{i,t}^{DG} + \eta_i^1 (P_{i,t}^{dis} - P_{i,t}^{ch})] (1 + L_i)\} / L_i \geq \eta_i^1 \tilde{P}_{i,t}^{WT} + \eta_i^1 \tilde{P}_{i,t}^{PV} \quad (28)$$

从凸优化模型  $F^{MG}$  可以观察到，它是一个关于  $\tilde{P}_{i,t}^{WT}$  和  $\tilde{P}_{i,t}^{PV}$  的非增函数。因此，可基于对偶理论将式(28)转化为确定性的鲁棒约束<sup>[19]</sup>。

$$\{u_{i,t}^g P_{i,\max}^{DG} + \eta_i^1 P_{i,\max}^{dis} - [u_{i,t}^g P_{i,t}^{DG} + \eta_i^1 (P_{i,t}^{dis} - P_{i,t}^{ch})] (1 + L_i)\} / L_i \geq [\eta_i^1 \bar{P}_{i,t}^{WT} + \eta_i^1 \bar{P}_{i,t}^{PV}] + \delta_i [\eta_i^1 \hat{P}_{i,t,\min}^{WT} + \eta_i^1 \hat{P}_{i,t,\min}^{PV}] - \gamma_i [\eta_i^1 \hat{P}_{i,t,\max}^{WT} + \eta_i^1 \hat{P}_{i,t,\max}^{PV}] \quad (29)$$

$$\delta_i - \gamma_i = 1, \delta_i \geq 0, \gamma_i \geq 0$$

在对微电网网内模型求解时，式(29)将原始约束(24)(25)替换为不含不确定性变量  $\tilde{P}_{i,t}^{WT}$  和  $\tilde{P}_{i,t}^{PV}$  的鲁棒约束。

## 3 基于同步型 ADMM 的分布式求解

### 3.1 同步型 ADMM 算法

ADMM 是一种适用于求解大规模可分离问题的分布式优化算法。同步型 ADMM 算法凭借其迭代形式简单、收敛精度高、鲁棒性强等特点，已经被广泛应用于求解电力系统的分布式优化问题<sup>[20]</sup>。

ADMM 的标准形式为

$$\begin{cases} \min & f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{z}) \\ \text{s.t.} & \mathbf{Ax} + \mathbf{Bz} = \mathbf{c} \end{cases} \quad (30)$$

式中： $f$  和  $g$  为凸函数； $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ ； $\mathbf{z} \in \mathbf{R}^m$ ； $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{p \times n}$ ； $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{p \times m}$ ； $\mathbf{c} \in \mathbf{R}^p$ 。

标准ADMM算法的增广拉格朗日函数<sup>[21]</sup>为

$$L_\rho(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\lambda}) = f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{z}) + \boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{Ax} + \mathbf{Bz} - \mathbf{c}) + \frac{\rho}{2} \|\mathbf{Ax} + \mathbf{Bz} - \mathbf{c}\|_2^2 \quad (31)$$

更新迭代的标准形式为

$$\mathbf{x}^{k+1} = \arg \min_{\mathbf{x}} L_\rho(\mathbf{x}, \mathbf{z}^k, \boldsymbol{\lambda}^k) \quad (32)$$

$$\mathbf{z}^{k+1} = \arg \min_{\mathbf{z}} L_\rho(\mathbf{x}^{k+1}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\lambda}^k) \quad (33)$$

$$\boldsymbol{\lambda}^{k+1} = \boldsymbol{\lambda}^k + \rho(\mathbf{Ax}^{k+1} + \mathbf{Bz}^{k+1} - \mathbf{c}) \quad (34)$$

令 $\mathbf{u} = \boldsymbol{\lambda}/\rho$ , 得到同步型ADMM的迭代更新形式:

$$\mathbf{x}^{k+1} = \arg \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) + \frac{\rho}{2} \|\mathbf{Ax} + \mathbf{Bz}^k - \mathbf{c} + \mathbf{u}^k\|_2^2 \quad (35)$$

$$\mathbf{z}^{k+1} = \arg \min_{\mathbf{z}} g(\mathbf{z}) + \frac{\rho}{2} \|\mathbf{Ax}^{k+1} + \mathbf{Bz} - \mathbf{c} + \mathbf{u}^k\|_2^2 \quad (36)$$

$$\mathbf{u}^{k+1} = \mathbf{u}^k + \mathbf{Ax}^{k+1} + \mathbf{Bz}^{k+1} - \mathbf{c} \quad (37)$$

