

考虑风电消纳的电热联合系统多源协调优化运行

李守东¹, 董海鹰¹, 张蕊萍¹, 马喜平², 闫志杰¹

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730050)

摘 要: 为解决中国“三北”地区风电消纳问题,从提升电力系统调节能力的角度出发,通过在供热侧配置储热、供电侧配置抽水蓄能,与常规机组共同参与电网优化调度,形成电热联合系统多源协调运行的调度模式。在研究电热负荷与风电出力分布特性的基础上,深入分析电热联合系统多源协调对风电消纳的影响机理,以风电消纳电量最大和系统运行成本最小为目标建立电热联合系统多源协调优化模型,并采用多目标和声搜索算法对模型进行求解。以6节点系统为例验证了模型的有效性,结果表明电热联合系统多源协调运行可有效降低系统运行成本,提高风电消纳水平。

关键词: 风电; 储热; 抽水蓄能; 电热联合; 多源协调

中图分类号: TM732

文献标识码: A

0 引 言

我国风电装机规模得到飞速发展,截至2017年底,我国风电累计装机容量已达1.88亿kW。但在风电迅速发展的同时,也面临着严峻的弃风问题。根据国家能源局数据统计,仅2017年上半年弃风电量就达235亿kWh,平均弃风率达到13.6%^[1]。系统调节能力不足是产生弃风的主要原因。风电出力的波动性导致其消纳需要系统提供更多的灵活性。而我国风电主要集中在“三北”地区,电源结构以燃煤火电机组为主。同时,在冬季供热期,热电联产机组出力受“以热定电”运行模式的限制,系统调节能力进一步下降,更加剧了反调峰特性的风电并网消纳难度^[2,3]。

为促进风电消纳,减少弃风,业界在提升热电联产机组的灵活性方面做了大量工作。文献[4~6]提出利用储热和电供热装置来提高热电联产机组调节能力的电热综合调度模型,并验证所提模型对于风电消纳的积极作用;文献[7]重点对热电厂配置电锅炉以促进风电消纳的经济性进行评价;文献[8]则着重分析储热配置位置不同,其促进风电消纳时运行方式的差异。而文献[9,10]通过利

用分布式热泵分担部分热负荷来提升热电联产机组的灵活性,以实现促进风电消纳的目的。

储能技术作为提高系统调峰能力,促进风电消纳的另一种有效措施受到国内外广泛关注^[11~13]。目前除技术较成熟的抽水蓄能外,其他储能方式大都面临规模难以满足现代电力系统的要求以及存在造价、寿命和效率等问题。文献[14]应用配置理论,通过风电和抽水蓄能的出力分配,扩大了风电运行的可行域。文献[15]利用抽水蓄能优良的削峰填谷能力,建立抽水蓄能电站与风电的联合优化调度模型,有效提高了系统消纳风电的能力。文献[16]基于风电不确定性及抽水蓄能运行机理分析,建立风电-火电-抽水蓄能联合优化机组组合模型,研究风电接入下的多源联合优化机组组合模型对于促进风电消纳的重要意义。然而,目前的研究大都单独考虑热电联产灵活性的提升与抽水蓄能等储能手段对风电消纳的作用,较少对电热联合系统中多种电源协调运行时的风电消纳效果进行深入分析。

本文将储热系统与抽水蓄能作为消纳风电的重要手段,与常规机组共同参与电力系统优化调度,形成电热联合系统多源协调运行的调度模式。建立电热联合系统多源协调优化模型,并采用多目

收稿日期: 2017-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(61663019); 国网甘肃省电力公司科技项目(522722160021)

通信作者: 董海鹰(1966—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事电力系统优化运行与智能控制, 新能源发电优化控制方面的研究。
hydong@mail.lzjtu.cn

标和声搜索算法进行求解。算例表明该方法对于促进风电消纳,提高系统运行经济性具有积极作用。

1 电热联合系统多源协调运行对风电消纳的影响

1.1 电热负荷与风电出力分布特性

根据历史运行数据,电、热负荷呈相反的分布特性,风电出力特性与热负荷变化趋势大致相同,夜晚为风电大发时节,最大出力在 24:00 和 02:00 附近,最小出力在 08:00 和 15:00 附近,反调峰特性很明显,如图 1 所示。

