

DOI: 10.7667/PSPC161693

基于需求侧响应和储能电量预估的微网运行调度策略

王海燕, 同向前, 路 娇, 宋美艺

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 微网在孤岛运行期间, 若微电源和储能装置容量不足, 则无法保证网内所有负荷的正常供电。为提高微网供电可靠性, 同时尽可能利用可再生能源发电, 提出了一种基于需求侧响应和储能电量预估的微网运行调度策略。该策略针对孤岛运行期间的微网, 根据微源发电功率和负荷用电功率的超短期预测结果, 对储能功率和剩余电量进行预估, 结合预估结果和需求侧信息对各类负荷实施不同的调度策略。通过对可平移负荷的平移优化和对可中断负荷的适时逐级投切, 达到微网内重要负荷可持续供电和其他负荷停电时间最短的目标。仿真算例验证了所提策略的正确性和有效性。

关键词: 微网; 储能剩余电量; 需求侧响应; 负荷平移; 切负荷

Dispatching strategy of microgrid based on demand side response and energy estimation of energy storages

WANG Haiyan, TONG Xiangqian, LU Qiao, SONG Meiyi

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: It is hardly to ensure the power supply for all loads in microgrid with insufficient capacity of micro sources and energy storages during isolated mode. A dispatch strategy of microgrid operation based on demand side response and energy evaluation of energy storages is proposed to improve power supply reliability of microgrid and take advantage of renewable energy as far as possible. In this strategy, focused on microgrid operating in isolated mode, firstly, power and surplus energy of energy storages are estimated according to the supper short-term power prediction of micro sources and loads, and secondly, different scheduling strategies for all kinds of loads are implemented on the basis of the estimated result and demand side information. Through the optimization of shiftable loads and the shedding of interruptible loads with different grades, the goal for continuous power supply of the important loads and the shortest power-off time of rest loads is achieved. The simulation example verifies the correctness and effectiveness of the strategy proposed in this paper.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507139 and No. 51677151).

Key words: microgrid; surplus energy of energy storages; demand side response; load shifting; load shedding

0 引言

大力发展和利用可再生能源技术, 是满足不断增长电力需求、解决能源匮乏和环境污染问题的有效途径。作为分布式电源(DG)大规模接入电网的主要形式, 微网将分布式发电装置、负荷、储能以及控制装置有机结合接入中低压配电网中, 是分布式电源综合利用的一种有效途径^[1-3]。微网运行方式灵活, 既可与主网联网运行, 也可在主网故障或检

修时与其断开单独运行^[4-5]。由于微源发电量和储能电量的有限性和波动性, 孤岛运行的微网如何保证网内负荷的持续稳定供电, 是微网调度系统需要解决的关键问题。

传统的微网孤岛运行调度通常集中在发电侧, 即根据负荷需求预先安排 DG 出力或运行方式, 通过储能充放电来补充或消纳 DG 输出功率, 实现微网实时功率平衡, 当微网出现较大功率缺额时则实施减载^[6-8]。这种策略未能充分挖掘用户侧参与微网运行调度的潜力。

需求侧响应是用户改变固有用电习惯和模式的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51507139, 51677151)

供需互动形式,在电力系统实现供需动态优化平衡、提升电力资源优化配置水平等方面发挥了重要作用^[9-12]。对孤岛运行的微网,实施需求侧响应,引导用户理性用电,转移用电时段,优化负荷需求分布,可有效地提升 DG 和储能电量不足时负荷供电可靠性。

已有学者研究了微网并网运行时考虑需求侧响应的经济调度策略^[13-18],文献[13-14]分别对“荷—储”型和“源—荷—储”型微网的需求侧管理和运行优化方法进行了研究;文献[15]以提高负荷满意度和经济性为目标,研究了微网多时间尺度优化问题。文献[16]提出了风险约束下考虑需求侧响应的微网运行优化策略;文献[17]以电动汽车和信息中心为需求侧响应资源,对微网经济运行问题进行了研究;文献[18]提出了考虑 DG 出力随机性和负荷需求响应的微网运行调度模型。上述文献中引入需求侧响应的目的是提高微网运行的经济性,减少运行费用。但是,通过需求侧响应技术,以最大限度提高供电可靠性为目标的微网调度策略鲜有报道。

本文针对孤岛运行的微网,从微网实时发电量与用电量供需平衡的全局考虑,结合需求侧响应技术,提出了一种基于需求侧响应和储能电量预估的微网调度策略,可有效提高各类负荷的供电可靠性,并优先保证重要负荷的供电连续性。

1 需求侧资源及其响应技术

1.1 需求侧资源及其响应方式

微网孤岛运行时,需求侧资源主要包括各类负荷,根据用电性质和类型,将负荷分为3类:即重要负荷、可平移负荷和可中断负荷。重要负荷主要包括照明、安保和通信等基础用电设备,此类设备断电将会影响正常生活,因此不参与需求侧响应;可平移负荷,如洗衣机和电动汽车等,其运行起始时间可推迟或提前,但耗电量一定,具有负荷转移能力;可中断负荷,如空调、热水器、电视机等,其用电可随时中断,耗电量受负荷断电影响而减少。

