



(21) 申请号 201910896712.9

(22) 申请日 2019.09.23

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110601264 A

(43) 申请公布日 2019.12.20

(73) 专利权人 国网辽宁省电力有限公司鞍山供电公司

地址 114002 辽宁省鞍山市铁东区南胜利路52号

专利权人 国网辽宁省电力有限公司
东北电力大学
国家电网有限公司

(72) 发明人 苏安龙 黄南天 贺欢 王顺江
赵铁英 刘德宝

(74) 专利代理机构 长春市吉利专利事务所(普通合伙) 22206

专利代理师 李晓莉

(51) Int.Cl.

H02J 3/38 (2006.01)

H02J 3/46 (2006.01)

H02J 3/28 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 110232640 A, 2019.09.13

CN 107204632 A, 2017.09.26

CN 107508328 A, 2017.12.22

CN 109494784 A, 2019.03.19

CN 109474026 A, 2019.03.15

CN 110212586 A, 2019.09.06

CN 109193815 A, 2019.01.11

CN 108964128 A, 2018.12.07

葛维春 等.《含风光储能源-储-荷规划与运行调控策略》.《电力系统保护与控制》.2019,

杨锡运 等.《提升风电就地消纳的蓄热式电锅炉优化调度研究》.《电器与能效管理技术》.2017,

审查员 刘琦

权利要求书4页 说明书10页 附图5页

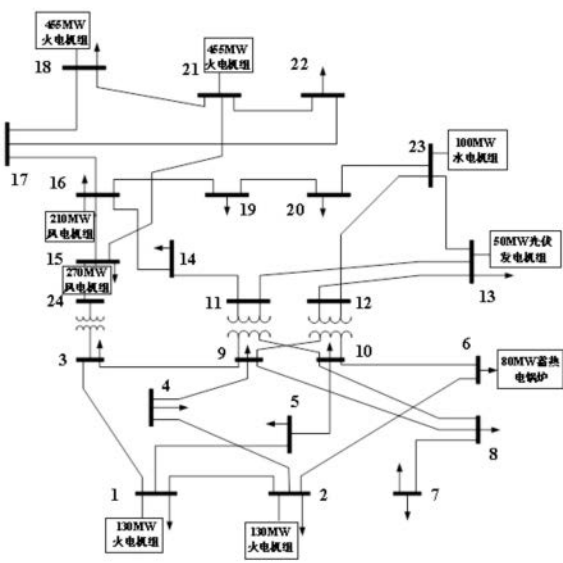
(54) 发明名称

计及超大功率蓄热电锅炉消纳能力的多能源优化调度方法

(57) 摘要

计及超大功率蓄热电锅炉消纳能力的多能源优化调度方法属于多能源优化调度技术领域。本发明参考现有研究成果,从经济、环保、最大化消纳清洁能源三方面入手,建立了考虑蓄热电锅炉消纳能力的风-光-水-火电联合优化目标函数。通过在调度模型中加入蓄热电锅炉这种可控负荷,能够在风电等清洁能源不能消纳时,作为负荷消纳过剩的清洁能源。在保证系统安全稳定运行的同时,提高风电消纳能力,实现了最优清洁能源调度。在冬季供暖时,考虑了蓄热电锅炉的储热、放热能力后,通过电采暖的方式,既满足冬季取暖需求,也能够减少清洁能源的浪费,有利于消纳风电等清洁能源。本发明的调度方法适

用于在冬季供暖季节。



1. 计及超大功率蓄热电锅炉消纳能力的多能源优化调度方法,其特征是:包括以下步骤,并且以下步骤顺次进行,

步骤一:以消纳风、光、水三种清洁能源最大化为目的建立目标函数:

$$F = \max (P_q / P_{q\max})$$

式中, F 为目标函数, P_q 为一天内清洁能源使用总量, $P_{q\max}$ 为一天内清洁能源总发电量;

$$P_q = P_F + P_S + P_G$$

$$P_{q\max} = P_{F\max} + P_{S\max} + P_{G\max}$$

式中, P_q 为一天内清洁能源使用总量, $P_{q\max}$ 为一天内清洁能源总发电量, P_F 为一天内风能使用总量, P_S 为一天内水能使用总量, P_G 为一天内光能使用总量, $P_{F\max}$ 为一天内风能发电总量, $P_{S\max}$ 为一天内水能发电总量, $P_{G\max}$ 为一天内光能发电总量;

步骤二、将风力发电机组、光伏发电机组、水力发电机组和蓄热电锅炉计入系统,并建立系统模型;

步骤三、将全天24小时按照设定时间划分调度时段,并设定模型约束条件

1) 设定全网功率平衡约束条件如下:

$$P_{Ht} + P_{St} + P_{Lt} + P_{Ft} + P_{Gt} = P_{Dt} + P_{Rebt}$$

式中, P_{Ht} 为时段 t 内火电机组发电功率, P_{St} 为时段 t 内水力发电机组发电功率, P_{Lt} 为时段 t 内系统线损功率, P_{Ft} 为时段 t 内风力发电机组发电功率, P_{Gt} 为时段 t 内光伏机组发电功率, P_{Dt} 为时段 t 内系统总负荷, P_{Rebt} 为时段 t 内蓄热电锅炉用电功率;

2) 设定网络运行约束条件如下:

$$\begin{cases} P_{Hb,t} + P_{Fb,t} + P_{Sb,t} + P_{Gb,t} - P_{b,t}^D = V_{b,t} \sum_{j=1}^n V_{j,t} Y_{bj} \cos \theta_{bj,t} \\ Q_{Hb,t} + Q_{Fb,t} + Q_{Sb,t} + Q_{Gb,t} - Q_{b,t}^D = V_{b,t} \sum_{j=1}^n V_{j,t} Y_{bj} \sin \theta_{bj,t} \\ V_b^{\min} \leq V_{b,t} \leq V_b^{\max} \\ \Psi_i^{\min} \leq \Psi_{l,t} \leq \Psi_i^{\max} \end{cases}$$

式中, $b, j \in I$, I 为网络节点数, t 为调度时段, $P_{Hb,t}$ 为节点 b 的注入火力发电机组有功功率, $P_{Fb,t}$ 为节点 b 的注入风力发电机组有功功率, $P_{Sb,t}$ 为节点 b 的注入水力发电机组有功功率, $P_{Gb,t}$ 为节点 b 的注入光伏发电机组有功功率, $Q_{Hb,t}$ 为节点 b 的注入火力发电机组无功功率, $Q_{Fb,t}$ 为节点 b 的注入风力发电机组无功功率, $Q_{Sb,t}$ 为节点 b 的注入水力发电机组无功功率, $Q_{Gb,t}$ 为节点 b 的注入光伏发电机组无功功率, $P_{b,t}^D$ 为节点 b 的有功功率, $Q_{b,t}^D$ 为节点 b 的无功功率, $V_{b,t}$ 为节点 b 的电压, $\theta_{bj,t}$ 为节点 b 的相位, $V_k^{\max}$ 为电网运行电压的上限、 $V_k^{\min}$ 为电网运行电压的下限, $\Psi_{l,t}$ 为线路 l 的输电量, $\Psi_i^{\max}$ 为传输线传输电量上限、 $\Psi_i^{\min}$ 为传输线传输电量下限, $Y_{bj} \angle \alpha_{bj}$ 代表节点导纳矩阵的 b 行 j 列的元素,其中 Y_{bj} 代表节点 b 与节点 j 之间的互导纳, α_{bj} 代表节点 b 与节点 j 之间的互导纳角度, $\theta_{bj,t} = \theta_{b,t} - \theta_{j,t} - \alpha_{bj}$, $\theta_{bj,t}$ 为时段 t 内节

点b与节点j的电压相角差值, $\theta_{b,t}$ 为时段t内节点b的电压相角, $\theta_{j,t}$ 为时段t内节点j的电压相角;