式中:  $k$ 为迭代次数;  $\rho > 0$ 为惩罚因子;  $\mathbf{u}^k$ 为第 $k$ 次迭代的拉格朗日乘子。

### 3.2 迭代过程中MGC的优化求解

对于本文的MGC优化调度问题, 每个MG仅与其邻接的微电网进行功率交换, 不需要控制中心和任何全局信息, 可最大程度保护各微电网的隐私。

$$P_{ij,t}^{\text{ex,ref}} = \frac{1}{2} (P_{ij,t}^{\text{ex}} - P_{ji,t}^{\text{ex}}) \quad (38)$$

$$\mathbb{C}_1 = \{P_{ij,t}^{\text{ex}} | P_{ij,t}^{\text{ex}} = -P_{ji,t}^{\text{ex}} = P_{ij,t}^{\text{ex,ref}}, \forall i, j \in N_i\} \quad (39)$$

式中:  $P_{ij,t}^{\text{ex,ref}}$ 为微电网 $j$ 向微电网 $i$ 进行功率传输的参考值;  $\mathbb{C}_1$ 为新增的功率传输一致性约束, 以保证算法的收敛性。

结合式(38)(39)和同步型ADMM的算法原理, MGC分布式优化问题的迭代过程可写为

$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \arg \min_{\mathbf{x}_i} F^{\text{MG}}(\mathbf{x}_i) + \sum_{j \in N_i} \frac{\rho}{2} \|P_{ij,t}^{\text{ex}} - P_{ij,t}^{\text{ex,ref,k}} + \mathbf{u}^k\|_2^2 = \arg \min_{\mathbf{x}_i} F^{\text{MG}}(\mathbf{x}_i) + \sum_{j \in N_i} \frac{\rho}{2} \left\| P_{ij,t}^{\text{ex}} - \frac{1}{2} P_{ij,t}^{\text{ex,k}} + \frac{1}{2} P_{ji,t}^{\text{ex,k}} + \mathbf{u}^k \right\|_2^2 \quad (40)$$

$$\mathbf{u}_{ij}^{k+1} = \mathbf{u}_{ij}^k + P_{ij,t}^{\text{ex,k+1}} - P_{ij,t}^{\text{ex,ref,k+1}} \quad (41)$$

由式(40)(41)可知, 各MG在迭代过程中需要获取邻接MG的传输功率参考值 $P_{ij,t}^{\text{ex,ref,k}}$ 。但本文采取分布式的通信方式, 每个MG仅与其存在功

率传输的MG建立通信连接, 并交换功率信息。该通信方式降低了MG隐私泄露的风险, 提高了MG运行的可靠性。

### 3.3 模型求解流程

本文建立了MGC的分布式优化模型, 并采用ADMM算法对其进行求解。具体的求解流程如下:

(1) 根据各MG当地温度、辐射强度、风速等气候数据及历史负荷, 获取光伏、风机及负荷的预测值。

(2) 采集各BESS荷电状态信息, 然后结合式(10)确定其成本函数。

(3) 初始化 $\mathbf{u}$ 、 $\rho$ 、 $k$ 、 $P_{ij,t}^{\text{ex,ref}}$ 等参数。根据式(40)和约束(14)~(29)进行求解, 得到初始最优值 $\mathbf{x}_i^k$ 。

(4) 各MG与邻接MG进行信息交互, 获取传输功率参考值 $P_{ij,t}^{\text{ex,ref,k}}$ 。

(5) 根据式(41)更新拉格朗日乘子 $\mathbf{u}^k$ 。

(6) 设置ADMM算法的收敛条件和最大迭代次数, 并计算当次迭代残差, 若当次迭代系统残差满

足 $\|\mathbf{r}^k\| = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} (\mathbf{u}_{ij}^{k+1} - \mathbf{u}_{ij}^k)^2} \leq \varepsilon$ , 则迭代停止; 不满足则迭代继续, 直到最大迭代次数。