引入需求侧响应后,微网框架结构如图1所示,各组成单元与能量管理系统通过电能流和信息流互联。能量管理系统根据预测结果、结合负荷需求侧信息,对 DG、负荷和储能制定相应的能量管理策略,并形成调度或控制指令。通过通信系统,能量管理系统可远程控制可平移负荷的启停和可中断负荷的投切;或者将调度指令以人机交互的方式发送给用户,由用户响应并执行。

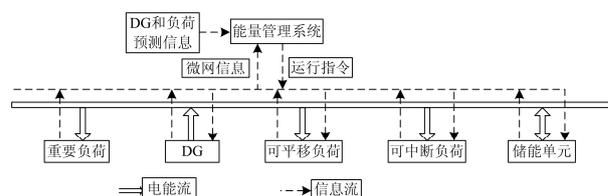


图1 基于需求侧响应的微网框架

Fig. 1 Framework of microgrid based on demand-side response

根据图1所示框架,设计了基于需求侧响应的微网能量管理系统,如图2所示。其中,对DG和负荷的调度和控制按时间尺度不同分为优化调度层和实时监控层。优化调度层主要根据功率预测和储能电量预估结果制定微网未来时段的运行计划,包括可平移负荷的优化调度和可中断负荷的投切策略;实时监控层则根据微网运行状态的实时监测信息,对可中断负荷进行实时投切控制。本文主要针对优化调度层中的可平移负荷优化调度和可中断负荷的投切策略进行研究。

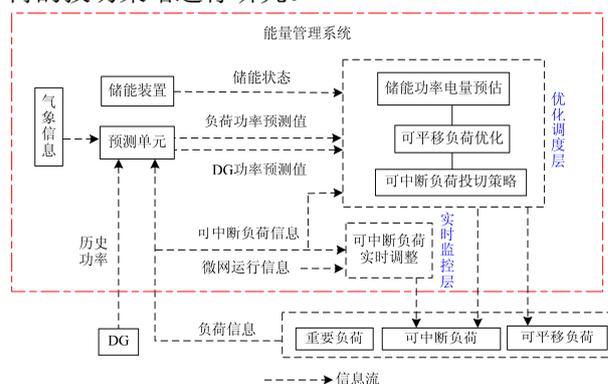


图2 基于需求侧响应的微网能量管理系统

Fig. 2 Microgrid energy management system based on demand-side response

对孤岛运行的微网,本文提出需求侧响应的主要目的是通过对原始负荷曲线的调整,使负荷与DG功率曲线在时序上更加贴近,从而减轻负荷高峰时段微网供电压力,提高微网运行可靠性和可再生能源利用率。以孤岛运行总时长作为需求侧响应周期,将其划分为若干响应时段 ΔT ,能量管理系统根据孤岛期间负荷和DG功率预测数据,对储能装置的放(充)电功率和电量进行预估,结合需求侧信息,优化确定可平移负荷的运行计划及可中断负荷的投切策略。

1.2 需求侧响应模型

本文研究的微网拓扑如图3所示,微网由光伏发电单元(Photovoltaic-PV)、蓄电池储能单元(battery-Bat)和若干负荷构成,将负荷分为重要负荷

P_A 、可中断负荷 P_B 和可平移负荷 P_C ，其中，可中断负荷 P_B 按照重要程度分为 n 级。

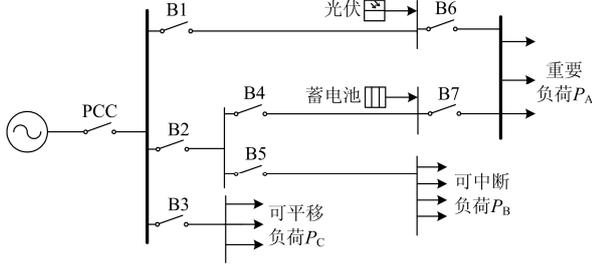


图 3 示例微网的拓扑结构

Fig. 3 Example of a microgrid topology

设微网孤岛运行起始时刻为 t_0 ，恢复并网运行的时刻为 t_{end} ，则计划停电时间 $T=t_{end}-t_0$ 。以 ΔT 为时间间隔，可将停电时间分为 N 段， $N=(t_{end}-t_0)/\Delta T$ 。

