

引用格式:李可然,刘继春,杨瑞琳,等.计及下垂曲线与储能的孤岛微电网分级调度策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):223-230.

Citation:LI Keran,LIU Jichun,YANG Runlin,et al.Hierarchical dispatching strategy of islanded microgrid considering droop curve and energy storage [J].Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(2):223-230.

计及下垂曲线与储能的孤岛微电网分级调度策略

李可然¹,刘继春¹,杨瑞琳¹,刘易珠²

(1.四川大学电气工程学院,四川 成都 610065;2.国网湖南省电力有限公司,湖南 长沙 410004)

摘要:目前国内孤岛微电网运行调度中分布式发电(distributed generation, DG)电源被统一处理为传统发电机的 PQ 模型,与微电网实际情况不一致,同时较少有文献考虑电压潮流约束,为此,考虑下垂控制 DG 静态模型,计及潮流非线性约束,提出含可再生能源出力、储能充放电的孤岛微电网分级调度策略;同时,考虑 DG 下垂特性与潮流非线性约束,上级孤岛微电网经济、安全运行调度依靠集中优化控制器进行,控制下级 DG 各类静态参数及各储能装置充放电功率;下级依靠传统下垂控制在上级控制参数下实时调整有功、无功出力,维持系统频率、电压稳定。上述模型采用 YALMIP+IPOPT 程序进行求解,以 14 节点系统为例开展模拟仿真。仿真结果证明:所提模型及其求解方法可以有效求解孤岛微电网经济及安全运行调度模型,在稳定并提高系统电压水平、降低孤岛微电网运行费用方面具备显著优势。

关键词:孤岛微电网;分布式发电;储能装置;下垂控制;分级调度

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.025 **中图分类号:**TM73 **文章编号:**1673-9140(2024)02-0223-08

Hierarchical dispatching strategy of islanded microgrid considering droop curve and energy storage

LI Keran¹, LIU Jichun¹, YANG Runlin¹, LIU Yizhu²

(1.College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2.State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: At present, the operation dispatching of distributed generation (DG) in islanded microgrids is treated uniformly as PQ model of traditional generators, which is inconsistent with the actual situation of microgrids. At the same time, few literatures consider voltage and power flow constraints. Therefore, considering the static model of droop control for DG and taking into account the nonlinear constraints of power flow, a hierarchical scheduling strategy for islanded microgrids with renewable energy output and energy storage charging and discharging is proposed. Meanwhile, considering the droop characteristics of DG and the nonlinear constraints of power flow, the economic and safe operation scheduling of the superior island microgrid adopts the centralized optimal controller to control various static parameters of the inferior DG and the charging and discharging power of each energy storage device. The inferior level uses traditional droop control to adjust active and reactive power output in real time under the control parameters of the superior level to maintain system frequency and voltage stability. The above model is solved by YALMIP+IPOPT program, and simulation is carried out with a 14-node system as an example. The simulation results prove that the proposed model and its solution method can effectively solve the economic and safe operation scheduling model of the islanded microgrid; it has significant advantages in stabilizing and improving the system voltage level and reducing the operating cost of the islanded microgrid.

Key words: islanded microgrid; distributed generation; energy storage device; droop control; hierarchical dispatching

收稿日期:2023-04-01;修回日期:2023-05-17

基金项目:国家自然科学基金(U2066209)

通信作者:刘继春(1975—),男,博士,教授,主要从事电力市场、综合能源系统等研究;E-mail:1150515270@qq.com

配网出现故障后孤岛微电网为避免故障延伸或扩大,且能保障持续可靠供电,其自动脱离主网进入计划外运行下的电网,由可再生能源及储能装置的综合运用可以获得更好的收益^[1]。由于分布式发电(distributed generation, DG)出力不确定,因此对DG的控制显得尤为重要。下垂控制是国内外运用最多的一种DG控制方法,而微电网的优化运行调度中往往没有考虑DG的下垂控制特性。

文献[2]提出基于场景概率分布的拉丁超立方抽样方法,对微电网系统的可靠性评估进行了优化升级;文献[3]提出了动态分层优化调度策略,用于实现热电联供的微电网经济可靠运行;文献[4]以最大化微电网经济利益和居民满意度为目标,提出了微电网在线调度优化方法,运用了一种基于深度强化学习的技术,解决了在线经济调度问题;文献[5]建立了考虑多种源荷以及需求侧响应参与度不确定性的微电网鲁棒优化调度模型,针对需求侧响应方案实施中用户响应参与度存在不确定性的问题,引入了禀赋效应和环保意识对用户心理因素进行描述,用来解决孤岛微电网中不确定性优化问题;文献[6]提出一种微电网能量管理系统优化算法,然而未考虑安全性问题;文献[7]提出一种基于安全域的并网型微电网优化新方法,该方法量化了微电网运行状态的安全裕度,实现了微电网经济效益与安全裕度的综合优化。