(7) 下一时刻, 重复上述步骤。

## 4 算例分析

### 4.1 算例概述及优化结果

MGC系统由图1所示的5个离网运行的MG组成, 各MG配置和参数见表1~2。逆变器转换效率 $\eta_i^!$ 取100%; 储备率 $L_i$ 取0.3%; BESS充电效率 $\eta_i^{\text{ch}}$ 和放电效率 $\eta_i^{\text{dis}}$ 都取97%; 荷电状态 $S^{\text{min}}$ 和 $S^{\text{max}}$ 分别取0.5和0.9; 各MG间的最大传输功率为200 kW; 优化周期为24 h, 时间间隔1 h; 收敛误差 $\varepsilon$ 取0.000 1。各MG光伏、风力预测功率及负荷曲线, 如图3所示, 其中, 光伏、风力预测功率误差上下限取 $\pm 5\%$ 。算法在MATLAB环境下采用Cplex软件对本文微电网模型进行编程求解。



表 1 微电网分布式电源配置  
Table 1 Microgrid distributed generation configuration

MG	风机额定功率/kW	光伏额定功率/kW	BESS 额定功率/kW	BESS 额定容量/(kW·h)	BESS 初始投资成本/万元
1	500	300	300	1 200	120
2	550	400	280	1 200	120
3	—	500	360	1 600	160
4	500	—	400	1 600	160
5	450	300	350	1 500	150

注：“—”为MG没有该类电源。

表 2 DG 的燃料消耗系数及额定功率  
Table 2 Fuel consumption coefficient and rated power of DGs

DG	$a_g$	$b_g$	$c_g$	柴油机额定功率/kW
1	0.001 24	0.32	3.21	200
2	0.001 24	0.32	3.21	200
3	0.000 50	0.48	5.03	300
4	0.001 24	0.32	3.21	200
5	0.001 24	0.32	3.21	200

