

DOI: 10.7667/PSPC171345

含多微网的主动配电网分层调度策略

戴志辉, 陈冰研, 谢军, 王增平

(分布式储能与微网河北省重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 近年来, 可再生能源高渗透率接入电网面临着明显的弃风弃光现象。微网为可再生能源的充分利用提供了良好的平台, 主动配电网下多微网间的协调调度将进一步提高可再生能源的利用率。将分层控制理论与多微网并列运行的配电网架构结合, 提出一种以配网协调能力最强为目标的先配网后微网的两步动态分层调度策略。重点研究配网能量管理中心和微网 EMS 的信息交互过程, 旨在最大化利用可再生能源, 减少主动配电网与主网的交互功率, 同时保证微网运行的经济性。最后, 以含多微网的主动配电网为例分析, 验证所提出策略的正确性。与其他策略的对比体现了所提策略在充分利用可再生能源、减少主动配电网与主网的交互功率、缩短优化用时方面的优势。

关键词: 主动配电网; 多微网; 配网协调能力; 分层调度策略; 粒子群算法

Hierarchical scheduling strategy for active distribution network with multi-microgrids

DAI Zhihui, CHEN Bingyan, XIE Jun, WANG Zengping

(Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid (North China Electric Power University),
Baoding 071003, China)

Abstract: In recent years, renewable energy integration to power grids with high penetration is facing an obvious phenomenon of abandoning wind and solar energy. Microgrid provides a good platform for the full utilization of renewable energy, and the coordinated scheduling of multi-microgrids in Active Distribution Network (ADN) would further improve the utilization efficiency of renewable energy. Based on the combination of hierarchical control and the parallel operation of multi-microgrids in ADN, a two-step hierarchical dynamic scheduling strategy is proposed, in which microgrids are optimized after the ADN optimization to maximize their coordination capability. The information interaction process between the energy management center of the distribution network and that of the microgrid is also addressed to maximize the utilization of renewable energy and to reduce the interaction power between ADN and the main grid, as well as to ensure the economical operation of microgrids. Finally, an ADN with multi-microgrids is analyzed to verify the correctness of the proposed strategy. Comparison results show that the strategy has advantages in making full use of renewable energy, reducing scheduling time and interactive power between ADN and the main grid and shortening optimization time.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900203), Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2018502063), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2017MS096).

Key words: active distribution network; multi-microgrids; coordination ability of distribution grids; hierarchical scheduling strategy; particle swarm optimization (PSO)

0 引言

随着工业技术的高速发展, 全球面临着能源危

机和环境危机, 世界各国对环境保护、节能减排和可持续发展的要求显著提高^[1-2]。在此背景下, 风电和光伏等分布式电源的充分利用将有效解决发电能源结构单一、环境污染等问题。但是调度策略的不合理易导致风、光能源利用率较低^[3-4]。

微网为可再生能源的充分利用提供了良好的平台。文献[5-6]研究微网经济调度, 均考虑微网的经

基金项目: 国家重点研发计划专项课题(2016YFB0900203);
河北省自然科学基金项目资助(E2018502063); 中央高校基
本科研业务费专项资金资助(2017MS096)

济效益；文献[7]考虑混合储能的控制策略；文献[8]在调度的同时考虑了储能系统的健康状态，并将电池状态拟合到目标函数中；文献[9]利用合作博弈的方式对用户和储能系统进行联合优化。以上文献的研究主体是单个微网，未考虑微网上层的主动配电网的调度问题。主动配电网可通过灵活的网络拓扑结构管理潮流，实现对局部的 DER 进行主动控制和主动管理^[10]。研究主动配电网的调度对于充分利用可再生能源、实现源-网-荷的协调有着重要的意义。文献[11-12]研究配电网能量管理，但不包含多微网的优化分析；文献[13]对国内多微网系统的现状和前景进行了分析；文献[14]研究配电网的经济调度，考虑配网内部多微网并存情况，但未明确指出各微网之间的协调运行策略；文献[15]侧重研究配网内多微网的合作博弈关系以及运行行为分析。