上述微电网运行调度研究中仅考虑了微电网的经济性与环境性,未考虑电压稳定,即未考虑潮流非线性约束。另外在发电机建模方面,往往没有考虑孤岛微电网中DG的下垂控制曲线特性,即燃气轮机、燃料电池等DG通常会采用下垂曲线控制^[8-9],并对系统频率和电压不断进行调节。然而大多数文献均采用传统的有功-无功模型(PQ模型)进行简单处理,其设定的出力与电网运行实际情况不符,得不到满足电网潮流约束的解。

在传统的下垂控制下,各DG可通过下垂曲线系数按视在功率比进行有功及无功的配置,即通过就地的电压、频率变化信息实时调整出力,通信需求较为简单,但也存在以下问题:

1) 各DG出口电压虽然能够保持相对稳定,但因辐射状线路可能出现较多压降,末端节点将出现电压跌落等情况^[10-11];

2) 不同于主网参数受阻抗未解耦的影响,在系统电压和阻抗参数的综合影响下,各DG的无功出力将不按照下垂曲线进行配置^[10-11];

3) 传统下垂控制下由于没有微电网中央控制器(microgrid central controller, MGCC),各DG仅按照固定的下垂控制系数即最大容量之比来确定有功和无功出力,导致系统运行费用较高^[12-13]。这是因为没有考虑不同的DG其运行费用不同的原因。

另外,主从控制下的孤岛微电网需要强通讯联系,如果通讯中断,孤岛微电网就无法保持运行。因此,本文采用孤岛微电网分层优化调度,经济、安全调度方面依靠微电网上级MGCC进行控制;采用下垂曲线对下级有功、无功出力进行实施配置,分级调度的通讯强度需求较弱,MGCC故障时下级仍能保持基本运行。

1 孤岛微电网分级调度框架

如图1所示,上级为MGCC,下级对应控制DG的下垂控制器、控制储能装置的充放电控制器。

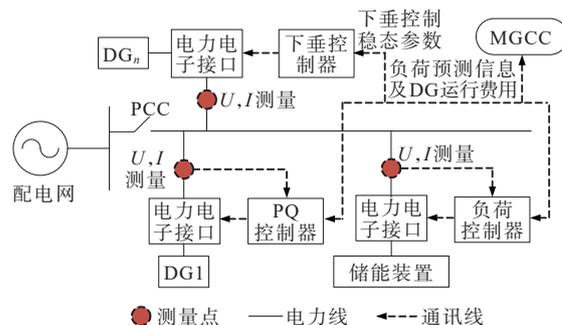


图1 计及下垂曲线的孤岛微电网分级调度

Figure 1 Hierarchical scheduling of islanded microgrid

上级控制包括:DG下垂控制器接收MGCC发送的各DG下垂曲线设定命令^[14],同时发送各DG的经济费用信息给MGCC;MGCC接受由储能装置充放电控制器发送的初始和最终荷电状态(state of charge, SOC)等,同时储能装置充放电控制器接收MGCC发出的充放电功率指令。

下级控制包括:各DG下垂控制器从MGCC获取经过非线性最优化问题求解器(interior point optimizer, IPOPT)优化算出的最利于经济性及安全性的下垂控制系数,然后根据下垂曲线实时配置其出口有功和无功,最后控制DG输出的无功和有功功率。目前下垂控制一般有2种: $P-f$ 和 $Q-U$ 、 $P-U$ 和 $Q-f$ ^[15],即通过跟踪频率控制有功、跟踪电压控制无功以及跟踪电压控制有功、跟踪频率控制无功等, $P-f$ 、 $Q-U$ 下垂曲线如图2所示,其控制框图如图3所示。

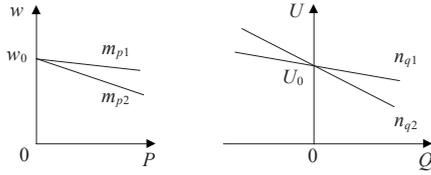


图 2 P-f、Q-U下垂曲线

Figure 2 Droop characteristic curves of P-f and Q-U

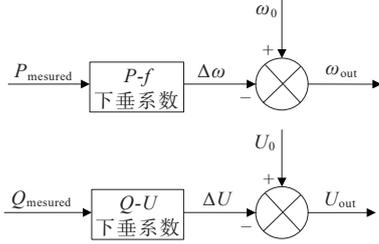


图 3 P-f、Q-U下垂控制框图

Figure 3 Droop control diagrams of P-f and Q-U

2 调度模型

孤岛微电网最重要的 2 个指标就是经济性和安全性,因此,本文模型的目标为经济消耗,约束中包含电压约束。

上级 MGCC 控制器以各 DG 经济消耗总和最小为目标:

$$\min \sum_{i=1}^{N_i} P_G^i(t) C_G^i + \sum_{C=1}^{N_c} \sum_{k=1}^{N_k} |P_C^k(t)| C_C^k \quad (1)$$

式中, C_G^i 为 DG $_i$ 的运行费用; N_i 为 DG 数量, $P_G^i(t)$ 为时段 t 节点 i 的 DG 输出有功功率; $P_C^k(t)$ 为第 k 个储能站的第 C 个储能装置在 t 时段的充放电功率; C_C^k 为第 k 个储能站的第 C 个储能装置的充放电运行费用; N_c 、 N_k 分别为第 C 个储能装置、第 k 个储能站数量; t 为调度时段。

