

DOI: 10.7667/PSPC152254

热电联产与风电机组联合运行滚动优化调度模型

宋卓然¹, 赵琳¹, 张子信¹, 王珊珊², 侯玉琤¹, 戴晓宇¹, 焦勇³

(1. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110015; 2. 国网辽宁省电力有限公司管理培训中心, 辽宁 沈阳 110032; 3. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 我国北方地区电力过剩、热力紧缺、电网弃风率高等问题凸显, 为提高运行经济性, 提出一种结合热电联产机组与风电机组联合运行滚动优化调度方法。针对风电等可再生能源出力存在较强波动性的现象, 提出滚动修正的策略, 并与单次预测结果进行了对比。同时, 给出了优化调度的模型, 利用智能单粒子算法将不同类型机组化作不同子矢量进行优化, 较传统粒子群算法寻优能力更强。引入分布式电力驱动热泵用于改善热、电负荷布局, 能够有效改善可再生能源弃电问题。所提出模型和策略在 IEEE30 节点系统算例中得到验证。

关键词: 热电联产; 滚动优化调度; 智能单粒子算法; 弃风率; 分布式电力驱动热泵

Rolling optimal model for multiple heating source and wind turbine unit

SONG Zhuoran¹, ZHAO Lin¹, ZHANG Zixin¹, WANG Shanshan², HOU Yucheng¹, DAI Xiaoyu¹, JIAO Yong³

(1. State Grid Liaoning Electric Power Company Limited Economic Research Institute, Shenyang 110015, China;
2. State Grid Liaoning Management Training Center, Shenyang 110032, China;
3. State Grid Liaoning Electric Power Company, Shenyang 110006, China)

Abstract: To improve the running efficiency and reduce the phenomenon of abandoning wind turbine output in north China, a rolling optimal dispatch for co-generation and wind turbine units is proposed. Due to the strong volatility of renewable energy like wind, rolling strategy is put forward and compared with single forecast results. Meanwhile, intelligent single particle optimizer (ISPO) algorithm, which divides a particle into sub-vectors in accordance to with unit type, is used in optimal dispatch model. Its ability of searching optimal state is stronger than traditional particle swarm optimization (PSO) algorithm. Distributed power driven heat pump is used to improve heat and electricity load structure and reduce the desert wind rate. The effectiveness and validity of model and strategy proposed are verified by the IEEE30 bus system case.

Key words: combined heat and power generation; rolling optimal dispatch; intelligent single particle optimizer; desert wind rate; distributed power driven heat pump

0 引言

在我国北方地区, 煤炭、石油以及风能资源较为丰富, 而其他资源相对匮乏, 发电设备以大型火电机组为主。而北方冬季严寒, 热负荷需求较大, 因此装机机组中大部分具备热电联产功能, 这种方式可大幅度提高能源利用率, 这也导致辽宁地区热电装机比重已接近七成。现实情况中, 热电联产机组的运行工况受热负荷约束较大, 这主要由于目前往往采用“以热定电”的调度模式, 热负荷仅仅由热电联产的热出力承担, 确定了热负荷约束后, 热机组出力随之确定, 导致机组调峰能力下降, 从

而造成了较大的弃风损失^[1], 国家颁布的《节能发电调度办法实施细则》明确规定:“无调节能力的风能等可再生能源在各类发电机组中拥有第一发电优先级”。因此, 合理地对热电联产机组和风电机组进行优化调度对提高电力系统效率具有重要影响。

已有部分学者对此领域展开了研究, 文献[2]引入碳排放权交易成本函数, 建立考虑碳交易成本、燃料成本、环境成本的冷热电联供系统低碳调度多目标优化模型, 并提出一种模糊自修正粒子群算法求解此优化问题; 文献[3]引入供热当量性能系数, 将冷、热、电能量等价转化, 建立了含生产成本、环境成本和冷热电协调成本的多目标节能调度模

型, 并运用模糊算法与二次规划方法进行求解; 文献[4-6]考虑了风电出力不确定性, 结合风、火电运行价格模型, 构建了考虑机组组合的多目标动态优化调度模型, 利用基于优先排序和多子群协同进化的多目标粒子群算法进行模型求解。还有一些文献^[7-9]关于调度问题研究多集中各类新型电源与传统火电机组的结合, 并未很好地根据地域特征构建常规火电、热电与风电的优化调度模型。

