

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.06.021

# 计及构网型储能稳定拓展的微电网群优化运行

马立红<sup>1</sup>, 梁亚峰<sup>1</sup>, 程西<sup>1</sup>, 羊冠宝<sup>2</sup>, 邱剑洪<sup>1</sup>, 尚磊<sup>3</sup>

(1. 海南能源发展研究院(电网规划设计研究中心), 海南海口 570100; 2. 海南电网有限责任公司三沙供电局, 海南三沙 573100; 3. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北武汉 430072)

**摘要:** 构网型储能发挥常规储能功能的同时, 能够提升系统惯性, 满足含高比例新能源微电网频率电压快速调节需求, 是促进微电网技术发展的重要形式。文中为研究储能控制策略改变对微电网群经济运行影响, 提出计及构网型储能稳定拓展的微电网群优化运行方法。首先, 搭建含2个子微电网的微电网群架构, 确定微电网群各组件效率模型, 分析不同储能控制策略。然后, 以微电网群运行成本为优化目标, 计及不同储能控制策略设置柴油发电机开机方式约束, 构建计及构网型储能稳定拓展的微电网群优化运行模型, 并采用 CPLEX 求解器进行求解。最后, 设置不同光伏渗透率场景进行算例仿真。仿真结果验证了储能构网型改造能够有效提升微电网群运行经济性及环保性。同时, 适当提高微电网群联络线功率限额可以提高系统运行经济性。

**关键词:** 微电网群; 储能控制策略; 构网型储能; 跟网型储能; 锁相锁幅环; 柴油发电机

**中图分类号:** TM721

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2024)06-0214-09

## 0 引言

微电网技术可高效集成多种分布式新能源发电装置, 有利于缓解电力短缺、加速清洁能源转型, 已成为目前研究热点<sup>[1-5]</sup>。微电网群可实现多个微电网互联功率支援, 提高用电经济性和供电可靠性, 充分发挥不同特性微电网之间的优势互补, 从而在更大空间和时间范围内提高分布式电源的规模化消纳水平和彼此间的供电可靠性<sup>[6-10]</sup>。热带海岛微电网群是微电网群的一个典型应用场景, 多个海岛间的微电网互联、同一海岛上的多个微电网互联, 可实现功率支援, 进而实现海岛的安全可靠供电。因此, 研究海岛微电网群运行调度具有现实意义。

目前, 关于微电网群调度的研究主要集中在微电网管理架构和储能策略方面。合理的微电网群管理架构是实现微电网群安全、稳定、经济运行的基础, 已有研究基于微电网群结构特点与通信需求, 选择适当的能量管理架构<sup>[11-12]</sup>。文献[13]采取集中式管理架构, 构建基于经济性的微电网群优化调度模型, 分析子微电网协同运行对微电网群可调度能力、经济性的影响。文献[14]考虑各微电网差异性和自治性需求, 构建微电网群分层分阶段能量管理模型, 有效引导微电网群内资源利用, 降低可再生能源波动性、随机性给系统运行带来的潜在风

险。文献[15]结合同步型交替方向乘子法, 提出一种微电网群分布式优化调度策略, 实现微电网群、子微电网迭代寻优。

储能装置具备功率和能量转移功能, 可促进可再生能源消纳、解决源荷功率不平衡导致的峰谷差等静态问题<sup>[16-18]</sup>。已有研究构建微电网储能策略时较多考虑充放电深度、速率对储能装置寿命影响。文献[19]提出一种两层预测性能源管理系统调度模型, 考虑超级电容器的长期成本和混合储能的衰减成本。文献[20]考虑充放电深度、速率对储能装置寿命影响, 提出一种面向实时优化调度的微电网群优化方法, 可以使得储能装置在较高荷电状态运行, 延长储能装置寿命。文献[21]基于储能装置限流充电、恒压充电工作模式, 提出一种基于储能装置健康的微电网群能量管理系统, 运行时在2种工作模式下进行切换, 以延长储能装置寿命。

然而, 现有微电网群调度研究中较少考虑高比例分布式光伏对系统动态特性影响。高比例分布式光伏的接入导致微电网群存在频率电压动态问题, 尤其在微电网孤岛运行时, 由于缺乏主电网的支撑, 频率和电压动态问题更加明显<sup>[22-24]</sup>。随着构网型控制技术及锁相锁幅(amplitude-phase-locked-loop, APLL)控制技术的深入, 储能装置既能平滑光伏功率波动, 又能支撑系统频率、电压的调节<sup>[25]</sup>。改变储能控制策略会影响微电网群内柴油发电机(下文简称“柴发”)开机方式, 进而影响微电网运行经济性、源荷互动情况。

基于此, 文中提出一种计及构网型储能稳定拓

收稿日期: 2024-03-19; 修回日期: 2024-06-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22B20107); 中国南方电网有限责任公司科技项目(074800KK52200009)

展的优化调度模型。基于不同储能控制策略,设置柴发不同开机方式约束,实现微电网群的经济可靠运行。通过实际算例分析验证所提模型的有效性,分析柴发开机方式、联络线功率限值等对微电网群运行影响,对微电网群规划设计及调度运行相关研究具有借鉴意义。

## 1 微电网群架构及运行控制策略

文中研究的微电网群位于海南某孤立海岛,为孤岛运行模式,如图 1 所示。受限于地理环境和电网结构,海岛上现存 2 个交流微电网  $MG_1$ 、 $MG_2$ ,通过交流母线连接。每个微电网均由柴发、光伏 (photovoltaic, PV)、储能装置 (energy storage, ES) 和负荷构成。图中,  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$  均为柴发。