主要限制条件有非线性潮流约束、下垂控制 DG 出力限制、下垂曲线控制参数限制、节点电压安全限制、充电功率限制以及 SOC 限制。

1) 非线性潮流约束。

$$\begin{cases} P_G^i(t) = P_{RL}^i(t) + \sum_C^{N_{SB}^i(t)} P_{SB}^i(t, C) + U^i(t) \cdot \\ \sum_{j=1}^{N_{bus}} U^j(t) [G_{ij} \cos \theta_{ij}(t) + B_{ij} \sin \theta_{ij}(t)] \\ Q_G^i(t) = Q_{RL}^i(t) + U^i(t) \cdot \\ \sum_{j=1}^{N_{bus}} U^j(t) [G_{ij} \sin \theta_{ij}(t) - B_{ij} \cos \theta_{ij}(t)] \end{cases} \quad (2)$$

式中, $P_{RL}^i(t)$ 为时段 t 节点 i 有功负荷; $P_{SB}^i(t, C)$ 为第 i 个储能站的第 C 个储能装置时段 t 的充电功率^[16-17]; $N_{SB}^i(t)$ 为时段 t 节点 i 储能装置集合; N_{bus} 为

时段 t 网络节点 i 集合; G_{ij} 为节点导纳矩阵的实部; B_{ij} 为节点导纳矩阵的虚部; $\theta_{ij}(t)$ 为支路 ij 在 t_k 时段的相角差; $Q_G^i(t)$ 为时段 t 节点 i 的 DG 输出无功功率; $Q_{RL}^i(t)$ 为时段 t 节点 i 无功负荷, $U^i(t)$ 为时段 t 节点 i 电压。

2) 下垂控制 DG 出力限制。

$$\begin{cases} P_G^i(t) = \frac{1}{m_p^i(t)} [\omega_0^i(t) - \omega(t)] \\ Q_G^i(t) = \frac{1}{n_q^i(t)} [U_0^i(t) - U(t)] \end{cases} \quad (3)$$

式中, $m_p^i(t)$ 为下垂控制下 DG $_i$ 有功静态下垂曲线系数; $n_q^i(t)$ 为时段 t 无功静态下垂曲线系数; $\omega(t)$ 、 $U(t)$ 分别为时段 t 的 DG $_i$ 实际输出电压角频率、幅值; $\omega_0^i(t)$ 、 $U_0^i(t)$ 分别为时段 t 的 DG $_i$ 空载角频率、空载电压幅值。

下垂控制下的 DG 出力也会有限制,根据物理原理可知,其应满足最大容量约束:

$$\begin{cases} P_G^i(t) \leq S_{Gmax}^i \\ Q_G^i(t) \leq \sqrt{S_{Gmax}^i - P_G^i(t)} \end{cases} \quad (4)$$

式中, S_{Gmax}^i 为 DG 最大视在功率^[18]。

3) 下垂曲线控制参数限制。

$$\begin{cases} \rho_G^i(t) = [\omega_0^i(t), U_0^i(t), m_p^i(t), n_q^i(t)] \\ \rho_{G,l}^i \leq \rho_G^i(t) \leq \rho_{G,u}^i \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\rho_{G,u}^i$ 、 $\rho_{G,l}^i$ 分别为下垂控制曲线参数的上限、下限。

4) 节点电压安全限制。

$$U_{min}^i \leq U^i(t) \leq U_{max}^i \quad (6)$$

式中, U_{min}^i 、 U_{max}^i 分别为节点 i 电压的下限、上限。

5) 充电功率限制。

$$-P_{max}^{dc} \leq P_{SB}^i(t, C) \leq P_{max}^{dc} \quad (7)$$

式中, P_{max}^{dc} 为储能装置最大充电功率; P_{max}^{dc} 为储能装置最大放电功率。

6) SOC 限制。

$$\begin{cases} S^i(t, C) = S^i(t - \Delta t, C) + \frac{\eta^i(C) P_{SB}^i(t, C) \Delta t}{B^i(C)} \\ S_{min}^i(C) \leq S^i(t, C) \leq S_{max}^i(C) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\eta^i(C)$ 为第 i 个储能站的第 C 个储能装置的充电效率; $S^i(t, C)$ 为时段 t 第 i 个储能站的第 C 个储能装置的 SOC; $B^i(C)$ 为第 C 个储能装置的电池容量; $S_{max}^i(C)$ 、 $S_{min}^i(C)$ 分别为第 C 个储能装置的最大、最小 SOC。

3 算例分析

3.1 测试平台与算例系统

本文所提模型中控制变量为储能装置充放电功率与下垂控制系数,均为连续变量,目标函数为系统运行费用,因此目标函数为线性型式;约束条件包含孤岛微电网的潮流方程,由此含有大量非线性成分,利用基于原始对偶内点算法的IPOPT软件进行求解^[19],可提高求解速度。