针对我国辽宁地区热负荷需求大、热电联产资源利用率高以及风能资源较为丰富的特点, 本文研究了热电联产与风电机组的滚动优化调度模型及算法, 用于在满足热负荷与电负荷的前提下, 提高电网运行经济性, 并减少电网弃风现象。文中结合终端采暖负荷管理, 通过用户侧分布式电力驱动热泵分担采暖负荷从而改变了热电负荷的比例^[10], 此外由于风能存在较强波动性, 本文利用预测信息进行滚动优化^[11-12], 本文还定义了弃风率作为目标函数中的惩罚项以提高风电的消纳率。为求解上述模型, 本文提出基于智能单粒子算法的优化调度模型求解方法, 并通过算例对模型效果进行了验证。

1 优化模型

1.1 目标函数

考虑到我国北方发电实际情况, 考虑以下机组的运行成本。

(1) 火电机组

传统火电机组运行成本 c_f 可用二次函数的形式表示, 如式(1)。

$$c_f(P, t) = a_i P_i^2(t) + b_i P_i(t) + c_i \quad (1)$$

式中: $P_i(t)$ 为火电机组 i 在 t 时段的有功出力; a_i 、 b_i 、 c_i 分别为火电机组 i 的发电成本系数。

(2) 背压式机组

热电联产考虑背压式机组和抽凝式机组, 其中背压式机组的排汽全部用于供热, 并无冷源损失, 同时背压式机组的发电量要受发热量大小的限制, 供热量确定后背压机组的发电功率也随即确定, 因此, 其发热量与发电量的关系可表示为

$$h_i(t) = k_i P_i(t) + \beta_i \quad (2)$$

式中: $h_i(t)$ 为背压式机组 i 在 t 时段的发热量; k_i 为背压式机组 i 的热电转换系数; β_i 为常数。

背压式热电机组利用发电做过功的蒸汽供热, 该部分蒸汽无论是否供热均会冷却, 因此背压式热电机组运行成本可仅考虑发电部分^[13], 形式与式(1)相同。

(3) 抽凝式机组

抽凝式机组从锅炉出来的蒸汽经主汽阀、调节阀先在高压缸膨胀做功之后分为两股: 一股蒸汽从高压缸抽出送到热用户; 另一股蒸汽经低压调节阀进入低压缸继续膨胀做功, 做功后的乏汽排入凝汽器内。研究时用背压式机组和纯凝式机组的组合来等值抽凝式机组, 所得抽凝式机组煤耗特性 f_{CP} 可表示为

$$f_{CP}(P, h, t) = d_{i,0} + d_{i,1} P_i(t) + d_{i,2} h_i(t) + d_{i,3} P_i^2(t) + d_{i,4} P_i(t) h_i(t) + d_{i,5} h_i^2(t) \quad (3)$$

式中, $d_{i,0} \sim d_{i,5}$ 为抽凝式机组 i 相应的发电量和发热量煤耗系数。

由此可知抽凝式机组运行成本 c_{CP} 可表示为

$$c_{CP}(P, h, t) = c_c \cdot f_{CP}(P, h, t) \quad (4)$$

式中, c_c 为单位煤耗的运行成本。

(4) 风电机组

风电机组发电本身并不需要消耗化石燃料, 可近似认为其运行成本为 0。

为改善环境, 减少弃风现象的出现, 定义 t 时段内弃风电量与预测发电量之比为风电机组的弃风率 ξ , 可表示为

$$\xi(t) = \frac{\sum_{i \in G_w} \int_0^t P_i^r(\tau) d\tau}{\sum_{i \in G_w} \int_0^t P_i^f(\tau) d\tau} \quad (5)$$

式中: G_w 为风电机组数量; P_i^r 为风电机组 i 实际出力; P_i^f 为风电机组 i 预测出力。

根据弃风率引入弃风成本 c_w , 用以实现弃风量最小的目标。

$$c_w(t) = \lambda_w \xi(t) \quad (6)$$

式中, λ_w 为弃风成本系数, 其大小决定对风电弃风的容忍度, λ_w 可设置为关于弃风率的分段函数, 以限制弃风率在特定范围内。

综合以上运行成本函数, 可建立如式(7)所示的优化调度目标。

$$f(t) = \min \sum_{t=t_0+1}^{t=t_0+T} \left(\sum_{i \in G_f} c_f(P, t) + \sum_{i \in G_{BP}} c_{BP}(P, h, t) + \sum_{i \in G_{CP}} c_{CP}(P, h, t) + c_w(t) \right) \quad (7)$$

式中: t_0 为本次优化计算的起始时段; T 为滚动调度周期; G_f 为传统火电机组的集合; G_{BP} 为背压式热电联产机组的集合; G_{CP} 为抽凝式热电联产机组的集合。

