

DOI: 10.7667/PSPC170688

计及热网特性的电热联合系统调度方法

邵世圻¹, 戴赛², 胡林献¹, 丁强², 谢华宝¹

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100089)

摘要: 电力系统与热力系统协调优化运行是提高风电消纳能力的有效方法。针对热能传输与电能传输不同的特点, 进一步研究热网特性对风电消纳的影响。首先结合热网水力模型及其实际热网结构与运行特点, 提出了一种热网实用水力模型。然后在建立延时和衰减等热网特性方程及电热耦合模型基础上, 构建了计及热网特性的电热联合系统调度模型。该模型不仅方便考虑延时和衰减等热网特性, 而且不需解算热网水力模型, 简化了约束条件, 编程简单。算例分析表明, 热网特性对电热联合系统优化调度结果及风电消纳率影响较大, 延时特性有利于风电上网, 而衰减特性则对风电上网不利。

关键词: 电热联合系统; 调度模型; 热网特性; 热网模型; 风电消纳

Research on heat-electricity combined scheduling method considering the characteristics of the heating network

SHAO Shiqi¹, DAI Sai², HU Linxian¹, DING Qiang², XIE Huabao¹

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100089, China)

Abstract: The coordinated optimization operation of power system and thermal system is an effective method to improve wind power consumption capacity. Aiming at the different characteristics between heat transfer and power transfer, this paper gives a further research on the impact of the heating network characteristics on wind power consumption capacity. Firstly, combining the heating network hydraulic model and its actual heating network structure and operation characteristic, this paper introduces a functional heating network hydraulic model. Then, based on the establishment of the heating network characteristics equation of delay and attenuation and the heat-electricity coupling model, a heat-electricity combined scheduling model considering the characteristics of the heating network is built. The model not only is convenient to consider the characteristics of delay and attenuation, but also simplifies the calculation of hydraulic model and the constraints of the scheduling model, which is also easy programming at the same time. A numerical example shows that the heating network characteristic can greatly affect the heat-electricity combined optimal scheduling result and wind power consumption capacity, the delay characteristic is conducive for the wind power integration, and the attenuation characteristic goes against the wind power integration.

This work is supported by Science and Technology Project "Research and Application of Key Techniques of Combined Thermo-electric Dispatch Considering Safety and Economy" which belongs to State Grid Corporation of China.

Key words: heat-electricity combined system; scheduling model; heating network characteristics; heating network model; wind power consumption

0 引言

三北地区以热电为主, 同时风电并网比例较大。在冬季供暖期, 热电机组出力大, 同时又与风电大发时间重合, 从而导致了电力系统弃风现象较

为严重^[1-2]。

针对三北地区弃风严重的现象, 国内学者提出了多种方案, 主要是在电热联合系统中增设电锅炉、热泵和储热装置等, 通过以上方案解耦以热定电约束, 提升电网的风电消纳率。文献[3]提出建立热电联产系统和电动热泵的复合系统方案, 引入等效热电厂的概念, 并将热效率、电效率和热电比进行等效。文献[4]提出在热电厂内部配置大型电锅炉与热

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“考虑安全与经济的电热联合优化调度关键技术研究与应用”

电厂共同承担供热任务, 通过大型电锅炉消耗电能供热来降低热电机组根据“以热定电”约束导致的较高出力。文献[5]提出在热力系统中配置大容量的储热设备替代集中锅炉房和分散锅炉房, 将电力系统中的电力负荷转换成热负荷储存起来, 从而更灵活地与风电的随机性、间歇性匹配, 形成热电联合调度系统。文献[6]提出利用电动汽车并网实现一定程度的风电消纳。

但以上文献在研究电热联合系统调度时, 都假设热力系统中的热能传输像电力系统中的电能传输一样, 是即时完成的。实际上, 热网输送热能不仅存在延时, 而且有衰减, 这些热网特性对调度结果将产生较大影响。文献[7]虽在调度模型中计及了热网约束, 但热网模型参照输电系统建立, 复杂且与实际热网辐射状结构不符, 算例分析时更是假设延时、衰减为一固定常数。