3.2 测试平台与算例系统

本文全球YALMIP建模平台^[20]研发了上述孤岛微电网分级调度模型,并通过国际通用的优化盒子OPTI Toolbox^[21-22]直接调用以内点法为核心、多种算法集合的IPOPT求解该模型。程序开发背景为MATLAB R2021b,OPTI Toolbox版本为v5.11,YALMIP版本为20220204,IPOPT版本为3.11.8,测试系统的计算机环境是操作系统为Win10 64 bit,2.7 GHz英特尔四核i7-CPU。如图4所示,采用14节点系统仿真论证所提孤岛微电网分级调度模型及相应求解方法的正确性。DG相关参数如表1所示,风电日出力曲线如图5所示,在14、9节点处分别接入一座蓄电池储能充电站,参数设置详见文献[23]。

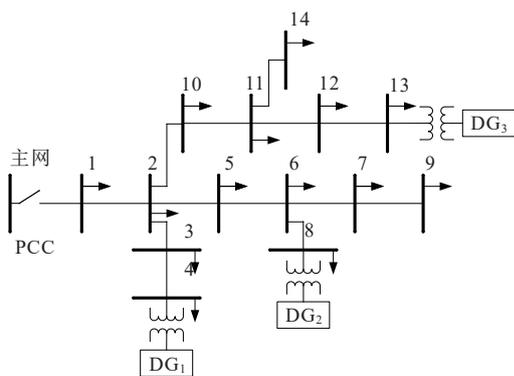


图4 14节点微电网系统结构

Figure 4 System structure of 14-bus microgrid

表1 DG参数

Table 1 Parameters of DG units

| DG | 类型 | 位置 | $S_{\max}/\text{p.u.}$ | 运行成本/(元/(kW·h)) |
|----|-------|------|------------------------|-----------------|
| 1 | 燃气轮机 | 4 | 1.0 | 0.258 |
| 2 | 燃气轮机 | 8 | 1.5 | 0.120 |
| 3 | 风力发电机 | 13 | 1.0 | 0.000 |
| 4 | 储能装置 | 9、14 | — | 0.005 |

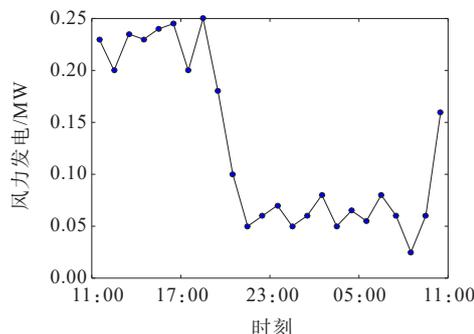


图5 风电日出力曲线

Figure 5 Daily output curve of wind power

3.3 仿真场景设置

设置无MGCC且无储能装置优化、有MGCC但无储能装置优化、无MGCC但有储能装置优化以及有MGCC且有储能装置优化这4种场景进行仿真。

场景1 无MGCC集中控制、仅有下级DG本身的下垂控制,常规无功、有功静态下垂系数设定为

$$\begin{cases} n_q^i(t) = \frac{|U_i|_{\max} - |U_i|_{\min}}{Q_{Gi, \max}} \\ m_p^i(t) = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{P_{Gi, \max}} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} m_p^1(t)P_{G, \max}^1 = m_p^2(t)P_{G, \max}^2 \\ n_q^1(t)Q_{G, \max}^1 = n_q^2(t)Q_{G, \max}^2 \end{cases} \quad (10)$$

由此,使得系统频率与电压保持在一定范围内。设定电压最大允许幅值偏差、频率偏差均为0.05 p.u.;固定下垂控制空载电压、空载角频率和幅值均为1.0 p.u.;设定场景1中储能装置不参与充放电,储能装置的 S_{\max} 、 S_{\min} 分别为0.95、0.20; B^i 为250 kW·h; η 为90%;设定储能装置最大充放电功率 P_{\max} 为50 kW,其中DG的有功和无功的最大容量按照式(4)而定。

场景2 上级MGCC对各DG进行经济性、安全性运行调度,下级利用本身的下垂控制配置出力功率,以平衡负荷变化,但储能装置仍然不进行充放电,其他参数设置参见场景1。

场景3 考虑储能装置充放电优化,不考虑MGCC,其他参数与场景1相同。

场景4 考虑储能装置充放电,其他参数与场景2相同。

3.4 仿真结果及分析

场景1下各DG有功出力曲线如图6所示,可知除风机(DG₃)按照预测曲线出力以外,DG₁、DG₂按照最大容量之比进行有功出力,即DG₂出力最大、DG₁出力最小。这是因为按照有功下垂控制特性,

DG 的有功出力与系统频率、下垂系数及参考频率有关,当参考频率、系统频率相同时,由最大容量决定下垂系数控制有功出力。此种场景由于没有考虑 DG 的运行费用,因此导致系统费用较高。