1.2 约束条件

1.2.1 等式约束

(1) 供电平衡

$$P_c(t) + P_{c-h}(t) = \sum_{i \in G_f} P_i^f(t) + \sum_{i \in G_{BP}} P_i^{BP}(t) + \sum_{i \in G_{CP}} P_i^{CP}(t) + \sum_{i \in G_w} P_i^w(t) \quad (8)$$

式中: $P_i^f(t)$ 为 t 时段传统火电机组计划出力; $P_i^{BP}(t)$ 为 t 时段背压式机组计划电出力; $P_i^{CP}(t)$ 为 t 时段抽凝式机组计划电出力; $P_i^w(t)$ 为 t 时段风电机组计划出力; $P_c(t)$ 为 t 时段系统用电需求; $P_{c-h}(t)$ 为 t 时段分布式电力驱动热泵用电需求。

(2) 供热平衡

$$\sum_{i \in G_{BP}} h_i^{BP}(t) + \sum_{i \in G_{CP}} h_i^{CP}(t) = h_h(t) - h_{c-h}(t) \quad (9)$$

式中: $h_i^{BP}(t)$ 为 t 时段背压式机组计划热出力; $h_i^{CP}(t)$ 为 t 时段抽凝式机组计划热出力; $h_h(t)$ 为 t 时段系统用热需求; $h_{c-h}(t)$ 为 t 时段分布式电力驱动热泵热出力。

1.2.2 不等式约束

(1) 火电、风电机组出力约束

$$\underline{P}_i^f \leq P_i^f(t) \leq \bar{P}_i^f \quad i \in G_f \quad (10)$$

$$0 \leq P_i^w(t) \leq \bar{P}_i^w(t) \quad i \in G_w \quad (11)$$

式中: \underline{P}_i^f 和 \bar{P}_i^f 分别为第 i 台火电机组出力上、下限; \bar{P}_i^w 为第 i 台风电机组出力上限。

(2) 背压式机组出力约束

背压式机组出力特性如图 1 所示, 分析时可以近似用一条直线代替, 该特性直线可用最小技术出力点和容量点两个点来描述。由于背压式机组固有的“以热定电”特性, 因此当热负荷中断时, 它连同相应的发电机都只能停止工作。

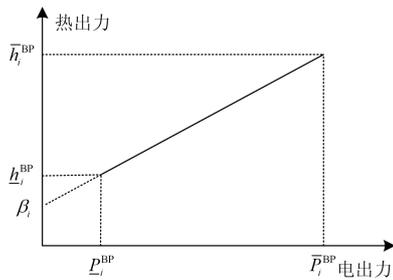


图 1 背压式机组出力特性

Fig. 1 Back pressure turbine output characteristics

以公式形式可表示为

$$h_i(t) = k_i P_i^{BP}(t) + \beta_i \quad i \in G_{BP} \quad (12)$$

$$\underline{h}_i^{BP} \leq h_i^{BP}(t) \leq \bar{h}_i^{BP} \quad i \in G_{BP} \quad (13)$$

$$\underline{P}_i^{BP} \leq P_i^{BP}(t) \leq \bar{P}_i^{BP} \quad i \in G_{BP} \quad (14)$$

式中: \underline{h}_i^{BP} 和 \bar{h}_i^{BP} 分别为第 i 台背压式机组热出力

上、下限; \underline{P}_i^{BP} 和 \bar{P}_i^{BP} 分别为第 i 台背压式机组考虑热出力影响的电出力上、下限。

(3) 抽凝式机组出力约束

抽凝式机组出力特性可用图 2 所示图形表征, 该模型的数学描述可用多边形所有定点的坐标表示。

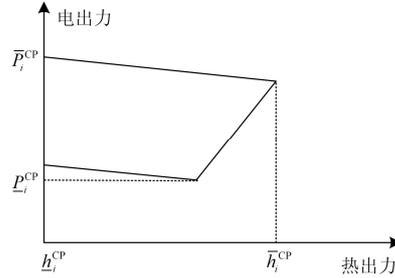


图 2 抽凝式机组出力特性

Fig. 2 Condensate pumping turbine output characteristics

(4) 机组爬坡率约束

$$h_i(t-1) - \Delta h_{d,i} \leq h_i(t) \leq h_i(t-1) + \Delta h_{u,i} \quad (15)$$

$$P_i(t-1) - \Delta P_{d,i} \leq P_i(t) \leq P_i(t-1) + \Delta P_{u,i} \quad (16)$$