文献[16-18]研究含多微网协调运行的配电网调度，侧重于微网优先，配网其次的优化顺序。其中，文献[16-17]仅有“微网-配网”两步调度优化，突出了微网调度的作用，配网仅起到功率再分配作用，并未参与到微网的调度中去，未从配网全局着眼，削弱了配网层对分布式电源的主动管理和控制能力，易出现配网内部分布式电源利用不充分、配网与上级主网间功率交互过大等弊端；文献[18]在“微网-配网”分层调度策略的基础上考虑可控分布式电源的可调整功率。并以“微网-配网-微网”的顺序依次进行优化。微网的初次调度能减少配网调度的压力，配网的全局优化可以得到每个微网间的交互功率。但此“三步优化”策略在每个调度周期内，整个配网内至少做三次优化，增加了调度的时间，加重了各层的调度压力。文献[19]在研究多微网优化的同时考虑了通信和控制的要求；文献[20]考虑了最小化发电和输电成本，但不限制多微网从上级主网的购电量。

本文提出一种以配网协调能力最强为全局优化目标的“配网-微网”的两步分层调度策略(Distribution-Microgrid Two-step Hierarchical Scheduling Strategy, DMTHSS)，并给定目标函数中参数值的选取方法。在调度时明确主动配电网对内部各微网的管理权，在每个调度周期内，首先进行配网全局优化，再进行微网局部优化。使配网能量管理中心(Energy Management Center, EMC)在调度中起主导作用，参与到微网 EMS 的调度中，保证在满足微网实际运行条件下进行配网全局优化。全局优化致力于提高可再生能源的利用率，协调多微网，减少主动配电网与上级主网的交互功率。最后，以含四

个微网的主动配电网为例，详细分析了每个时段微网实际可外送功率的取值范围，可再生能源利用情况，以及全天配网与主网交互功率情况，验证了调度策略的准确性；通过与其他方法对比，分析了本文调度策略的优势。

1 主动配电网调度框架

本文以包含多微网的主动配电网为研究对象，采用分层控制体系，如图 1。将主动配电网分为双层控制结构。第一层为配网 EMC，进行全局优化，负责协调多微网以及微网外独立源荷的调度；第二层为微网 EMS，依据配网下发的微网应外送功率情况，在保证微网经济性的前提下进行局部优化。

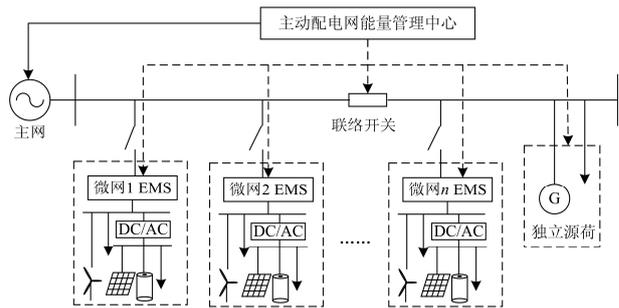


图 1 主动配电网分层控制系统

Fig. 1 Hierarchical control system of active distribution network

调度策略分为微网部分和配网部分。研究配网策略时主要考虑配网协调内部各微网及独立电源的能力；研究微网调度策略主要考虑微网的经济性。

2 微网调度策略

2.1 目标函数

微网作为分层优化的下层，需要满足配电网下发的指令，但各微网内风、光、柴、储、荷五部分由微网自身 EMS 负责调度和控制。下标为 i 的变量表示与微网 i 相关。净负荷功率 $N_i(t)$ 由风机、光伏出力及负荷需求确定。

在微网调度中，以柴油发电机的出力 $D_i(t)$ 和储能出力 $B_i(t)$ 为优化变量，以经济性最优为目标，分别对各个微网进行优化。目标函数如式(1)所示。