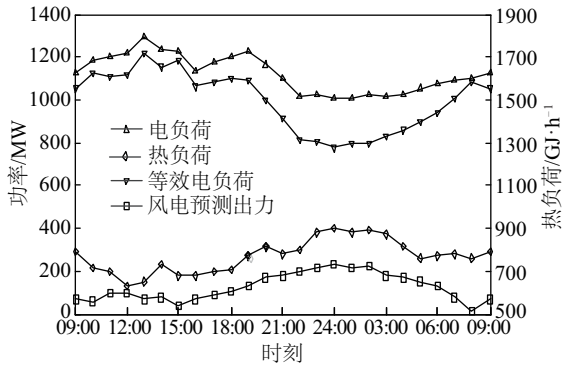


图1 电热负荷与风电出力分布曲线

Fig. 1 Electrical load, thermal load and wind power output distribution curves

1.2 电热联合系统多源协调运行对风电消纳的影响

如图 2 所示,本文根据抽水蓄能的调节情况分析电热联合系统多源协调运行对风电消纳的影响。风电出力的波动性增加了系统调节负担,通过在供热侧配置储热、供电侧配置抽水蓄能,充分利

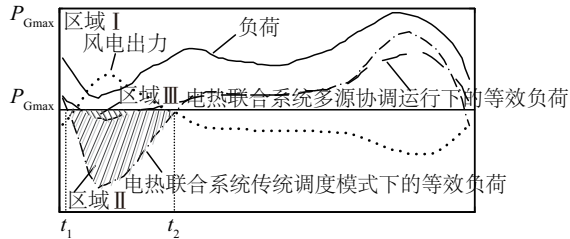


图2 电热联合系统多源协调运行对风电消纳影响示意图

Fig. 2 Schematic diagram of effect that multi-source coordinate operation of combined heat and power system on wind power accommodation

用储热装置和抽水蓄能提供的灵活性提高系统调节能力。当电热联合系统中的常规机组(含储热)调节能力不足时,通过抽水蓄能的快速响应实现电力系统供需平衡,促进风电消纳。

图 2 中, P_{Gmax} 、 P_{Gmin} 分别为常规机组的最大、最小出力(MW)。此处的常规机组出力为系统中含储热的热电联产机组与纯凝火电机组的出力之和。区域 I 为机组出力可调节范围。在电热联合系统传统调度模式下,风电接入系统后的等效负荷为:

$$P_E = P_L - P_W \quad (1)$$

式中, P_L ——系统原有负荷, MW; P_W ——系统风电出力, MW。

当风电出力超出机组调节能力时($t_1 \sim t_2$ 时段), 为了不影响系统安全经济运行, 系统不得不弃风, 风电消纳受阻, 如区域 II 所示。该方式下的弃风电量为:

$$E_{W,abon} = \sum_{t=t_1}^{t_2} (P_{Gmin} - P_E) \Delta T = \sum_{t=t_1}^{t_2} (P_{Gmin} - P_L + P_W) \Delta T \quad (2)$$

式中, ΔT ——时段 t 的持续时长。

电热联合系统多源协调运行后, 在 $t_1 \sim t_2$ 时段抽水蓄能从下水库向上水库抽水消耗的功率为 P_{pum} , 此时等效负荷和弃风电量为:

$$P_E^* = P_L + P_{pum} - P_W \quad (3)$$

$$E_{W,abon}^* = \sum_{t=t_1}^{t_2} (P_{Gmin} - P_E^*) \Delta T \quad (4)$$

$$= \sum_{t=t_1}^{t_2} (P_{Gmin} - P_L - P_{pum} + P_W) \Delta T$$

由于 $P_{pum} > 0$, 所以电热联合系统多源协调运行下的弃风电量小于传统调度方式下的弃风电量。此时, 系统增加的风电消纳电量为:

$$\Delta E_W = E_{W,abon} - E_{W,abon}^* = \sum_{t=t_1}^{t_2} (P_{Gmin} - P_L + P_W) \Delta T - \sum_{t=t_1}^{t_2} (P_{Gmin} - P_L - P_{pum} + P_W) \Delta T = \sum_{t=t_1}^{t_2} P_{pum} \Delta T \quad (5)$$

因此, 电热联合系统常规机组调节能力不足时($t_1 \sim t_2$ 时段), 通过抽水蓄能的快速响应来消纳受阻风电, 使弃风电量由区域 II 缩小至区域 III, 有效提高了风电消纳能力。

2 多源协调调度模型

2.1 调度模型目标函数

考虑风电优先上网,调度模型中不计风力发电成本。由于热电联产机组需向系统供热,所以不能出现停机情况,并将热电联产机组的电、热出力折算为纯凝工况下的出力。由于采用电热联合系统多源协调运行方式,势必会增加多种电源的运行成本。因此,如何以最低的运行成本实现风电消纳的最大化是电热联合系统多源协调运行的关键。本文分别从风电消纳电量最大和系统运行成本最小2个维度构建电热联合系统多源协调优化目标。

1) 风电消纳电量最大

$$\max F_1 = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_W} P_{W,i,t} \Delta T \quad (6)$$