按照可平移负荷独立可控的断路器数目，可将每个时段内的可平移负荷分为若干个。在满足用电需求的前提下，每个可平移负荷的运行时间可推迟或提前一定数目的时间段。

若用 $P_{kpy}(i, j)$ 表示初始状态第 i 时段中第 j 个可平移负荷的功率，则在平移前，第 i 时段的可平移负荷的总功率 $P_C(i)$ 为

$$P_C(i) = \sum_{j=1}^{Num(i)} P_{kpy}(i, j), \quad i \in [1, N] \quad (1)$$

式中， $Num(i)$ 表示第 i 时段内可平移负荷的个数。

如果发生负荷平移，则平移后第 i 时段可平移负荷的总功率 $P'_C(i)$ 为

$$P'_C(i) = \begin{cases} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{Num(k)} P_{kpy}(k, j), & h_s(k, j) + k = i \\ 0, & h_s(k, j) + k \neq i \end{cases} \quad (2)$$

式中， $h_s(k, j)$ 表示初始第 k 时段中第 j 个可平移负荷 $P_{kpy}(k, j)$ 所要平移的时段数。 $h_s(k, j) > 0$ 表示向后平移， $h_s(k, j) < 0$ 表示向前平移。 $h_s(k, j) + k = i$ 表示初始在第 k 时段、但需要平移到第 i 时段的负荷 $P_{kpy}(k, j)$ ； $h_s(k, j) + k \neq i$ 表示初始在第 k 时段的负荷并不平移到第 i 时段。

2 微网孤岛运行策略

2.1 储能剩余电量预估

微网孤岛运行期间，根据 DG 和负荷的超短期预测功率 $P_{DG}(t)$ 和 $P_{LD}(t)$ ，可得储能装置的放(充)电预测功率为

$$P_{ES}(t) = P_{DG}(t) - P_{LD}(t) \quad (3)$$

则在任一时刻 t ，储能装置的当前电量为

$$W_{ES}(t) = W_{ES}(t_0) + \int_{t_0}^t P_{ES}(\tau) d\tau, \tau \in (t_0, t_{end}) \quad (4)$$

式中， $W_{ES}(t_0)$ 为储能装置在 t_0 时的电量。

在微网孤岛运行期间，要保证负荷的可靠供电，则必须同时满足下列约束。

$$|P_{ES}(t)| \leq P_{ES,lim} \quad (5)$$

$$W_{ES,min} < W_{ES}(t) \leq W_{ES,max} \quad (6)$$

式中： $P_{ES,lim}$ 为储能放(充)电功率限值(kW)，充电时 $P_{ES}(t) > 0$ ，放电时 $P_{ES}(t) < 0$ ； $W_{ES,max}$ ， $W_{ES,min}$ 分别为储能电量的上、下限值(单位为 kWh)。

对微网孤岛运行期间的任一时刻 t ，以 ΔT 间隔对储能装置的放(充)电功率 $P_{ES}(t)$ 和电量 $W_{ES}(t)$ 进行预估。若 $P_{ES}(t)$ 和 $W_{ES}(t)$ 均满足式(5)和式(6)，则表明微网功率平衡且储能装置可提供足够的电能，反之，则表明由于储能功率越限无法继续调节微网功率平衡，或其储电量不足以保证微网的电量需求。

2.2 基于储能剩余电量预估的微网运行策略

以图 3 所示微网为例，说明在各个时段对微网采取的运行策略。

如图 4 所示，负荷功率 $P_{LD}(t)$ 与光伏发电功率 $P_{DG}(t)$ 预测曲线的交点对应时刻分别为 t_1 、 t_2 ，根据储能功率和剩余电量预估结果将微网孤岛运行期间分为两种时段。

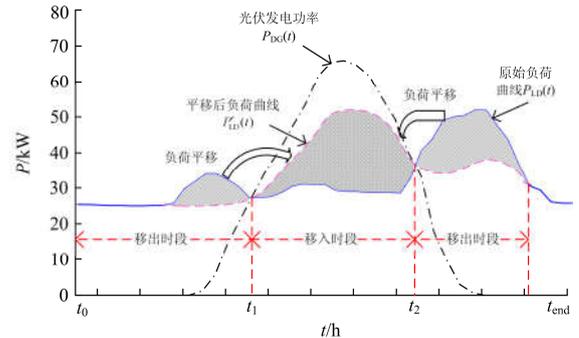


图 4 负荷平移过程示意图

Fig. 4 Process of load shifting

移入时段：即 $t \in [t_1, t_2]$ ，此时 $P_{DG}(t) > P_{LD}(t)$ ， $P_{ES}(t) > 0$ ，储能持续充电，剩余电量 $W_{ES}(t)$ 增大，当 $P_{ES}(t) > P_{ES,lim}$ 或 $W_{ES}(t) > W_{ES,max}$ 时，需限制 DG 出力以维持微网功率平衡，同时限制储能继续充电，将导致可再生能源发电量不能充分利用，造成“弃光”。

移出时段：即 $t \in [t_0, t_1]$ 或 $t \in [t_2, t_{end}]$ ，此时 $P_{DG}(t) < P_{LD}(t)$ ， $P_{ES}(t) < 0$ ，储能持续放电，剩余电量 $W_{ES}(t)$ 减小，当 $P_{ES}(t) < -P_{ES,lim}$ 或 $W_{ES}(t) < W_{ES,min}$ 时，储能将无法调节微网功率平衡或满足其电量需求，需切除部分负荷，进行“限电”。