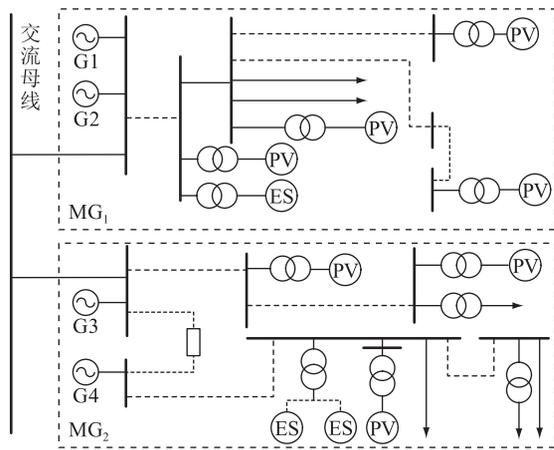


图 1 某海岛微电网群拓扑

Fig.1 Topology of the island microgrids

柴发是以柴油机为原动机带动发电机发电的动力机械,可为光伏发电和负荷需求提供平衡。光伏发电具有不确定性,工作在最大功率跟踪模式,不具备惯性支撑能力。为保证系统运行可靠性,当前海岛柴发配置冗余,各微电网内 2 台柴发即可满足日常负荷需求。在微电网孤岛运行时,柴发为主电源,提供频率、电压支撑,以保证微电网动态稳定运行。

储能装置用于平抑功率波动及削峰填谷,其充放电模型为:

$$E_{es}(t) = E_{es}(t-1) + \eta_{ch} P_{ch}(t) \Delta t - \frac{P_{dis}(t) \Delta t}{\eta_{dis}} \quad (1)$$

式中:  $E_{es}(t)$  为  $t$  时刻储能装置存储的电能;  $P_{ch}(t)$ 、 $P_{dis}(t)$  分别为  $t$  时刻储能装置的充、放电功率;  $\eta_{ch}$ 、 $\eta_{dis}$  分别为储能装置的充、放电效率;  $\Delta t$  为时间间隔。

储能装置的荷电状态  $S_{oc}$  的计算表达式为:

$$S_{oc}(t) = \frac{E_{es}(t)}{E_{es,r}} \quad (2)$$

式中:  $S_{oc}(t)$  为  $t$  时刻储能装置荷电状态;  $E_{es,r}$  为储能装置容量。

文中微电网群结构简单,采取集中式架构实现微电网群的群观群控,如图 2 所示。该运行控制架构分为 3 层:(1) 微电网群控制层,基于预测数据建立优化模型,制定并下发柴发、储能的调度指令,通过 2 个微电网间的功率互济实现微电网群优化运行;(2) 微电网控制层,对各微电网运行模式进行管理;(3) 就地控制层,响应调度指令并根据功率变化进行实时调整。

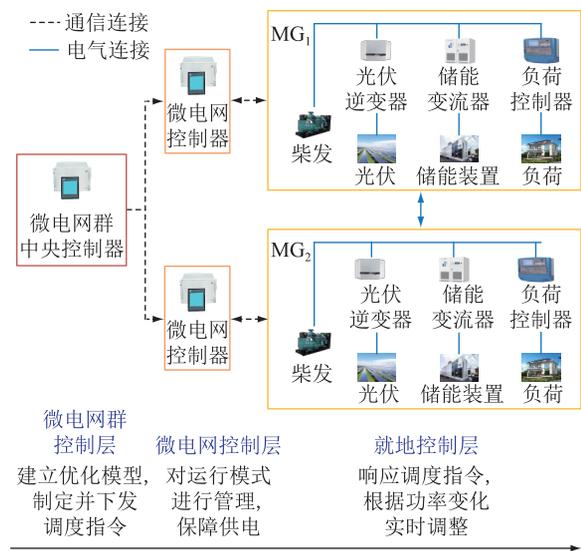


图 2 某海岛微电网群运行控制架构

Fig.2 Operation and control architecture of the island microgrids

在极端/故障工况下,就地控制层可采取构网+跟网混合的独立组网技术,独立构建系统频率电压调节能力与分布式新能源功率支撑能力,最大化保障负荷连续电力供应。然而,岛上目前配置储能为跟网型储能,采取传统的跟网型控制策略,柴发需满足  $N-1$  运行以支撑系统频率和电压。APLL 控制策略是一种新型跟网型控制策略,将锁相环、锁幅环结合起来,使得储能自发响应频率、电压变化,相比传统控制,可在一定程度上提升运行可靠性<sup>[26]</sup>。当储能采取 APLL 控制时,柴发无须满足  $N-1$  运行条件。当进行构网型储能稳定拓展后,微电网可实现 100% 新能源运行,此时允许柴发脱网运行,可保证系统动态稳定。

## 2 微电网群优化运行模型及求解方法

### 2.1 目标函数

优化模型考虑系统运行经济性,主要为柴发运

行成本,而光伏发电成本很小,可以忽略不计。柴油发电成本主要考虑燃料成本  $C_{fuel}$ ,其与机组的关系一般用二次多项式函数表达<sup>[27]</sup>。

$$C_{fuel} = \sum_{t=1}^T (a_{dg} P_{dg}^2(t) + b_{dg} P_{dg}(t) + c_{dg}) \quad (3)$$

式中: $a_{dg}$ 、 $b_{dg}$ 、 $c_{dg}$ 分别为燃料费用-机组出力的相应二次项、一次项和常数项系数; $P_{dg}(t)$ 为 $t$ 时刻柴发出力; $T$ 为调度周期。