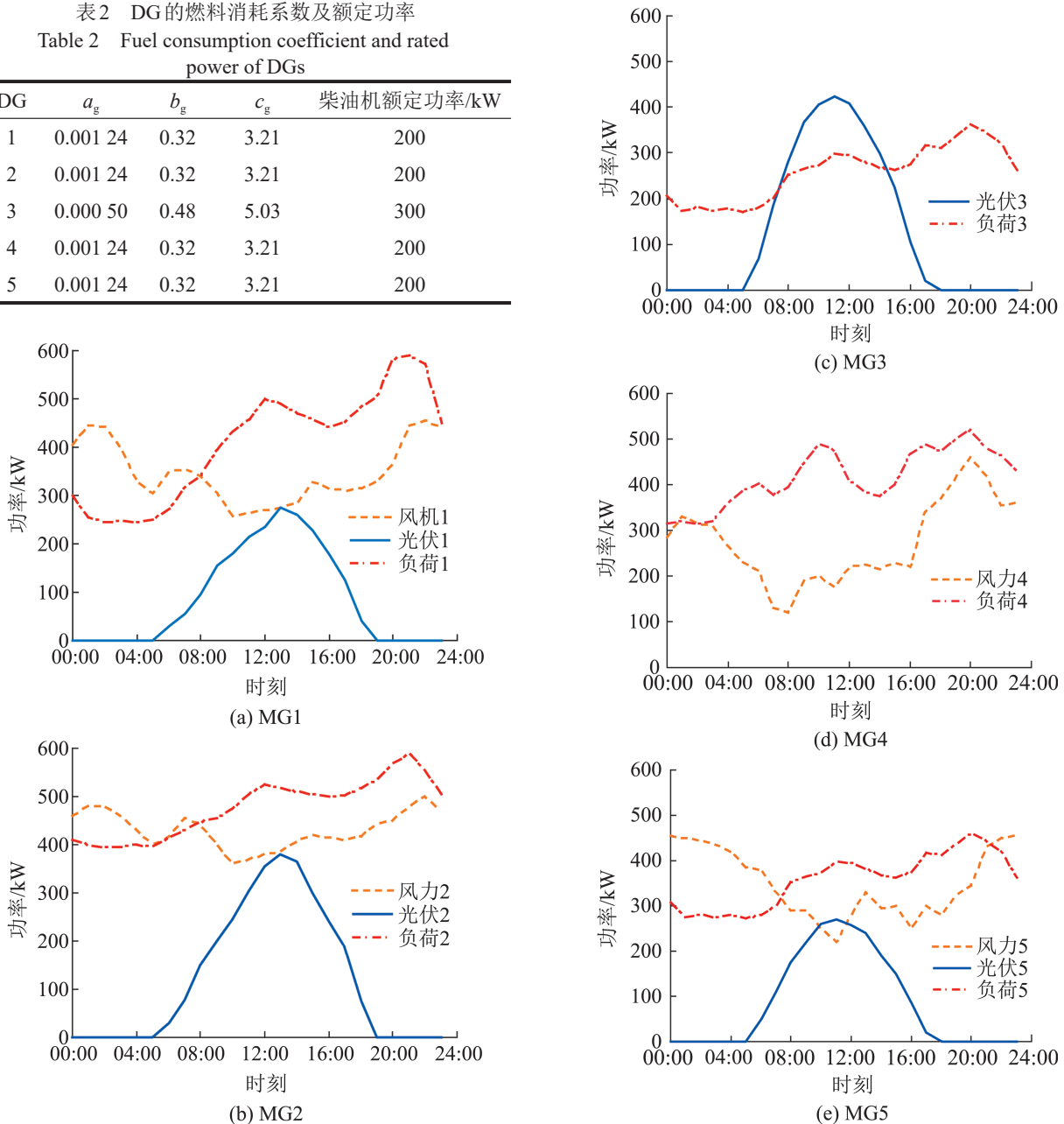


图 3 各 MG 可再生能源输出功率和负荷曲线  
Fig. 3 Renewable energy source output power and load curves of each MGs

MGC系统的优化调度结果如图4~6所示。从优化结果可以看出, BESS在00:00—04:00及10:00—16:00等可再生能源充足时进行充电,在18:00—22:00等负荷高峰时进行放电,实现削峰填谷,提高可再生能源利用率。从图4可以看到, MG3的柴油机在负荷高峰时功率最大,这是由于MG3只配置了光伏,没有配置其他可再生能源。此时, MG3从其他MG获取传输功率,以避免柴油机负荷过高和储能电池放电过快。同时,各MG间的功率交换也延长了储能电池的使用寿命,降低了系统的运行成本。