微网孤岛运行期间，若 DG 发电量过剩与不足

的情况并存,其结果是既无法充分利用可再生能源,也不能满足负荷供电需求。因此,如果能将移出时段内的可平移负荷向移入时段平移,则既可以缓解移出时段内供电量不足的压力,也可以充分利用移入时段内过剩的发电量,负荷平移过程如图4所示。

负荷平移后,如果仍有部分时段储能放/充电功率或电量越限,则可切除可中断负荷或限制DG出力直至微网功率平衡。

3 微网优化调度

3.1 基于需求侧响应的负荷平移优化

3.1.1 优化指标

对孤岛运行的微网,负荷平移优化的目的是尽可能满足负荷供电需求,力求少切除或不切除负荷。在满足运行目标的前提下,考虑用户用电习惯,负荷平移的数量和时间应尽量少,且应保证平移前后,负荷曲线有足够的平滑度。

1) 负荷曲线峰谷分布优化

将用电高峰时段的可平移负荷向光伏发电充足时段平移,使光伏发电曲线和负荷需求曲线在时序上更贴近,即

$$\min C_1 = \sum_{i=1}^N |P_{pv}(i) - (P_A(i) + P_B(i) + P'_C(i))| \quad (7)$$

式中, $P_{pv}(i)$ 、 $P_A(i)$ 、 $P_B(i)$ 、 $P'_C(i)$ 分别对应优化后第 i 时段内光伏、重要负荷、可中断和可平移负荷的功率。

2) 减小实际平移的负荷数量

$$\min C_2 = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{Num(k)} P_{py}(k, j) \quad (8)$$

$$P_{py}(k, j) = \begin{cases} 0, h_s(k, j) = 0 \\ P_{kpy}(k, j), h_s(k, j) \neq 0 \end{cases}$$

式中, $P_{py}(k, j)$ 为初始第 k 时段中第 j 个可平移负荷的实际平移功率。

3) 优化负荷曲线的平滑度

$$\min C_3 = \sum_{i=1}^{N-1} \left| \frac{(P_A(i) + P_B(i) + P'_C(i)) - (P_A(i+1) + P_B(i+1) + P'_C(i+1))}{(P_A(i) + P_B(i) + P'_C(i)) + (P_A(i+1) + P_B(i+1) + P'_C(i+1))} \right| \quad (9)$$

式(9)表明负荷曲线两个相邻时段的起伏,可反映曲线的平滑度。

3.1.2 约束条件

1) 储能放(充)电功率和储电量约束

对可平移负荷进行平移优化后,储能功率和电量应尽量满足式(5)、式(6)约束。

2) 平移时段约束

考虑负荷的用电特性,对可平移负荷的平移时段进行约束。

$$h_{\min}(k, j) \leq h_s(k, j) \leq h_{\max}(k, j), \quad (k \in (1, N)) \quad (10)$$

式中, $h_{\max}(k, j)$ 、 $h_{\min}(k, j)$ 分别表示 $h_s(k, j)$ 的上、下限。

3.1.3 优化目标函数

微网负荷平移优化是含约束的多目标优化问题,对优先级不同的3个优化目标,选用不同的权重值进行复合加权后得到最终适应度函数F,并采用惩罚函数法处理约束条件,将多目标含约束的优化问题转化为无约束优化,储能放(充)电功率和储电量约束对应的惩罚函数分别为

$$C_4 = \begin{cases} 0 & -P_{ES,lim} \leq P_{ES}(i) \leq P_{ES,lim} \\ \sum_{i=1}^N (P_{ES}(i) - P_{ES,lim})^2 & P_{ES}(i) < -P_{ES,lim} \end{cases} \quad (11)$$

$$C_5 = \begin{cases} 0 & W_{ES,min} \leq W_{ES}(i) \leq W_{ES,max} \\ \sum_{i=1}^N (W_{ES}(i) - W_{ES,min})^2 & W_{ES}(i) < W_{ES,min} \end{cases} \quad (12)$$

由于微网可通过限制PV出力来避免储能充电功率和充电量越上限,故式中对此不作考虑。

综合考虑 $C_1 \sim C_3$ 各子目标和惩罚项 $C_4 \sim C_5$, 微网整体优化的适应度函数为

$$\min F = \alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2 + \alpha_3 C_3 + \lambda C_4 + \gamma C_5 \quad (13)$$

式中: $\alpha_1 \sim \alpha_3$ 为各优化分目标对应加权值; λ 和 γ 为惩罚因子。

3.1.4 优化流程

负荷平移优化是非线性离散的组合最优化问题,此类问题常包含大量的局部极值点,具有不可微、不连续、多维、含约束、高度非线性等特点^[19]。本文采用粒子群算法^[20]进行求解,优化流程如下所述。