## 2.2 约束条件

(1) 实时功率平衡约束,包含微电网内部功率平衡约束以及微电网群功率平衡约束。

$$P_{dg1}(t) + P_{pvi}(t) + P_{dis1}(t) = P_{L1}(t) + P_{ch1}(t) + P_{aban1}(t) + P_{ex}(t) \quad (4)$$

$$P_{dg2}(t) + P_{pv2}(t) + P_{dis2}(t) + P_{ex}(t) = P_{L2}(t) + P_{ch2}(t) + P_{aban2}(t) \quad (5)$$

$$P_{dg1}(t) + P_{pvi}(t) + P_{dis1}(t) + P_{dg2}(t) + P_{pv2}(t) + P_{dis2}(t) = P_{L1}(t) + P_{ch}(t) + P_{aban1}(t) + P_{L2}(t) + P_{ch2}(t) + P_{aban2}(t) \quad (6)$$

式中: $P_{dgi}(t)$ 、 $P_{pvi}(t)$ 分别为 $t$ 时刻 $MG_i$ 中柴发电功率、光伏发电功率, $i=1,2$ ; $P_{disi}(t)$ 、 $P_{chi}(t)$ 分别为 $t$ 时刻 $MG_i$ 中储能充、放电功率; $P_{abani}(t)$ 为 $t$ 时刻 $MG_i$ 弃光功率; $P_{Li}(t)$ 为 $t$ 时刻 $MG_i$ 的负荷功率; $P_{ex}(t)$ 为 $t$ 时刻微电网群联络线功率,正方向为 $MG_1$ 流入 $MG_2$ ,其约束见式(7)。

$$P_{ex,min} \leq P_{ex}(t) \leq P_{ex,max} \quad (7)$$

式中: $P_{ex,max}$ 、 $P_{ex,min}$ 分别为微电网群联络线功率上、下限。

(2) 柴发运行约束,柴发应满足运行在经济出力区间。

$$P_{dg,low} < P_{dg}(t) < P_{dg,high} \quad (8)$$

式中: $P_{dg,low}$ 、 $P_{dg,high}$ 分别为经济运行下限和旋转备用上限。

计及构网型储能稳定拓展约束,当储能采取不同控制策略时,存在不同柴发开机方式约束。

$$\sum S_{on,dg}(j) \geq k \quad (9)$$

$$\sum S_{on,dg}(j) \geq 1 \quad (10)$$

$$\sum S_{on,dg}(j) \geq 0 \quad (11)$$

式中: $S_{on,dg}(j)$ 为第 $j$ 台柴发的启停状态量,当 $S_{on,dg}$ 为1时,柴发为运行状态,当 $S_{on,dg}$ 为0时,柴发为停机状态。式(9)为系统采取传统跟网型储能时柴发开机方式约束, $k$ 为满足 $N-1$ 安全运行时的柴发台数;式(10)为系统采取APLL策略时柴发开机方式约束;式(11)为系统采取构网型储能时柴发开机方式约束。

(3) 储能系统运行约束,包含容量约束、充放电功率约束。

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

$$P_{ch}(t) \leq P_{ch,max} \quad (13)$$

$$P_{dis}(t) \leq P_{dis,max} \quad (14)$$

$$P_{ch}(t)P_{dis}(t) = 0 \quad (15)$$

$$S_{oc}(0) = S_{oc}(T) \quad (16)$$

式中: $S_{oc,max}$ 、 $S_{oc,min}$ 分别为储能装置荷电状态上、下限; $P_{ch,max}$ 为储能充电功率上限; $P_{dis,max}$ 为储能放电功率上限; $S_{oc}(0)$ 、 $S_{oc}(T)$ 分别为调度初始时刻和调度结束时刻的荷电状态。

调度模型包含较多寻优变量,存在非线性目标函数和多个非线性约束条件,求解较为困难。文中利用MATLAB/YALMIP工具箱进行优化问题建模,并利用CPLEX求解器进行求解<sup>[28-29]</sup>。

## 3 算例验证

### 3.1 基础数据

以某孤立海岛中2个微电网构成的微电网群作为研究对象,展开仿真分析。在 $MG_1$ 中存在柴发 $DG_1$ 、 $DG_2$ ,储能 $ES_1$ ,光伏 $PV_1$ ;在 $MG_2$ 中存在柴发 $DG_3$ 、 $DG_4$ ,储能 $ES_2$ ,光伏 $PV_2$ 。各微电网柴发、储能、成本参数见表1。现有柴发配置情况下,调度周期内不存在柴发一直停机。

表1 设备参数

Table 1 Parameters of equipment		
设备	参数	数值
ES <sub>1</sub> 、ES <sub>2</sub>	$E_{es,i}/(kW \cdot h)$	2 000
	$\eta_{ch}$	0.95
	$\eta_{dis}$	0.95
	$S_{oc}(0)$	0.4
	$S_{oc,min}$	0.3
	$S_{oc,max}$	0.95
DG <sub>1</sub> 、DG <sub>3</sub>	$P_{dg,low}/kW$	400
	$P_{dg,high}/kW$	1 000
	$a_{dg}$	0.000 8
	$b_{dg}$	0.15
DG <sub>2</sub> 、DG <sub>4</sub>	$c_{dg}$	30
	$P_{dg,low}/kW$	800
	$P_{dg,high}/kW$	2 000
	$a_{dg}$	0.000 8
	$b_{dg}$	0.15
	$c_{dg}$	30

该海岛的典型日负荷和光伏数据如图3所示。定义光伏渗透率为调度周期内光伏总发电功率与系统负荷总需求的比值。设置微电网优化运行算

例场景,不同场景负荷总需求量固定,光伏渗透率分别为 15%、30%、45%、60%、75%;设置微电网群优化运行算例场景,MG<sub>1</sub>、MG<sub>2</sub> 负荷总需求量相同, MG<sub>1</sub> 光伏渗透率为 15%, MG<sub>2</sub> 各场景光伏渗透率分别为 15%、30%、45%、60%、75%。

