

考虑需求侧响应的风电功率分层平滑方法

吴红斌, 董淑涛, 丁 明

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 从需求侧响应的角度出发, 提出源-荷-储的风电功率分层平滑方法。在建立风电分时电价模型和多时间尺度可平移负荷模型的基础上, 利用经济性启发式规则建立风电与负荷、储能互动的优化调度模型。根据可平移负荷的特性, 提出负荷与储能的分层优化策略, 并给出每层的目标曲线及求解的方法。通过算例系统, 验证和分析分层优化调度策略的有效性和平滑效果。

关键词: 风电功率; 负荷调度; 粒子群优化; 需求侧响应; 可平移负荷

中图分类号: TM715

文献标识码: A

0 引 言

大规模分布式电源(distributed generation, DG)的并网, 其间歇性和波动性对电网产生的影响引起了业界广泛关注^[1,2]。负荷资源与储能资源作为需求侧资源, 对维持电网安全、稳定地运行起到至关重要的作用。为充分利用电网中各种资源, 实现良性互动, 让用户侧更多地参与电网的优化运行, 应从需求响应(demand response, DR)的角度, 深入研究源-荷-储互动的电网系统优化控制方法^[3,4]。

负荷作为需求侧资源的重要组成部分, 可有效参与电网系统的运行优化。文献[5]采用二分法对负荷进行聚类, 实施电价机制引导用户参与电力系统的优化运行。文献[6]通过经济激励手段使用户负荷曲线更加贴近光伏曲线, 并对储能优化配置和满意度进行分析。文献[7,8]研究温度对负荷的影响, 提出利用热储能以及温控负荷来平滑微电网联络线功率波动的方法。文献[9]构建“源-荷-储”三维运行优化架构, 对负荷进行运行优化。随着电池储能系统(battery energy storage system, BESS)应用越来越广泛^[10,11], 利用 BESS 技术进行负荷优化, 为平滑可再生能源出力波动提供一种新的思路。

本文以风电功率的波动性为例, 从需求侧响应的角度出发, 提出分层调度可平移负荷, 降低联络

线上风电输出功率波动性的方法。通过建立源-荷-储互动的分层优化模型, 基于粒子群算法将全天负荷曲线及储能装置运行方式进行优化, 使负荷曲线更加贴近风力机出力曲线, 从而减小风电功率输出的波动性, 并通过算例分析讨论负荷优化对风电输出功率波动性的影响和经济性的影响。

1 需求侧资源模型

1.1 风电功率波动平抑系统的结构

风电功率平抑系统的结构如图 1 所示, 主要包括风电机组、储能装置、参与需求响应的负荷群、风电预测中心、调度中心以及优化中心。

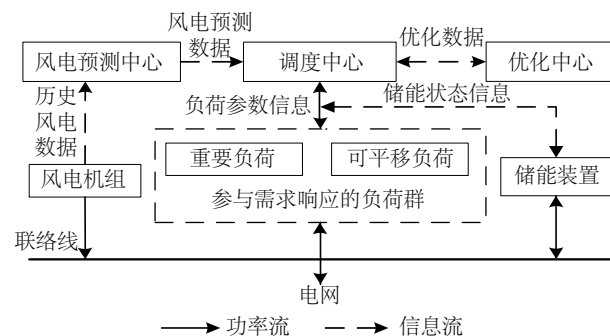


图1 风电功率平滑系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of smoothing wind power system

风电机组通过联络线向电网中不参与需求响应的负荷群送电, 同时将风力机出力数据发送给风

收稿日期: 2016-08-20

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0901100; 2016YFB0901101)

通信作者: 吴红斌(1972—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事分布式发电微电网技术方面的研究。hfwhongbin@163.com