1) 输入数据。包括各时段内DG和各类负荷预测功率、可平移负荷的个数及各自的平移时段数限值。

2) 确定可平移负荷移入移出时段。

3) 求解负荷平移过程。优化各时段中每个可平移负荷的平移时段数,并据此对各可平移负荷进行平移,求出平移后各时段中可平移负荷的总功率,最后输出平移后的负荷曲线。

3.2 基于储能剩余电量预估的可中断负荷投切策略

在微网孤岛运行期间,以下两种情况下需要考虑适时逐级切除可中断负荷。一是在对可平移负荷进行平移优化后,若仍存在储能放电功率越限或电量不足的时段,表明微网无法满足所有负荷需求,需进一步切除可中断负荷。二是根据储能功率和电量的初始预估结果,若某些时段中放电功率越限或电量不足,而其余时段中并未出现充电功率越

限或电量过剩, 表明微网没有多余电量供给可平移负荷, 则不必进行负荷平移, 直接切除可中断负荷。

在微网孤岛期间任一时刻 t , 若 $k(k \in n)$ 级可中断负荷投入运行, 则对时刻 $\tau(\tau \in [t, t_{\text{end}}])$, 储能功率预估值为

$$P_{\text{ES}}(\tau) = P_{\text{DG}}(\tau) - (P_{\text{A}}(\tau) + P_{\text{C}}(\tau) + \sum_{j=1}^k P_{\text{B}_j}(\tau)) \quad (14)$$

由式(14)和式(4)可得 τ 时刻储能的电量预估值 $W_{\text{ES}}(\tau)$, 可中断负荷投切流程如图 5 所示。

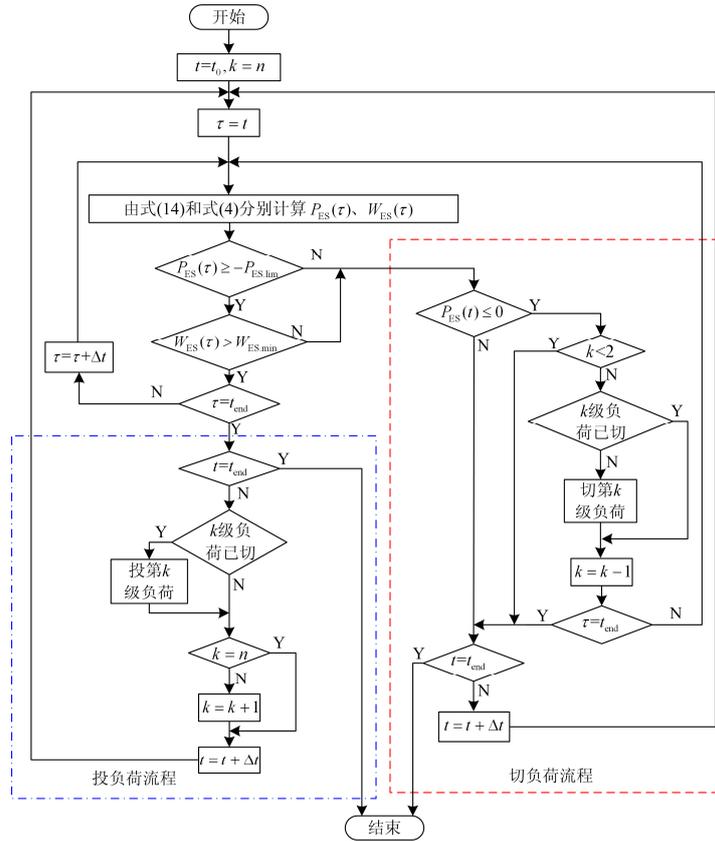


图 5 基于储能剩余电量预估的微网切负荷流程

Fig. 5 Process of microgrid load shedding strategy based on surplus energy evaluation of energy storage

4 算例分析

在 Matlab 环境下对本文提出的微网运行调度策略进行验证。微网孤岛运行时长 $T=24 \text{ h}$, 调度周期 $\Delta T=30 \text{ min}$, 则 24 h 包含 48 个调度周期。

4.1 微网参数

某光储微网拓扑如图 3 所示, PV 额定功率为 100 kW ; 夏季和冬季最大负荷分别为 200 kW 、 120 kW , 其中, 重要负荷 P_{A} 、可中断负荷 P_{B} 和可平移负荷 P_{C} 的比例分别为 20% 、 40% 和 40% ; Bat 额定容量为 200 kWh , 额定放(充)电功率为 35 kW 。选取功率和电量的基准值分别为 100 kW 和 200 kWh , 则 Bat 功率 P_{ES} 上下限标么值为 $-0.35 \leq P_{\text{ES}} \leq 0.35$, 荷电状态满足上下限约束 ($10\% \sim 90\%$), 设初始荷电状态为 70% , 优化过程及结果均以标么值表示。