式中, N_T ——一个调度周期的时段数; N_W ——风电场数量; $P_{W,i,t}$ ——风电场 i 在 t 时段的调度出力, MW。

2) 系统运行成本最小

$$\min F_2 = \sum_{i=1}^{N_T} \left\{ \sum_{i=1}^{N_R} U_{i,t} [f_1(P_{CON,i,t}) + (1 - U_{i,t-1}) S_i + C_i(R_{i,t}^u, R_{i,t}^d)] + \sum_{j=1}^{N_G} f_2(P_{E,j,t}, P_{H,j,t}) + \sum_{k=1}^{N_H} (S_{k,t}^{\text{gen}} + S_{k,t}^{\text{pump}}) \right\} \quad (7)$$

式中, $U_{i,t}$ ——纯凝火电机组 i 在 t 时段的启停情况, 0 表示停机, 1 表示运行; $f_1(P_{CON,i,t})$ ——纯凝火电机组 i 在 t 时段的发电成本, ¥; $P_{CON,i,t}$ ——纯凝火电机组 i 在 t 时段的出力, MW; S_i ——纯凝火电机组 i 的启动成本, ¥; $C_i(R_{i,t}^u, R_{i,t}^d)$ ——纯凝火电机组 i 的备用成本, ¥, $R_{i,t}^u$ 、 $R_{i,t}^d$ ——纯凝火电机组 i 在 t 时段的正、负旋转备用, MW; $f_2(P_{E,j,t}, P_{H,j,t})$ ——热电联产机组 j 在 t 时段的运行成本, ¥, 其中 $P_{E,j,t}$ 、 $P_{H,j,t}$ 为热电联产机组 j 在 t 时段的电出力和热出力, MW; $S_{k,t}^{\text{gen}}$ 、 $S_{k,t}^{\text{pump}}$ ——抽蓄机组 k 在 t 时段的发电工况启动成本和抽水工况启动成本, ¥; N_R ——纯凝火电机组总数; N_G ——热电联产机组总数; N_H ——抽蓄机组总数。

纯凝火电机组运行成本方程为:

$$f_1(P_{CON,i,t}) = a_i P_{CON,i,t}^2 + b_i P_{CON,i,t} + c_i \quad (8)$$

式中, a_i 、 b_i 、 c_i ——火电机组运行成本系数。

热电联产机组运行成本方程为:

$$f_2(P_{E,j,t}, P_{H,j,t}) = a_j (P_{E,j,t} + C_v P_{H,j,t})^2 + b_j (P_{E,j,t} + C_v P_{H,j,t}) + c_j \quad (9)$$

式中, a_j 、 b_j 、 c_j ——热电机组运行成本系数; C_v ——热电机组纯凝工况折算系数。

机组备用成本方程为:

$$C_i(R_{i,t}^u, R_{i,t}^d) = k_{i,t}^u R_{i,t}^u + k_{i,t}^d R_{i,t}^d \quad (10)$$

式中, $k_{i,t}^u$ 、 $k_{i,t}^d$ ——正、负单位备用成本, ¥/MW。

抽蓄机组发电抽水工况启动成本方程为:

$$\begin{cases} S_{k,t}^{\text{gen}} = S_k^{\text{gen}} I_{k,t}^{\text{gen}} (I_{k,t}^{\text{gen}} - I_{k,t-1}^{\text{gen}}) \\ S_{k,t}^{\text{pump}} = S_k^{\text{pump}} I_{k,t}^{\text{pump}} (I_{k,t}^{\text{pump}} - I_{k,t-1}^{\text{pump}}) \end{cases} \quad (11)$$

式中, S_k^{gen} ——抽蓄机组 k 发电工况的启动成本, ¥; S_k^{pump} ——抽蓄机组 k 抽水工况的启动成本, ¥; $I_{k,t}^{\text{gen}}$ 、 $I_{k,t}^{\text{pump}}$ ——抽蓄机组 k 在 t 时段的运行工况, $I_{k,t}^{\text{gen}}$ 为 1 表示抽蓄机组 k 在 t 时段处于发电工况, $I_{k,t}^{\text{pump}}$ 为 1 表示抽蓄机组 k 在 t 时段处于抽水工况。

2.2 运行约束条件

1) 电力系统约束

① 负荷平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_R} P_{CON,i,t} + \sum_{j=1}^{N_G} P_{E,j,t} + \sum_{k=1}^{N_H} P_{PS,k,t} + P_{W,t} - P_{\text{load},t} = 0 \quad (12)$$

式中, $P_{PS,k,t}$ ——抽蓄机组 k 在 t 时段的出力, MW, 正表示发电状态, 负表示抽水状态; $P_{W,t}$ ——风电场在 t 时段的调度出力, MW。