步骤四、设定各机组自身约束条件

1) 设定火电机组约束条件

①火电功率约束

$$P_{Htmin} \leq P_{Ht} \leq P_{Htmax}$$

式中, P_{Ht} 为火电机组在t时段的发电功率, P_{Htmin} 为火电机组发电功率的最小值, P_{Htmax} 为火电机组发电功率的最大值;

②火电爬坡约束

$$-r_{di} \Delta t \leq P_{Ht} - P_{H(t-1)} \leq r_{ui} \Delta t$$

式中, P_{Ht} 、 $P_{H(t-1)}$ 火电机组在t时段以及(t-1)时段内的发电功率, r_{ui} 为在相邻时段内的机组i的出力变化上限值, r_{di} 为在相邻时段内的机组i的出力变化下限值, Δt 为最短的相邻调度时段间隔;

2) 设定水力发电机组约束条件

①水电功率约束

$$P_{Smin} \leq P_{St} \leq P_{Smax}$$

式中, P_{St} 为t时段内水力发电机组发电功率, P_{Smax} 为水电站发电功率的上限值, P_{Smin} 为水电站发电功率的下限值;

②日流量积分约束

$$Q_{min s} \leq \int_{t=1}^T Q_{st} dt \leq Q_{max s}$$

式中: Q_{st} 为时段t内的用水量, $Q_{max s}$ 为每天用水量的上限值, $Q_{min s}$ 为每天用水量的下限值;

3) 设定风力发电机组功率约束条件

$$0 \leq P_{Ft} \leq P_{Ftmax}$$

式中, P_{Ft} 为t时段内风力发电机组上网功率, P_{Ftmax} 为t时段风力发电总量;

4) 设定光伏机组功率约束条件

$$0 \leq P_{Gt} \leq P_{Gtmax}$$

式中, P_{Gt} 为t时段内光伏机组上网功率, P_{Gtmax} 为t时段光伏发电总量;

5) 设定蓄热电锅炉约束条件

①功率约束

$$0 \leq P_{Rebt} \leq P_{Rebmax}$$

式中, P_{Rebt} 为t时段内蓄热电锅炉消耗功率, P_{Rebmax} 表示电锅炉功率上限;

②蓄热量约束

$$Q_{Rebt} \leq Q_{Rebmax}$$

$$Q_{Rebt} = \sum_{t=1}^T P_{Rebt} \Delta t$$

式中: Q_{Rebt} 为电锅炉存储的热量, Q_{Rebmax} 为储热器最大储热量, P_{Rebt} 为t时段内蓄热电锅炉消耗功率, Δt 为最短的相邻调度时段间隔,T为调度时段的总段数;

③功率波动约束:

$$\Delta P_{\text{Reb}}^- \leq P_{\text{Rebt}} - P_{\text{Reb}(t-1)} \leq \Delta P_{\text{Reb}}^+$$

式中: ΔP_{Reb}^+ 为电锅炉相邻调度时段功率变化的上限值, ΔP_{Reb}^- 为电锅炉相邻调度时段功率变化的下限值, P_{Rebt} 为t时段内蓄热电锅炉消耗功率, $P_{\text{Reb}(t-1)}$ 为(t-1)时段内蓄热电锅炉消耗功率;

步骤五、计及蓄热电锅炉的风-光-水-火多能源调度方案的制定

1) 采用节点测试系统,布置火电机组、水电厂、光伏发电设备以及超大功率蓄热电锅炉,形成含蓄热电锅炉的风-光-水-火电的系统,将全天24小时按照设定时间划分调度时段,该设定时间与步骤二中的设定时间相同;

2) 设定场景I为当天最低气温低于-23℃的极寒天气下不含蓄热电锅炉的风-光-水-火联合系统,场景II为当天最低气温低于-23℃的极寒天气下含蓄热电锅炉的风-光-水-火联合系统,场景III为当天最低气温在-23℃~5℃之间的一般天气下不含蓄热电锅炉的风-光-水-火联合系统,场景IV为当天最低气温在-23℃~5℃之间的一般天气下含蓄热电锅炉的风-光-水-火联合系统;

3) 根据近三年以上的历史气象信息以及相对应的负荷值以及清洁能源发电量,通过天气预报获取预测日的气象信息,使用随机森林算法,预测各场景下调度日各调度时段内的各清洁能源机组出力上限值以及负荷值;

4) 通过步骤四中的约束条件对蓄热电锅炉一天内蓄热量进行约束,获得蓄热电锅炉一天内需要消耗的总功率,根据步骤三中的全网功率平衡约束获得各发电机组的出力总和;

5) 各台机组的出力先后需要按照下列原则进行:

①火电机组出力小于负荷需求与网损消耗的总和,按照光伏发电机组、水力发电机组、风力发电机组的顺序并网;

火电机组出力大于或等于负荷需求与网损消耗的总和,进行步骤②;

②火电机组出力等于负荷需求与网损消耗的总和,系统保持蓄热电锅炉处于停运状态,

火电机组出力大于负荷需求与网损消耗的总和,蓄热电锅炉作为负荷加入系统运行,消纳过剩的清洁能源;

③蓄热电锅炉最大功率运行条件下清洁能源有剩余,按照风力发电机组减少出力直至退出系统,水力发电机组减少出力直至退出系统,光伏发电机组减少出力直至退出系统的顺序减少清洁能源的利用;

④调度日内蓄热电锅炉的蓄热量达到设定的最大值,蓄热电锅炉当日内停运,直至第二日重复步骤①至步骤④;

6) 根据步骤一中建立的目标函数,在步骤四中步骤4)的相关约束下,通过步骤五中步骤5)的各机组出力顺序原则,利用Matlab软件调用CPLEX,获得的最优解为各场景下清洁能源消纳量最大的各台机组的出力;

7) 根据获得的各台机组出力,进行网络的潮流分析,

根据网络运行约束条件、各台机组出力,获得出各节点的电压以及节点间的输电量,

分析结果显示各节点的电压和节点间的输电量超出电网安全稳定运行的数值范围,删除各机组出力,返回步骤五中的步骤6)中重新分配各台机组的出力,直至各节点的电压和节点间的输电量在电网安全稳定运行的数值范围内,

分析结果显示各节点的电压和节点间的输电量在电网安全稳定运行的数值范围内,输出各机组出力的结果,输出的各机组出力的结果为稳定运行的各场景下清洁能源消纳量最大的各台机组的出力;

8) 将获得的稳定运行的各场景下清洁能源消纳量最大的各台机组的出力,通过步骤一中的目标函数获得各场景的风、光、水三种清洁能源最大消纳量。

2. 根据权利要求1所述的计及超大功率蓄热电锅炉消纳能力的多能源优化调度方法,其特征是:所述步骤五中超大功率蓄热电锅炉的功率上限为80MW。

3. 根据权利要求1所述的计及超大功率蓄热电锅炉消纳能力的多能源优化调度方法,其特征是:所述步骤五中的气象信息包括每日的最高温度、每日的最低温度、每日的风力等级和每日的日照时数。

计及超大功率蓄热电锅炉消纳能力的多能源优化调度方法

技术领域

[0001] 本发明属于多能源优化调度技术领域,特别是涉及到一种计及超大功率蓄热电锅炉消纳能力的多能源优化调度方法。

背景技术

[0002] 当前我国风、水、光能等清洁能源发电的装机容量规模均稳居世界第一,但是,随着电力供应的相对过剩,清洁能源的使用越来越多,出现了消纳能力不足的问题。由于电力系统多能源调度系统不完善,目前火电机组仍然占据发电的主导地位,限制了清洁能源的消纳,不利于经济效益以及环境改善。

[0003] 因此现有技术当中亟需要一种新型的技术方案来解决这一问题。

发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题是:提供一种计及超大功率蓄热电锅炉消纳能力的多能源优化调度方法,用于解决现有技术中电力系统多能源调度系统不完善限制清洁能源的消纳的技术问题。