$$\min f_i = \min \{ F_{ES} + F_D + F_{buy} - F_{sell} \} \quad (1)$$

式中： F_{ES} 、 F_D 、 F_{buy} 、 F_{sell} 分别表示储能费用、柴油机费用、购电费用、售电收益。

2.2 约束条件

储能 $B_i(t)$ 的作用是尽可能补充或消纳不平衡功率，其能量平衡约束和充放电功率约束如式(2)和式(3)，柴油机的运行约束如式(4)。

$$\begin{cases} B_i(t) = N_i(t) + M_i - D_i(t) \\ B_{i-,min}(t) \leq B_i(t) \leq B_{i+,max}(t) \\ E_i(t+1) = E_i(t) - \alpha \Delta t B_i(t) \\ E_i(t) \leq E_{i,max} \end{cases} \quad (2)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1/\alpha_{d,i} & B_i(t) \geq 0 \\ \alpha_{c,i} & B_i(t) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_{down,i} \leq [D_i(t+1) - D_i(t)]/\Delta t \leq P_{up,i} \\ D_{i,max}(t) = \Delta t P_{up,i} + D_i(t-1) \\ D_{i,min}(t) = \Delta t P_{down,i} + D_i(t-1) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $B_i(t)$ 为储能出力; $E_i(t)$ 为储能的能量; Δt 为时间间隔; $D_i(t)$ 为柴油机出力; $E_{i,max}$ 为储能的容量; $B_{i-,min}(t)$ 、 $B_{i+,min}(t)$ 为储能在 t 时刻的最大充电和放电功率。式(3)中 α 为储能的充放电系数; $\alpha_{c,i}$ 、 $\alpha_{d,i}$ 分别为充电和放电效率; $N_i(t)$ 为净负荷, 表示仅在风光作用下负荷的缺失量; $P_{up,i}$ 、 $P_{down,i}$ 为柴油机爬坡比率。

另外, 微网自身实际运行情况决定其输出功率 $M_i(t)$ 满足约束, 如式(5)。

$$\begin{cases} M_{i,max}(t) = D_{i,max} + [E_{i,max} - E_i(t)]\alpha_{c,i}/\Delta t - N_i(t) \\ M_{i,min}(t) = D_{i,min} + [E_i(t) - E_{i,min}]/\alpha_{d,i}\Delta t - N_i(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $E_{i,max}$ 、 $E_{i,min}$ 为荷电状态限制的储能最大最小能量。

$$M_i(t) \leq \sum_{j=1, j \neq i}^n M_{ij,max} \quad (6)$$

式(6)反映了各微网间能量交互的线路容量约束。其中 $M_{ij,max}$ 表示微网 i 、 j 之间线路容量最大值。

3 配电网协调调度

3.1 目标函数

配电网 EMC 在每个调度时段初接收各微网 EMS 上传的净负荷、储能剩余能量、柴油机出力范围, 以及微网外独立负荷、独立电源出力范围后, 以配电网协调能力最强为目标进行全局优化。旨在充分利用配电网内部的可再生能源, 帮助主动配电网削峰填谷, 减少从上级主网的能量需求, 实现主动配电网对内部能量的主动管理和控制。

本文以 t 时刻配网等效输出功率 $P_{out}(t)$ 为优化变量, 构建配电网协调能力目标函数如式(7)。

$$\begin{cases} \min f_2 = \min \{k_1 P_{out}(t) + e^{-k_2 P_{out}(t)}\} \\ P_{out}(t) = \sum_{i=1}^n M_i(t) + \sum_{j=1}^p S_j(t) - \sum_{k=1}^q L_k(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $M_i(t)$ 为微网 i 的输出功率; $S_j(t)$ 为微网外独立电源 j 的输出功率; $L_k(t)$ 为独立负荷 k 的功率; n 、 p 、 q 分别为微网数、微网外独立电源数、微网外独立负荷数; $P_{out}(t)$ 为函数 $f_2=f(P_{out}(t))$ 的自变量, $P_{out}(t) < 0$ 表示配网从主网购电, $P_{out}(t) > 0$ 表示配网向主网售电; k_1 、 k_2 为比例系数, 根据函数 f_2 自身性质以及可再生能源情况, 其取值参考依据如下所述。

比例系数取异号时, 函数 f_2 的值在定义域内单调递增或单调递减, 显然目标函数最优时对应的 $P_{out}(t)$ 绝对值较大, 配网与主网交互功率较大, 不符合本文研究目标。