对可平移负荷进行优化, 在满足优化约束的条

件下, 优先考虑减小实际平移的负荷数量和优化负荷曲线的平滑度, 各优化目标分量权重值分别为 $\alpha_1=0.1, \alpha_2=0.5, \alpha_3=0.4$, 惩罚因子 $\lambda=\gamma=100$, 由式(13)可得

$$\min F = 0.1C_1 + 0.5C_2 + 0.4C_3 + 100C_4 + 100C_5$$

在 3 种典型天气下, 由 PV 及各类负荷功率的超短期预测曲线, 根据所提出的调度策略, 对孤岛微网中的可平移负荷进行平移优化, 并对可中断负荷进行适时投切, 结果及分析见 4.2 节。

4.2 优化结果及分析

优化结果如图 6—图 9 所示, 其中, P_{pv} 、 P_{A} 分别表示光伏和重要负荷功率, P_{B} 、 P_{B}' 分别表示初始和投切后的可中断负荷功率, P_{C} 、 P_{C}' 分别表示初始和平移后的可平移负荷功率, P_{ES} 、 P_{ES}' 、 P_{ES}'' 分别表示初始、平移或切除负荷后、“平移+切除”负荷

后的储能功率需求, W_{ES} 、 W'_{ES} 、 W''_{ES} 分别表示初始、平移或切除负荷后、“平移+切除”负荷后的储能电量需求。

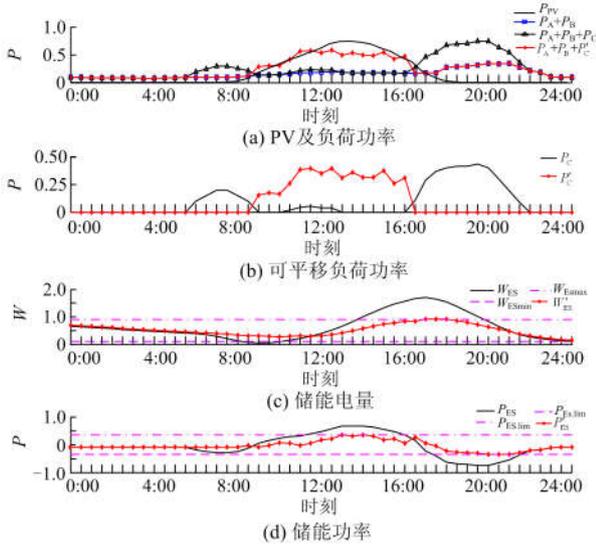


图 6 晴天负荷平移优化

Fig. 6 Load shifting in sunny day

对图 6—图 8 进行分析, 晴天和多云时, 在光照充足时段, 储能充电功率和电量预估值越上限, 即 $P_{ES} > P_{ES,lim}$, $W_{ES} > W_{ES,max}$, 而在光照不足时段, 储能放电功率和电量预估值越下限, 即 $P_{ES} < -P_{ES,lim}$, $W_{ES} < W_{ES,min}$ 。若将光照不足(负荷高峰)时段的 P_C 向光照充足(负荷低谷)时段平移, 在提高可再生能源利用率的同时也对负荷曲线进行了“削峰填谷”。