② 机组出力约束

$$U_{i,t} P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq U_{i,t} P_{i,\max} \quad (13)$$

式中, $P_{i,\max}$ 、 $P_{i,\min}$ ——机组 i 的出力上下限, MW。

③ 机组爬坡约束

$$|P_{i,t} - P_{i,t-1}| \leq P_i^{\text{ramp}} \quad (14)$$

式中, P_i^{ramp} ——机组 i 的上升、下降速度, MW。

④ 旋转备用约束

由于风电场的并网, 系统需要增加一定的旋转备用来应对风电出力波动。

$$\begin{cases} R_{i,t}^u \leq \min(U_{i,t} P_{i,\max} - U_{i,t} P_{i,t}, U_{i,t} P_i^{\text{ramp}}) \\ R_{i,t}^d \leq \min(U_{i,t} P_{i,t} - U_{i,t} P_{i,\min}, U_{i,t} P_i^{\text{ramp}}) \end{cases} \quad (15)$$

⑤ 风电场运行约束

$$0 \leq P_{W,i,t} \leq P_{W,\max,i,t} \quad (16)$$

式中, $P_{W,\max,i,t}$ ——风电场 i 在 t 时段的预测出力, MW。

⑥抽水蓄能库容约束

任意时段 $\tau \in N_T$, 有:

$$\frac{V_0 - V_{\max}}{\eta^{\text{pum}}} \leq \frac{\sum_{t=1}^{\tau} P_{\text{PS},t}^{\text{gen}} \eta^{\text{gen}}}{\eta^{\text{pum}}} - \sum_{t=1}^{\tau} P_{\text{PS},t}^{\text{pum}} \leq \frac{V_0 - V_{\min}}{\eta^{\text{pum}}} \quad (17)$$

式中, η^{pum} 、 η^{gen} ——抽水蓄能抽水和发电时的水量/电量转换系数; V_0 ——抽水蓄能上水库初始水量, m^3 ; V_{\max} 、 V_{\min} ——抽水蓄能上水库和下水库最大、最小水量, m^3 。

式(17)表示 1 个调度周期以内抽水蓄能上水库容量约束, 由于上下水库在抽水和发电过程库容不变, 因此实质上考虑了下水库的库容约束。

2) 热力系统约束

①供热平衡约束

$$\sum_{j=1}^{N_G} P_{\text{H},j,t} = P_{\text{load},t}^{\text{th}} \quad (18)$$

式中, $P_{\text{load},t}^{\text{th}}$ ——系统在 t 时段的热负荷, MW ; $P_{\text{H},j,t}$ ——含储热的热电联产机组 j 在 t 时段的供热功率, MW 。

②储热装置运行约束

$$\begin{cases} S_{j,t} - S_{j,t-1} = P_{\text{cr},j,t} \leq P_{\text{hc},j,\max} \\ S_{j,t-1} - S_{j,t} = P_{\text{cr},j,t} \leq P_{\text{hf},j,\max} \\ S_{j,t} \leq S_{j,\max} \\ \sum_{t=1}^{N_T} P_{\text{cr},j,t} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中, $S_{j,t}$ ——储热装置 j 在 t 时段的储热量, MWh ; $P_{\text{hc},j,\max}$ 、 $P_{\text{hf},j,\max}$ ——储热装置 j 的最大储、放热功率, MW ; $S_{j,\max}$ ——储热装置 j 的最大蓄热量, MWh ; $P_{\text{cr},j,t}$ ——储热装置 j 在 t 时段的储、放热功率, MW , 求和为 0 表示储热装置满足周期容量不变约束。

3 模型求解

3.1 和声搜索算法

针对本文建立的是一个复杂的非线性多目标优化问题, 因此采用智能算法中全局搜索能力强、收敛速度快的多目标和声搜索算法 (multi-objective HS, MOHS) 来求解优化调度模型^[17], 获取 Pareto 最优解集。其基本原理是模仿作曲家反复搜寻最优声调的方法, 实现优化问题的寻优。具体过程如下:

1) 初始化参数。所要初始化的算法参数包括

和声记忆库空间、和声记忆考虑概率以及最终迭代次数 G_{\max} 。

2) 确定支配关系。定义多目标优化为:

$$\min \{F_1(X), F_2(X), \dots, F_m(X)\}, X \in V \quad (20)$$

式中, X ——决策变量, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 在 V 范围内。

一般情况下各个目标彼此相互排斥, 所以需要确定各支和声之间的支配关系。如果决策变量 X_1 和 X_2 满足式(21), 则可确定决策变量 X_2 被 X_1 支配。

$$\begin{cases} \forall i: f_i(X_1) \leq f_i(X_2) \\ \exists i: f_i(X_1) < f_i(X_2) \end{cases} \quad i = 1, \dots, m \quad (21)$$