比例系数取同号时, 函数值 f_2 在定义域内先减后增, 目标函数最优时对应的 $P_{out}(t)$ 绝对值相对较小, 配网与主网交互功率较少, 符合本文研究目标。由函数自身性质决定, 当 k_1 、 k_2 差异不大时, 函数 f_2 在驻点两侧函数值差异较大。即 k_1 、 k_2 同为正时, 驻点右侧函数值相比左侧明显偏小, 而 k_1 、 k_2 同为负时, 驻点右侧函数值明显偏大; 因此不同的参数选择会影响配网与主网的交互功率的最优流向。当可再生能源渗透率相对较高时, 考虑尽量在配网内消纳风光能源, 剩余能量流向主网, 并尽量减少流向主网的能量, 此时 k_1 、 k_2 取正值较为合适; 当可再生能源渗透率较低且配网内电源单位发电成本较高时, 可依据实际情况考虑由主网供给一部分能量, 此时可考虑取 k_1 、 k_2 为负值。特别地, 当 $k_1 = k_2$ 时, 式(7)目标函数在 $P_{out}(t) = 0$ (即配网与主网无交互功率)时取得最优值。

综上, 式(7)可以充分反映主动配网系统的协调能力和主动管理能力, 发挥微网间的协调配合作用, 并能充分利用可再生能源, 降低弃风弃光率。

3.2 约束条件

配电网进行全局优化既要考虑微网外独立源荷实时运行约束, 又要满足多微网的实际运行情况。

独立负荷 $L_k(t)$ 与独立电源 $S_j(t)$ 影响着配网的调度。式中, $P_{s,max}(t)$ 、 $P_{s,min}(t)$ 表示微网外等效电源功率上下限, 如式(8)。

$$\begin{cases} P_{s,max}(t) = \sum_{j=1}^p S_{j,max}(t) - \sum_{k=1}^q L_k(t) \\ P_{s,min}(t) = \sum_{j=1}^p S_{j,min}(t) - \sum_{k=1}^q L_k(t) \end{cases} \quad (8)$$

综上, 配网全局优化中优化变量 $P_{out}(t)$ 需要满足的约束如式(9)。

$$\begin{cases} P_{\text{out}}(t) \leq P_{s,\text{max}}(t) + M_{i,\text{max}}(t) \\ P_{\text{out}}(t) \geq P_{s,\text{min}}(t) + M_{i,\text{min}}(t) \end{cases} \quad (9)$$

4 粒子群算法

本文采用粒子群优化算法求解配网优化调度问题。该算法收敛性较好,鲁棒性较强,非常适合求解电力系统优化调度问题。

粒子的初始位置和速度随机产生,并按照式(10)和式(11)更新位置和速度。

$$v^{t+1} = wv^t + c_1 \text{rand}(\text{pbest}^t - x^t) + c_2 \text{rand}(\text{gbest}^t - x^t) \quad (10)$$

$$x^{t+1} = x^t + v^{t+1} \quad (11)$$

式中: c_1 为自我认知因子; c_2 为社会认知因子; pbest^t 与 gbest^t 分别为 t 时刻的个体最优值和全局最优值; w 为惯性因子,表征对粒子速度的影响。

基于两步分层调度策略的 PSO 算法流程如下。

1) while $t \leq 24$ do

2) 微网 EMS 根据当前时段的风、光、荷数据计算 $N_i(t)$, 根据前一时段的柴油机最优出力得到本时段出力上下限 $D_{i,\text{max}}(t)$ 、 $D_{i,\text{min}}(t)$, 根据上一时段末的储能出力得到本时段初储能剩余电量 $E_i(t)$;

3) 配网 EMC 收集独立源荷系统中 $S_{j,\text{min}}(t)$ 、 $S_{j,\text{max}}(t)$ 和 $L_k(t)$ 以及微网 EMS 上传的 $N_i(t)$ 、 $D_{i,\text{max}}(t)$ 、 $D_{i,\text{min}}(t)$ 、 $E_i(t)$;

4) 配网 EMC 以等效输出功率 $P_{\text{out}}(t)$ 为优化变量,以协调能力最强为目标进行全局优化;

5) 计算粒子个体最优值和全局最优值,得到每个微网最优外送功率 $M_i(t)$ 和微网外独立电源出力 $S_j(t)$;

6) 各微网 EMS 接收配网 EMC 下发的 $M_i(t)$; 以柴油机出力和储能出力为优化变量,以每个微网的经济性为目标进行局部优化;

7) 计算粒子个体最优值和全局最优值,得到微网中柴油机最优出力 $D_i(t)$ 、储能最优出力 $B_i(t)$;