式中: $\Delta h_{d,i}$ 和 $\Delta h_{u,i}$ 分别为机组单位时段内增加和减少热出力的爬坡率; $\Delta P_{d,i}$ 和 $\Delta P_{u,i}$ 分别为机组单位时段内增加和减少电出力的爬坡率。

(5) 系统安全约束

$$\underline{I}_i \leq I_i(t) \leq \bar{I}_i \quad i \in G_L, \forall t \quad (17)$$

式中: $I_i(t)$ 为 t 时刻线路 i 流过的电流; \underline{I}_i 和 \bar{I}_i 分别为线路 i 流过电流上、下限; G_L 为系统线路集合。

2 优化算法

2.1 滚动优化

滚动优化是以模型预测技术为基础, 以预测周期作为调度周期, 并根据设定的滚动周期进行周期性优化的控制技术。它是基于当前机组出力以及负荷与风电机组的预测信息, 利用指定的优化算法进行未来一个调度周期内机组出力计划制定的最优控制方法, 在众多控制中已经得到了良好的应用^[14-15]。由于预测信息误差随着时间推移逐渐增加, 因此按照机组出力计划执行若干时段后, 根据此时未来一个调度周期信息进行新的优化是滚动优化效果更佳的关键。

我国传统发电日计划一般以 15 min 为 1 个时段, 1 天包含 96 个时段, 并且 1 天只进行 1 次计划安排。然而在分布式电源接入大电网后, 风电、光伏发电的波动性较强, 使得日前计划精度严重恶化。为有效解决该问题, 本文提出利用滚动优化的方法进行结果优化: 每个优化结果只执行前 2~4 个时段(根据电网复杂程度设定), 然后重新进行 15 min 一

个点的负荷预测与风电预测, 并基于此进行后续机组发电计划设定。

滚动优化第 i 步优化的一般数学模型可以表示如下。

$$\min_U = J(U), U = \{u_0, u_1, u_2, \dots, u_N\} \quad (18)$$

$$\text{s.t. } x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k), k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (19)$$

$$g(x_k, x_{k+1}, u_k, w_k) \leq 0, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (20)$$

式中: N 为预测周期, 及调度周期; $U = \{u_0, u_1, u_2, \dots, u_N\}$ 为生成的计划指令序列; x_k 为第 k 个状态变量; x_0 为初始状态变量; f 和 g 分别为模型的等式约束和不等式约束。

在 $U = \{u_0, u_1, u_2, \dots, u_N\}$ 中, 只有 n 个 ($n < N$) 计划指令被执行, 当 n 个指令执行完成后, 则重复式(19)至式(20)的过程。

2.2 智能单粒子算法

传统粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)中, 粒子根据以下式子更新速度与位置。

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id} - z_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd} - z_{id}^k) \quad (21)$$

$$z_{id}^{k+1} = z_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (22)$$

式中: ωv_{id}^k 为惯性部分, 用来表示对于原有速度的继承; $c_1 r_1 (p_{id} - z_{id}^k)$ 为认知部分, 代表了粒子对自身的学习; $c_2 r_2 (p_{gd} - z_{id}^k)$ 为社会部分, 用来表示粒子间的协作。

传统 PSO 算法简洁, 易于实现, 是非线性连续优化问题、组合优化问题以及混合整数非线性优化问题的有效优化工具。但是传统 PSO 算法的性能随着维数的增加而变差, 其寻优的能力也会减弱, 这是因为传统的 PSO 算法在更新位置过程中是同时改变整个解矢量各维的数值, 虽然适应值能判断解矢量的整体质量, 但并不能判断每一个维度是否向最优方向移动, 因此当粒子维度较高时, 传统的 PSO 算法很难兼顾所有维度的优化方向。

基于以上原因, 本文采用智能单粒子算法 (ISPO) 对调度模型进行优化, 如图 3 所示, 在整个更新过程中, 把 n 维的位置矢量划分为 m 部分, 即将位置矢量划分为 m 个子位置子矢量, 定义每一个位置子矢量与其对应的速度子矢量分别表示为 z_j 和 $v_j (j=1, 2, \dots, m)$ 。