[0005] 计及超大功率蓄热电锅炉消纳能力的多能源优化调度方法,包括以下步骤,并且以下步骤顺次进行,

[0006] 步骤一:以消纳风、光、水三种清洁能源最大化为目的建立目标函数:

$$[0007] F = \max (P_q / P_{q \max})$$

[0008] 式中, F 为目标函数, P_q 为一天内清洁能源使用总量, $P_{q \max}$ 为一天内清洁能源总发电量;

[0009] 其中, $P_q = P_F + P_S + P_G$

$$[0010] P_{q \max} = P_{F \max} + P_{S \max} + P_{G \max}$$

[0011] 式中, P_q 为一天内清洁能源使用总量, $P_{q \max}$ 为一天内清洁能源总发电量, P_F 为一天内风能使用总量, P_S 为一天内水能使用总量, P_G 为一天内光能使用总量, $P_{F \max}$ 为一天内风能发电总量, $P_{S \max}$ 为一天内水能发电总量, $P_{G \max}$ 为一天内光能发电总量;

[0012] 步骤二、将风力发电机组、光伏发电机组、水力发电机组和蓄热电锅炉计入系统,并建立系统模型;

[0013] 步骤三、将全天24小时按照设定时间划分调度时段,并设定模型约束条件

[0014] 1) 设定全网功率平衡约束条件如下:

$$[0015] P_{Ht} + P_{St} + P_{Lt} + P_{Ft} + P_{Gt} = P_{Dt} + P_{Rebt}$$

[0016] 式中, P_{Ht} 为时段 t 内火电机组发电功率, P_{St} 为时段 t 内水力发电机组发电功率, P_{Lt} 为时段 t 内系统线损功率, P_{Ft} 为时段 t 内风力发电机组发电功率, P_{Gt} 为时段 t 内光伏机组发电功率, P_{Dt} 为时段 t 内系统总负荷, P_{Rebt} 为时段 t 内蓄热电锅炉用电功率;

[0017] 2) 设定网络运行约束条件如下:

$$[0018] \quad \begin{cases} P_{Hb,t} + P_{Fb,t} + P_{Sb,t} + P_{Gb,t} - P_{b,t}^D = V_{b,t} \sum_{j=1}^n V_{j,t} Y_{bj} \cos \theta_{bj,t} \\ Q_{Hb,t} + Q_{Fb,t} + Q_{Sb,t} + Q_{Gb,t} - Q_{b,t}^D = V_{b,t} \sum_{j=1}^n V_{j,t} Y_{bj} \sin \theta_{bj,t} \\ V_b^{\min} \leq V_{b,t} \leq V_b^{\max} \\ \Psi_i^{\min} \leq \Psi_{l,t} \leq \Psi_i^{\max} \end{cases}$$

[0019] 式中, $b, j \in I$, I 为网络节点数, t 为调度时段, $P_{Hb,t}$ 为节点 b 的注入火力发电机组有功功率, $P_{Fb,t}$ 为节点 b 的注入风力发电机组有功功率, $P_{Sb,t}$ 为节点 b 的注入水力发电机组有功功率, $P_{Gb,t}$ 为节点 b 的注入光伏发电机组有功功率, $Q_{Hb,t}$ 为节点 b 的注入火力发电机组无功功率, $Q_{Fb,t}$ 为节点 b 的注入风力发电机组无功功率, $Q_{Sb,t}$ 为节点 b 的注入水力发电机组无功功率, $Q_{Gb,t}$ 为节点 b 的注入光伏发电机组无功功率, $P_{b,t}^D$ 为节点 b 的有功功率, $Q_{b,t}^D$ 为节点 b 的无功功率, $V_{b,t}$ 为节点 b 的电压, $\theta_{bj,t}$ 为节点 b 的相位, $V_k^{\max}$ 为电网运行电压的上限、 $V_k^{\min}$ 为电网运行电压的下限, $\Psi_{l,t}$ 为线路 l 的输电量, $\Psi_i^{\max}$ 为传输线传输电量上限、 $\Psi_i^{\min}$ 为传输线传输电量下限, $Y_{bj} \angle \alpha_{bj}$ 代表节点导纳矩阵的 b 行 j 列的元素, 其中 Y_{bj} 代表节点 b 与节点 j 之间的互导纳, α_{bj} 代表节点 b 与节点 j 之间的互导纳角度, $\theta_{bj,t} = \theta_{b,t} - \theta_{j,t} - \alpha_{bj}$, $\theta_{bj,t}$ 为时段 t 内节点 b 与节点 j 的电压相角差值, $\theta_{b,t}$ 为时段 t 内节点 b 的电压相角, $\theta_{j,t}$ 为时段 t 内节点 j 的电压相角;

[0020] 步骤四、设定各机组自身约束条件

[0021] 1) 设定火电机组约束条件

[0022] ①火电功率约束

[0023] $P_{Ht \min} \leq P_{Ht} \leq P_{Ht \max}$

[0024] 式中, P_{Ht} 为火电机组在 t 时段的发电功率, $P_{Ht \min}$ 为火电机组发电功率的最小值, $P_{Ht \max}$ 为火电机组发电功率的最大值;

[0025] ②火电爬坡约束

[0026] $-r_{di} \Delta t \leq P_{Ht} - P_{H(t-1)} \leq r_{ui} \Delta t$

[0027] 式中, P_{Ht} 、 $P_{H(t-1)}$ 火电机组在 t 时段以及 $(t-1)$ 时段内的发电功率, r_{ui} 为在相邻时段内的机组 i 的出力变化上限值, r_{di} 为在相邻时段内的机组 i 的出力变化下限值, Δt 为最短的相邻调度时段间隔;

[0028] 2) 设定水力发电机组约束条件

[0029] ①水电功率约束

[0030] $P_{Smin} \leq P_{St} \leq P_{Smax}$

[0031] 式中, P_{St} 为 t 时段内水力发电机组发电功率, P_{Smax} 为水电站发电功率的上限值, P_{Smin} 为水电站发电功率的下限值;

[0032] ②日流量积分约束

$$[0033] \quad Q_{\min s} \leq \int_{t=1}^T Q_{st} dt \leq Q_{\max s}$$

[0034] 式中： Q_{st} 为时段t内的用水量， $Q_{\max s}$ 为每天用水量的上限值， $Q_{\min s}$ 为每天用水量的下限值；

[0035] 3) 设定风力发电机组功率约束条件

$$[0036] \quad 0 \leq P_{Ft} \leq P_{Ft \max}$$

[0037] 式中， P_{Ft} 为t时段内风力发电机组上网功率， $P_{Ft \max}$ 为t时段风力发电总量；

[0038] 4) 设定光伏机组功率约束条件

$$[0039] \quad 0 \leq P_{Gt} \leq P_{Gt \max}$$

[0040] 式中， P_{Gt} 为t时段内光伏机组上网功率， $P_{Gt \max}$ 为t时段光伏发电总量；

[0041] 5) 设定蓄热电锅炉约束条件

[0042] ①功率约束

$$[0043] \quad 0 \leq P_{Rebt} \leq P_{Reb \max}$$

[0044] 式中， P_{Rebt} 为t时段内蓄热电锅炉消耗功率， $P_{Reb \max}$ 表示电锅炉功率上限；

[0045] ②蓄热量约束

$$[0046] \quad Q_{Rebt} \leq Q_{Reb \max}$$

$$[0047] \quad Q_{Rebt} = \sum_{t=1}^T P_{Rebt} \Delta t$$

[0048] 式中： Q_{Rebt} 为电锅炉存储的热量， $Q_{Reb \max}$ 为储热器最大储热量， P_{Rebt} 为t时段内蓄热电锅炉消耗功率， Δt 为最短的相邻调度时段间隔，T为调度时段的总段数；