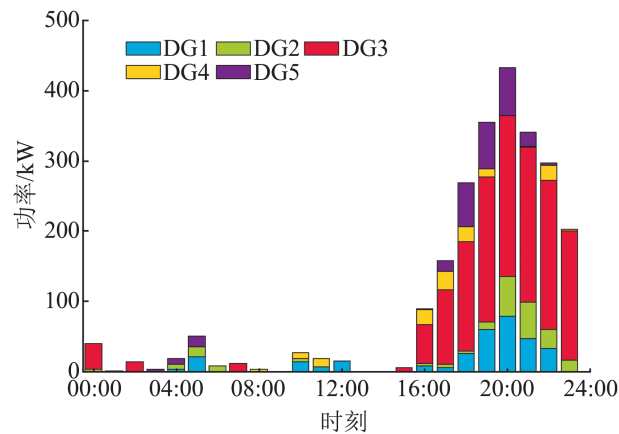


图4 柴油发电机优化结果  
Fig. 4 Optimization results of DG

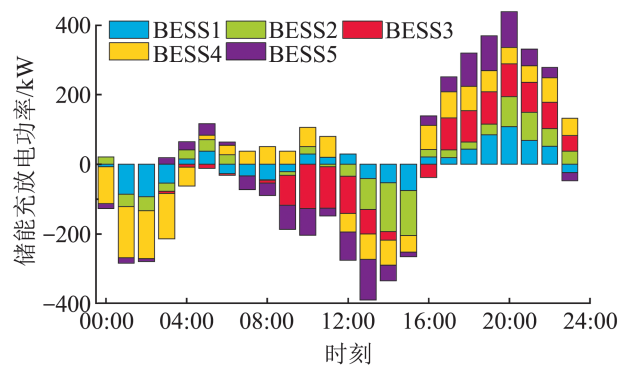


图5 电池储能系统的优化结果  
Fig. 5 Optimization results of BESS

## 4.2 分布式算法收敛性分析

图7给出了优化周期内残差的收敛过程。由图7可知,系统刚开始迭代时残差较大,但在几

次迭代后,系统残差迅速下降,并在20次迭代后达到收敛,说明本文算法具有较好的收敛性能。

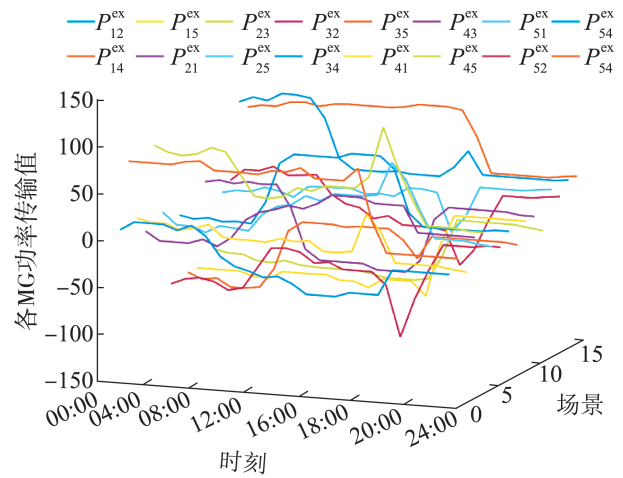


图6 传输功率优化结果  
Fig. 6 Optimization results of transmission power

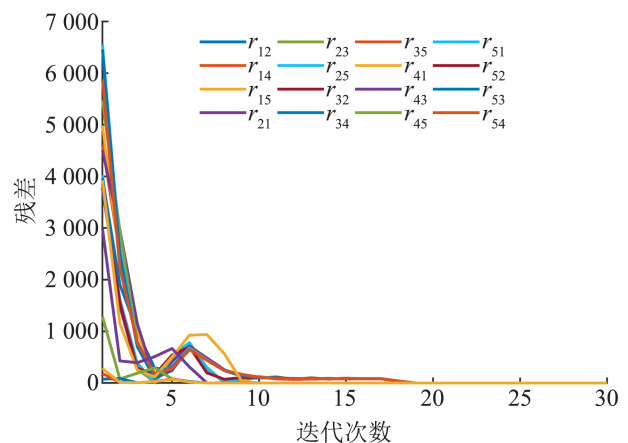


图7 迭代收敛过程  
Fig. 7 Iterative convergence process

图8给出了16:00时各MG传输功率迭代收敛的具体变化过程。在迭代初始阶段,各MG大多倾向于输出功率,这是由于初始迭代时各MG通过增加可控单元功率来保障负荷需求。因此,此时的迭代结果只是各MG的内部最优,不是全局最优。随着迭代次数的增加, MG3和MG4从其他MG获取传输功率来降低运行成本,系统达到全局最优。

图9给出了MG3优化周期内考虑和不考虑BESS寿命时SoC的变化情况。可以看到,考虑

BESS 寿命时的平均 SoC 值更高，减缓了 BESS 的深度充放。MG3 中储能电池的充放电速率曲线如图 10 所示，从图 10 可以看到，在 18:00—22:00 等峰负荷时段，考虑储能电池寿命时，BESS 的充放电曲线变化平缓，而不考虑储能电池寿命时，BESS 的充放电曲线变化频繁，并以更高的速率进行放电。由此说明，本文的分布式策略不仅能改善 BESS 的过充过放，还能控制 BESS 的充放电速率，最终实现 BESS 的有序充放。

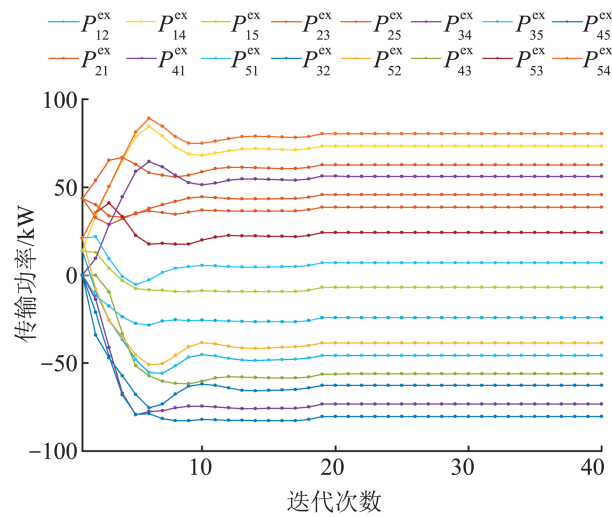


图 8 迭代过程中各 MG 传输功率变化情况  
Fig. 8 Transmission power change in each MG during the iteration process