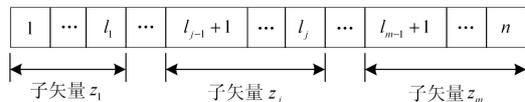


图 3 粒子位置子矢量示意

Fig. 3 Sub-vector of particle position

ISPO 更新粒子时按先后顺序进行循环更新, 直

至得到收敛解。在进行第 j 个子矢量更新过程中, 将按以下公式迭代更新速度和位置分量 N_{sub} 次。

$$v_j^k = \left(\frac{a}{k^p}\right) \times r + b \times L_j^{k-1} \quad (23)$$

$$z_j^k = \begin{cases} z_j^{k-1} + v_j^k & f(x_1^k) > f(x_2^k) \\ z_j^{k-1} & f(x_1^k) \leq f(x_2^k) \end{cases} \quad (24)$$

$$L_j^k = \begin{cases} v_j^k & f(x_1^k) > f(x_2^k) \\ L_j^{k-1}/s & f(x_1^{k+1}) \leq f(x_2^{k+1}) \end{cases} \quad (25)$$

式中: x_1^k 为第 j 个子矢量在第 k 次迭代前的粒子位置矢量; x_2^k 为第 j 个子矢量在第 k 次迭代更新后的粒子位置矢量; $f(\cdot)$ 为粒子位置矢量的适应度计算函数; a 为多样性因子, 用以控制随机矢量 r 的幅度; p 为下降因子, 用以控制幅度的下降速度; r 为 $[-0.5, 0.5]$ 随机变量, 用以保持速度子矢量的多样性; s 为收缩因子; b 为加速度因子。通过式(27)可以实现可动态调节的自适应学习策略。

2.3 ISPO 在调度模型中的应用

将 ISPO 算法应用于主动配电网的最优潮流计算, 关键在于对粒子的位置矢量合理表达。根据上文所述可知, 优化调度是要确定未来一个调度周期内火电机组、热电联产机组以及风电机组的出力曲线, 因此对于本文调度模型的智能单粒子位置矢量可以划分为 $g \times N$ 维的矩阵。 $g = G_f + G_{BP} + G_{CP} + G_w$, 为所有计划机组数量。

本文优化调度模型中, 智能单粒子的子矢量划分按照如下原则: 同一时段下, 同类型机组出力组成一个子矢量。根据该原则, 假设将同一时段的列向量划分为 r 个子矢量, 则整个位置矢量共可分为 $r \times N$ 个子矢量。

ISPO 粒子更新流程可表示为如图 4 所示, 其中 N_{iter} 为算法迭代次数小于设定值。

3 算例分析

3.1 算例系统参数

本文采用 IEEE 30 节点系统作为验证算例, 算例参数为 IEEE 30 节点标准参数, 并将机组 5、8、11 设定为热电联产机组(其中机组 5、8 为抽凝式机组, 机组 11 为背压式机组), 机组 13 设定为风电机组, 容量设定为 70 MW。如图 5 所示, 系统电负荷、热负荷与风电出力数据采用辽宁某地区实际数据进行分析。

背压式机组热电转换系数采用文献[16]数据, 机组成本系数采用文献[17]数据。弃风成本系数 λ_w 设为风电机组容量 $\times \max\{b_i\}$ 。