[0049] ③功率波动约束：

$$[0050] \quad \Delta P_{Reb}^- \leq P_{Rebt} - P_{Reb(t-1)} \leq \Delta P_{Reb}^+$$

[0051] 式中： ΔP_{Reb}^+ 为电锅炉相邻调度时段功率变化的上限值， ΔP_{Reb}^- 为电锅炉相邻调度时段功率变化的下限值， P_{Rebt} 为t时段内蓄热电锅炉消耗功率， $P_{Reb(t-1)}$ 为(t-1)时段内蓄热电锅炉消耗功率；

[0052] 步骤五、计及蓄热电锅炉的风-光-水-火多能源调度方案的制定

[0053] 1) 采用节点测试系统，布置火电机组、水电厂、光伏发电设备以及超大功率蓄热电锅炉，形成含蓄热电锅炉的风-光-水-火电的系统，将全天24小时按照设定时间划分调度时段，该设定时间与步骤二中的设定时间相同；

[0054] 2) 设定场景I为当天最低气温低于-23℃的极寒天气下不含蓄热电锅炉的风-光-水-火联合系统，场景II为当天最低气温低于-23℃的极寒天气下含蓄热电锅炉的风-光-水-火联合系统，场景III为当天最低气温在-23℃~5℃之间的一般天气下不含蓄热电锅炉的风-光-水-火联合系统，场景IV为当天最低气温在-23℃~5℃之间的一般天气下含蓄热电锅炉的风-光-水-火联合系统，

[0055] 3) 根据近三年以上的历史气象信息以及相对应的负荷值以及清洁能源发电量，通过天气预报获取预测日的气象信息，使用随机森林算法，预测各场景下调度日各调度时段

内的各清洁能源机组出力上限值以及负荷值；

[0056] 4) 通过步骤四中的约束条件对蓄热电锅炉一天内蓄热量进行约束, 获得蓄热电锅炉一天内需要消耗的总功率, 根据步骤三中的全网功率平衡约束获得各发电机组的出力总和；

[0057] 5) 各台机组的出力先后需要按照下列原则进行：

[0058] ①火电机组出力小于负荷需求与网损消耗的总和, 按照光伏发电机组、水力发电机组、风力发电机组的顺序并网；

[0059] 火电机组出力大于或等于负荷需求与网损消耗的总和, 进行步骤②；

[0060] ②火电机组出力等于负荷需求与网损消耗的总和, 系统保持蓄热电锅炉处于停运状态，

[0061] 火电机组出力大于负荷需求与网损消耗的总和, 蓄热电锅炉作为负荷加入系统运行, 消纳过剩的清洁能源；

[0062] ③蓄热电锅炉最大功率运行条件下清洁能源有剩余, 按照风力发电机组减少出力直至退出系统, 水力发电机组减少出力直至退出系统, 光伏发电机组减少出力直至退出系统的顺序减少清洁能源的利用；

[0063] ④调度日内蓄热电锅炉的蓄热量达到设定的最大值, 蓄热电锅炉当日内停运, 直至第二日重复步骤①至步骤④；

[0064] 6) 根据步骤一中建立的目标函数, 在步骤四中步骤4) 的相关约束下, 通过步骤五中步骤5) 的各机组出力顺序原则, 利用Matlab软件调用CPLEX, 获得的最优解为各场景下清洁能源消纳量最大的各台机组的出力；

[0065] 7) 根据获得的各台机组出力, 进行网络的潮流分析，

[0066] 根据网络运行约束条件、各台机组出力, 获得出各节点的电压以及节点间的输电量，

[0067] 分析结果显示各节点的电压和节点间的输电量超出电网安全稳定运行的数值范围, 删除各机组出力, 返回步骤五中的步骤6) 中重新分配各台机组的出力, 直至各节点的电压和节点间的输电量在电网安全稳定运行的数值范围内，

[0068] 分析结果显示各节点的电压和节点间的输电量在电网安全稳定运行的数值范围内, 输出各机组出力的结果, 输出的各机组出力的结果为稳定运行的各场景下清洁能源消纳量最大的各台机组的出力；

[0069] 8) 将获得的稳定运行的各场景下清洁能源消纳量最大的各台机组的出力, 通过步骤一中的目标函数获得各场景的风、光、水三种清洁能源最大消纳量。

[0070] 所述步骤五中超大功率蓄热电锅炉的功率上限为80MW。

[0071] 所述步骤五中的气象信息包括每日的最高温度、每日的最低温度、每日的风力等级和每日的日照时数。

[0072] 通过上述设计方案, 本发明可以带来如下有益效果：

[0073] 本发明参考现有研究成果, 从经济、环保、最大化消纳清洁能源三方面入手, 建立了考虑蓄热电锅炉消纳能力的风-光-水-火电联合优化目标函数。通过在调度模型中加入蓄热电锅炉这种可控负荷, 能够在风电等清洁能源不能消纳时, 作为负荷消纳过剩的清洁能源。在保证系统安全稳定运行的同时, 提高风电消纳能力, 实现了最优清洁能源调度。在

冬季供暖时,考虑了蓄热电锅炉的储热、放热能力后,通过电采暖的方式,既满足冬季取暖需求,也能够减少清洁能源的浪费,有利于消纳风电等清洁能源。

[0074] 本发明的调度方法适用于在冬季供暖季节,冬季需要对居民以及商业供暖,考虑了超大功率蓄热电锅炉的消纳能力,在负荷低谷时将清洁能源发电产生的电能以热能的形式储存起来,在通过释放热能供给居民以及商业取暖,保证了系统的安全稳定运行前提下,既满足了冬季的取暖需求,也更深层次的消纳了清洁能源。

附图说明

[0075] 以下结合附图和具体实施方式对本发明作进一步的说明:

[0076] 图1为本发明计及超大功率蓄热电锅炉消纳能力的多能源优化调度方法中实施例的网络结构图。

[0077] 图2为本发明计及超大功率蓄热电锅炉消纳能力的多能源优化调度方法中实施例的场景I下的负荷与出力情况图。

[0078] 图3为本发明计及超大功率蓄热电锅炉消纳能力的多能源优化调度方法中实施例的场景II下的负荷与出力情况图。

[0079] 图4为本发明计及超大功率蓄热电锅炉消纳能力的多能源优化调度方法中实施例的场景III下的负荷与出力情况图。

[0080] 图5为本发明计及超大功率蓄热电锅炉消纳能力的多能源优化调度方法中实施例的场景IV下的负荷与出力情况图。

具体实施方式

[0081] 计及超大功率蓄热电锅炉消纳能力的多能源优化调度方法,包括以下步骤,并且以下步骤顺次进行,

[0082] 步骤一:以消纳风、光、水三种清洁能源最大化为目的建立目标函数,目的是为了令清洁能源的使用率最大化。

[0083] $F = \max (P_q / P_{q \max})$

[0084] 式中, F 为目标函数, P_q 为一天内清洁能源使用总量, $P_{q \max}$ 为一天内清洁能源总发电量。

[0085] 因为本发明的目的是为了提高清洁能源利用率,因此目标函数需要考虑清洁能源的使用情况与发电量总体情况,以比例的形式,更加简单明了的表达出清洁能源利用率。本发明考虑的清洁能源主要是风能、水能、光能,其中占据主导地位的是风能。由于本发明考虑了风、光、水三种清洁能源,因此 P_q 、 $P_{q \max}$ 定义为:

[0086] $P_q = P_F + P_S + P_G$

[0087] $P_{q \max} = P_{F \max} + P_{S \max} + P_{G \max}$

[0088] 式中, P_q 为一天内清洁能源使用总量, $P_{q \max}$ 为一天内清洁能源总发电量, P_F 为一天内风能使用总量, P_S 为一天内水能使用总量, P_G 为一天内光能使用总量, $P_{F \max}$ 为一天内风能发电总量, $P_{S \max}$ 为一天内水能发电总量, $P_{G \max}$ 为一天内光能发电总量;