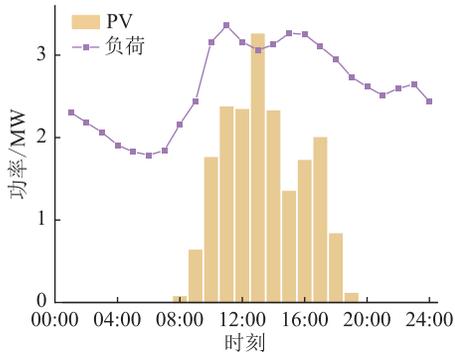


图3 微电网群典型日负荷和光伏出力曲线

Fig.3 Typical daily load and PV curves of microgrids

为评价计及动态稳定下不同柴发开机方式的微电网系统运行情况,进行经济性、环保性两方面评估。运行经济性评估指标计算见式(3),运行环保性评估指标计算见式(17)。此外,文中通过调度周期内充电电量简单评估调度策略对储能寿命影响。

$$r_{\text{aban}} = \frac{\sum_{t=1}^T P_{\text{aban}}(t)}{\sum_{t=1}^T P_{\text{pv}}(t)} \quad (17)$$

式中: $r_{\text{aban}}$ 为弃光率。

### 3.2 计及构网型储能稳定拓展的微电网运行分析

设置不同光伏渗透率,计及构网型储能稳定拓展的微电网调度结果如图4、图5所示。由图4可知,光伏渗透率从15%提高到30%时,系统运行成本快速下降,可降低15.79%,此时成本受储能稳定拓展约束影响较小;光伏渗透率大于45%时,成本降低缓慢,仅改变光伏渗透率对系统经济性影响不大,储能控制方式成为影响成本降幅的主要因素。光伏渗透率60%时,若储能控制策略由传统跟网型拓展为APLL控制,则柴发开机方式由2台同时运行转为允许1台柴发停机,可降低成本11.07%;若储能控制策略由传统跟网型拓展为构网型控制,则2台柴发均可停机,可降低成本15.65%。

由图5可知,随着光伏渗透率增加,弃光率先小幅增加,而后加大增幅。改变储能控制策略,弃光率增幅改变滞后。光伏渗透率大于30%时,基于传统跟网型的微电网弃光率增幅变大;光伏渗透率大于45%时,基于APLL控制或构网型储能的微电网弃光率增幅变大。光伏渗透率为45%时,若储能控制策略由传统跟网型拓展为APLL控制,则柴发开机方式由2台同时运行转为允许1台柴发停机,弃

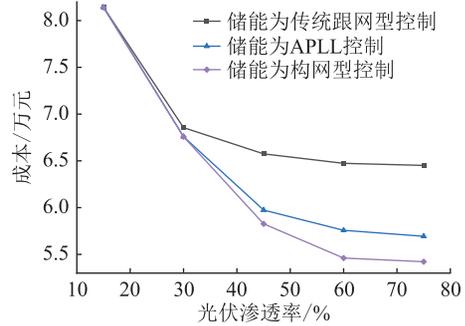


图4 计及构网型储能稳定拓展的微电网成本随光伏渗透率变化曲线

Fig.4 Variation curves of microgrid cost under different PV penetration rates considering stabilized expansion of grid-forming ES

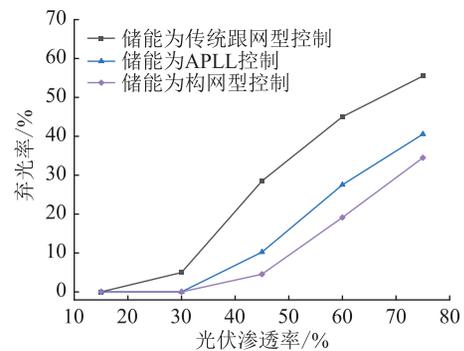


图5 计及构网型储能稳定拓展的微电网弃光率随光伏渗透率变化曲线

Fig.5 Variation curves of microgrid light abandonment rate under different PV penetration rates considering stabilized expansion of grid-forming ES