3) 计算拥挤度。对同级别和声进行拥挤度计算, 并根据拥挤度对其排序。

4) 利用杂交策略产生新和声。当迭代次数增加时, 算法中解的多样性会降低, 但是提高解的多样性又会导致收敛速度下降。因此, 本文采用杂交策略产生新和声。新和声产生算法^[18]如下:

$$X^{\text{new}} = X^{\text{Nd}} \pm \text{rand} |X^{\text{Nd}} - X^{\text{d}}| \quad (22)$$

式中, X^{new} ——生成的新和声; X^{Nd} 、 X^{d} ——随机选取的非支配和支配和声; rand ——HMCR 算法产生的随机数。

5) 更新和声记忆库。用新和声替换掉初始化后和声库 HM 中解最差的那个和声。

6) 判断算法是否达到终止条件, 返回步骤 4) 循环, 直到迭代次数为 G_{\max} , 则终止。

3.2 最优折衷解求取

在电力系统的日常调度中, 运行人员需要从 Pareto 最优解集中选取最优折衷解, 均衡各个目标, 从而确定最优方案。本文采用模糊隶属度函数法表示 Pareto 最优解集中各个目标的满意度, 通过比较满意度选取最优折衷解。隶属度函数定义如下:

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & f_i < f_{i,\min} \\ \frac{f_{i,\max} - f_i}{f_{i,\max} - f_{i,\min}}, & f_{i,\min} \leq f_i \leq f_{i,\max} \\ 0, & f_{i,\max} < f_i \end{cases} \quad (23)$$

式中, f_i ——第 i 个目标函数值; $f_{i,\max}$ 、 $f_{i,\min}$ ——目标函数值的上、下限。

$\mu_i = 0$ 表示调度人员对该目标函数值完全不满意, $\mu_i = 1$ 则表示对该目标函数值完全满意。根据下式求取 Pareto 解的标准化满意度, 其中满意度值

最大的便是最优折衷解。

$$\mu = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mu_i \quad (24)$$

式中, μ ——标准化满意度值; m ——目标函数数量。

4 算例分析

4.1 算例描述

基于6节点系统构造本文算例,如图3所示。算例系统中包含:2台火电,装机800 MW;1台热电联产,装机350 MW;1台等值风电,装机300 MW;1座抽水蓄能,最大发电功率120 MW,抽水功率80.1 MW。抽蓄机组参数参考文献[16],电、热负荷预测值和其他机组参数参考文献[19]。取调度周期为1 d,以1 h为一个调度时段。

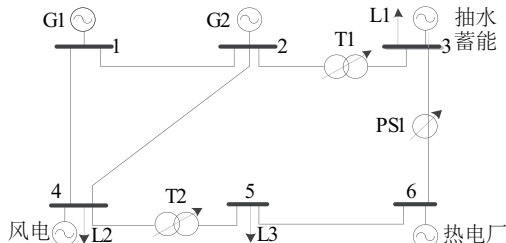


图3 6节点测试系统

Fig. 3 Six-node test system

4.2 结果分析

采用 MOHS 算法求解本文提出的电热联合系统多源协调优化模型,得到的 Pareto 解集分布均匀而广泛,如图4所示。

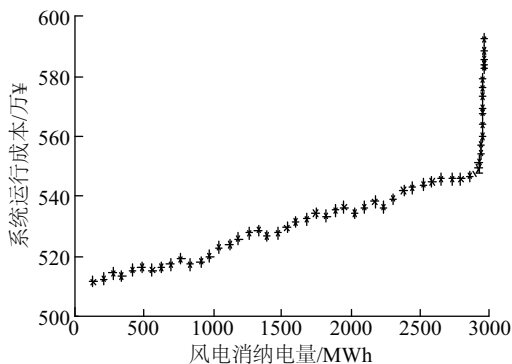


图4 Pareto最优解集分布

Fig. 4 Diagram of the distribution situation of Pareto optimal solution set

分别以风电消纳电量最大和系统运行成本最

小为目标搜寻极端解,如表1所示。

表1 Pareto最优解集中的极端解

Table 1 Extreme solutions in Pareto optimal set

优化模型	优化目标	F_1 /MWh	F_2 /万元
多源协调	F_1 最大	2984.04	592.39
优化模型	F_2 最小	139.87	511.26

从表1中可看出,如果单以风电消纳电量最大为优化目标,则系统运行成本会显著增加;如果单以系统运行成本最小为目标,则会对风电消纳造成不利影响。所以,需深度挖掘 Pareto 最优解集包含的所有信息,权衡各目标的影响,为调度运行人员决策提供科学依据。