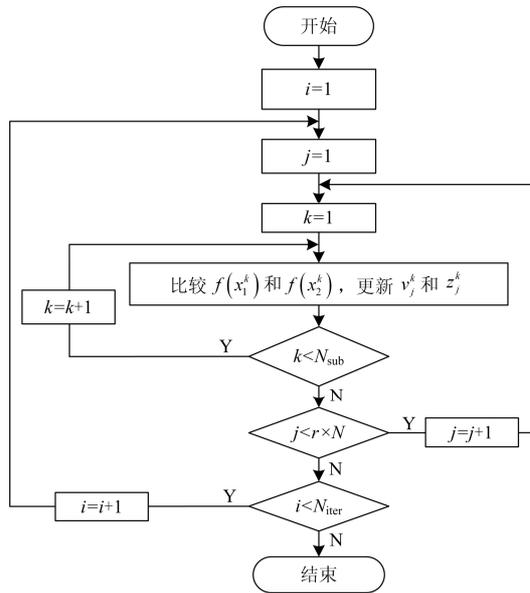


图 4 ISPO 粒子更新流程

Fig. 4 Flow chart of ISPO evolution

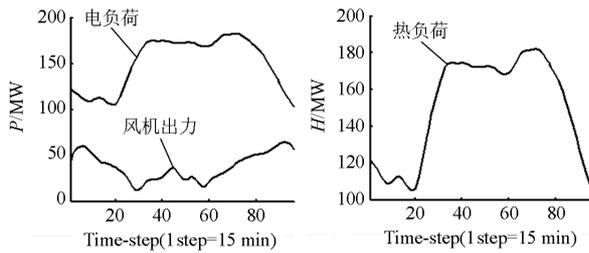


图 5 热、电负荷以及风电出力情况

Fig. 5 Heat, power load and wind turbine output condition

滚动优化调度每次对未来 1 h 共 4 个时段的机组进行出力修正。执行完成未来 1 h 计划出力后，重新进行优化计算。

3.2 计算效果分析

本文所述算法采用 Matlab 进行编程求解，硬件环境为：Intel Core i5 CPU 2.50 GHz，内存为 4 G，计算时间为 14.32 s。

求得 6 台机组电出力滚动计划如图 6 所示，热电联产机组 5、机组 8 大部分时段以电出力下限运行。求得 3 台热电联产机组热出力滚动计划如图 7 所示，大部分热负荷波动由背压式机组承担。

采用 ISPO 算法与传统 PSO 算法得到的主问题迭代收敛曲线如图 8 所示。对于测试系统，ISPO 需要迭代 22 次收敛，传统 PSO 需要迭代 14 次收敛。虽然收敛速度 ISPO 较 PSO 没有优势，但收敛后得到的运行成本 ISPO 算法明显优于 PSO 算法。这主要是由于 ISPO 子矢量可分散向各个方向优化，较 PSO 更易寻找到最优点，不易过早陷入局部最优点。

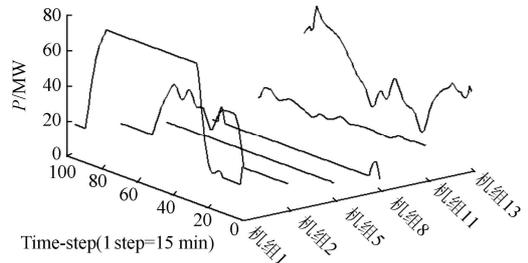


图 6 各机组电出力优化结果

Fig. 6 Optimal power output of all units

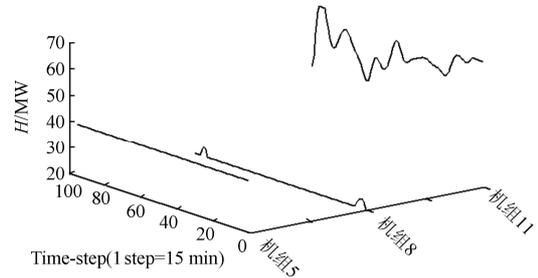


图 7 各热电联产机组热出力优化结果

Fig. 7 Optimal heat output of co-generation units

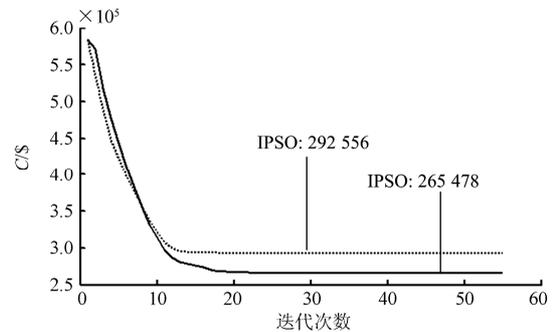


图 8 ISPO 与 PSO 迭代效果比较

Fig. 8 Iteration results comparison between ISPO and PSO

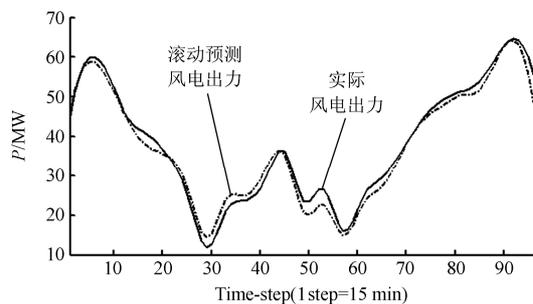
3.3 滚动预测与单次预测效果对比

本文采取每隔 1 h 重新计算的滚动优化方法，这主要由于对于风电等间歇式能源的出力预测随着时间尺度的精细化，预测的准确度将逐渐提高。以图 9 风电出力预测结果为例，可见滚动预测风电出力精度明显优于单次预测。另外对于大型省级电网，1 h 也足以对全网优化问题进行再次计算。