[0089] 步骤二、将风力发电机组、光伏发电机组、水力发电机组和蓄热电锅炉计入系统,并建立系统模型;

[0090] 步骤三、将全天24小时按照设定时间划分调度时段,并设定模型约束条件1) 设定全网功率平衡约束条件

[0091] 为了保证网络的正常运行,网络任何时刻的功率都需要满足发电量等于用电量,因此有:

$$[0092] \quad P_{Ht} + P_{St} + P_{Lt} + P_{Ft} + P_{Gt} = P_{Dt} + P_{Rebt}$$

[0093] 式中, P_{Ht} 为时段t内火电机组发电功率, P_{St} 为时段t内水力发电机组发电功率, P_{Lt} 为时段t内系统线损功率, P_{Ft} 为时段t内风力发电机组发电功率, P_{Gt} 为时段t内光伏机组发电功率, P_{Dt} 为时段t内系统总负荷, P_{Rebt} 为时段t内蓄热电锅炉用电功率;

[0094] 2) 设定网络运行约束条件

[0095] 为了满足网络的安全运行,网络的功率与电压都需要满足一定的运行范围约束,在这个约束范围内,进行各个机组的调度。约束如下:

$$[0096] \quad \begin{cases} P_{Hb,t} + P_{Fb,t} + P_{Sb,t} + P_{Gb,t} - P_{b,t}^D = V_{b,t} \sum_{j=1}^n V_{j,t} Y_{bj} \cos \theta_{bj,t} \\ Q_{Hb,t} + Q_{Fb,t} + Q_{Sb,t} + Q_{Gb,t} - Q_{b,t}^D = V_{b,t} \sum_{j=1}^n V_{j,t} Y_{bj} \sin \theta_{bj,t} \\ V_b^{\min} \leq V_{b,t} \leq V_b^{\max} \\ \Psi_i^{\min} \leq \Psi_{l,t} \leq \Psi_i^{\max} \end{cases}$$

[0097] 式中, $b, j \in I$, I 为网络节点数, t 为调度时段, $P_{Hb,t}$ 为节点b的注入火力发电机组有功功率, $P_{Fb,t}$ 为节点b的注入风力发电机组有功功率, $P_{Sb,t}$ 为节点b的注入水力发电机组有功功率, $P_{Gb,t}$ 为节点b的注入光伏发电机组有功功率, $Q_{Hb,t}$ 为节点b的注入火力发电机组无功功率, $Q_{Fb,t}$ 为节点b的注入风力发电机组无功功率, $Q_{Sb,t}$ 为节点b的注入水力发电机组无功功率, $Q_{Gb,t}$ 为节点b的注入光伏发电机组无功功率, $P_{b,t}^D$ 为节点b的有功功率, $Q_{b,t}^D$ 为节点b的无功功率, $V_{b,t}$ 为节点b的电压, $\theta_{bj,t}$ 为节点b的相位, $V_k^{\max}$ 为电网运行电压的上限, $V_k^{\min}$ 为电网运行电压的下限, $\Psi_{l,t}$ 为线路l的输电量, 线路l的输电量等于线路l的传输功率乘以输电时间, $\Psi_i^{\max}$ 为传输线传输电量上限, $\Psi_i^{\min}$ 为传输线传输电量下限,

[0098] $Y_{bj} \angle \alpha_{bj}$ 代表节点导纳矩阵的b行j列的元素, 其中 Y_{bj} 代表节点b与节点j之间的互导纳大小, α_{bj} 代表节点b与节点j之间的互导纳角度, $\theta_{bj,t} = \theta_{b,t} - \theta_{j,t} - \alpha_{bj}$, $\theta_{bj,t}$ 为时段t内节点b与节点j的电压相角差值, $\theta_{b,t}$ 为时段t内节点b的电压相角, $\theta_{j,t}$ 为时段t内节点j的电压相角;

[0099] 步骤四、设定各机组自身约束条件

[0100] 在满足以上网络约束的前提下, 调度时各台机组为了保证各自的安全稳定运行, 也需要满足自己本身的运行约束限制。

[0101] 1) 设定火电机组约束条件

[0102] ①火电功率约束

[0103] 火电机组的发电功率有最大最小值限制, 太小会损坏机组, 而且机组发电出力也

有上限,需要约束条件来限制机组出力:

$$[0104] \quad P_{Ht \min} \leq P_{Ht} \leq P_{Ht \max}$$

[0105] 式中, P_{Ht} 为火电机组在 t 时段的发电功率, $P_{Ht \min}$ 为火电机组发电功率的最小值, $P_{Ht \max}$ 为火电机组发电功率的最大值;

[0106] ②火电爬坡约束

[0107] 火电机组的功率需要满足一定的约束条件,短时间内机组功率做不到快速调节,约束如下:

$$[0108] \quad -r_{di} \Delta t \leq P_{Ht} - P_{H(t-1)} \leq r_{ui} \Delta t$$

[0109] 式中, P_{Ht} 、 $P_{H(t-1)}$ 火电机组在 t 时段以及 $(t-1)$ 时段内的发电功率, r_{ui} 为在相邻时段内的机组 i 的出力变化上限值, r_{di} 为在相邻时段内的机组 i 的出力变化下限值, Δt 为最短的相邻调度时段间隔;

[0110] 2) 设定水力发电机组约束条件

[0111] ①水电功率约束

$$[0112] \quad P_{Smin} \leq P_{St} \leq P_{Smax}$$

[0113] 式中, P_{St} 为 t 时段内水力发电机组发电功率, $P_{S \max}$ 为水电站发电功率的上限值, $P_{S \min}$ 为水电站发电功率的下限值;

[0114] ②日流量积分约束

[0115] 水电站听从上级部门的调度安排,确定水力发电的需求量。因此每天的用水量规定在一定值。

$$[0116] \quad Q_{\min s} \leq \int_{t=1}^T Q_{st} dt \leq Q_{\max s}$$

[0117] 式中: Q_{St} 为时段 t 内的用水量, $Q_{\max s}$ 为每天用水量的上限值, $Q_{\min s}$ 为每天用水量的下限值;

[0118] 3) 设定风力发电机组功率约束条件

$$[0119] \quad 0 \leq P_{Ft} \leq P_{Ft \max}$$

[0120] 式中, P_{Ft} 为 t 时段内风力发电机组上网功率, $P_{Ft \max}$ 为 t 时段风力发电总量;

[0121] 4) 设定光伏机组功率约束条件

$$[0122] \quad 0 \leq P_{Gt} \leq P_{Gt \max}$$

[0123] 式中, P_{Gt} 为 t 时段内光伏机组上网功率, $P_{Gt \max}$ 为 t 时段光伏发电总量;

[0124] 5) 设定蓄热电锅炉约束条件

[0125] ①功率约束

$$[0126] \quad 0 \leq P_{Rebt} \leq P_{Reb \max}$$

[0127] 式中, P_{Rebt} 为 t 时段内蓄热电锅炉消耗功率, $P_{Reb \max}$ 表示电锅炉功率上限;

[0128] ②蓄热量约束

[0129] 根据第二天的天气预测值,锅炉空闲时段存储的能量有一定的限制,既可以保证取暖需求,也不会浪费资源,即

$$[0130] \quad Q_{Rebt} \leq Q_{Reb \max}$$

$$[0131] \quad Q_{\text{Rebt}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{Rebt}} \Delta t$$

[0132] 式中： Q_{Rebt} 为电锅炉存储的热量， $Q_{\text{Reb max}}$ 为储热器最大储热量， P_{Rebt} 为t时段内蓄热电锅炉消耗功率， Δt 为最短的相邻调度时段间隔，T为调度时段的总段数；