电预测中心；风电预测中心将预测的风力机出力数据发送到调度中心；调度中心根据优化结果对负荷群、储能装置进行调度；参与需求响应的负荷群将负荷信息发送到调度中心，由调度中心进行统一调度，优化调度后的负荷群消纳联络线上的风力机出力；储能装置根据优化后调度中心的信息设置充放电状态，向联络线释放或者吸收功率。

1.2 分时电价的模型

需求响应常通过价格信号引导用户改变自身的用电方式，减少或者推移某时段的用电负荷，促进供需两侧优化平衡^[12]。

当预测风力机输出功率 $P_{\text{wind}}(t)$ 波动较大（即基准变化率较大），且超过功率波动的截止上限值时，其电价较低，鼓励负荷群在这个时刻用电；当低于功率波动的截止下限值时，其电价较高，不鼓励负荷群在这个时刻用电。其分时电价模型可表示为：

$$K(t) = \frac{|P_{\text{wind}}(t) - P_{\text{st}}(t)|}{P_{\text{st}}(t)} \times 100\% \quad (1)$$

$$P_{\text{max}}(t) = P_{\text{st}}(t)(1 + K(t)) \quad (2)$$

$$P_{\text{min}}(t) = P_{\text{st}}(t)(1 - K(t)) \quad (3)$$

$$C_{\text{real}}(t) = \begin{cases} C_{\text{Low}}, & P_{\text{wind}}(t) \geq P_{\text{max}}(t) \\ C_{\text{Nomal}}, & P_{\text{min}}(t) < P_{\text{wind}}(t) < P_{\text{max}}(t) \\ C_{\text{High}}, & P_{\text{wind}}(t) \leq P_{\text{min}}(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中， $K(t)$ —— t 时刻的基准变化率，反应了功率波动的大小，基准变化率越大，波动性越大，反之越小； $P_{\text{st}}(t)$ —— t 时刻联络线向电网输出的平均功率； $P_{\text{max}}(t)$ 、 $P_{\text{min}}(t)$ —— t 时刻风力机输出功率波动的截止上限与下限； $C_{\text{real}}(t)$ —— t 时刻的分时电价； C_{High} 、 C_{Nomal} 、 C_{Low} ——分时电价的高中低电价。

1.3 多时间尺度可平移负荷模型

需求侧负荷资源分为不可控负荷与可控负荷，可控负荷通常分为可平移负荷、可中断负荷和可削减负荷。本文考虑的负荷包括不可控负荷 L_{main} 与可控负荷中的可平移负荷 $L_{\text{shift-}xh}(\alpha, \beta, \eta)$ 。其中 x 表示可平移负荷的时间尺度； α 、 β 分别表示可平移负荷运行的起始时间与终止时间； η 表示可平移负荷运行的时间。不可控负荷 L_{main} （如照明类设备等），其通断电将影响居民正常生活，不参与优化调度；可平移负荷（如工业负荷、热水器、电动汽车