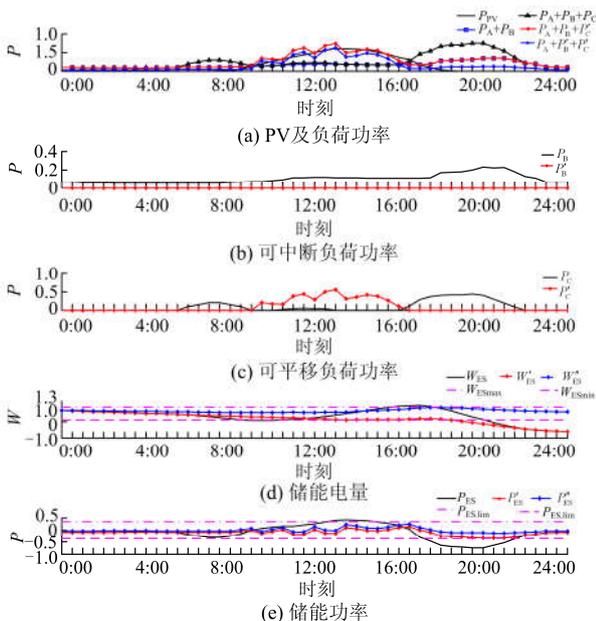


图 7 多云天负荷平移优化及切负荷

Fig. 7 Load shifting and shedding in cloudy day

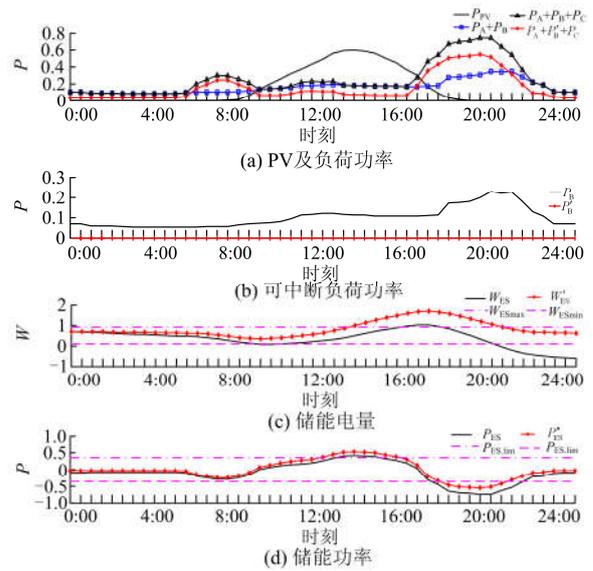


图 8 多云天直接切负荷

Fig. 8 Load shedding in cloudy day

晴天的优化结果表明, 平移 P_C 后, 储能功率和电量需求满足运行约束, 即 $P'_{ES} < P_{ES,lim}$ 且 $W_{ES,min} < W'_{ES} < W_{ES,max}$, 无须切负荷, 如图 6 所示。多云天的优化结果表明, 仅平移 P_C 后, 在孤岛运行至 18:00 后 $W'_{ES} < W_{ES,min}$; 若平移 P_C 后, 在 t_0 时刻切除 P_B , 则 $P''_{ES} < P_{ES,lim}$ 且 $W_{ES,min} < W''_{ES} < W_{ES,max}$, 微网可稳定运行至孤岛结束, 如图 7 所示。反之, 若仅切除 P_B , 则 P'_{ES} 和 W'_{ES} 仍不满足约束, 微网无法保证其余负荷供电, 如图 8 所示。

阴雨天的优化结果如图 9 所示, 由于光照不足, P_{pv} 较小, $P_{ES} < -P_{ES,lim}$, $W_{ES} < W_{ES,min}$, 且并未出现 $P_{ES} > P_{ES,lim}$ 或 $W_{ES} > W_{ES,max}$ 时段, 不满足负荷平移条件, 故只考虑切除 P_B 。在 t_0 时刻切除 P_B 后, 微网运行至 18:00 后出现 $P_{ES} < -P_{ES,lim}$ 及 $W_{ES} < W_{ES,min}$, 将无法继续稳定运行, 而若不切除 P_B , 则微网运行至 8:00 后即出现 $W_{ES} < W_{ES,min}$, 显然, 及时切除可中断负荷, 可延长其余负荷的供电时间。

将上述情况下, 平移和切除负荷前后的供电负荷、供电时间、储能功率和电量、PV 发电量及其利用率等指标进行对比, 结果如表 1 所示。

5 结语

针对微网孤岛运行期间可能存在发电量不能满足负荷需求的实际情况, 本文研究了基于需求侧响应和储能电量预估的微网孤岛运行调度策略, 得出如下结论。

表 1 3 种典型天气情况下平移切除前后情况对比

Table 1 Comparison before and after load shifting and shedding in three typical weather conditions

工况比较项	晴天			多云		阴雨	
	未平移	平移后	未平移切除	平移+切除后	仅切除后	未切除	仅切除后
供电负荷	$P_A+P_B+P_C$	$P_A+P_B+P'_C$	$P_A+P_B+P_C$	$P_A+P'_C$	P_A+P_C	$P_A+P_B+P_C$	P_A+P_C
供电时间	17.5 h	24 h	9 h	24 h	18.5 h	8 h	17 h
P_{ES}	充/放电均越限	满足约束	充/放电均越限	满足约束	充/放电均越限	放电越限	放电越限
W_{ES}	先不足后过剩	满足约束	先过剩后不足	满足约束	过剩	不足	不足
$W_{pv,max}/kWh$	253.3	253.3	177.3	177.3	177.3	35.5	35.5
W_{pv}/kWh	212.9	251.1	171.6	177.3	153.8	35.5	35.5
W_{pv}	84%	99%	97%	100%	87%	100%	100%

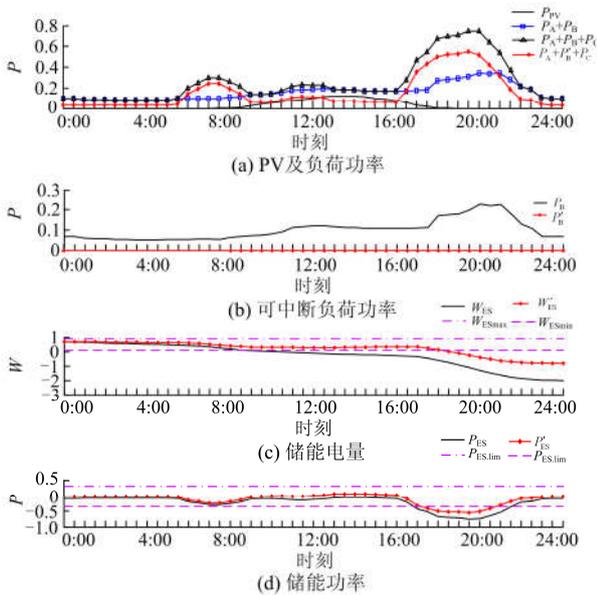


图 9 阴雨天直接切负荷

Fig. 9 Load shedding in rainy day

1) 基于需求侧响应和储能电量预估的平移优化策略, 将发电量不足时段的负荷平移至发电量充足时段, 既消除或减轻了负荷被中断供电的影响, 又充分利用了光伏发电量, 有效提高了可再生能源利用率。