本文首先结合热网水力模型及其实际热网结构与运行特点, 研究热网实用水力模型, 然后研究热网延时、衰减特性方程及电热耦合模型, 在此基础上建立了计及热网特性的电热联合系统调度模型, 并提出了一种带有自调节环节的粒子群求解算法。最后通过实例分析, 研究了延时、衰减等热网特性对风电消纳率的影响。

1 热网模型

热力系统由热源、热网和热负荷组成, 其中热网又由拓扑结构完全相同的供水网络和回水网络组成。热网建模主要基于支路特性及网络基本定律。其中支路特性反映管道两端的热力变化, 与管道特性、管内流体温度等因素密切相关; 网络基本定律由网络拓扑结构决定^[8-9]。一般从水力和热力两个角度出发, 建立热网支路特性方程和平衡方程。

1.1 热网水力方程

水力方程用以计算各管道内水流量和各个节点的水流入量。

1) 水力方程

水力方程用于计算节点注入水流量。

$$Am = m_q \quad (1)$$

式中: A 为热网管道与节点的关联矩阵; m 为管道流量; m_q 为节点注入水流量。

2) 压强损失方程

压强损失方程表征管道内压强损失与水流量的关系。

$$h_f = Km|m| \quad (2)$$

式中, K 为各供热管道的阻抗系数, K 值主要取决

于管道直径、液体物理性质, 其具体求解公式为

$$K = \frac{\varepsilon}{D} \quad (3)$$

式中: ε 为管道的绝对粗糙度值; D 为管道的直径。

水力方程求解有压强法和环流法等两种方法, 分别对应电路中的节点电压法和节点电流法, 一般采用压强法进行求解。

1.2 热网热力方程

1) 热力支路特性方程

热力支路特性方程用于计算各管道的延时及衰减^[10]。假设管道 k 的入口、出口节点分别为 i 、 j , 则

$$\tau_{ij,t} = V_{ij} / G_{ij,t} \quad (4)$$

式中: $\tau_{ij,t}$ 为 t 时刻管道 ij 的延时; V_{ij} 为管道 ij 的特征量, 与管道的横截面积和长度相关; $G_{ij,t}$ 为 t 时刻管道 ij 的流量。

$$\Delta Q_{ij,t} = 2\pi\lambda(T_{ij,t} - T_0) \cdot L_{ij} / \ln(D_{ij} / d_{ij}) \quad (5)$$

式中: $\Delta Q_{ij,t}$ 为管道 ij 的热量衰减; λ 为管道保温层的导热系数; $T_{ij,t}$ 为管道 ij 介质的温度; T_0 为保温层外表面温度; L_{ij} 为管道长度; d_{ij} 、 D_{ij} 分别为管道内径和外径。

2) 热网热力方程

热负荷与水流量关系式为

$$Q_{i,t} = CG_{i,t}(T_{i,t,s} - T_{i,t,r}) \quad (6)$$

供水、回水网络节点间温度关系为

$$\begin{cases} T_{i,t,r} = (T_{j,t,r} - T_a)^{\frac{\lambda_0 d_{ij}}{Cm_{ij}}} + T_a \\ T_{i,t,s} = (T_{j,t,s} - T_a)^{\frac{-\lambda_0 d_{ij}}{Cm_{ij}}} + T_a \end{cases} \quad (7)$$

式中: C 为工质体积比热; λ_0 为输热管道每米的传输阻抗; T_a 为外界的自然温度; $T_{i,t,s}$ 、 $T_{i,t,r}$ 分别为 t 时刻供热管道入口节点 i 的供给温度以及返回温度; $T_{j,t,s}$ 、 $T_{j,t,r}$ 分别为 t 时刻供热管道 k 出口节点 j 的供给温度以及返回温度; $Q_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的热负荷。