[0133] ③功率波动约束：

$$[0134] \quad \Delta P_{\text{Reb}}^- \leq P_{\text{Rebt}} - P_{\text{Reb}(t-1)} \leq \Delta P_{\text{Reb}}^+$$

[0135] 式中： ΔP_{Reb}^+ 为电锅炉相邻调度时段功率变化的上限值， ΔP_{Reb}^- 为电锅炉相邻调度时段功率变化的下限值， P_{Rebt} 为t时段内蓄热电锅炉消耗功率， $P_{\text{Reb}(t-1)}$ 为(t-1)时段内蓄热电锅炉消耗功率；

[0136] 步骤五、计及蓄热电锅炉的风-光-水-火多能源调度方案的制定

[0137] 1) 采用节点测试系统，布置火电机组、水电厂、光伏发电设备以及功率上限为80MW的超大功率蓄热电锅炉，形成含蓄热电锅炉的风-光-水-火电的系统，将全天24小时按照设定时间划分调度时段，该设定时间与步骤二中的设定时间相同；

[0138] 2) 设定场景I为当天最低气温低于-23℃的极寒天气下不含蓄热电锅炉的风-光-水-火联合系统，场景II为当天最低气温低于-23℃的极寒天气下含蓄热电锅炉的风-光-水-火联合系统，场景III为当天最低气温在-23℃~5℃之间的一般天气下不含蓄热电锅炉的风-光-水-火联合系统，场景IV为当天最低气温在-23℃~5℃之间的一般天气下含蓄热电锅炉的风-光-水-火联合系统，

[0139] 3) 根据近三年以上的历史气象信息以及相对应的负荷值以及清洁能源发电量，所述的气象信息包括每日的最高温度、每日的最低温度、每日的风力等级和每日的日照时数，通过天气预报获取预测日的气象信息，使用随机森林算法，预测各场景下调度日各调度时段内的各清洁能源机组出力上限值以及负荷值；

[0140] 4) 通过步骤四中的约束条件对蓄热电锅炉一天内蓄热量进行约束，获得蓄热电锅炉一天内需要消耗的总功率，根据步骤三中的全网功率平衡约束获得各发电机组的出力总和；

[0141] 5) 各台机组的出力先后需要按照下列原则进行：

[0142] ①火电机组出力小于负荷需求与网损消耗的总和，按照光伏发电机组、水力发电机组、风力发电机组的顺序并网；

[0143] 火电机组出力大于或等于负荷需求与网损消耗的总和，进行步骤②；

[0144] ②火电机组出力等于负荷需求与网损消耗的总和，系统保持蓄热电锅炉处于停运状态，

[0145] 火电机组出力大于负荷需求与网损消耗的总和，蓄热电锅炉作为负荷加入系统运行，消纳过剩的清洁能源；

[0146] ③蓄热电锅炉最大功率运行条件下清洁能源有剩余，按照风力发电机组减少出力直至退出系统，水力发电机组减少出力直至退出系统，光伏发电机组减少出力直至退出系统的顺序减少清洁能源的利用；

[0147] ④调度日内蓄热电锅炉的蓄热量达到设定的最大值，蓄热电锅炉当日内停运，直

至第二日重复步骤①至步骤④；

[0148] 6) 根据步骤一中建立的目标函数,在步骤四中步骤4)的相关约束下,通过步骤五中步骤5)的各机组出力顺序原则,利用Matlab软件调用CPLEX,CPLEX可以将复杂的业务问题表现为数学规划(Mathematic Programming)模型,并能够求得模型的最优解,模型的最优解即为各场景下清洁能源消纳量最大的各台机组的出力;

[0149] 7) 将获得的各台机组出力,进行网络的潮流分析,

[0150] 根据网络运行约束条件、机组出力(即机组功率),求解出各节点的电压,同时求解出各节点间的输电量,线路的输电量等于线路的传输功率乘以输电时间,

[0151] 若分析结果显示各节点的电压和节点间的输电量超出电网安全稳定运行的数值范围,删除各机组出力,返回步骤五中的步骤6)中重新分配各台机组的出力,直至各节点的电压和节点间的输电量在电网安全稳定运行的数值范围内;

[0152] 若分析结果显示各节点的电压和节点间的输电量在电网安全稳定运行的数值范围内,输出各机组出力的结果,输出的各机组出力即为稳定运行的各场景下清洁能源消纳量最大的各台机组的出力;

[0153] 8) 将稳定运行的各场景下清洁能源消纳量最大的各台机组的出力,通过步骤一中的目标函数获得各场景的风、光、水三种清洁能源最大消纳量。

[0154] 实施例:

[0155] 采用IEEE24节点测试系统,布置装机容量为455MW、455MW、130MW、130MW的火电机组各一台、装机容量各为210MW、270MW的风电场、100MW的水电厂、总装机容量为50MW的光伏发电设备以及80MW的超大功率蓄热电锅炉,形成如图1所示的含蓄热电锅炉的风-光-水-火电的系统。图中数字1~24均为节点编号。分别通过四个不同场景分析各机组出力情况,规定场景I为极寒天气下的不含蓄热电锅炉的风-光-水-火联合系统,场景II为极寒天气下的含蓄热电锅炉的风-光-水-火联合系统,场景III为一般天气下的不含蓄热电锅炉的风-光-水-火联合系统,场景IV为一般天气下的含蓄热电锅炉的风-光-水-火联合系统。

[0156] 1) 目标函数:

[0157] $F = \max (P_q / P_{q \max})$

[0158] 式中, F 为目标函数, P_q 为一天内清洁能源使用总量, $P_{q \max}$ 为一天内清洁能源总发电量;

[0159] 目的是为了令清洁能源的使用率最大化。

[0160] 由于本发明考虑了风、光、水三种清洁能源,因此 P_q 、 $P_{q \max}$ 定义为:

[0161] $P_q = P_F + P_S + P_G$

[0162] $P_{q \max} = P_{F \max} + P_{S \max} + P_{G \max}$

[0163] 式中, P_q 为一天内清洁能源使用总量, $P_{q \max}$ 为一天内清洁能源总发电量, P_F 为一天内风能使用总量, P_S 为一天内水能使用总量, P_G 为一天内光能使用总量, $P_{F \max}$ 为一天内风能发电总量, $P_{S \max}$ 为一天内水能发电总量, $P_{G \max}$ 为一天内光能发电总量。

[0164] 2) 首先将调度日一天24小时按照15分钟为一个时间段,划分为96个调度段。

[0165] 约束条件见步骤三以及步骤四。

[0166] 3) 在满足步骤三中步骤2)约束条件的前提下,根据全网功率平衡以及目标函数,可分别求出四种场景下各个机组的出力情况。分别见图2-图5。其中风电利用率由下表给

出：

[0167] 表1机组出力情况及清洁能源利用率(计及网损)

[0168]	场景	I	II	III	IV
	总负荷 ($MW\cdot h$)	24510	24510	23492	23492
	火电机组发电量 ($MW\cdot h$)	21924	21924	20196	20196
	风电机组发电量 ($MW\cdot h$)	2442	3066	2280	2711
	水电机组发电量 ($MW\cdot h$)	0	0	748	868
	光电机组发电量 ($MW\cdot h$)	199	199	179	217
	蓄热电锅炉耗电量 ($MW\cdot h$)	0	624	0	589
	清洁能源利用率 (%)	75.46	93.29	74.5	88.28

[0169] 分析上表,因为目标为最大化消纳清洁能源,在考虑了蓄热电锅炉的消纳能力之后,最大化的消纳了风电出力。场景II与场景IV都是考虑了蓄热电锅炉的消纳能力,因此清洁能源的利用率分别大于场景I和场景III下无蓄热电锅炉的情况。并且极寒天气下的热负荷需求更大,因此需热量也更高,锅炉的需电量更多,清洁能源的消纳效果更好,对比场景II与场景IV就可以知道,极寒天气下蓄热电锅炉的消纳清洁能源效果更好。又因为使用的是多余的清洁能源,几乎无成本费用,所以说同时还带来一定的经济效益。