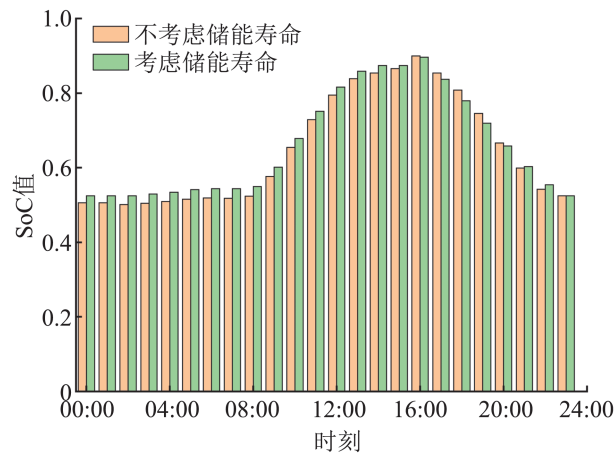


图 9 考虑储能寿命前后储能电池 SoC 值  
Fig. 9 Energy storage battery SoC value before and after considering energy storage life

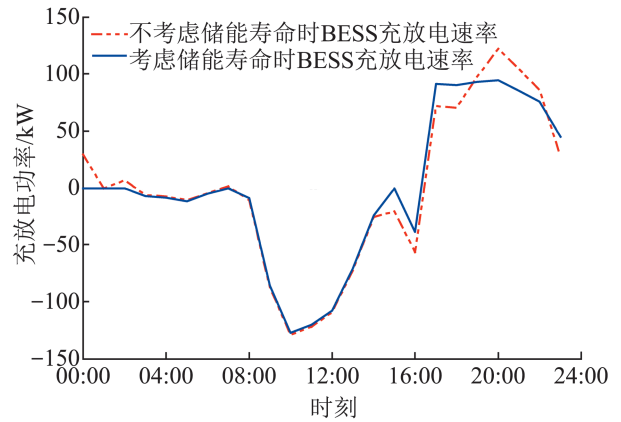


图 10 考虑储能寿命前后 BESS 充放电速率曲线  
Fig. 10 Charge and discharge rate curve of BESS before and after considering energy storage life

### 4.3 分布式算法的最优性分析

为验证分布式 ADMM 算法的优越性，本文将分布式算法与集中式算法的优化结果进行对比，结果如表 3 所示。相较于集中式优化算法，分布式优化算法只对局部信息进行交互，保护了微网运行的隐私性，但由于缺少全局信息，需要不断迭代交互，求解时间相对较长。其次，分布式算法通过并行求解，降低了计算负担，提高了模型的计算效率。

表 3 分布式优化和集中式优化结果对比  
Table 3 Results comparison between distributed optimization and centralized optimization

优化类型	成本/元			求解时间/s
	发电	传输	合计	
分布式	22 615.29	2 141.52	24 756.81	15.12
集中式	22 542.56	2 201.12	24 743.68	9.52

### 4.4 微电网通信故障时的可靠性分析

本文 MGC 系统的通信拓扑结构可用一个无向图 G 表示，其中，MG 视为无向图 G 的顶点，各 MG 间的通信联络线视为无向图 G 的边。每个 MG 通过通信联络线传递功率交互信息，无需设置控制中心，保护了电网信息的隐私性。然而，通信联络线故障在微电网运行时不可避免，其的发生会导致通信拓扑结构改变和传输功率中断，影响电力系统的稳定运行。为此，本文假设 MG1 与

MG2, MG3与MG4间的通信联络线发生故障来验证算法的可靠性,通信拓扑变化如图11所示。

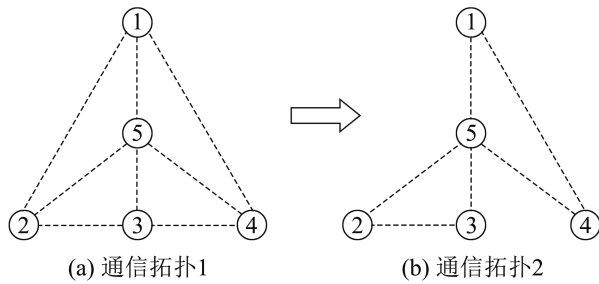


图11 通信拓扑变化

Fig. 11 Communication topology changes

当联络线故障导致微网通信异常时,各MG需重新初始化算法参数,然后利用同步型ADMM算法得到系统通信拓扑变化后的优化结果。图12给出了通信故障发生后MGC系统16:00时的传输功率变化情况,从图12可以看出,虽然系统的拓扑结构发生了变化,但通信正常的MG仍能通过联络线传递功率信息,最终使系统收敛到全局最优。因此,本文所提的分布式优化策略在某些通信故障发生时仍然有效,具有较高的可靠性。