1.3 热网实用水力模型

实际热力系统的每个热源(如热电厂)固定地供给特定地区热负荷, 各热源之间要么不相连, 要么有管道相连, 但管道通常处于关闭状态, 这使得热网结构不是环网结构, 而是辐射状结构。本文采取质调节作为热网调节方式, 即保持热源处流量恒定, 通过调节热源处水温适应系统热负荷变化。综合热网水力方程及其结构、运行特点, 得到热网实用水力模型。

$$\begin{cases} G_{j,t}^L = \frac{Q_{j,t}}{C_p \times (T_{j,t,s} - T_{j,t,r})} \\ G_{ij,t} = G_{j,t}^L + \sum_{l \in j, l \neq i} G_{jl,t} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $G_{j,t}^L$ 为 j 点处换热站水流量; $G_{ij,t}$ 为该换热站与其热网上游 i 节点之间管道水流量; $\sum_{l \in j, l \neq i} G_{jl,t}$ 为该换热站热网下游各节点水流量之和。

2 电热联合系统优化调度模型

调度模型以电热联合系统的总体运行煤耗量最小为优化目标辅以弃风量最小, 综合考虑供电平衡约束、供热平衡约束、热电机组、纯凝机组、风电机组出力约束、机组爬坡约束、热网特性约束等约束条件^[11-13]。

2.1 目标函数

$$\min F = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_{TP}} (f_i^{TP} (P_{i,t}^{TP})) + \sum_{i=1}^{N_{CHP}} f_i^{CHP} (P_{i,t}^{CHP}, Q_{i,t}^{CHP}) \right) + C_{CW} \quad (9)$$

式中: T 为时段总数; N_{TP} 、 N_{CHP} 、 N_i 分别为火电机组、热电厂、第 i 座热电厂热电机组的数量; 函数 f_i^{TP} 、 f_i^{CHP} 分别为第 i 台火电机组、第 i 座热电厂中第 n 台热电机组运行煤耗量; $P_{i,t}^{TP}$ 为第 i 台火电机组在时段 t 的出力; $P_{i,n,t}^{CHP}$ 、 $Q_{i,n,t}^{CHP}$ 分别为第 i 座热电厂中第 n 台热电机组在时段 t 的发电功率与供热功率; C_{CW} 为弃风电量的惩罚项, 可定义为

$$C_{CW} = \varphi \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{CW}} (\overline{P_{i,t}^{CW}} - P_{i,t}^{CW}) \quad (10)$$

式中: φ 为惩罚因子; N_{CW} 为风电场个数; $\overline{P_{i,t}^{CW}}$ 为第 i 个风电场在时段 t 的预测发电功率; $P_{i,t}^{CW}$ 为实际发电功率。

2.2 约束条件

1) 供电平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_{CHP}} \sum_{n=1}^{N_i} P_{i,n,t}^{CHP} + \sum_{j=1}^{N_j} P_{j,t}^{TP} + P_t^{CW} = P_t^{\text{load}} \quad (11)$$

式中: $P_{i,n,t}^{CHP}$ 为 t 时段第 i 座热电厂中第 n 台热电机组的电功率; $P_{t,j}^{TP}$ 为 t 时段第 j 台火电机组的电功率; P_t^{CW} 为 t 时段风电场的总上网功率; P_t^{load} 为 t 时段系统总电负荷。

2) 供热平衡约束

供热系统按供热区域分别平衡。

$$\sum_{n=1}^{N_i} Q_{i,n,t}^{CHP} = \sum_{l=1}^{N_h} (Q_{l,t+\tau_{l,j}} + \Delta Q_{l,t+\tau_{l,j}}), i=1, \dots, N_{CHP} \quad (12)$$