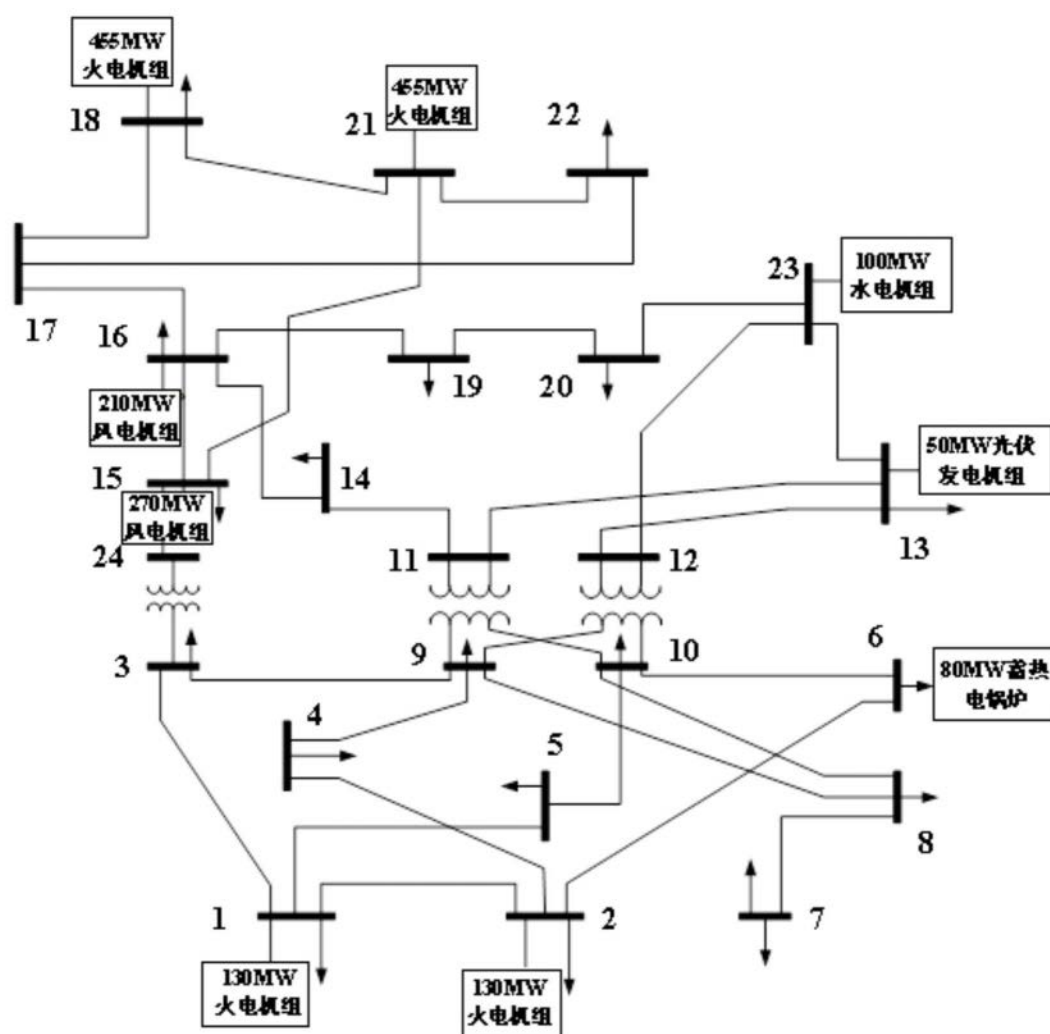


图1

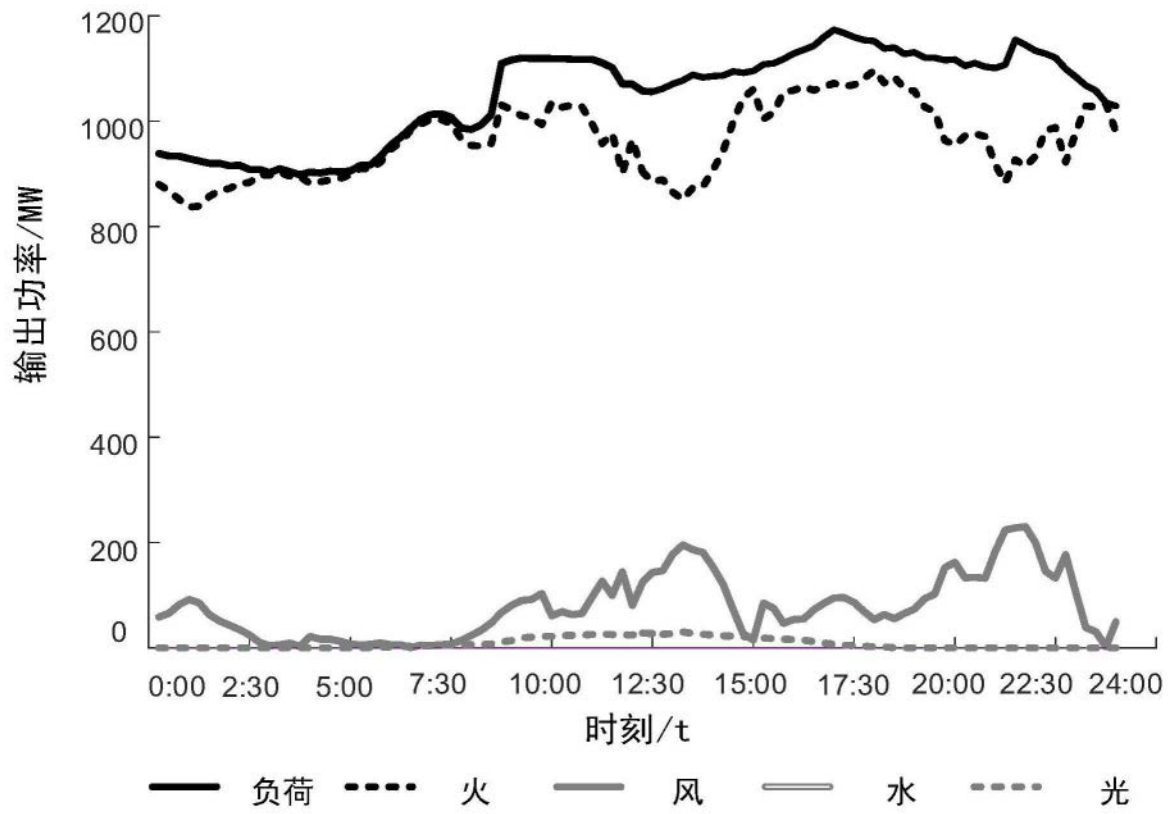


图2

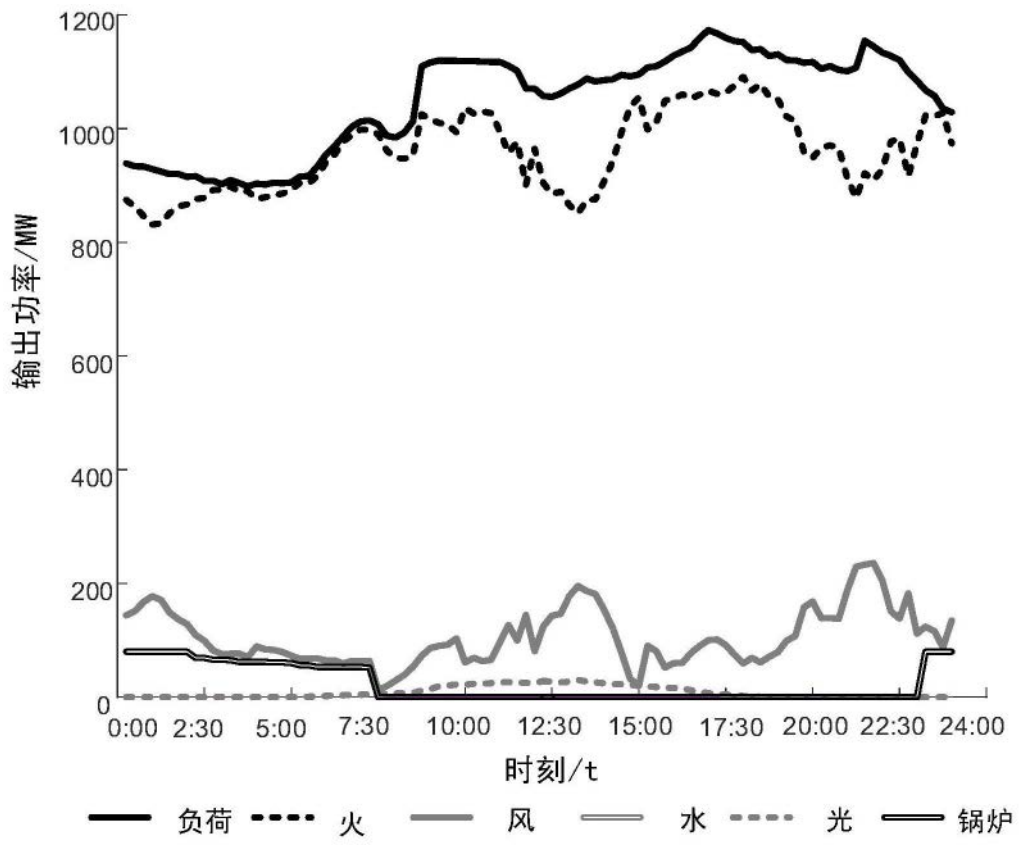