等），其工作时间可在设定时间段内进行优化调度。

本文将可平移负荷根据其可平移时间尺度的长短特性，将负荷定义为多时间尺度的可平移负荷，如图2所示。

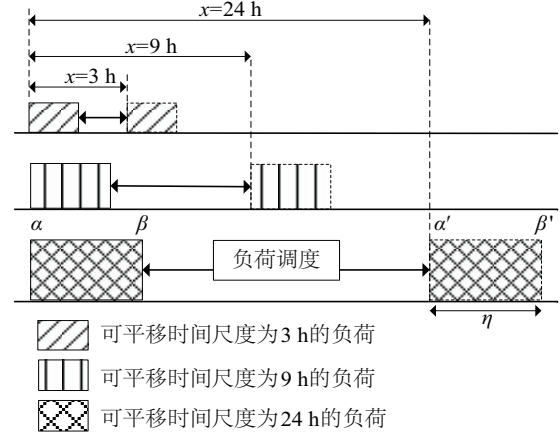


图2 多时间尺度可平移负荷示意图

Fig. 2 Diagram of translational loads of multi-time scale

如图2，可平移时间尺度分为3、9、24 h，即 $L_{\text{shift-}24h}(\alpha, \beta, \eta)$ 、 $L_{\text{shift-}9h}(\alpha, \beta, \eta)$ 、 $L_{\text{shift-}3h}(\alpha, \beta, \eta)$ ，可平移的时间尺度越长，其可调动的的时间跨度越大，负荷量越大，对电价越敏感。可平移时间尺度为3 h的负荷有热水器和空调等；可平移时间尺度为9 h的负荷一般为城区居民负荷，如电动汽车和洗衣机等；可平移时间尺度为24 h的负荷一般为工业负荷，如钢铁、工地施工、有色金属加工等。

1.4 储能充放电模型

为防止储能装置频繁的充放电，根据启发式规则的思想，当电价为低电价时储能充电，当电价为高电价时储能放电，可将储能系统的充放电状态表示为：

$$S(t) = \begin{cases} 1, & C_{\text{real}}(t) = C_{\text{High}} \\ 0, & C_{\text{real}}(t) = C_{\text{Nomal}} \\ -1, & C_{\text{real}}(t) = C_{\text{Low}} \end{cases} \quad (5)$$

式中， $S(t)$ —— t 时刻储能的充放电状态，1表示储能放电，0表示储能不工作，-1表示储能充电。

在工作过程中，蓄电池储能装置的存储电量由荷电状态(state of charge, SOC)表示， $t+1$ 时刻 SOC 值与 t 时刻 SOC 值和本时段蓄电池储能装置的功率相关，可表示为：

$$SOC(t+1) = SOC(t) - \frac{P_{\text{BESS}}(t)\Delta t}{S_{\text{BESS}}} \quad (6)$$

式中, $P_{\text{BESS}}(t)$ —— t 时段内蓄电池储能装置充放电功率, $P_{\text{BESS}}(t)$ 为正表示放电, 为负表示充电; S_{BESS} —— 蓄电池储能装置的总容量; Δt —— 充放电时间。

2 源-荷-储分层优化模型

2.1 分层优化调度策略

通过采用各部分局部最优优化总体的思想, 对不同时间尺度的可平移负荷进行分层调度, 使每一层可平移负荷曲线“跟踪”各层的目标曲线, 从而调整整体负荷曲线, 使其“跟踪”风力机出力曲线^[13]。

步骤 1: 调度中心读取系统内负荷群所设定的负荷参数信息, 对可平移负荷按时间尺度的降序顺序进行分层处理, 获得 $N=3$ 层可平移负荷曲线, 记为 $\{L_{\text{shift}-1}(t), L_{\text{shift}-2}(t), L_{\text{shift}-3}(t)\}$ 。获取不可控负荷的负荷参数信息得到不可控负荷曲线, 记为 $L_{\text{main}}(t)$ 。

步骤 2: 求解 N 层可平移负荷曲线的最优运行方式, 使其尽可能的贴近该层的目标曲线。

各层可平移负荷的目标曲线可表示为:

$$P_{\text{aim}-n}(t) = \begin{cases} P_{\text{wind}}(t) - L_{\text{main}}(t), & n=1 \\ P_{\text{wind}}(t) - L_{\text{main}}(t) - \sum_{i=1}^{n-1} L_{\text{shift}-i}'(t), & n>1 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $P_{\text{aim}-n}(t)$ —— 第 n 层可平移负荷的目标曲线; $L_{\text{shift}-i}'(t)$ —— 优化后的 $n-1$ 层可平移负荷曲线中的第 i 层可平移负荷曲线。

步骤 3: 根据步骤 2 中优化后的各层可平移负荷曲线求得储能装置的目标曲线。根据风电预测中心给出的风力机出力预测曲线以及分时电价, 由式(4)设定储能的充放电状态, 求解储能装置的最优运行方式。