式中: $\tau_{l,j}$ 为热水到达第 l 节点的延时时间; $Q_{l,t+\tau_{l,j}}$ 为 $t+\tau_{l,j}$ 时段第 l 个换热站的热负荷; $\Delta Q_{l,t+\tau_{l,j}}$ 为 $t+\tau_{l,j}$ 时段第 l 个换热站的等效热量补偿。

3) 电热耦合约束

热电机组上下限 $P_{i,\max}^{\text{CHP}}$ 、 $P_{i,\min}^{\text{CHP}}$ 与供热功率 Q_{si} 满足如式(13)关系。

$$\begin{cases} a_L + Q_{si} b_L = P_{i,\min}^{\text{CHP}} \\ a_H + Q_{si} b_H = P_{i,\max}^{\text{CHP}} \end{cases} \quad (13)$$

式中, a_L 、 b_L 、 a_H 、 b_H 均为拟合系数。

供热功率 Q_{si} 与热源出口水温及流量的关系如式(14)所示。

$$Q_{si} = CG_{si} (T_{si,s} - T_{si,r}) \quad (14)$$

式中, $T_{si,s}$ 、 $T_{si,r}$ 、 G_{si} 分别为热源节点 si 的出口水温、回水温度和出口流量。

4) 热电机组热功率限制

$$Q_{si,\min} \leq Q_{si} \leq Q_{si,\max} \quad (15)$$

式中, $Q_{si,\max}$ 、 $Q_{si,\min}$ 分别为热电机组热功率上下限。

5) 机组电出力上下限

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (16)$$

式中, $P_{i,\max}$ 、 $P_{i,\min}$ 分别为热电机组电出力上下限。

6) 机组爬坡约束

$$-\Delta P_{i,\text{down}} \leq P_{t,i} - P_{t-1,i} \leq \Delta P_{i,\text{up}} \quad (17)$$

式中, $\Delta P_{i,\text{down}}$ 、 $\Delta P_{i,\text{up}}$ 分别为机组在一个时段内可以降低或升高的最大电出力。

7) 热网特性约束

参考式(4)、式(5)、式(7)和式(8)。

2.3 调度模型求解方法

上述调度模型是一个多维、非线性优化问题。基本粒子群优化算法在处理这样的问题时收敛速度较慢, 最终可能陷入局部最优解。本文参考文献[12-16], 采用了一种改进基本粒子群算法, 即在基本粒子群算法的基础上, 引入自调节环节来处理以上约束条件。自调节改进粒子群优化算法流程图如图1所示。

以机组电出力为例, 将每个机组出力视为一个粒子, 每次粒子位置更新后将其值与机组出力上下限进行比较, 若该值超出范围, 则以界限值对其取代。每次迭代求出该值与上、下限的差值的绝对值作为其可向上、向下调节裕度。根据调度结果违反供电平衡约束的大小以及每台机组可调节的裕度来对机组的出力进行调节。经过自调节环节后, 提高了可行解的比例, 大大提高了算法的收敛速度。

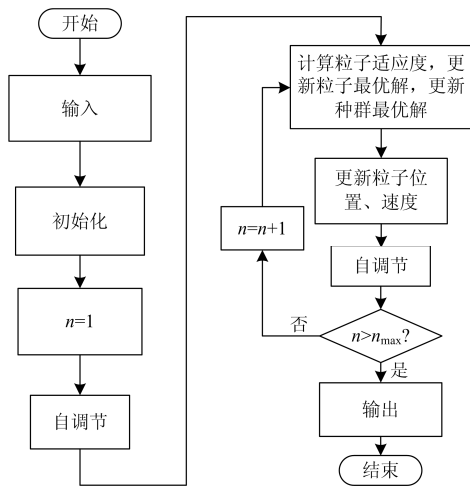


图 1 自调节改进粒子群优化算法流程图

Fig. 1 Flow chart of modified PSO with self-regulation

3 算例分析

3.1 原始数据

算例系统部分参考文献[12-13], 含有 1 座热电

厂、1 座火电厂、1 座风电场。其中热电厂包含有 12 台抽凝式机组, 编号#1—#12。火电厂包含 4 台纯凝式机组, 编号#13—#16。热力系统带 9 个换热站(图 2 所示), 编号#h1—#h3, #h5—#h10。表 1 为系统各时段热、电负荷及风电预测出力, 表 2 为热网管道参数。