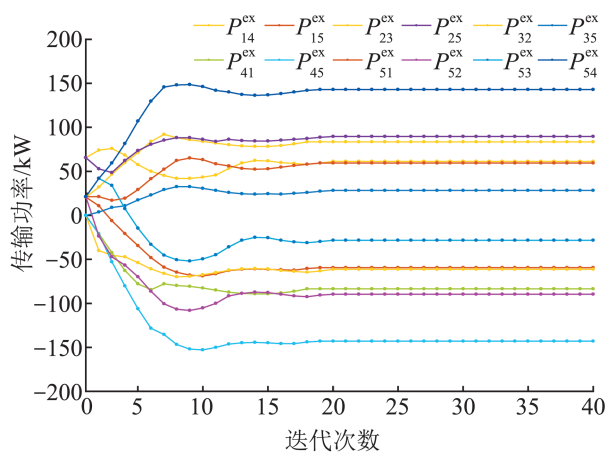


图12 通信故障时各MG传输功率变化情况

Fig. 12 Transmission power change in each MG during communication failures

## 5 结论

针对当前储能系统研究的不足,本文在考虑充放电深度的基础上,进一步探究充放电速率对

储能寿命的影响,并建立了面向实时优化调度的电池储能系统模型。考虑到高比例可再生能源接入带来的能源消纳问题,将地域上毗邻的微电网互联成一个微电网集群系统,采用ADMM算法进行优化求解。仿真结果表明:本文模型能缓解储能电池的高充高放,并使储能电池在较高荷电状态下运行,延长了电池的使用年限。此外,本文还考虑了微网间的通信故障。当微电网集群通信异常时,剩余通信正常的微网仍能通过信息交互使系统收敛到全局最优,验证了本文算法的收敛性与可靠性。然而,随着大规模可再生能源的接入,孤岛模式下的多微网系统将趋于并网连接。因此,多个以可再生能源发电为主的微网的并网连接或将是未来研究的一个课题。

## 参考文献:

- [1] 孟明,陈世超,赵树军,等. 新能源微电网研究综述[J]. 现代电力, 2017, 34(1): 1-7.  
Meng Ming, Chen Shichao, Zhao Shujun, et al. Overview on Research of Renewable Energy Microgrid[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(1): 1-7.
- [2] 桑博,张涛,刘亚杰,等. 多微电网能量管理系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3077-3092.  
Sang Bo, Zhang Tao, Liu Yajie, et al. Energy Management System Research of Multi-microgrid: A Review[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3077-3092.
- [3] 刘畅,卓建坤,赵东明,等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18.  
Liu Chang, Zhuo Jiankun, Zhao Dongming, et al. A Review on the Utilization of Energy Storage System for the Flexible and Safe Operation of Renewable Energy Microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18.
- [4] Yang Kang, Li Chunhua, Jing Xu, et al. Energy Dispatch Optimization of Islanded Multi-microgrids Based on Symbiotic Organisms Search and Improved Multi-agent Consensus Algorithm[J]. Energy, 2022, 239, Part C: 122105.
- [5] 王皓,艾芊,吴俊宏,等. 基于交替方向乘子法的微电网群双层分布式调度方法[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1718-1725.  
Wang Hao, Ai Qian, Wu Junhong, et al. Bi-level Distributed Optimization for Microgrid Clusters Based on Alternating Direction Method of Multipliers[J]. Power