储能装置需要“跟踪”的目标曲线可表示为:

$$P_{\text{aim-BESS}}(t) = P_{\text{wind}}(t) - L_{\text{main}}(t) - \sum_{i=1}^N L_{\text{shift}-i}'(t) \quad (8)$$

2.2 可平移负荷优化目标函数

1) 经济性目标函数

负荷的优化调度与用户的利益息息相关, 应从用户角度考虑, 提高用户参与需求响应的经济性。通过分时电价来调度可平移负荷的 N 层经济性目

标函数如式(9)所示:

$$f_{1-n} = \sum_{t=1}^{24/T} C_{\text{real}}(t)(L_{\text{main}}(t) + L_{\text{shift}-n}(t)) \quad (9)$$

式中, f_{1-n} —— 第 n 层可平移负荷的经济性目标函数; T —— 每个优化时段的时间间隔; $L_{\text{shift}-n}(t)$ —— t 时刻第 n 层可平移负荷平移优化中的负荷。

2) 波动性目标函数

为使负荷曲线贴近目标曲线, 可平移负荷的 N 层波动性目标函数可表示为:

$$f_{2-n} = \sum_{t=1}^{24/T} (P_{\text{aim}-n}(t) - L_{\text{shift}-n}(t) - P_{\text{st}}(t))^2 \quad (10)$$

式中, f_{2-n} —— 第 n 层可平移负荷的波动性目标函数。

3) 平滑性目标函数

可平移负荷的优化调度后会改变原有负荷的曲线, 使风电输出功率变得不平滑, 降低电能质量, 所以有必要对输出功率的平滑性进行优化。

通过相邻两个时间段的输出功率的起伏, 可反映整个输出功率曲线的平滑性。可平移负荷的 N 层平滑性目标函数可表示为:

$$f_{3-n} = \sum_{t=1}^{(24/T)-1} [(P_{\text{aim}-n}(t+1) - L_{\text{shift}-n}(t+1)) - (P_{\text{aim}-n}(t) - L_{\text{shift}-n}(t))]^2 \quad (11)$$

2.3 储能充放电功率优化目标函数

在确定储能充放电状态的情况下, 储能装置平滑波动性的目标函数可表示为:

$$f_{\text{BESS}} = \sum_{t=1}^{24/T} (P_{\text{aim-BESS}}(t) - P_{\text{BESS}}(t) - P_{\text{st}}(t))^2 \quad (12)$$

式中, $P_{\text{BESS}}(t)$ —— 储能装置的充放电功率, 当 $P_{\text{BESS}}(t)$ 大于 0 时表示储能放电, 小于 0 时表示储能充电。

2.4 约束条件

1) 可平移负荷优化时间范围约束

可平移负荷的负荷优化与其可调度的时间尺度有关, 其调度的跨度不能超过用户设定的负荷运行结束时间。若可平移负荷为 $L_{\text{shift}-xh}(\alpha, \beta, \eta)$, 则其时间范围约束可表示为:

$$\alpha \leq t_{\text{on}} \leq \alpha + x - \eta \quad (13)$$

$$t_{\text{off}} = t_{\text{on}} + \eta \quad (14)$$

式中, t_{on} 、 t_{off} —— 可平移负荷运行的起始时间、结束时间; η —— 可平移负荷运行的时间。

2) 储能系统充放电约束

蓄电池的寿命与充放电深度相关,过冲过放均会减少蓄电池使用寿命,所以需对蓄电池荷电状态 $SOC(t)$ 进行约束:

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (15)$$

式中, SOC_{\min} 、 SOC_{\max} —— $SOC(t)$ 上限、下限。

储能装置充放电功率约束:

$$P_{\text{BESS}}(t) \leq P_{\text{BESS-max}} \quad (16)$$

式中, $P_{\text{BESS-max}}$ —— 蓄电池的最大充放电功率。

储能装置始末能量约束:

$$SOC_0 + \sum_{t=2}^{24/T} P_{\text{BESS}}(t) \Delta t = SOC_0' \quad (17)$$

式中, SOC_0 、 SOC_0' —— 储能装置 SOC 的初始状态、结束状态,考虑储能的周期性,故 $SOC_0 = SOC_0'$ 。

3 基于粒子群算法的优化运算

考虑到本文可平移负荷优化为多目标求解问题,因此采用设置权重系数的方法,将多目标加权求和得到 N 层可平移负荷的适应度函数,第 n 层负荷的适应度函数为 F_n 。本文多时间尺度可平移负荷每一层负荷的特性不同,所对应的各层目标函数的权重也不同。

第 1 层可平移负荷平移时间跨度大,对电价十分敏感,因此该层的可平移负荷的经济性目标函数的权重系数较大;此后每层平移跨度逐渐减小,电价对其影响逐渐减小,经济性目标函数的权重系数逐渐减小,波动性目标函数的权重系数逐渐增大;各层负荷曲线都需要进行平滑性的优化,因此各层平滑性目标函数的权重系数不变。 N 层可平移负荷优化的适应度函数可表示为:

$$\min F_n = A \frac{N_f - n}{N_f - 1} f_{1-n} + B \frac{n-1}{N_f - 1} f_{2-n} + C f_{3-n} \quad (18)$$

式中, F_n —— 第 n 层负荷的适应度函数; N_f —— 目标函数的数量; $A \frac{N_f - n}{N_f - 1}$ 、 $B \frac{n-1}{N_f - 1}$ 、 C —— f_{1-n} 、 f_{2-n} 、 f_{3-n} 的权重系数,本文取 $A=3$ 、 $B=4$ 、 $C=1$ 。

对于储能装置来说,其优化是单目标求解问题,所以进行求解的适应度函数即为其目标函数。

4 算例分析

4.1 算例介绍

本文基于 Visual C++ 软件平台对多时间尺度可

平移负荷以及储能装置进行优化。将一天分为 48 个时间段,每个时间段为 30 min,每个时间段为一个维度,即每个粒子中包含了 48 个维度,每次优化的迭代次数为 $N_{\text{iter}}=1000$ 。图 3 为某地区电网内的风力机出力历史数据。

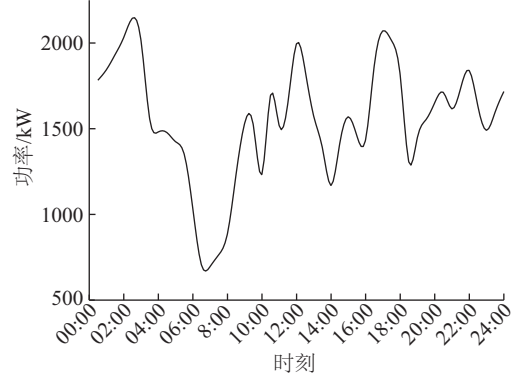


图3 风力机的出力曲线

Fig. 3 The wind turbines output curve

本文选取该地区内的历史负荷数据,假定该地区内的负荷接入风电功率平滑系统中参与需求响应。参与需求响应的负荷占发电总功率的 23.65%,其中第 1 层、第 2 层、第 3 层可平移负荷所占的比例分别为 19.12%、8.64%、2.94%,不可控负荷的比比例为 69.29%;风电机组的平均功率为 1550 kW;联络线向电网输出的平均功率 $P_{\text{sl}}=1000$ kW;储能装置容量配置为 $S_{\text{BESS}}=1000$ kWh,充放电深度为 20%~90%,充放电额定功率为 $P_{\text{BESS}}=200$ kW。

图 4 给出了分时电价曲线。当风力机出力超过截止上限时为 0.3 元/kWh,当风力机出力少于截止下限时电价为 0.9 元/kWh,平时电价为 0.6 元/kWh。