光率降低64.13%;若储能控制策略由传统跟网型拓展为构网型控制,则柴发开机方式由2台柴发同时运行转为2台柴发均可停机,弃光率降低84.08%。

图6、图7分别为光伏渗透率15%、45%下微电网运行结果,用于分析构网型稳定约束对微电网运行影响。

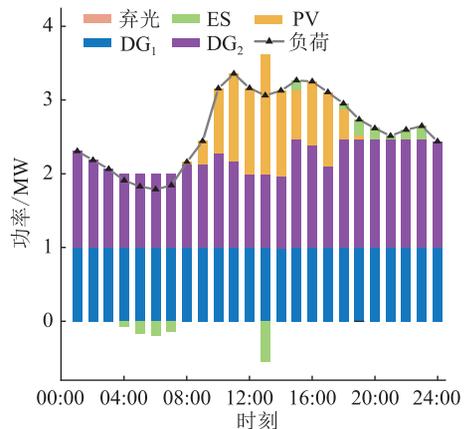


图6 光伏渗透率15%时微电网优化运行结果

Fig.6 Microgrid optimization operation results when PV penetration rate is 15%

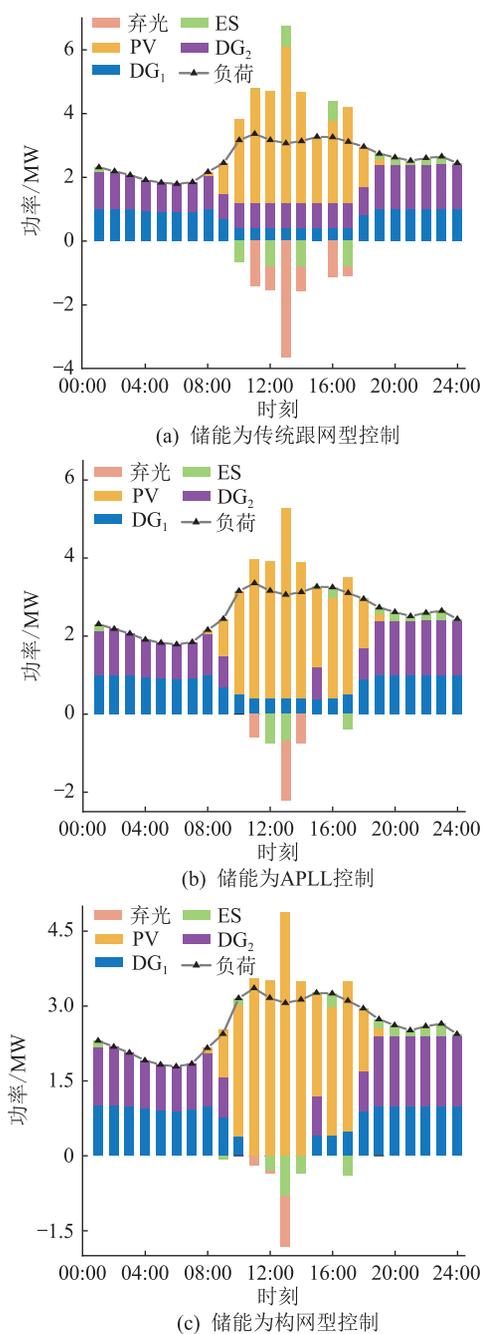


图7 光伏渗透率45%场景微电网优化运行结果  
Fig.7 Microgrid optimization operation results under 45% PV penetration rate

由图6可知,光伏渗透率较低时,储能稳定拓展约束对微电网运行无影响。此时,系统不存在弃光,2台柴发同时运行,柴发出力跟随净负荷波动。DG<sub>1</sub>运行在经济区间上限,DG<sub>2</sub>在负荷低谷时段(04:00—07:00)和光伏峰值时段(12:00—14:00)出力较低。与之相对应,储能装置在04:00—07:00和光伏峰值时段(12:00—13:00)充电,由于光伏在15:00时存在较大功率波动,储能此时放电。储能装置在18:00—23:00进行小功率放电,以达到调度周期内始末 $S_{oc}$ 一致。

由图7可知,随着光伏渗透率提高,储能稳定拓展约束显著影响微电网运行。此时,系统存在不同程度弃光。当储能控制为传统跟网型控制时,2台柴发须同时运行,在10:00—17:00,2台柴发均运行在经济区间下限,该时段储能充电,然而在12:00时储能 $S_{oc}$ 已达到最大值,13:00时系统既存在弃光,又存在储能放电,在19:00—24:00,储能放电以满足调度周期 $S_{oc}$ 始末状态一致约束,调度周期内,储能充电电量累计达3 077.63 kW·h。当储能控制为APLL控制时,允许1台柴发停机,10:00—17:00时,DG<sub>1</sub>以经济区间下限运行,DG<sub>2</sub>停机,仅在15:00光伏波动时运行在经济区间下限,储能充电,调度周期内,储能充电电量累计达1 834.72 kW·h。当储能控制拓展为构网型控制时,2台柴发均可停机,DG<sub>1</sub>在11:00—14:00停机,在10:00、15:00—17:00运行在经济区间下限,DG<sub>2</sub>在10:00—14:00、16:00—17:00停机,由于光伏于15:00骤降,DG<sub>2</sub>在15:00运行在经济区间下限,此时储能小幅度充电,调度周期内,储能充电电量累计达1 913.25 kW·h。可知,将跟网型储能拓展为构网型储能时,可降低柴发总出力,提高系统经济性。此外,调度周期内不同储能控制策略下储能充电电量相差不大,对储能寿命影响较小。

### 3.3 计及构网型储能稳定拓展的微电网群运行分析

设置不同光伏渗透率,计及构网型储能稳定拓展的微电网群调度结果如图8、图9所示。由图8可知,随MG<sub>2</sub>中光伏渗透率增加,系统成本先快速下降,后降速减慢。MG<sub>2</sub>中光伏渗透率从15%提高到30%,经济成本可降低8.49%,此时系统运行成本受储能稳定拓展约束影响较小;光伏渗透率大于45%时,系统运行成本降低缓慢,仅改变光伏渗透率对系统经济性影响不大,不同储能控制方式影响成本降幅程度。光伏渗透率为60%时,跟网型储能拓展为构网型储能,柴发由2台同时运行转为均可停机,可降低成本6.93%。由于微电网群存在功率互济,同一条件下,微电网群成本降幅小于单微电网运行成本降幅。此外,同一储能控制策略下,随联络线功率约束增大,系统成本降低。光伏渗透率75%、基于构网型储能控制的微电网群系统中,若联络线功率约束从0增加到1 200 kW,系统成本可降低10.44%。

由图9可知,随MG<sub>2</sub>中光伏渗透率增加,微电网群弃光率小幅度增加,而后加大增幅。构网型储能改造后,弃光率增幅滞后。基于跟网型储能的微电网群系统光伏渗透率大于30%,弃光率增幅变大;

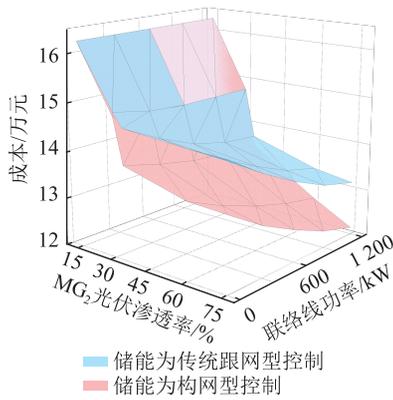


图 8 计及构网型储能稳定拓展的微电网群成本随光伏渗透率变化趋势

Fig.8 Microgrids costs under different PV penetration rates considering stabilized expansion of grid-forming ES