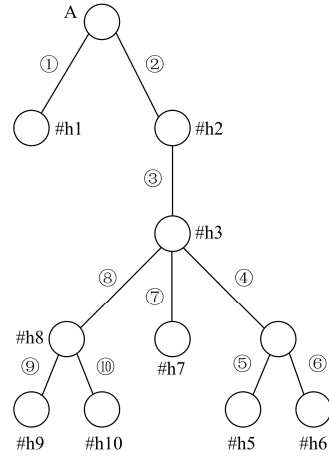


图 2 热网水力平面图

Fig. 2 Hydraulic plan of the heating network

表 1 各时段热、电负荷及风电预测出力

Table 1 Hourly forecast of the heat load, the electrical load and the wind power output

	#h1	#h2	#h3	#h5	#h6	#h7	#h8	#h9	#h10	全网电 负荷/MW	风电预 测/MW
1	386.82	284.66	281.36	287.86	285.36	282.56	289.56	288.86	288.06	1 472.32	209.69
2	377.48	279.11	275.93	282.19	279.78	277.09	283.83	283.15	282.38	1 488.51	217.25
3	372.82	278.58	275.54	281.53	279.23	276.65	283.1	282.46	281.72	1 484.27	197.52
4	359.16	273.02	270.24	275.72	273.61	271.25	277.15	276.56	275.89	1 485.71	180.41
5	358.34	272.15	269.37	274.85	272.74	270.38	276.29	275.7	275.02	1 503.14	171.53
6	342.46	254.66	251.82	257.41	255.26	252.85	258.87	258.27	257.58	1 585.89	149.43
7	330.82	240.81	237.9	243.63	241.43	238.96	245.13	244.51	243.8	1 619.14	101.18
8	341.08	248.36	245.36	251.26	248.99	246.45	252.81	252.17	251.44	1 607.32	54.41
9	328.66	241.86	239.06	244.58	242.45	240.08	246.02	245.43	244.75	1 635.75	81.78
10	281.4	208.4	206.04	210.69	208.9	206.9	211.9	211.4	210.83	1 573.79	79.85
11	255.12	189.06	186.93	191.13	189.52	187.7	192.23	191.78	191.26	1 671.18	108.18
12	267.08	194.96	192.63	197.22	195.45	193.48	198.42	197.92	197.36	1 626.38	133.82
13	282.98	198.47	195.74	201.12	199.05	196.74	202.53	201.95	201.29	1 575.14	87.67
14	268.32	200.1	197.89	202.23	200.56	198.69	203.37	202.9	202.37	1 593.15	96.53
15	268.72	197.75	195.46	199.97	198.24	196.29	201.15	200.67	200.11	1 673.81	65.09
16	286.94	211.16	208.71	213.53	211.68	209.60	214.79	214.27	213.68	1 588.92	92.84
17	320.08	235.55	232.82	238.19	236.13	233.81	239.60	239.02	238.36	1 623.14	110.82
18	329.24	237	234.03	239.89	237.64	235.11	241.43	240.8	240.07	1 679.26	133.64
19	325.88	239.81	237.03	242.51	240.40	238.05	243.94	243.35	242.68	1 646.72	158.93
20	324.76	244.27	241.67	246.79	244.82	242.62	248.13	247.58	246.95	1 618.94	176.59
21	351.3	258.52	255.52	261.43	259.16	256.61	262.97	262.34	261.61	1 677.49	184.41
22	371.12	273.11	269.94	276.18	273.78	271.09	277.81	277.14	276.37	1 556.6	193.06
23	375	273.32	270.04	276.51	274.02	271.23	278.2	277.5	276.7	1 503.52	208.84
24	379.12	284.28	281.21	287.25	284.93	282.33	288.82	288.17	287.43	1 505.05	216.77