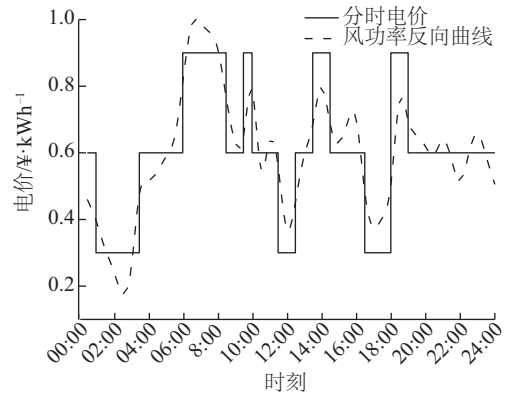


图4 分时电价图

Fig. 4 Time-of-use electricity price

4.2 负荷优化分析

图 5 所示为各层可平移负荷的优化目标曲线。从图 5 可知,当第 1 层可平移负荷完成优化后,风电功率输出曲线(即第 2 层目标曲线)的峰值有明显降低,此后各层负荷量均有所减少,但对平滑波动性的精度逐渐提高。在 06:00~07:00 时段内风力机出力小,同时在这个时段缺少可调度的负荷,优化调度负荷无法有效平滑风电功率低谷段波动,因此需配合储能装置来弥补优化调度负荷平滑风电功率的缺陷。

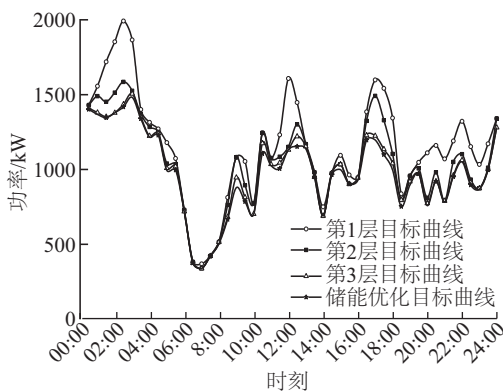


图 5 分层优化目标曲线

Fig. 5 Layered optimization target curve

图 6 为可平移负荷分层优化调度后,“跟踪”风力机出力波动的结果。从图 6 可知,可平移负荷经过优化调度之后,负荷高峰时段从 09:00~11:00、18:00~21:00 转移到 02:00~03:00、11:00~12:00 和 17:00~18:00,与风力机出力曲线的峰谷段大致一致。负荷曲线有效地贴近风力机出力曲线,减小了联络线向电网输出的风电功率的波动性。

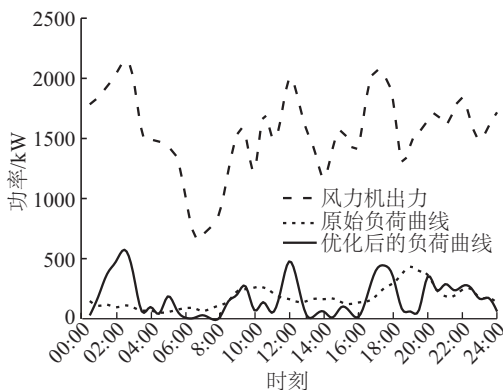
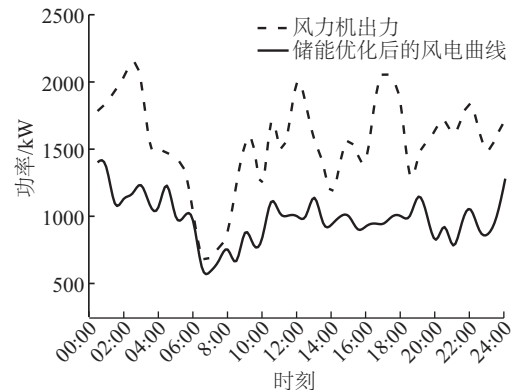