- System Technology, 2018, 42(6): 1718-1725.
- [6] 吴成辉, 林声宏, 夏成军, 等. 基于模型预测控制的微电网群分布式优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 530-538. Wu Chenghui, Lin Shenghong, Xia Chengjun, et al. Distributed Optimal Dispatch of Microgrid Cluster Based on Model Predictive Control[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 530-538.
- [7] 方斯顿, 王鸿东, 张沈习, 等. 考虑蓄电池寿命损耗的最优船舶储能系统调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7566-7577, 中插7. Fang Sidun, Wang Hongdong, Zhang Shenxi, et al. Optimal Management of Shipboard Energy Storage System Considering Battery Lifetime Degradation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7566-7577, 中插7.
- [8] Hu Lin, Hu Xiaosong, Che Yunhong, et al. Reliable State of Charge Estimation of Battery Packs Using Fuzzy Adaptive Federated Filtering[J]. Applied Energy, 2020, 262: 114569.
- [9] 王育飞, 叶俊斌, 薛花, 等. 基于改进雨流计数法的梯次利用电池储能系统优化控制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 39-49. Wang Yufei, Ye Junbin, Xue Hua, et al. Optimal Control for Energy Storage System with Echelon Utilization Batteries Based on Improved Rain-flow Counting Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 39-49.
- [10] 严干贵, 蔡长兴, 段双明, 等. 考虑电池储能单元分组优化的微电网运行控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 38-46. Yan Gangui, Cai Changxing, Duan Shuangming, et al. Operation Control Strategy of Microgrid Considering Grouping Optimization of Battery Energy Storage Units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 38-46.
- [11] 冯海林, 张翀. 基于新健康因子的锂电池健康状态估计和剩余寿命预测[J]. 南京大学学报(自然科学), 2021, 57(4): 660-670. Feng Hailin, Zhang Xuan. State of Health Estimation and Remaining Using Life Prediction of Lithium-ion Batteries Based on New Health Indicators[J]. Journal of Nanjing University(Natural Science), 2021, 57(4): 660-670.
- [12] 杨艳红, 裴玮, 邓卫, 等. 计及蓄电池储能寿命影响的微电网日前调度优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 172-180. Yang Yanhong, Pei Wei, Deng Wei, et al. Day-ahead Scheduling Optimization for Microgrid with Battery Life Model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 172-180.
- [13] 刘长良, 王鹏飞, 刘帅, 等. 一种改进的CS算法及其在微电网优化中的应用[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(3): 930-936. Liu Changliang, Wang Pengfei, Liu Shuai, et al. An Improved CS Algorithm and Its Application in Micro Grid Optimization[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 930-936.
- [14] Jamal Faraji, Abbas Ketabi, Hamed Hashemi-Dezaki. Optimization of the Scheduling and Operation of Prosumers Considering the Loss of Life Costs of Battery Storage Systems[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 31: 101655.
- [15] Xie Peng, Cai Zexiang, Liu Ping, et al. Microgrid System Energy Storage Capacity Optimization Considering Multiple Time Scale Uncertainty Coupling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5234-5245.
- [16] Deng Chao, Wang Yu, Wen Changyun, et al. Distributed Resilient Control for Energy Storage Systems in Cyber-physical Microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(2): 1331-1341.
- [17] 孙伟卿, 张婕, 叶磊, 等. 考虑广义储能的电力系统运行弹性优化[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(4): 962-972. Sun Weiqing, Zhang Jie, Ye Lei, et al. Operation Resilience Optimization of Power System Considering Generalized Energy Storage[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(4): 962-972.
- [18] 周京华, 翁志鹏, 宋晓通. 兼顾可靠性与经济性的孤岛型光储微电网容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 166-174. Zhou Jinghua, Weng Zhipeng, Song Xiaotong. Capacity Configuration Method of Islanded Microgrid with Photovoltaic and Energy Storage System Considering Reliability and Economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 166-174.
- [19] Xie Peng, Jia Youwei, Chen Hongkun, et al. Mixed-stage Energy Management for Decentralized Microgrid Cluster Based on Enhanced Tube Model Predictive Control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3780-3792.
- [20] 林永君, 陈鑫, 杨凯, 等. 含多微网的主动配电网双层分布式优化调度[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(11): 2323-2336. Lin Yongjun, Chen Xin, Yang Kai, et al. Bilevel Distributed Optimal Dispatch of Active Distribution Network with Multi-microgrids[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(11): 2323-2336.
- [21] Xu Da, Wu Qiuwei, Zhou Bin, et al. Distributed Multi-energy Operation of Coupled Electricity, Heating, and Natural Gas Networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2457-2469.