表 2 热网管道参数

Table 2 Parameters of thermal grid pipelines

管道号	管径/mm	总长/m
1	400	12 910
2	1 000	18 610
3	800	13 620
4	500	4 180
5	320	11 680
6	320	13 640
7	320	13 640
8	800	4 490
9	320	13 640
10	320	13 410

3.2 优化调度结果及其分析

3.2.1 热网延时特性对风电消纳率的影响分析

计及热网延时特性与不计及热网延时特性两种情况下热机组总热功率、火电机组总出力、风电上网功率对比曲线分别如图 3、图 4 和图 5 所示。

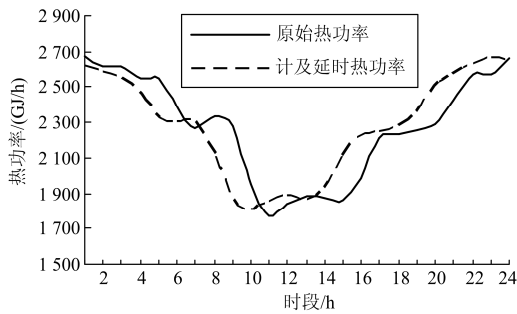


图 3 热机组总热功率对比曲线

Fig. 3 Comparison between the heat load of the system with or without considering the heating network delay

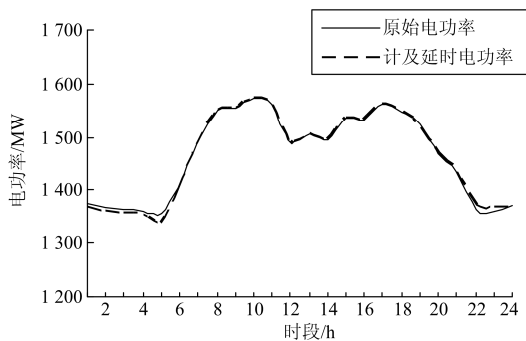


图 4 火电机组总出力对比曲线

Fig. 4 Comparison between the electrical load (excluding wind power) of the system with or without considering the heating network delay

从图 3 可以看出，计及热网延时特性后，热电

机组总热功率整体左移，同时由于各节点延时时间不同，热发电机组总热功率曲线也有所改变。

从图 4 可以看出，在计及热网延时后，火电机组总出力随着热发电机组总热功率曲线变化而有所改变。在系统弃风时段，随着系统热出力的减少，热电厂的电出力减少，火电机组总出力有所降低，反之则反。

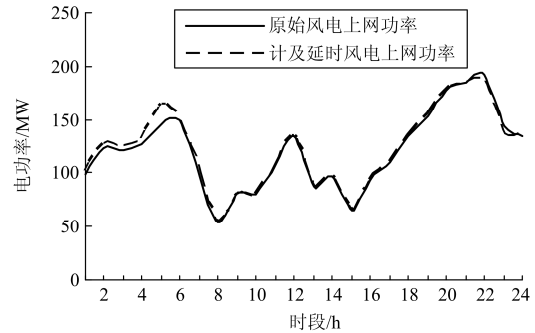


图 5 风电上网功率对比曲线

Fig. 5 Comparison between the wind power output of the system with or without considering the heating network delay

对比图 4 和图 5，在弃风时段，系统电负荷一定时，随着热电厂出力减少，系统风电上网空间增加，如图中所示 1:00—6:00，而热电厂 22:00—24:00 的出力增加，弃风量增加。