图 6 负荷“跟踪”风力机出力仿真结果

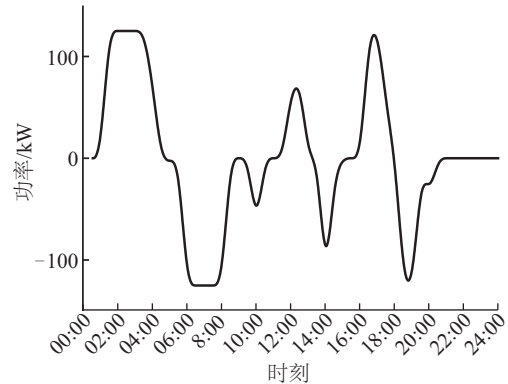
Fig. 6 Simulation results of load group tracking the wind power curve

4.3 储能系统优化分析

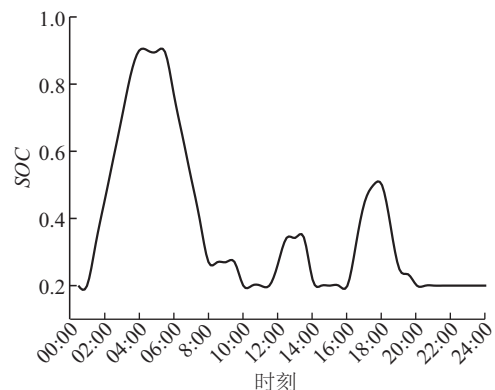
图 7 给出了储能装置参与协调优化风电功率后的仿真结果。从图 7 可知,在 02:00~08:00、17:00~19:00 时段,储能装置显著降低了风电功率波动的峰值。在 06:00~07:00 时段,储能装置有效减小了风电功率低谷段的波动性,弥补了优化调度可平移负荷平滑风电功率的缺陷。储能装置在一定程度上对风电波动进行了平滑,使风电功率输出波动性进一步降低。



a. 储能装置优化风电功率波动结果



b. 储能系统的充放电功率



c. 储能系统的荷电状态曲线

图 7 储能装置的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of energy storage device

4.4 优化前后不同指标对比分析

为了验证所述源-荷-储分层调度平滑风电波动方法的正确性和经济性,将优化前后各基准变化率下的比例,以及系统内用户总共支出的费用进行比较。表1为各项指标的对比结果。从表1可看出,负荷优化后,基准变化率小于5%的风电功率波动

的比例逐渐增大,对优化储能装置进一步扩大了这种趋势,最后可将风电功率波动的基准变化率稳定在25%以下。对比负荷优化后的风电功率、储能优化后的风电功率与原始风电功率的波动在各基准变化率下的分布变化,可看出优化后的风电功率波动性有明显减小,同时用户的购电总费用降低了13.89%。

表1 优化前后各项指标对比
Table 1 Index comparison before and after optimization

| 指标 | 基准变化率 | | | | 用户购电总费用/元 |
|-------------|-------|--------|---------|------|-----------|
| | <5% | 5%~15% | 15%~25% | >25% | |
| 原始风电功率/% | 20.8 | 33.3 | 22.9 | 22.9 | 16528.83 |
| 负荷优化后风电功率/% | 35.4 | 33.3 | 20.8 | 10.4 | 15439.83 |
| 储能优化后风电功率/% | 50.0 | 37.5 | 12.5 | 0.0 | 14233.74 |

5 结 论

本文在考虑多时间尺度可平移负荷特性的基础上,提出源-荷-储互动的多时间尺度可平移负荷的分层优化平滑风电功率波动的方法。算例分析表明,通过优化调度,负荷曲线能很好地“跟踪”风力机出力曲线,降低了风电功率输出的波动性,同时系统内用户的经济性也有一定程度的提高。该方法对平滑风电大功率波动、增加可再生能源消纳以及完善需求侧响应技术方面具有一定的参考意义。