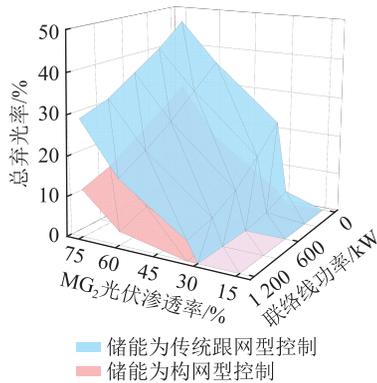


图 9 计及构网型储能稳定拓展的微电网弃光率随光伏渗透率变化趋势

Fig.9 Microgrids abandonment rate under different PV penetration rates considering stabilized expansion of grid-forming ES

基于构网型储能的微电网群系统光伏渗透率大于45%时,弃光率增幅变大。此外,同一储能控制策略,随联络线功率增大,系统弃光率降低。光伏渗透率75%、基于构网型储能控制的微电网群系统中,若联络线功率约束从0增加到1200 kW,弃光率降低约57.46%。

综上,增加联络线功率约束可降低系统运行成本、降低弃光率,当联络线功率过大时,降幅减小。此外,联络线功率过大可能在故障情况下对微电网造成冲击。

为分析构网型稳定约束对微电网群运行影响,图10、图11分别为MG<sub>2</sub>中光伏渗透率15%、45%时的运行结果,图中L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>分别为MG<sub>1</sub>、MG<sub>2</sub>负荷。

由图10可知,光伏渗透率较低时,储能控制策略对微电网群运行无影响。此时,系统不存在弃光,微电网内2台柴发均同时运行,柴发功率跟随净负荷波动。由于2个微电网净负荷需求相同,供受

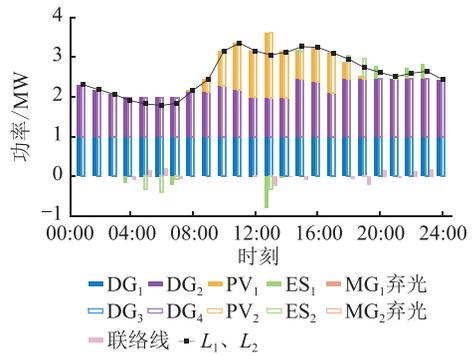
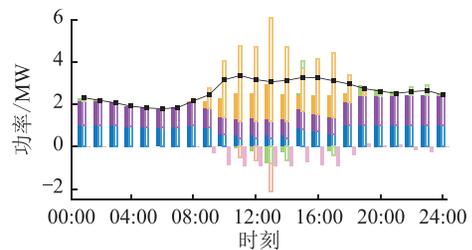
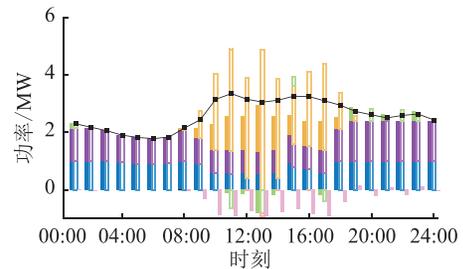


图 10 MG<sub>2</sub>中光伏渗透率15%时微电网群优化运行结果

Fig.10 Microgrids optimization operation results when PV penetration rate of MG<sub>2</sub> is 15%



(a) 储能为传统跟网型控制



(b) 储能为构网型控制

DG<sub>1</sub>、DG<sub>2</sub>、PV<sub>1</sub>、ES<sub>1</sub>、MG<sub>1</sub>弃光、DG<sub>3</sub>、DG<sub>4</sub>、PV<sub>2</sub>、ES<sub>2</sub>、MG<sub>2</sub>弃光、联络线、L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>

图 11 MG<sub>2</sub>光伏渗透率45%时微电网群优化运行结果

Fig.11 Microgrids optimization operation results when PV penetration rate of MG<sub>2</sub> is 45%

关系不明显, MG<sub>1</sub>、MG<sub>2</sub>运行情况与单微电网运行情况相近,详见3.2节分析。此外,由于不存在明显供受关系,联络线功率最大可达245.58 kW,远低于上限900 kW。由图11可知,随MG<sub>2</sub>中光伏渗透率提高,储能稳定拓展约束显著影响微电网运行,此时,系统存在不同程度的弃光,微电网群系统弃光量降低76.85%。由于MG<sub>2</sub>中光伏渗透率远大于MG<sub>1</sub>,供受关系明显。基于跟网型储能的微电网群联络线功率在光伏出力高峰时段(11:00—14:00、17:00)达最大限额900 kW,由MG<sub>2</sub>输出功率至MG<sub>1</sub>;基于构网型储能的微电网群联络线功率仅在11:00、13:00及17:00时段达到最大限额。从联络线功率角度,由跟网型储能拓展为构网型储能,联络线功率达上限运行时段少,有利于系统安全稳定运行。

为分析联络线约束对微电网运行影响,图 12 为 MG<sub>2</sub> 光伏渗透率 75%、构网型储能控制的微电网群运行结果。由图 12 可知,提高联络线功率约束可降低 MG<sub>1</sub> 中柴发出力,对 MG<sub>2</sub> 柴发出力影响不大。联络线功率约束为 600 kW 时,在 11:00—12:00, MG<sub>1</sub> 中 DG<sub>2</sub> 运行在经济区间下限, DG<sub>1</sub> 运行功率约为 784 kW。联络线功率约束为 1 200 kW 时,10:00—16:00, DG<sub>1</sub>、DG<sub>2</sub> 运行在经济区间下限, DG<sub>2</sub> 在 13:00 停机。储能充放电方面,增加联络线功率约束可增加 MG<sub>1</sub> 储能充电量,降低 MG<sub>2</sub> 储能充电量。联络线功率约束由 600 kW 提高至 1 200 kW, MG<sub>1</sub> 储能充电量增加 42.92%, MG<sub>2</sub> 储能充电量降低 20.41%。