根据模糊隶属度函数计算 Pareto 解的满意度,选取满意度值最大的决策向量作为最优折衷解,如表2所示。

表2 最优折衷解

Table 2 Best compromise solutions

优化模型	F_1 /MWh	F_2 /万元
多源协调优化模型	2909.67	546.19

为了说明电热联合系统中储热和抽水蓄能调节对风电消纳的作用,将电热联合系统多源协调优化模型和传统优化调度模型进行对比,对本文模型的有效性进行验证。

1) 多源协调配合

分别从储热装置工作与否两种运行情况研究电热联合系统多元电源间的协调运行机理。

结合图5~图8可看出,在供热侧配置储热,可通过在时间上平移热负荷,使夜间热电机组出力下降,为风电提供消纳空间,热负荷缺口由储热系统

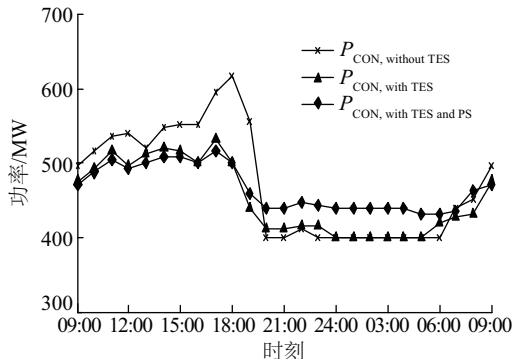


图5 火电机组出力

Fig. 5 Thermal units' outputs

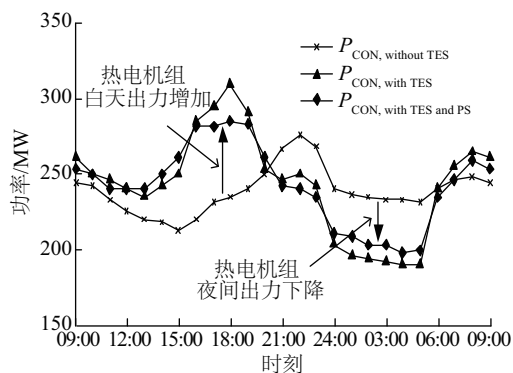


图6 热电机组出力

Fig. 6 Cogeneration units' outputs

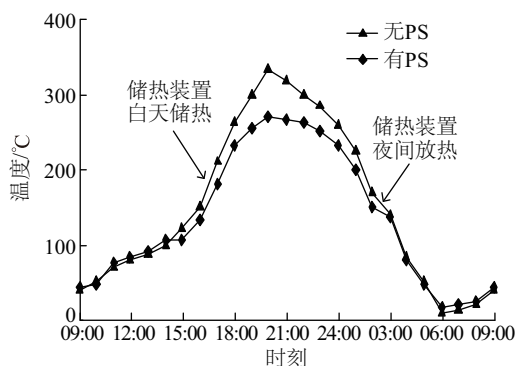


图7 储热装置储热量

Fig. 7 Variation of stored energy in TES

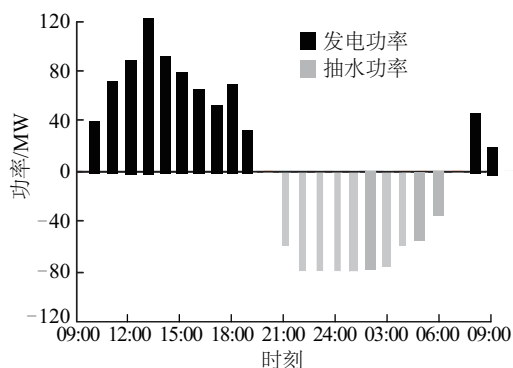


图8 抽水蓄能的发电及抽水功率

Fig. 8 Generation power and pumping power of pumped storage unit

补足;白天由于补充储热装置的储热量,热电机组出力上升,压缩火电机组出力以满足风电消纳的要求。然而,在电热联合系统的传统优化调度模型中,由于缺乏抽水蓄能参与调节,常规机组部分时段(24:00~05:00)运行在最小出力附近,这不仅增加了常规机组的运行成本,也导致常规机组调节能力不足而被迫弃风。而在多源协调优化模型中,通过

抽水蓄能的快速响应,可缓解常规机组的运行压力。当风电出力较大而系统电负荷处于低谷时段(21:00~06:00),为促进风电消纳,利用抽水蓄能抽水;当风电出力较小而系统电负荷处于高峰时段(08:00~19:00),为满足系统功率平衡和负荷供电需求,抽水蓄能开始发电。