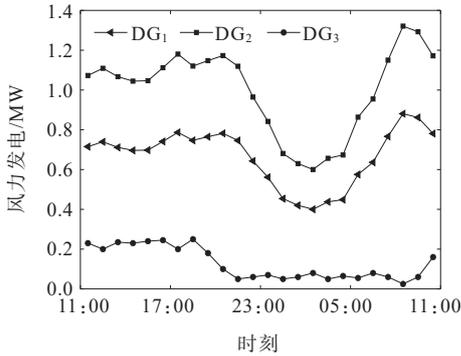


图 6 各 DG 有功出力曲线(场景 1)

Figure 6 Active power output curves of DG units (Case 1)

场景 2 下各 DG 有功出力曲线如图 7 所示,可知 DG₂ 在 23:00—次日 05:00 外,未按最大有功功率出力,其余时段均按照最大有功功率出力,约为 1.499 5 p.u.;在低谷负荷时段即当日 23:00—次日 06:00, DG₁ 不出力。这是因为 DG₂ 经济费用最小,而 DG₁ 经济费用最大,因此,该算法自动优先 DG₂ 输出有功功率。综上所述,引入上级中央控制器控制后,各 DG 的有功实际值会根据 DG 经济费用最小的目标进行控制。为此,当场景 2 引入上级中央控制器控制后,各 DG 有功实际值会根据 DG 经济费用最小的目标来控制,相比场景 1 减少费用共计 1 318.7 元。

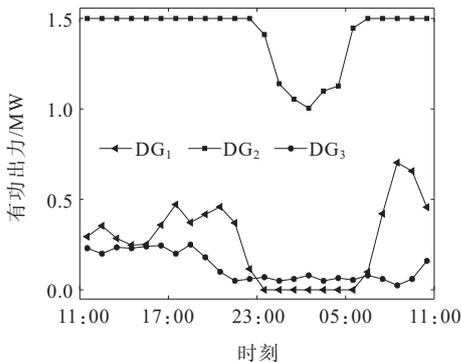


图 7 各 DG 有功出力曲线(场景 2)

Figure 7 Active power output curves of DG units (Case 2)

场景 3 下各 DG 有功出力曲线如图 8 所示,场景 3 比场景 1 下的 DG₂ 出力有所减少。此外,从图 9 可知储能装置充放电优化的作用较为明显,在负荷高峰时期进行放电、低谷时期进行充电,减少了 DG 的

出力,优化了负荷曲线,具有削峰填谷的作用。其余情况与场景 1 相同,都没有进行 MGCC 优化,仅靠 DG 下垂系数控制。此外,此种场景按照容量比进行出力,经济费用相对较高,由此可见 MGCC 控制的必要性。

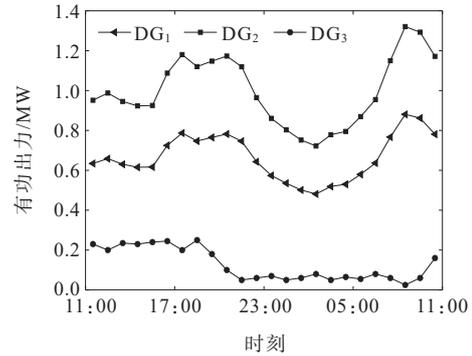


图 8 各 DG 有功出力曲线(场景 3)

Figure 8 Active power output curves of DG units (Case 3)

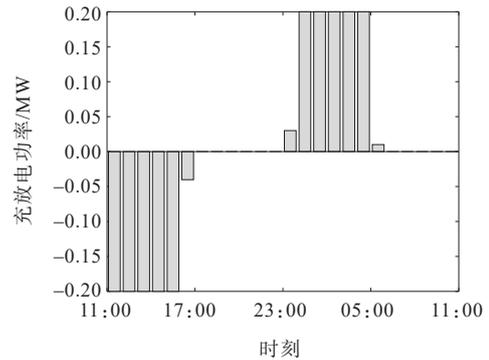


图 9 下储能装置充放电功率曲线(场景 3)

Figure 9 Charging and discharging power curves of energy storage device (Case 3)

综上所述,加入储能装置后场景 3 相比于场景 1,经济费用减少共计 169.2 元,相比于有 MGCC 控制但是没有储能装置优化的场景 2,费用增加了 1 149.5 元,由此可见 MGCC 的控制在一定程度上更为重要。

场景 4 下各 DG 有功出力曲线如图 10 所示,可知场景 4 下 DG₂ 除 24:00—次日 05:00 即负荷低谷时段以外,其余时段均按照最大有功出力,约为 1.499 5 p.u.;另外在这些时段中,场景 4 比场景 2 下的 DG₂ 有功出力明显要高。从图 11 可知,场景 4 下的储能装置需要恢复 SOC,选择在低谷负荷时段进行充电,这样导致低谷时段的负荷增高,而在负荷高峰时段进行放电,从而达到了平滑负荷曲线的目的。