〔参考文献〕

[1] 韩芳.我国可再生能源发展现状和前景展望[J].可再生能源,2010,28(4):137—140.
[1] Han Fang. Development status and prospect of renewable energy in China[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(4): 137—140.
[2] 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—68.
[2] Yang Xinfu, Su Jian, Lyu Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57—68.
[3] Teleke S, Baran M E, Bhattacharya S. Optimal control of battery energy storage for wind farm dispatching[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 787—794.
[4] 姚建国,杨胜春,王珂,等.智能电网“源-网-荷”互

动运行控制概念及研究框架[J].电力系统自动化,2012,36(21):1—12.
[4] Yao Jianguo, Yang Shengchun, Wang Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1—12.
[5] 赵洪山,王莹莹,陈松.需求响应对配电网供电可靠性的影响[J].电力系统自动化,2015,39(17):49—55.
[5] Zhao Hongshan, Wang Yingying, Chen Song. Impact of demand response on distribution system reliability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 49—55.
[6] 赵波,包侃侃,徐志成,等.考虑需求侧响应的光储并网型微电网优化配置[J].中国电机工程学报,2015,35(21):5465—5474.
[6] Zhao Bo, Bao Kankan, Xu Zhicheng, et al. Optimal sizing for grid-connected PV-and-storage microgrid considering demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5465—5474.
[7] 王成山,刘梦璇,陆宁.采用居民温控负荷控制的微网联络线功率波动平滑方法[J].中国电机工程学报,2012,32(25):36—43.
[7] Wang Chengshan, Liu Mengxuan, Lu Ning. A tie-line power smoothing for microgrid using residential thermostatically-controlled loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 36—43.
[8] 王成山,于波,肖峻,等.平滑微电网联络线功率波动的储能系统容量优化方法[J].电力系统自动化,2013,37(3):12—17.

- [8] Wang Chengshan, Yu Bo, Xiao Jun, et al. An energy storage system capacity optimization method for microgrid tie-line power flow stabilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 12—17.
- [9] 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.
- [9] Xing Long, Zhang Peichao, Fang Chen, et al. Optimal operation for microgrid using generalized demand side resource[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 7—12.
- [10] 张新松, 顾菊萍, 袁 越, 等. 基于电池储能系统的风功率波动平抑策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4753—4760.
- [10] Zhang Xinsong, Gu Juping, Yuan Yue, et al. Strategy of smoothing wind power fluctuation based on battery energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4753—4760.
- [11] Ortega- Vazquez M A, Kirschen D S. Estimating the spinning reserve requirements in systems with significant wind power generation penetration[J]. IEEE Transactions on Power System, 2009, 24(1): 114—124.
- [12] 王蓓蓓, 李 扬, 高赐威. 智能电网框架下的需求侧管理展望与思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 18—22.
- [12] Wang Beibei, Li Yang, Gao Ciwei. Demand side management outlook under smart grid infrastructure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 18—22.
- [13] Shao Sheng, Pipattanasomporn Manisa, Rahman S. Demand response as a load shaping tool in an intelligent grid with electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(4): 624—631.

A LAYERED METHOD FOR SMOOTHING FLUCTUATION OF WIND POWER BASED ON DEMAND RESPONSE

Wu Hongbin, Dong Shutao, Ding Ming

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: By tracking the output curve of renewable energy sources, shifting the operational time of load can reduce the side effects which the fluctuations of large-scale renewable energy have on power system. From the perspective of demand response, this paper proposes a layered method for smoothing the wind power fluctuation. This method establishes the time-of-use electricity price model and the model of the shiftable load with multi-time scales. On this basis, by using economic heuristic rules, this paper establishes optimization models of wind-load and wind-storage. According to the characteristics of the shiftable load in different time scales, this paper presents a layered optimization strategy which gives the target curve and the corresponding solving algorithm in each layer. With the example system, the effectiveness and smoothing effect of the layered optimization scheduling strategy are verified and analyzed.

Keywords: wind power; electric load dispatching; particle swarm optimization; demand response; shiftable load