2) 风电消纳情况

电热联合系统不同运行方式下的风电调度出力对比曲线如图9所示。

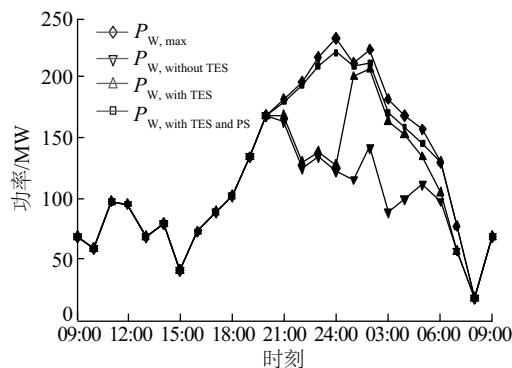


图9 风电调度出力对比曲线

Fig. 9 Contrast curves of wind power dispatching output

采用电热联合系统传统优化调度模型时,系统消纳的风电电量为2239.81 MWh,风电调度出力在1天24个时段中严重受限时段多达9个,弃风电量为744.23 MWh;利用储热装置提升系统灵活性后,系统消纳的风电电量增至2543.76 MWh,风电调度出力严重受限时段减少至4个,弃风电量为440.28 MWh,风电消纳水平得到了一定程度的提高;采用多源协调优化模型时,系统消纳的风电电量进一步增至2909.67 MWh,风电调度出力严重受限时段全部消除,弃风电量减少到74.37 MWh,风电消纳水平显著提高。

3) 系统运行成本

电热联合系统多源协调优化模型和传统优化调度模型得到的系统运行成本如表3所示。

表3 不同优化模型下的系统运行成本

Table 3 System operation costs of different optimal model

优化模型	常规 机组/万¥	抽水 蓄能/万¥	总成本/ 万¥
传统调度模型	588.42	0.00	588.42
含储热调度模型	563.73	0.00	563.73
多源协调优化模型	534.05	12.14	546.19

电热联合系统传统优化调度模型虽未考虑抽

水蓄能的调节成本,但只通过常规机组对风电出力波动进行调节,使得常规机组的发电成本远比多源协调运行的结果高。通过储热装置提升系统灵活性可在一定程度上减少常规机组的调节成本,但储热装置是通过在时间上平移热负荷、压缩火电机组出力进行调节的,受时间约束和火电机组出力限制,其调节能力和调节范围有限。而在多源协调运行的方式下,通过抽水蓄能的快速响应,发挥削峰填谷作用促进风电消纳,可进一步降低系统运行成本。

5 结 论

针对风电消纳困难和系统调节能力不足等问题,本文将储热系统与抽水蓄能作为提升系统灵活性的手段与常规机组共同参与电力系统优化调度,提出电热联合系统多源协调运行的调度模型,通过算例比较不同调度模型下风电消纳和系统运行结果,得到如下结论:

1)通过利用储热系统在时间上平移热负荷可以提升热电联产机组的灵活性,与不含储热的优化调度模型相比,在一定程度上可促进风电消纳,降低系统运行成本。

2)考虑储热系统与抽水蓄能调节作用的电热联合系统多源协调优化模型能有效缓解常规机组的调节压力,显著提高风电消纳水平,进一步减少系统运行成本。

3)在我国鼓励新能源发电优先上网和抽水蓄能发挥调峰效益的背景下,电热联合系统多源协调运行对于解决中国“三北”地区的风电消纳问题具有科学的指导意义。

[参考文献]

- [1] 国家能源局. 2017年上半年风电并网运行情况[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2017-07/24/c_136468307.htm, 2017-07-24.
- [1] National Energy Administration. China's wind power integration in the first half of 2017[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2017-07/24/c_136468307.htm, 2017-07-24.
- [2] 王晓海, 乔颖, 鲁宗相, 等. 供暖季风电电量消纳能力的评估新方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2112—2119.
- [2] Wang Xiaohai, Qiao Ying, Lu Zongxiang, et al. A novel method to assess wind energy usage in the heat-supplied season[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2112—2119.
- [3] 顾泽鹏, 康重庆, 陈新宇, 等. 考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3596—3604.
- [3] Gu Zepeng, Kang Chongqing, Chen Xinyu, et al. Operation optimization of integrated power and heat energy systems and the benefit on wind power accommodation considering heating network constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3596—3604.
- [4] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 含储热的电力系统电热综合调度模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 79—85.
- [4] Lyu Quan, Chen Tianyou, Wang Haixia, et al. Combined heat and power dispatch model for power system with heat accumulator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 79—85.
- [5] 徐飞, 闵勇, 陈磊, 等. 包含大容量储热的电热联合系统[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5063—5072.
- [5] Xu Fei, Min Yong, Chen Lei, et al. Combined electricity-heat operation system containing large capacity thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5063—5072.
- [6] 李佳佳, 胡林献. 基于二级热网电锅炉调峰的消纳弃风方案研究[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3286—3291.
- [6] Li Jiajia, Hu Linxian. Research on accommodation scheme of curtailed wind power based on peak-shaving electric boiler in secondary heat supply network[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3286—3291.
- [7] 吕泉, 姜浩, 陈天佑, 等. 基于电锅炉的热电厂消纳风电方案及其国民经济评价[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 6—12.
- [7] Lyu Quan, Jiang Hao, Chen Tianyu, et al. Wind power accommodation by combined heat and power plant with electric boiler and its national economic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 6—12.
- [8] 陈磊, 徐飞, 王晓, 等. 储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4283—4290.
- [8] Chen Lei, Xu Fei, Wang Xiao, et al. Implementation and effect of thermal storage in improving wind power

- accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4283—4290.
- [9] 龙虹毓, 马建伟, 吴 锴, 等. 含热电联产和风电机组的电网节能调度[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 18—22.
- [9] Long Hongyu, Ma Jianwei, Wu Kai, et al. Energy conservation dispatch of power grid with mass cogeneration and wind turbines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 18—22.
- [10] 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.
- [10] 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.
- [11] 袁小明, 程时杰, 文劲宇. 储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 14—18.
- [11] Yuan Xiaoming, Cheng Shijie, Wen Jinyu. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 14—18.
- [12] 刘德有, 谭志忠, 王 丰. 风电-抽水蓄能联合运行系统的模拟研究[J]. 水电能源科学, 2006, 24(6): 39—42.
- [12] Liu Deyou, Tan Zhizhong, Wang Feng. Study on combined system with wind power and pumped storage power[J]. Water Resources and Power, 2006, 24(6): 39—42.
- [13] 严干贵, 刘 嘉, 崔 杨, 等. 利用储能提高风电调度入网规模的经济性评价[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 45—52.
- [13] Yan Gangui, Liu Jia, Cui Yang, et al. Economic evaluation on improving wind power scheduling scale by using energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 45—52.
- [14] 胡泽春, 丁华杰, 孔 涛. 风电-抽水蓄能联合日运行优化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 36—41.
- [14] Hu Zechun, Ding Huajie, Kong Tao. A joint daily operational optimization model for wind power and pumped-storage plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 36—41.
- [15] 徐 飞, 陈 磊, 金和平, 等. 抽水蓄能电站与风电的联合优化运行建模及应用分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 149—154.
- [15] Xu Fei, Chen Lei, Jin Heping, et al. Modeling and application analysis of optimal joint operation of pumped storage power station and wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 149—154.
- [16] 刘 芳, 潘 毅, 杨军峰, 等. 风电-火电-抽水蓄能联合优化机组组合模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 766—775.
- [16] Liu Fang, Pan Yi, Yang Junfeng, et al. Combination model of wind power-thermal power-pumped storage combined optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 766—775.
- [17] Geem Zong Woo, Kim Joong Hoon, Loganathan G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search[J]. Simulation, 2011, 76(2): 60—68.
- [18] Zou Dexuan, Gao Liqun, Wu Jianhua, et al. A novel global harmony search algorithm for reliability problems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(2): 307—316.
- [19] 邓佳乐, 胡林献, 李佳佳. 采用二级热网电锅炉调峰的消纳弃风机理及经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 41—47.
- [19] Deng Jiale, Hu Linxian, Li Jiajia. Analysis on the mechanism and economical analysis of the elimination of abandoned wind with secondary heat network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 41—47.

MULTI-SOURCE COORDINATION AND OPTIMAZATION OPERATION OF COMBINED HEAT AND POWER SYSTEM CONSIDERING WIND POWER CONSUMPTION

Li Shoudong¹, Dong Haiying¹, Zhang Ruiping¹, Ma Xiping², Yan Zhijie¹

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. State Grid Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To solve the consumption problem of wind power in the Three Norths (for northwest China, north China, and northeast China), from the perspective of improving the regulation of the power system, the heat storage is configured in the heat supply side and the pumped storage is configured in the power supply side, a multi-source coordinated operation scheduling mode of combined heat and power system is formed by cooperating with conventional generators to participate in grid optimization scheduling. Based on the study of the distribution characteristics of electric heating load and wind power output, the influence mechanism of multi-source coordination of combined heat and power system on wind power consumption is analyzed in depth, and aiming at the goal of maximum wind power consumption and minimum system operating cost, the multi-source coordinated operation and optimization model of combined heat and power system is established, and the multi-objective harmony search algorithm is used to solve the model. The 6-node system is used as an example to verify the validity of the model. The results show that the multi-source coordinated operation of combined heat and power system can effectively reduce the system operation costs and increase the level of wind power consumption.

Keywords: wind power; heat storage; pumped storage; combined heat and power; multi-source coordination