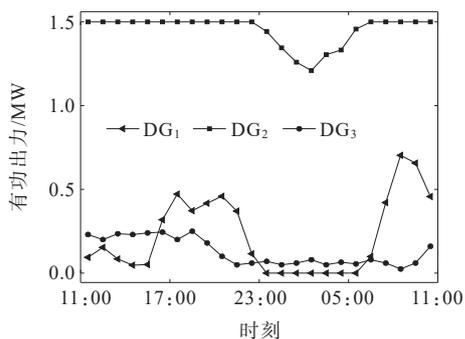


图10 各DG有功出力曲线(场景4)

Figure 9 Active power output curves of DG units (Case 4)

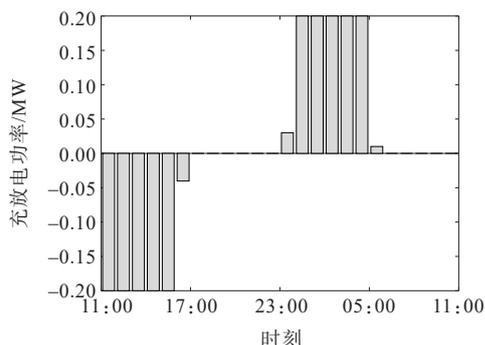


图11 储能装置充放电功率曲线(场景4)

Figure 11 Charging and discharging power curves of energy storage device (Case 4)

图10与图7对比后不难发现, DG_1 在负荷高峰时段即11:00—16:00,有功出力小于场景2下的出力,在23:00—次日05:00有功出力实际为零;此外,其余出力与场景2接近。这是因为中央控制器对储能装置进行算法优化调度后,负荷高峰时段利用储能装置优先进行放电,通过较小的储能装置充放电费用,降低整个孤岛微电网的运行费用,并提高供电可靠性、改善电压水平以及平滑负荷曲线。

综上,既考虑MGCC又考虑储能装置优化的场景4比场景1下总费用减少共计1482.9元,表明本文提出的计及下垂曲线的孤岛微电网分层调度策略是最为经济的调度方法。

对4种场景下的系统电压水平进行对比分析,4种场景下各DG无功出力曲线如图12~15所示。由图12可知,场景1下 DG_1 比 DG_2 各时段输出的无功功率大,与场景1下的有功出力呈现了相反情况。这是因为无MGCC控制下的DG出力仅按照下垂控制调整出力,然而下垂控制的无功出力与下垂系数、电压参考值及电压实际值有关,在下垂系数、电压参考值固定的情况下,电压实际值与系统阻抗参数有关,孤岛微电网的系统阻抗参数不能解耦,因此各DG没有按照下垂系数比进行出力。

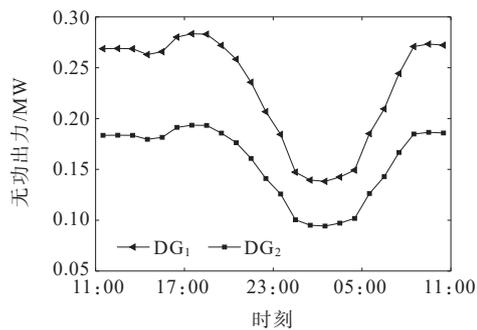


图12 各DG无功出力曲线(场景1)

Figure 12 Reactive power output curves of DG units (Case 1)

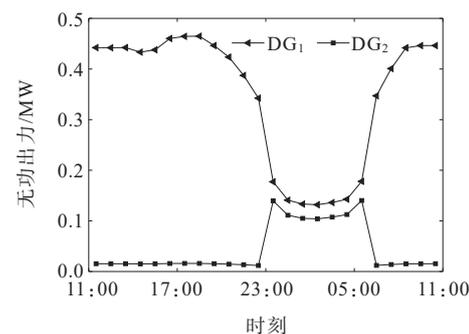


图13 各DG无功出力曲线(场景2)

Figure 13 Reactive power output curves of DG units (Case 2)

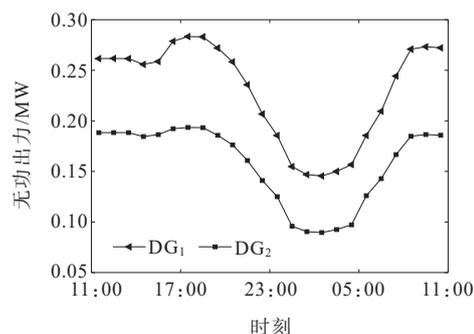


图14 各DG无功出力曲线(场景3)

Figure 14 Reactive power output curves of DG units (Case 3)

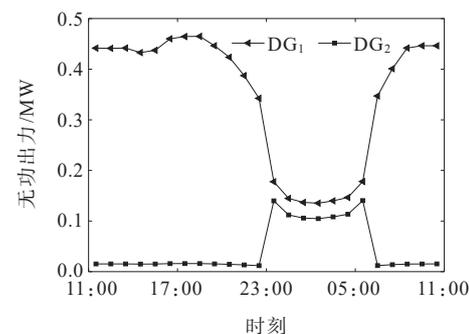


图15 下各DG无功出力曲线(场景4)

Figure 15 Reactive power output curves of DG units (Case 4)