3.2.2 热网衰减特性对风电消纳率的影响分析

图 6、图 7 和图 8 分别为计及热网衰减与不计及热网衰减时热机组总热功率、火电机组总出力以及风电上网功率对比曲线。

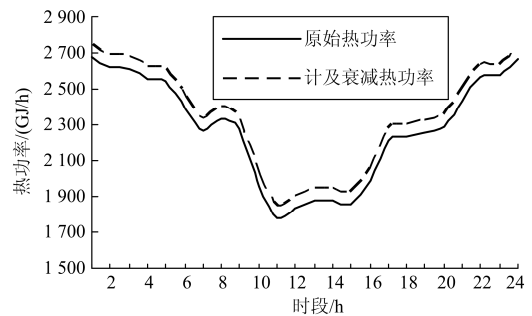


图 6 热机组总热功率对比曲线

Fig. 6 Comparison between the wind power output of the system with or without considering the heating network attenuation

从图 6 可以看出，计及热网衰减之后，热发电机组总热功率曲线整体上移，即在实际热负荷不变的情况下，热发电机组供热功率增加。

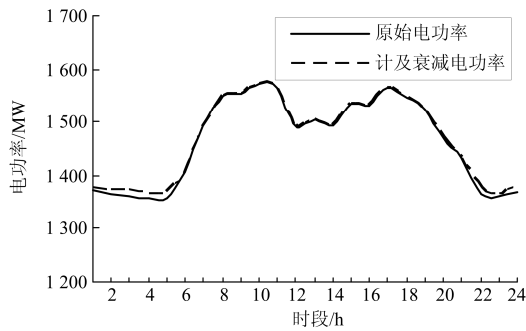


图7 火电机组出力对比曲线

Fig. 7 Comparison between the electrical load (excluding wind power) of the system with or without considering the heating network attenuation

从图7可知,在弃风时段,随着系统热发电机组供热功率增加,热发电机组电出力增加,火电机组总出力增加,反之则反。

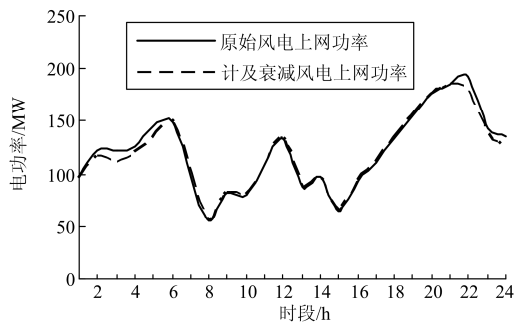


图8 风电上网功率对比曲线

Fig. 8 Comparison between the wind power output of the system with or without considering the heating network attenuation

从图8可以发现,考虑热网衰减特性后,热发电机组的供热功率增加,火电机组出力增大,在实际热负荷不变的情况下,上网风电功率将下降。

表3为不同情况下的系统调度结果汇总表。

表3 不同条件下结果汇总表

Table 3 Results of the three scenarios

	不计及 热网特性	计及热网延时	计及热网衰减
煤耗量/t	20 824.62	20 799.83	20 977.84
弃风量/MWh	519.52	484.58	578.68
弃风率/%	15.23	14.21	16.97

从表3可以看出,计及热网延时和热网衰减的情况下,系统煤耗量、风电消纳率均有所改变。计及热网延时的情况下,系统提前供热,系统供热高峰时段与电负荷低谷时期、风电大发时期错开。系

统煤耗量降低,弃风量减小。而计及热网衰减的情况下,系统热发电机组出力增加,煤耗量增加,压榨了风电上网空间,系统弃风量增加。

4 结论

1) 本文结合热网现有水力模型、热力模型以及热网实际结构与运行特点,提出了一种热网实用模型,模型简单,方便计及电锅炉等电热转换设备,且特别容易改造成热网约束方程式。

2) 建立了延时、衰减等热网特性方程,在此基础上构建了计及热网特性的电热联合系统调度模型。模型不仅方便考虑延时、衰减等热网特性,而且不需解算热网水力模型,简化了约束条件,编程简单。