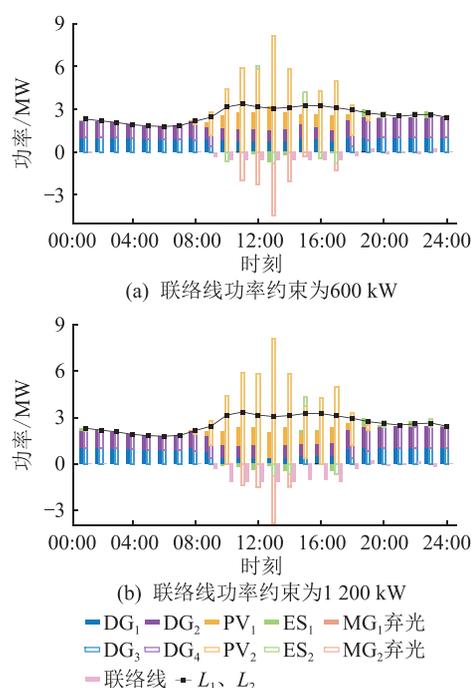


图 12 不同联络线功率约束下微电网群优化运行结果

Fig.12 Microgrids optimization operation results under different contact line power constraints

#### 4 结论

针对微电网群,文中提出一种计及安全稳定约束的微电网群源荷互动优化运行方法,并针对不同光伏渗透率下的微电网、微电网群进行算例验证,分析结果表明:

(1) 光伏渗透率低于 30% 时,系统运行成本受储能控制策略影响较小;光伏渗透率大于 30% 时,储能控制策略为运行成本的主要影响因素;光伏渗透率达 45% 时,由构网型储能稳定约束拓展至 2 台柴发均可停机,成本降低 15.66%;

(2) 当 2 个微电网存在明显供受关系时,提高联络线功率约束可降低系统运行成本、降低系统弃光率。由跟网型储能拓展为构网型储能,联络线功

率达上限运行时段少,有利于系统安全稳定运行。

文中优化调度模型未考虑联络线运行成本,未来将考虑包括功率联络线与非联络线互联(发电船、储能船)的功率互济技术,研究不同联络下微电网群运行情况。

#### 参考文献:

[1] 董旭柱,华祝虎,尚磊,等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术,2021,47(9):3021-3035.  
 DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.

[2] 齐宁,程林,田立亭,等. 考虑柔性负荷接入的配电网规划研究综述与展望[J]. 电力系统自动化,2020,44(10):193-207.  
 QI Ning, CHENG Lin, TIAN Liting, et al. Review and prospect of distribution network planning research considering access of flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 193-207.

[3] MA X Y, MU Y F, ZHANG Y, et al. Multi-objective microgrid optimal dispatching based on improved bird swarm algorithm [J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(2): 154-167.

[4] 郑宇丁,田桂珍. 直流微电网基于自适应下垂系数算法的多储能 SOC 均衡控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(2): 131-138.  
 ZHENG Yuding, TIAN Guizhen. SOC balancing control strategy based on adaptive droop coefficient algorithm for multi-energy storage units in DC microgrid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(2): 131-138.

[5] 马永翔,钱锴,闫群民,等. 孤岛直流微电网光储荷协调分层控制研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(1): 129-135.  
 MA Yongxiang, QIAN Kai, YAN Qunmin, et al. Research on coordination and hierarchical control of photovoltaic, storage and load in island DC microgrid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(1): 129-135.

[6] SHAHNIYA F, BOURBOUR S, GHOSH A. Coupling neighboring microgrids for overload management based on dynamic multicriteria decision-making[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 969-983.

[7] 徐明宇,郝文波,王盼宝,等. 基于动态随机模型的微电网群能量管理方法[J]. 电力工程技术,2022,41(5):140-148.  
 XU Mingyu, HAO Wenbo, WANG Panbao, et al. Energy management method of multi-microgrids based on dynamic stochastic model[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 140-148.

[8] 李志浩,倪筹帷,陈哲,等. 考虑信息交互的微电网群分布式经济调度方法[J]. 浙江电力,2023,42(10):8-16.  
 LI Zhihao, NI Chouwei, CHEN Zhe, et al. Distributed economic dispatching method for microgrid clusters considering information interaction[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(10): 8-16.