8) $t=t+1$, 并返回步骤 2);

9) End while

10) 得到主动配电网调度最优解,即每个微网外送功率、各微网内分布式电源以及微网外独立电源的出力情况。

5 算例分析

选取含四个微网的主动配电网为研究对象,由于配电网相比输电网覆盖区域较小,所在区域全天

风速和光照强度基本相同,本文算例 4 个微网的风、光发电量取相同值。其中风电总装机容量为 80 MW,光伏装机容量为 60 MW,柴油机总容量为 20 MW; 储能装置容量为 30 MWh,最大充放电量为容量的 20%,充电效率均取 0.94,放电效率均取 0.92,储能装置的荷电状态范围是[0.3,0.9],初始荷电状态为 0.4; 各微网外送功率最大值分别为 6 MW、5 MW、5.5 MW、6 MW。独立电源总容量为 30 MWh。粒子群算法的参数选取如下: 种群规模为 20,进化代数为 2 000, c_1 、 c_2 均为 2.05。算例中可再生能源渗透率较高,协调能力参数 k_1 、 k_2 均取 1。

计算采用 32 位 Windows7 操作系统,英特尔酷睿 i3 处理器, CPU2.2 GHz, 4 G 内存; 应用 Matlab2010 编程寻优。

风光发电量如图 2 所示,负荷数据如图 3 所示。

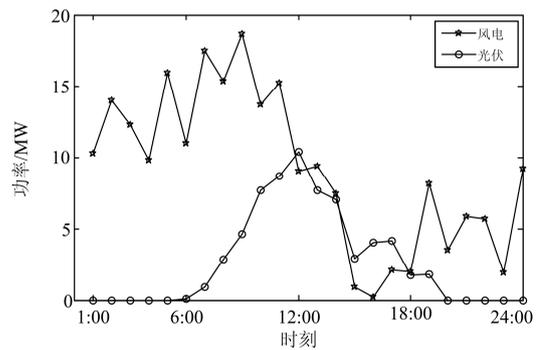


图 2 微网中风、光伏发电量

Fig. 2 Power generation of wind and solar energy in microgrids

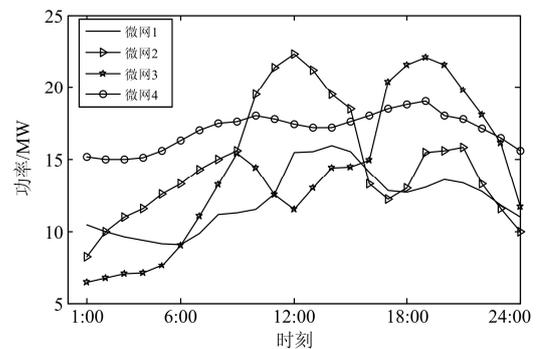


图 3 各时段微网负荷

Fig. 3 Load in each microgrid during each period

在调度过程中,微网实际可外送功率必须处于微网可输出限值和交互限值的交集部分。如图 4 所示,以微网 1 为例,在 1:00—7:00 时段和 12:00—24:00 时段,微网实际可外送功率值可从阴影部分选取。但在 6:00—12:00 时段,考虑到内部柴油机和储能情况(即使微网 1 中储能以最大功率充电,柴

油机出力取最小值, 仍有大量功率剩余), 实际可输出功率最小值超过以微网间联络线功率限值为约束的交互上限, 此时实际可外送功率只能取交互上限。

当然, 微网实际可外送功率亦有可能取交互功率下限, 如图 5 中微网 3 第 20:00 时段。此时, 即使微网 3 柴油机保持最大出力, 储能以最大功率放电, 风光出力全部被利用, 仍不能满足负荷需求, 且负荷缺失量超过交互功率下限。