3) 热网特性对电热联合系统优化调度结果影响较大,延时特性使热发电机组热出力整体左移,热发电机组电出力下降,有利于风电上网。而衰减特性则增加了热发电机组的电、热出力,对风电上网不利。

参考文献

- [1] 张冲, 胡林猷, 胡佳. 热发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.
- [2] MANCARELLA P. Cogeneration systems with electric heat pumps: energy-shifting properties and equivalent plant modelling[J]. Energy Conversion & Management, 2009, 50(8): 1991-1999.
- [3] 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.
LÜ Quan, JIANG Hao, CHEN Tianyou, 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.
- [4] 徐飞, 闵勇, 陈磊. 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.
XU Fei, MIN Yong, CHEN Lei. Combined electricity-heat operation system containing large capacity thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5063-5072.
- [5] 任博强, 彭鸣鸿, 蒋传文, 等. 计及风电成本的电力系

- 统短期经济调度建模[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 39(5): 37-72.
- REN Boqiang, PENG Minghong, JIANG Chuanwen, et al. Short-term economic dispatch of power system modeling considering the cost of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2010, 39(5): 37-72.
- [6] 汪春, 吴可, 张祥文, 等. 规模化电动汽车和风电协同调度的机组组合问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 41-48.
- WANG Chun, WU Ke, ZHANG Xiangwen, et al. Unit commitment considering coordinated dispatch of large scale electric vehicles and wind power generation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 41-48.
- [7] 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.
- 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.
- [8] LIU X, JENKINS N, WU J, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[D]. Cardiff: Cardiff University, 2014.
- [9] CHO H, SMITH AD, MAGO P. Combined cooling, heating and power: a review of performance improvement and optimization[J]. Applied Energy, 2014, 136: 168-185.
- [10] 供热管道保温结构散热损失测试与保温效果评定方法: CJ/T 140—2001[S].
- Methods measuring and evaluating heat loss and thermal insulation efficiency for thermal insulation construction of heating pipeline: CJ/T 140—2001[S].
- [11] HU Bao, WANG He, YAO Sen. Optimal economic operation of isolated community microgrid incorporating temperature controlling devices[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 70-80. DOI: 10.1186/s41601-017-0037-1.
- [12] 李佳佳. 基于二级热网电锅炉调峰的热电联合调度方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 24-41.
- LI Jijia. Research on heat-electricity combined scheduling method of peak load regulation based on boiler in the secondary heat supply network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 24-41.
- [13] 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.
- DENG Jiale, HU Linxian, LI Jijia. Analysis on mechanism of curtailed wind power accommodation and its economic operation based on electric boiler for peak-load regulation at secondary heat supply network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 41-47.
- [14] 吴辰斌, 李海明, 刘栋, 等. 一种改进型粒子群优化算法在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 44-48.
- WU Chenbin, LI Haiming, LIU Dong, et al. Application of improved particle swarm optimization algorithm to power system economic load dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 44-48.
- [15] 吴昊, 王艳松. 基于智能单粒子算法的微电网经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 43-49.
- WU Hao, WANG Yansong. Economic dispatch of microgrid using intelligent single particle optimizer algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 43-49.
- [16] 宋卓然, 赵琳, 张子信, 等. 热电联产与风电机组联合运行滚动优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 110-116.
- SONG Zhuoran, ZHAO Lin, ZHANG Zixin, et al. Rolling optimal model for multiple heating source and wind turbine unit[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 110-116.

收稿日期: 2017-05-08; 修回日期: 2017-07-12

作者简介:

邵世圻(1992—), 男, 研究方向为电热联合系统的建模与优化调度; E-mail: 1289318482@qq.com

戴 赛(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统经济调度及电网安全分析;

胡林献(1966—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为高压直流输电系统运行与控制、电力系统稳定性分析与控制、发电厂过程自动化。E-mail: linxian_hu@163.com

(编辑 魏小丽)