- [9] 陈哲,李山林,林达,等. 考虑拓扑切换暂态波动的微电网群分布式协同控制策略[J]. 浙江电力,2023,42(11):1-10.  
CHEN Zhe, LI Shanlin, LIN Da, et al. A distributed cooperative control strategy for MGC considering transient fluctuations in topology switching[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(11): 1-10.
- [10] 臧云帆,夏晟,李嘉文,等. 含共享储能的微电网群分布式鲁棒博弈优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(24):90-101.  
ZANG Yunfan, XIA Sheng, LI Jiawen, et al. A robust game optimization scheduling method for shared energy storage micro electric network group distribution[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 90-101.
- [11] 邢小文. 并网运行模式下微电网群分布式协调控制策略研究[D]. 西安:西北工业大学,2019.  
XING Xiaowen. Research on distributed coordination control strategy for microgrids community in grid-connected operation mode[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [12] 赵波,秦如雯. 微电网群体体系架构及能量协同优化运行的SoS方法初探[J]. 中国电机工程学报,2020,40(6):1886-1896.  
ZHAO Bo, QIN Ruwen. SoS architecting and operational coordination of microgrid cluster for optimal energy management [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1886-1896.
- [13] OLIVARES D E, CAÑIZARES C A, KAZERANI M. A centralized energy management system for isolated microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1864-1875.
- [14] 张志文,李华强. 考虑灵活性的孤岛微电网群分层能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(20):97-105.  
ZHANG Zhiwen, LI Huaqiang. A hierarchical energy management strategy for an island microgrid cluster considering flexibility [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 97-105.
- [15] 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.
- [16] RODRIGUEZ M A. Heuristic approach for configuration of a grid-tied microgrid in Puerto Rico [D]. Washington: Howard University, 2014.
- [17] ZHANG G L, SHEN Z R, LI Z P, et al. Energy scheduling for networked microgrids with co-generation and energy storage [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 7722-7736.
- [18] 陈阳,谢丽蓉,马兰,等. 考虑光伏预测误差兼顾平抑波动的双层储能运行策略[J]. 电力工程技术,2023,42(1):70-79.  
CHEN Yang, XIE Lirong, MA Lan, et al. Double-layer energy storage operation strategy that takes into account PV output error and smooths out fluctuations [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 70-79.
- [19] JU C Q, WANG P, GOEL L, et al. A two-layer energy management system for microgrids with hybrid energy storage considering degradation costs [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6047-6057.
- [20] 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.  
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.
- [21] 孟洪民,刘迪,李强,等. 考虑蓄电池健康的微电网群模型预测控制能量管理策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(6):88-95.  
MENG Hongmin, LIU Di, LI Qiang, et al. Energy management strategy based on model predictive control of microgrid cluster considering battery health [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 88-95.
- [22] 张长久,邬小波,谢小英. 基于GB/T 33593标准的DG低电压穿越输出特性研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(24):76-83.  
ZHANG Changjiu, WU Xiaobo, XIE Xiaoying. Research on low voltage ride through of DG characteristics based on GB/T 33593 standard [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 76-83.
- [23] SHUAI Z K, SHEN C, LIU X, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4648-4661.
- [24] 叶清泉,林厚飞,金建新,等. 考虑经济性和灵活性的海岛微电网优化调度策略[J]. 浙江电力,2022,41(3):54-64.  
YE Qingquan, LIN Houfei, JIN Jianxin, et al. An optimal dispatching strategy of island microgrid considering economy and flexibility [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(3): 54-64.
- [25] 叶林,王凯丰,赖业宁,等. 低惯量下电力系统频率特性分析及电池储能调频控制策略综述[J]. 电网技术,2023,47(2):446-464.  
YE Lin, WANG Kaifeng, LAI Yening, et al. Review of frequency characteristics analysis and battery energy storage frequency regulation control strategies in power system under low inertia level [J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 446-464.
- [26] SHANG L, DONG X Z, LIU C X, et al. Fast grid frequency and voltage control of battery energy storage system based on the amplitude-phase-locked-loop [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2): 941-953.
- [27] 吴雄,王秀丽,王建学,等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(28):1-8.  
WU Xiong, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. Economic generation scheduling of a microgrid using mixed integer programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 1-8.
- [28] 李英量,高兆迪,王康,等. 基于清洁发展机制的不确定性机组组合优化方法[J]. 太阳能学报,2023,44(3):368-375.

LI Yingliang, GAO Zhaodi, WANG Kang, et al. Uncertainty unit commitment optimization method based on clean development mechanism [J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44 (3):368-375.

[29] 程杉,汪业乔,廖玮霖,等. 含电动汽车的新能源微电网多目标分层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50 (12):63-71.

CHENG Shan, WANG Yeqiao, LIAO Weilin, et al. Bi-level multi-objective optimization of a new energy microgrid with electric vehicles [J]. Power System Protection and Control,

2022, 50(12):63-71.

作者简介:



马立红

马立红(1983),女,学士,高级工程师,从事电网规划、新型电力系统规划、微网规划设计相关工作(E-mail:254615302@qq.com);

梁亚峰(1982),男,硕士,高级工程师,从事电网规划设计相关工作;

程西(1986),女,学士,高级工程师,从事电网工程电气二次评审相关工作。

## Optimal operation of microgrids considering stabilized expansion of grid-forming energy storage

MA Lihong<sup>1</sup>, LIANG Yafeng<sup>1</sup>, CHENG Xi<sup>1</sup>, YANG Guanbao<sup>2</sup>, QIU Jianhong<sup>1</sup>, SHANG Lei<sup>3</sup>

(1. Hainan Energy Development Research Institute (Grid Planning and Design Centre), Haikou 570100, China;

2. Sansha Power Supply Bureau of Hainan Power Grid Co., Ltd., Sansha 573100, China;

3. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Grid-forming energy storage can not only have the conventional energy storage function, but also be able to improve the system inertia to meet the demand for rapid frequency and voltage regulation of microgrid with high renewable penetration. Therefore, the grid-forming energy storage technology is an important form to promote the development of microgrid technology. In this paper, to investigate the impact of energy storage control strategy, an optimal operation model of microgrids considering stabilized expansion of grid-forming energy storage is proposed. Firstly, a microgrid cluster architecture with two sub-microgrids is built. The efficiency model of each component of the microgrid cluster is determined, and different energy storage control strategies are analyzed. Based on the different energy storage control strategies, different start-up modes of diesel generators constraints are set. Secondly, with the operating cost of microgrids as the optimization objective and the diesel generator start-up mode constraints, the optimized operation model of microgrids considering stabilized expansion of grid-forming energy storage is constructed, and it is solved by the CPLEX solver. Finally, different photovoltaic penetration scenarios are set up for arithmetic. The simulation is conducted to verify that the grid-forming energy storage can effectively improve the microgrids operation economy and environmental protection. Meanwhile, appropriately increasing the microgrid cluster contact line power limit can improve the system operation economy.

**Keywords:** microgrid cluster; energy storage control strategy; grid-forming energy storage; grid-following energy storage; amplitude-phase-locked-loop; diesel generator

(编辑 方晶)