由图13可知,场景2下由于分级调度的总目标在系统中无功运行费用最小,因此,运行费用最小

的DG₂一直按照最大有功出力进行,从而影其无功出力,即导致无功出力减小以满足最大容量约束。

由图14可知,场景1、3下的无功出力基本一致,储能装置只影响有功分布,对无功分布影响不大。

由图15可知,场景2、4下的无功出力走向基本一致,均受MGCC控制。这是因为储能装置只是在一定程度上改变了DG有功出力的分布,未影响无功出力;只是平滑了负荷曲线,未影响最大容量的约束,即未改变场景2中运行费用最高的DG比运行费用最低的DG出力高的现实情况。而场景1、3的各DG无功出力曲线基本相符,这是因为场景3增加的储能装置充放电优化只涉及到有功出力,对无功出力影响较小。

文献[23]中展示了4种场景下各节点在各时段的电压实际值曲线,可知场景2、4比场景1、3的各时段电压幅值大,这是因为下垂曲线控制系数固定而未采用MGCC控制的原因。场景4下的系统电压各时段均一致,是因为储能装置充放电有功出力起到了均衡的作用,对负荷进行了平滑。由于储能装置具有削峰填谷的作用,场景3、1的电压水平基本一致(场景3的电压略高于场景1)。由于场景2、4考虑了MGCC,因此无功出力更为优化,电压水平最高,相比于场景1、3电压高出约0.014 p.u.,而且分布更加均匀。

3种场景下的DG经济费用情况如表2所示,考虑中央控制器的场景2比场景1的DG总运行费用小,这是因为场景1下的下垂控制系数并未随着系统负荷的变化而变化,而且未考虑DG运行费用的优化。

表2 DG运行费用

| 场景 | DG运行费用 | | | 储能装置 运行费用 | 总费用 |
|----|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|---------|
| | DG ₁ | DG ₂ | DG ₃ | | |
| 1 | 4 126.9 | 2 879.3 | 0 | 0 | 7 006.2 |
| 2 | 1 633.8 | 4 053.7 | 0 | 0 | 5 687.5 |
| 3 | 3 879.2 | 2 756.1 | 0 | 202 | 6 837.3 |
| 4 | 1 365.1 | 3 956.2 | 0 | 202 | 5 523.3 |

进一步分析可得,考虑储能装置充放电的场景3比场景2的DG总运行费用高,这是由于中央控制器未对储能装置进行优化充放电调度。在负荷高峰时段由储能装置进行放电,提供有功出力,同时在负荷低谷时期由储能装置进行充电,恢复SOC,负荷高峰、低谷时段的DG运行费用的差值比储能装置运行费用高,因此场景2运行费用稍低。但考虑储能装置优化且上级MGCC对各DG进行经济

性、安全性运行调度的场景4比场景1、2费用都低,充分体现了MGCC的作用更大。

4 结语

本文在考虑孤岛微电网非线性潮流约束以及在下垂控制DG实际静态特性下,提出了含储能装置、风电的孤岛微电网分级调度策略,上级负责控制各DG下垂系数及储能装置的充放电功率,实现整体经济调度,下级则由各DG在下垂控制下实时配置有功、无功出力,实现孤岛微电网的分级优化协调调度。

以14节点系统为例,采用IPOPT求解方式对所提孤岛微电网分级调度模型进行求解,从有功出力的合理经济分配、电压水平的有效控制的角度验证了模型的正确性、高效性和有效性。仿真结果表明,同时考虑MGCC与储能装置优化的模型,其经济性与安全性最为理想。

参考文献:

- [1] 黎海涛,申保晨,杨艳红,等.基于改进竞争深度Q网络算法的微电网能量管理与优化策略[J].电力系统自动化,2022,46(7):42-49.
LI Haitao, SHEN Baochen, YANG Yanhong, et al. Energy management and optimization strategy for microgrids based on improved competitive deep Q-network algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(7):42-49.
- [2] 徐明忻,石勇,邢敬舒,等.基于多典型场景采样的微网可靠性计算方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(3):41-49.
XU Mingxi, SHI Yong, XING Jingshu, et al. Reliability calculation method of microgrid based on multi typical scene sampling[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022,37(3):41-49.
- [3] 齐志远,张如意,李晓文,等.热电联供微电网动态修正的分层优化调度[J].中国电机工程学报,2022,42(3):968-980.
QI Zhiyuan, ZHANG Ruyi, LI Xiaowen, et al. Hierarchical optimal scheduling with dynamic correction of microgrid combined heat and power[J]. Proceedings of the CSEE, 2022,42(3):968-980.
- [4] PINCIROLI L, BARALDI P, BALLABIO G, et al. Optimization of the operation and maintenance of renewable energy systems by deep reinforcement learning[J]. Renew Energy, 2021, 183:752-763.
- [5] 赵彭杰,吴俊勇,王焱,等.基于深度强化学习的微电网优化运行策略[J].电力自动化设备,2022,42(11):9-16.
ZHAO Pengjie, WU Junyong, WANG Yi, et al. Optimal operation strategy of microgrid based on deep