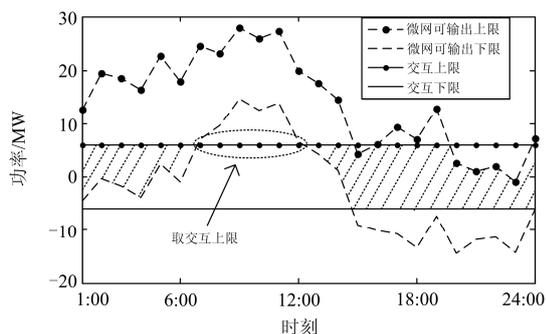


图 4 微网 1 实际外送功率

Fig. 4 Actual external delivery power of microgrid 1

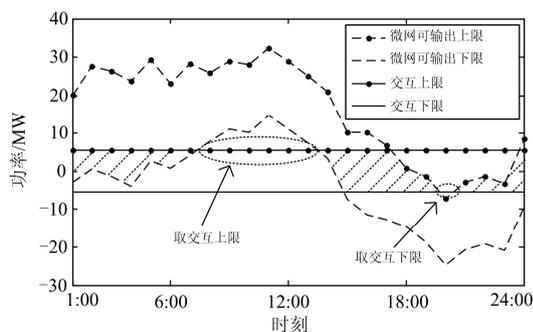


图 5 微网 3 实际可外送功率

Fig. 5 Actual external delivery power of microgrid 3

由于各微网所采用的算法和策略相同, 仅对微网 1 进行详细分析, 其他微网可同理分析。应用本文策略求解的调度结果如图 6 所示, 文献[16-17]所述方法求解得到的微网 1 调度结果如图 7, 应用文献[18]所述方法求解得到的微网 1 调度结果如图 8。

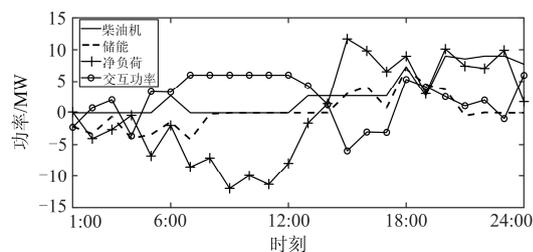


图 6 本文策略下微网 1 调度结果

Fig. 6 Scheduling results of microgrid 1 under the strategy proposed in this paper

图 6 中, 在 1:00—6:00 和 13:00—24:00 时段, 净负荷功率、柴油机出力、储能出力、交互功率在微网 1 中满足了功率平衡; 但在 7:00—12:00 时段, 微网 1 交互功率达到上限 6 MW, 风、光能源不能被充分利用。调度结果与图 4 外送功率的取值对应。

如图 7 所示, 在 1:00—6:00 时段, 交互功率均为负值, 储能充电功率相对较大; 7:00 储能接近充满, 对风光发电量的消纳有限, 导致弃风弃光量明显增加。在 21:00—22:00 时段, 微网优先满足自身利益, 柴油机出力相对较少, 微网外送功率几乎为零。

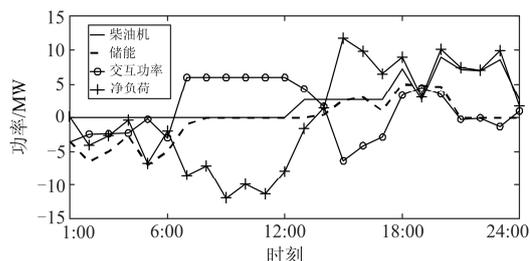


图 7 文献[16-17]策略下微网 1 调度结果

Fig. 7 Scheduling results of microgrid 1 under the strategy in [16-17]

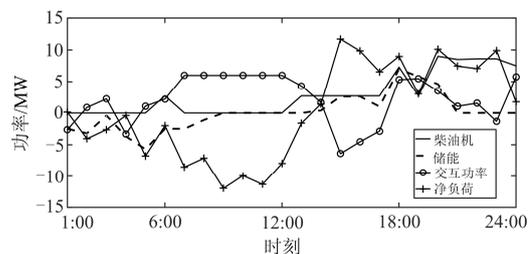


图 8 文献[18]策略下微网 1 调度结果

Fig. 8 Scheduling results of microgrid 1 under the strategy of literature [18]