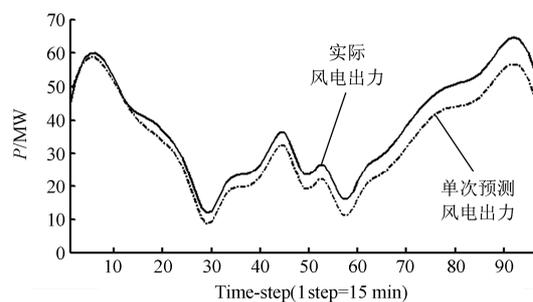
由于预测误差造成的弃风率曲线如图 10 所示，其中理想弃风率曲线中由于其他机组出力限制才会被迫弃风。可见滚动预测下弃风率明显低于单次预测下弃风率。

由此计算得到的单次预测运行成本为 \$291 080，而滚动预测运行成本为 \$265 478。去除弃风率罚项

后, 单次预测运行成本为\$249 355, 滚动预测运行成本为\$247 207, 这主要由于滚动预测准确度高, 实际风电出力更多, 相应的成本更低。



(a) 滚动预测风电出力与真实出力对比



(b) 单次预测风电出力与真实出力对比

图 9 不同预测方法下风电出力与真实出力比较

Fig. 9 Wind turbine output comparison between different prediction method and practical situation

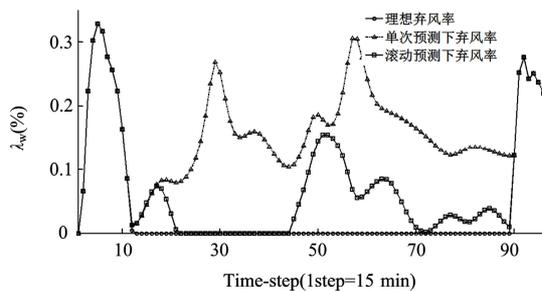


图 10 不同预测方法下弃风率

Fig. 10 Desert wind rate of different prediction method

3.4 分布式电力驱动热泵使用对弃风率的影响

在现有以热定电的调度模式下, 采暖负荷仅仅由热电联产机组的热出力承担, 确定了采暖负荷后, 剩余的调度安排只能针对电出力机组进行。这种情况下, 往往导致风电等新能源出力得到限制。

本文提出通过引入分布式电力驱动热泵分担部分热负荷, 增加热负荷向电负荷转化的优化变量, 形成新的热、电负荷联合约束条件。

假定单台分布式电力驱动热泵额定产热 1 MW, 并拥有 80% 的能源转换效率。在 IEEE30 节点系统中依次在节点 17、24、26 安装分布式电力驱

动热泵, 由此得到的弃风率曲线如图 11 所示。可见, 分布式电力驱动热泵可有效改变热、电负荷布局, 改善目前由于以热定电而造成的分布式电源弃电问题。

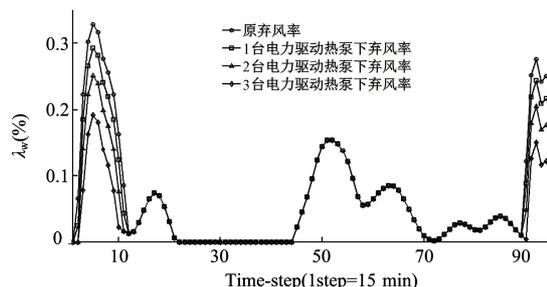


图 11 配置电力驱动热泵后弃风率改善效果

Fig. 11 Desert wind rate improvement with power driven heat pump

4 结论

本文提出了一种涉及火电机组、热电联产机组、风电机组以及分布式电力驱动热泵的新型调度策略, 研究得到的结论如下:

(1) 在传统调度日前计划的基础上, 提出在线滚动优化调度策略, 提高了风电等新能源出力预测准确度, 并有效降低其弃电比例。

(2) 探讨了智能单粒子算法应用于热电联产与风电机组联合调度的效果, 较传统粒子群算法获得更好的效果, 有效降低了系统运行成本。

(3) 引入了分布式电力驱动热泵用于改变系统热、电负荷布局, 有效改善目前由于以热定电而造成的弃风及低谷调峰问题。

参考文献

- [1] 龙虹毓, 何国军, 徐瑞林, 等. 计及分布式电源热泵的热电联产协调优化调度与能效分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 38-42.
LONG Hongyu, HE Guojun, XU Ruilin, et al. Cogeneration coordination optimal dispatch and energy efficiency analysis containing distributed electric heat pumps[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 38-42.
- [2] 周任军, 李绍金, 陈瑞先, 等. 采用模糊自修正粒子群算法的碳排放权交易冷热电多目标调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6119-6126.
ZHOU Renjun, LI Shaojin, CHEN Ruixian, et al. Combined cool ad heat and power multi-objective scheduling considering carbon emissions trading using algorithm of fuzzy self-correction particle swarm optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6119-6126.
- [3] 周任军, 冉晓洪, 毛发龙, 等. 分布式冷热电三联供系