- reinforcement learning[J]. *Electric Power Equipment Automation*,2022,42(11):9-16.
- [6] 杨晓辉,袁志鑫,肖锦扬,等.考虑电池寿命的混合储能微电网优化配置[J].*电力系统保护与控制*,2023,51(4):22-31.
YANG Xiaohui, YUAN Zhixin, XIAO Jinyang, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage microgrid considering battery life[J]. *Power System Protection and Control*,2023,51(4):22-31.
- [7] 刘建伟,李学斌,刘晓鸥.有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J].*发电技术*,2022,43(3):476-484.
LIU Jianwei, LI Xuebin, LIU Xiaou. Distributed power generation access and energy storage configuration in active distribution networks[J]. *Power Generation Technology*,2022,43(3):476-484.
- [8] 李晓文,王旭,齐志远.氢电综合能源供应微电网的优化调度[J].*供用电*,2022,39(1):40-46.
LI Xiaowen, WANG Xu, QI Zhiyuan. Optimal scheduling of micro-grid for comprehensive hydrogen-electricity supply[J]. *Distribution & Utilization*,2022,39(1):40-46.
- [9] 周林,吕智林,刘斌.基于无功电流自适应下垂系数控制的多微网调度与控制协调运行[J].*智慧电力*,2022,50(11):41-47.
ZHOU Lin, LÜ Zhilin, LIU Bin. Coordinated operation of multi-microgrid scheduling and control based on reactive current adaptive droop coefficient control[J]. *Smart Power*,2022,50(11):41-47.
- [10] 王成山.微电网分析与仿真理论[M].北京:科学出版社,2013:119-122.
WANG Chengshan. Analysis and simulation of microgrids [M]. Beijing: Science Press, 2013: 119-122.
- [11] 赵峰,张帆,陈小强,等.基于VMD-APSO的风电场混合储能系统容量优化配置[J].*高压电器*,2023,59(6):120-127.
ZHAO Feng, ZHANG Fan, CHEN Xiaoqiang, et al. Optimal configuration of capacity of wind farm hybrid energy storage system based on VMD-APSO algorithm [J]. *High Voltage Apparatus*,2023,59(6):120-127.
- [12] ABDELAZIZ M M A, FARAG H E, EL-SAADANY E F, et al. A novel and generalized three-phase power flow algorithm for islanded microgrids using a Newton trust region method[J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2013,28(1):190-201.
- [13] 刘昊,贺翔,赵健,等.计及变流器热应力的比例PV微网功率分配控制[J].*电网与清洁能源*,2022,38(10):69-78.
LIU Hao, HE Xiang, ZHAO Jian, et al. Power allocation control for high proportional PV microgrid with consideration of converter thermal stress[J]. *Power System and Clean Energy*,2022,38(10):69-78.
- [14] NUTKANI I U, LOH P C, WANG P, et al. Cost-prioritized droop schemes for autonomous AC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*,2015,30(2):1109-1119.
- [15] 刘易珠.电动汽车与电网协调调度研究[D].长沙:湖南大学,2015.
LIU Yizhu. Research on dispatch of coordination between electric vehicles and power grid[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [16] 葛平娟,肖凡,涂春鸣.考虑故障限流的下垂控制型逆变器暂态控制策略[J].*电工技术学报*,2022,37(14):3676-3687.
GE Pingjuan, XIAO Fan, TU Chunming. Transient control strategy of droop-controlled inverter considering fault current limitation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2022,37(14):3676-3687.
- [17] 易文飞,卜强生.计及下垂控制的潮流计算研究综述[J].*电力工程技术*,2022,41(3):72-82.
YI Wenfei, BU Qiangsheng. Overview of research on power flow calculation with droop control[J]. *Electric Power Engineering Technology*,2022,41(3):72-82.
- [18] FAN B, LI Q, WANG W, et al. A novel droop control strategy of reactive power sharing based on adaptive virtual impedance in microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,2022,69(11):11335-11347.
- [19] 曹昕,韩民晓,张明洋.基于虚拟电阻的P-V下垂系数计算方法[J].*电力建设*,2022,42(4):105-112.
CAO Xin, HAN Minxiao, ZHANG Mingyang. A method for calculating P-V droop coefficients based on virtual resistance[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 42(4): 105-112.
- [20] WÄCHTER A, BIEGLER L T. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming[J]. *Mathematical Programming*,2006,106(1):25-57.
- [21] LÖFBERG G. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB[C]//IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design, Taipei, China, 2004.
- [22] CURRIE J, WILSON D I. OPTI: lowering the barrier between open source optimizers and the industrial MATLAB user[C]//Foundations of Computer-Aided Process Operations, Savannah, Georgia, USA, 2012.
- [23] 李可然. 论文附录 [EB/OL]. https://pan.baidu.com/s/1bk54CtqzW_rNxcz63fC9Rw?pwd=kv6e (提取码: kv6e), 2023-04-01.
LI Keran. Appendix to the paper [EB/OL]. https://pan.baidu.com/s/1bk54CtqzW_rNxcz63fC9Rw?pwd=kv6e (extraction code: kv6e), 2023-04-01.