图3

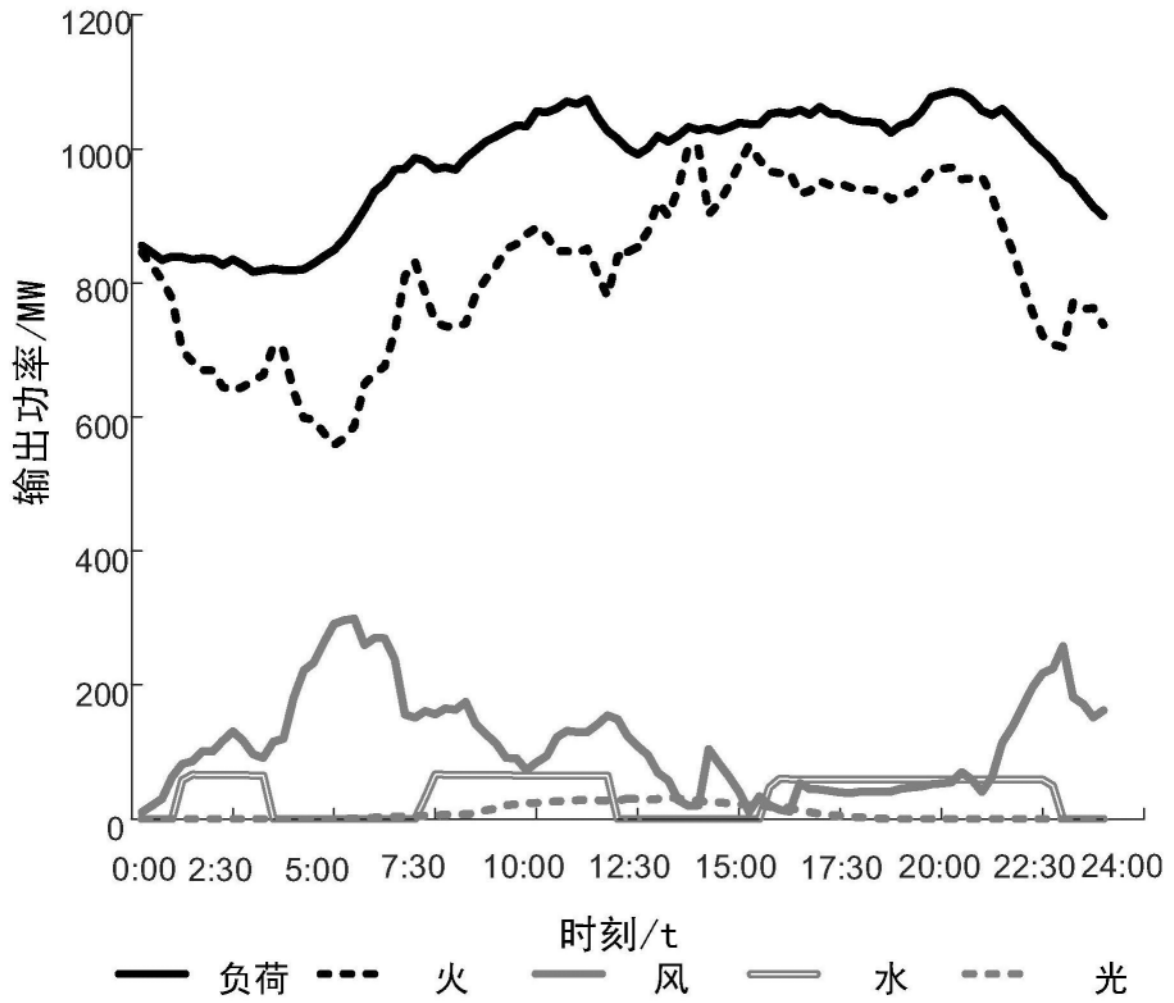


图4

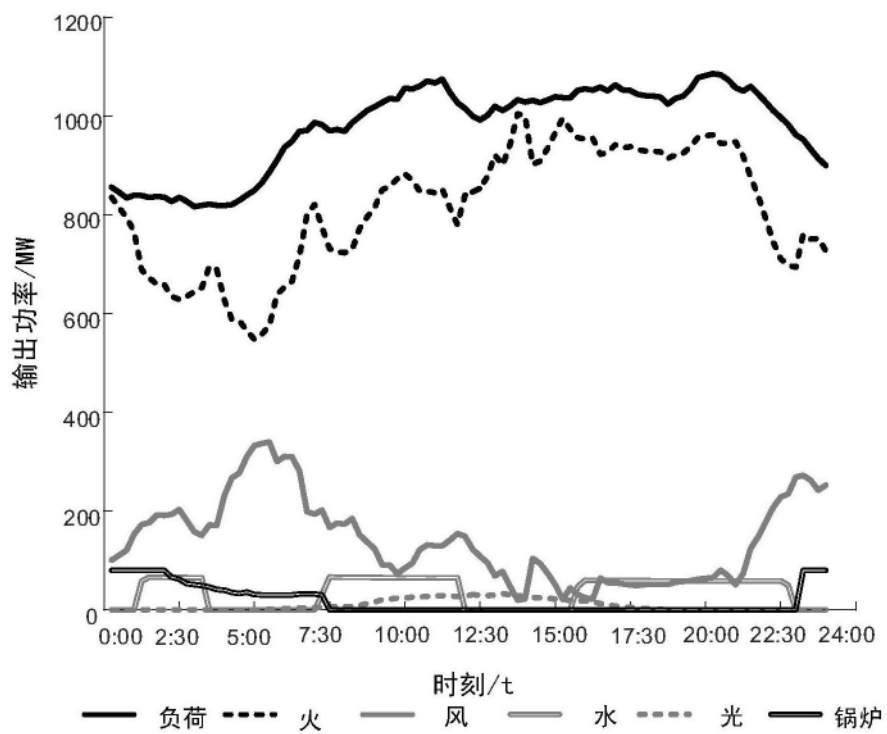


图5