- 统节能协调优化调度[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 8-14.
ZHOU Renjun, RAN Xiaohong, MAO Falong, et al. Energy-saving coordinated optimal dispatch of distributed combined cool, heat and power supply[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 8-14.
- [4] 杨柳青, 林舜江, 刘明波, 等. 考虑风电接入的大型电力系统多目标动态优化调度[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 286-295.
YANG Liuqing, LIN Shunjiang, LIU Mingbo, et al. Multi-objective dynamic optimal dispatch for large-scale power systems considering wind power penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 286-295.
- [5] 徐立中, 易永辉, 朱承治, 等. 考虑风电随机性的微网多时间尺度能量优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 1-8.
XU Lizhong, YI Yonghui, ZHU Chengzhi, et al. Multi-time scale optimal energy dispatch of microgrid considering stochastic wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 1-8.
- [6] 卢鹏铭, 温步瀛, 江岳文. 基于多时间尺度协调机组组合的含风电系统旋转备用优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 94-100.
LU Pengming, WEN Buying, JIANG Yuewen. Study on optimization of spinning reserve in wind power integrated power system based on multiple timescale and unit commitment coordination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 94-100.
- [7] 贺建波, 胡志坚, 刘宇凯. 大规模多目标水-火-风协调优化调度模型的建立及求解[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 1-7.
HE Jianbo, HU Zhijian, LIU Yuka. Establishment and solution of the large-scale multi-objective hydro-thermal-wind power coordination optimization dispatching model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 1-7.
- [8] 葛晓琳, 张粒子. 考虑调峰约束的风水火随机机组组合问题[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 223-230.
GE Xiaolin, ZHANG Lizi. Wind-hydro-thermal stochastic unit commitment problem considering the peak regulation constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 223-230.
- [9] 张新松, 礼晓飞, 王运, 等. 不确定性环境下考虑弃风的电力系统日前调度[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 75-82.
ZHANG Xinsong, LI Xiaofei, WANG Yun, et al. Day-ahead dispatching in consideration of wind power curtailments in uncertain environments[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 75-82.
- [10] 龙虹毓, 付林, 徐瑞林, 等. 利用燃气机组和热泵减少不确定因素影响的电网调度[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 220-226.
LONG Hongyu, FU Lin, XU Ruilin, et al. Research on the electric grid dispatch for alleviating the uncertainties impact through gas-fired cogenerations and heat pumps[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 220-226.
- [11] 沈伟, 吴文传, 张伯明, 等. 消纳大规模风电的在线滚动调度策略与模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 136-140.
SHEN Wei, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. An on-line rolling generation dispatch method and model for accommodating large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 136-140.
- [12] 李志刚, 吴文传, 张伯明, 等. 计及风电考虑离散化发电调节约束的在线滚动调度方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(10): 36-42.
LI Zhigang, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A look-ahead generation dispatch method considering discrete generation regulation constraints with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10): 36-42.
- [13] 张冲, 胡林猷, 胡佳. 热电机组比重及热负荷对风电消纳率影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 120-125.
ZHANG Chong, HU Linxian, HU Jia. Research on the impact of the proportion of thermal power generating units and heat load on the wind power accommodation rate[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 120-125.
- [14] GALLESTEY E, STOTHERT A, ANTOINE M, et al. Model predictive control and the optimization of power plant load while considering lifetime consumption[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(1): 186-191.
- [15] CAMPONOGARA E, JIA D, KROGH B H, et al. Distributed model predictive control[J]. IEEE Control System, 2002, 22(1): 44-52.
- [16] 唐家裕, 付林, 狄洪发. 不同类型供热机组热电负荷优化分配的研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2007, 3(3): 211-214.
TANG Jiayu, FU Lin, DI Hongfa. Research on thermal and electric load optimizing dispatch of different types of heat supplied turbine[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2007, 3(3): 211-214.
- [17] CHANG C S, FU W. Stochastic multiobjective generation dispatch of combined heat and power systems[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(5): 583-591.

收稿日期: 2015-12-29; 修回日期: 2016-03-18

作者简介:

宋卓然(1985-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统规划, 能源规划; E-mail: 40420833@qq.com

赵琳(1987-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统规划, 能源规划。

(编辑 魏小丽)