图 8 所示调度结果与图 6 对比区别较小, 但在 7:00 和 8:00 储能充电功率的差别会导致可再生能源利用率的不同。

5.1 可再生能源利用率分析

本文方法与传统方法在可再生能源利用率方面的对比如图 9 所示。本文方法仅 5:00、6:00—12:00、18:00 出现微量弃风弃光现象, 其他时段均能保证风光能源的充分利用, 约为 99.84% 的风光利用率充分体现了 DMTHS 策略的优势。文献[16-17]的风、光利用率约为 98.42%。7:00 时刻可再生能源利用量明显低于本文策略。对比图 6 和图 7 分析可知, 文献[16-17]策略在 7:00—8:00 储能充电功率很小, 受交互功率上限限制, 弃风弃光量增加; 文献[18]风、光利用率约为 99.79%, 与本文仅在 7:00—8:00 略有不同。

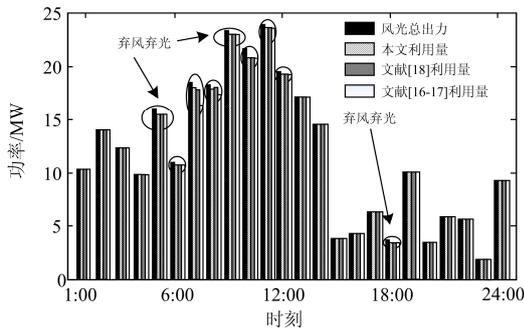


图 9 可再生能源利用率

Fig. 9 Utilization efficiency of renewable energy

5.2 主动配电网协调能力对比

本文策略与文献[16-17]策略(微网优先调度策略)、文献[18](三步调度策略)的配网外送功率对比如图 10。正值表示向上级主网售电，负值表示从主网购电。微网优先策略曲线中，在 1:00—19:00 时段，各微网向主网售电增加收益，但在 19:00 后微网调度时优先满足自身利益，柴油机出力较小，从主网购电量明显增加。而本文策略优先考虑配网协调能力，从主网购电量相对较少；文献[18]在配网全局优化后再次进行微网优化，也能保证配网的协调能力，但会增加优化用时。

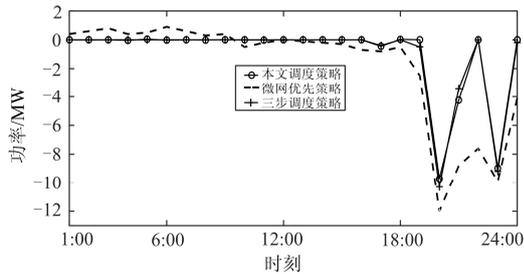


图 10 不同策略协调能力对比

Fig. 10 Coordination ability comparison between different strategies

5.3 优化时间对比

文献[18]提出的调度策略协调过程为“微网-配网-微网”三步优化，微网层需进行两次优化。如表 1 所示，其总优化时间明显超过本文提出的“配网-微网”两步调度策略。

表 1 不同策略的优化用时

Table 1 Optimization time of different strategies

策略	全天优化用时
“配网-微网”两步策略	246.21 s
“微网-配网-微网”三步策略	415.27 s

6 结论

本文提出一种基于分层控制理论的“配网-微

网”两步调度策略，以含 4 个微网的主动配电网为例，验证策略的可行性。主要结论如下：

1) “配网-微网”两步分层调度策略能充分利用可再生能源，明显降低弃风弃光率，发挥主动配电网对内部微网和独立电源的主动管理和协调能力，减轻配网对上级主网的依赖程度，即使主网发生故障断开时，主动配电网也可较为稳定地独立运行。相比于微网优先策略，本文在降低配网与主网交互功率以及提高可再生能源利用率方面有明显优势；相比于“微网-配网-微网”三步策略，本文在缩短优化时间方面有明显优势。

2) 配网内各微网的储能、柴油机容量配置不尽相同，反映了各微网实际运行情况的差异。微网单独运行时可能造成风光能源利用不充分，但多微网协调运行会有效避免出现此类现象。在配网的统一协调下，DMTHS 策略也保证了微网的运行利益。