2) 基于储能剩余电量预估的可中断负荷投切策略, 在孤岛运行期间对可中断负荷进行逐级适时投切, 尽可能地保证了包括重要负荷在内的各类负荷的可靠供电。

3) “先平移后切除”的运行策略有效改善了微网“弃光限电”问题, 且最大限度地延长了各类负荷供电时间, 提高了供电可靠性。

参考文献

[1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.

YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.

[2] CHAOUACHI A, KAMEL R M, ANDOULSI R, et al. Multi objective intelligent energy management for a microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1688-1699.

[3] 秦红霞, 王成山, 刘树, 等. 智能微网与柔性配网相关技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 17-23.

QIN Hongxia, WANG Chengshan, LIU Shu, et al. Discussion on the technology of intelligent micro-grid and flexible distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 17-23.

[4] 姜世公, 李琰, 王卫. 一种微网系统孤岛运行条件下的能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 130-135.

JIANG Shigong, LI Yan, WANG Wei. A novel power management strategy for microgrid on islanding mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 130-135.

[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] 王海燕, 同向前, 张永辉. 基于储能剩余电量预估的微电网切负荷策略[J]. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1431-1438.

WANG Haiyan, TONG Xiangqian, ZHANG Yonghui. Load shedding strategy of microgrid based on surplus energy evaluation of energy storage device[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(6): 1431-1438.

[7] RAGHAMI A, AMELI M T, HAMZEH M, et al. Primary and secondary frequency control in an autonomous

- microgrid supported by a load-shedding strategy[C] // 4th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, Tehran, Iran, 2013.
- [8] 沈臣, 顾伟, 吴志. 孤岛模式下的微电网低频减载策略分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 47-52.
SHEN Chen, GU Wei, WU Zhi. An under frequency load shedding strategy for islanded microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 47-52.
- [9] MOHSENIAN-RAD A H, WONG V W S, JATSKEVICH J, et al. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3): 320-331.
- [10] PALENSKY P, DIETRICH D. Demand side management: demand response, intelligent energy systems, and smart loads[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(3): 381-388.
- [11] RAHIMI F, IPAKCHI A. Demand response as a market resource under the smart grid paradigm[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 82-88.
- [12] 张颖, 容展鹏, 张宇雄, 等. 基于微电网的电网需求响应研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 20-26.
ZHANG Ying, RONG Zhanpeng, ZHANG Yuxiong, et al. Study of grid demand response based on micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 20-26.
- [13] 何舜, 郑毅, 蔡旭, 等. 基于荷-储型微网的需求侧管理系统运行优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 15-20.
HE Shun, ZHENG Yi, CAI Xu, et al. Optimal operation for demand side management based on load-storage microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 15-20.
- [14] 邢龙, 张沛超, 方陈, 等. 基于广义需求侧资源的微网运行优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 7-12.
XING Long, ZHANG Peichao, FANG Chen, et al. Optimal operation for microgrid using generalized demand side resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 7-12.
- [15] 曾君, 徐冬冬, 刘俊峰, 等. 考虑负荷满意度的微电网运行多目标优化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3325-3333.
ZENG Jun, XU Dongdong, LIU Junfeng, et al. Multi-objective optimal operation of microgrid considering dynamic loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3325-3333.
- [16] NGUYEND T, LE L B. Risk-constrained profit maximization for microgrid aggregators with demand response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 135-146.
- [17] CARPINELLI G, MOTTOLA F, PROTOD. Optimal scheduling of a microgrid with demand response resources[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2014, 8(8): 1891-1899.
- [18] TALARI S, YAZDANINEJAD M, HAGHIFAMM R. Stochastic-based scheduling of the microgrid operation including wind turbines, photovoltaic cells, energy storages and responsive loads[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(12): 1498-1509.
- [19] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [20] SAUER D U, WENZL H. Comparison of different approaches for lifetime prediction of electrochemical systems — using lead-acid batteries as example[J]. Journal of Power Sources, 2008, 176(2): 534-546.

收稿日期: 2016-10-12; 修回日期: 2017-02-03

作者简介:

王海燕(1980—), 女, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为微电网运行调度及能量管理; E-mail: wanghaiyan@xaut.edu.cn

同向前(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术电力系统中的应用; E-mail: lstong@mail.xaut.edu.cn

路 峤(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微网负荷预测及能量管理. E-mail: 373061036@qq.com

(编辑 周金梅)