参考文献

- [1] 罗金山, 路畅, 孟繁骏. 碳排放及燃煤约束下的电源规划及其效益评价[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 47-52.
LUO Jinshan, LU Chang, MENG Fanjun. Generation expansion planning and its benefit evaluation considering carbon emission and coal supply constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 47-52.
- [2] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-19.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-19.
- [3] 张明锐, 陈洁, 杜志超, 等. 考虑交互功率控制的微网经济运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1013-1023.
ZHANG Mingrui, CHEN Jie, DU Zhichao, et al. Economic operation of micro-grid considering regulation of interactive power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1013-1023.
- [4] LI Jinghua, WANG Sai, YE Liu, et al. A coordinated dispatch method with pumped-storage and battery-storage for compensating the variation of wind power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 21-34. DOI: 10.1186/s41601-017-0074-9.
- [5] 成思琪, 刘俊勇, 向月, 等. 微网中混储/柴协调运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 42-50.
CHENG Siqi, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. Research on optimal coordinated operation for microgrid with hybrid energy storage and diesel generator[J]. Power System

- Protection and Control, 2015, 43(7): 42-50.
- [6] 江岳春, 邢方方, 庞振国, 等. 基于机会约束规划的微网运行备用优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 100-106.
JIANG Yuechun, XING Fangfang, PANG Zhenguo, et al. Optimization configuration of operating reserve in microgrid based on chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 100-106.
- [7] 张蕴昕, 孙运全. 混合储能风光互补微网中的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 93-98.
ZHANG Yunxin, SUN Yunquan. Control strategy of a hybrid energy storage in wind-solar hybrid generation micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 93-98.
- [8] 王毅, 于明, 李永刚. 基于改进微分进化算法的风电直流微网能量管理[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2392-2397.
WANG Yi, YU Ming, LI Yonggang. Energy management of wind turbine-based DC microgrid using improved differential algorithm[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2392-2397.
- [9] 王树东, 杜巍, 林莉, 等. 基于合作博弈的需求侧响应下光储微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 129-137.
WANG Shudong, DU Wei, LIN Li, et al. Optimal allocation of photovoltaic energy storage microgrid under the demand side response based on cooperative game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 129-137.
- [10] 李鹏, 窦鹏冲, 李雨薇, 等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 8-16.
LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 8-16.
- [11] BORGHETTI A, BOSETTIM, GRILLO S, et al. Short-term scheduling and control of active distribution systems with high penetration of renewable resources[J]. IEEE Systems Journal, 2010, 4(3): 313-322.
- [12] 韩笑, 周明, 李庚银. 基于无迹变换随机潮流建模的主动配电网优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 9-17.
HAN Xiao, ZHOU Ming, LI Gengyin. Stochastic optimal dispatching of active distribution networks based on stochastic power flow modeling using unscented transformation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 9-17.
- [13] 许志荣, 杨苹, 赵卓立, 等. 中国多微网系统发展分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 224-231.
XU Zhirong, YANG Ping, ZHAO Zhuoli, et al. Analysis on the development of multi-microgrid in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 224-231.
- [14] NIKMEHR N, RAVADANEGH S N. Optimal power dispatch of multi-microgrids at future smart distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1648-1657.
- [15] 吕天光, 艾芊, 孙树敏, 等. 含多微网的主动配电系统综合优化运行行为分析与建模[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 122-132.
LÜ Tianguang, AI Qian, SUN Shumin, et al. Behavioural analysis and optimal operation of active distribution system with multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 122-132.
- [16] 何祥兴. 含多微网的配电网优化调度研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
HE Xiangxing. Study on the optimal dispatching for distribution network with multi-microgrids[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [17] 董若溪. 多微网与配电网协调运行与分层控制技术的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
DONG Ruoxi. Research on coordinated operation technique of microgrids and distribution based on hierarchical control[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [18] BUI V H, HUSSAIN A, KIM H M. A multiagent-based hierarchical energy management strategy for multi-microgrids considering adjustable power and demand response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1323-1333.
- [19] AREFIFAR S A, MOHAMED Y A I, EL-FOULY T. Optimized multiple microgrid-based clustering of active distribution systems considering communication and control requirements[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 711-723.
- [20] WANG Y, MAO S W, NELMS R M. On hierarchical power scheduling for the macrogrid and cooperative microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(6): 1574-1584.

收稿日期: 2017-09-09; 修回日期: 2018-03-06

作者简介:

戴志辉(1980—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制, 电力系统自动化; E-mail: daihuadian@163.com

陈冰研(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统调度与控制; E-mail: cbyncepu@126.com

谢军(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能变电站二次系统可靠性评估。E-mail: 1484115426@qq.com

(编辑 周金梅)