



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107702079 A

(43)申请公布日 2018.02.16

(21)申请号 201710842946.6

H02J 3/00(2006.01)

(22)申请日 2017.09.18

(71)申请人 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司

地址 710075 陕西省西安市高新区团结南路22号

(72)发明人 孙沛 傅旭 李丁 王昭 李富春
韩伟 杨攀峰 许美朋

(74)专利代理机构 西安通大专利代理有限责任公司 61200

代理人 张弘

(51)Int.Cl.

F22B 1/00(2006.01)

F22B 1/06(2006.01)

F22B 1/28(2006.01)

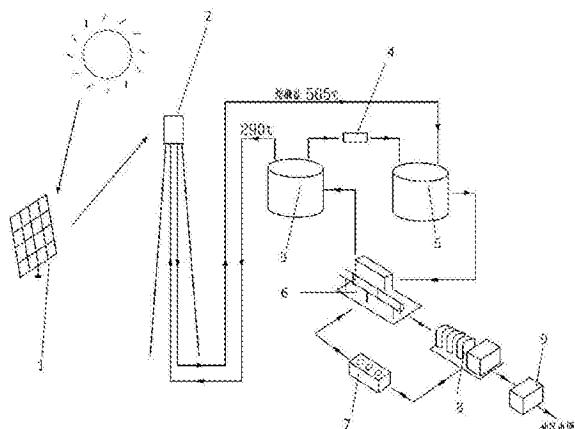
权利要求书6页 说明书12页 附图2页

(54)发明名称

一种含有电加热装置的光热电站及其建模和优化运行方法

(57)摘要

本发明提出了一种含有电加热装置的光热电站及其建模和优化运行方法。模型适用于独立运行的光热电站及含有风电、光伏、光热发电的多能互补系统等场景，其中考虑了多种运行约束，包括：以热盐罐为节点的热功率平衡约束、电加热装置的热电转换关系约束、热罐逐时的储热状态约束、计算周期内存储热量等于释放热量约束、汽轮发电机的热电转换约束、汽轮机的启动热量约束和电力平衡约束、用于电加热装置的弃风弃光电力约束等。采用混合整数线性优化技术求解该优化问题。通过在光热电站加装适量的电加热装置，可有效地减少新能源的弃电量，增加光热发电量，有利于提高光热电站及多能互补系统的运行经济性。



1. 一种含有电加热装置的光热电站，其特征在于，包括聚光集热系统(1)、吸热系统、储热装置、换热系统和汽轮发电机(8)；所述的聚光集热系统(1)用于给吸热器(2)提供热能；吸热器(2)的出口与储热装置的热盐储罐(5)的第一入口连接，吸热器(2)的入口与储热装置的冷盐储罐(3)的第一出口连接；冷盐储罐(3)的第二出口通过电加热装置(4)与热盐储罐(5)的第二入口连接；热盐储罐(5)的出口与换热系统的蒸汽发生器(6)的高温入口连接，蒸汽发生器(6)的低温出口与冷盐储罐(3)的入口连接，以实现熔盐循环；蒸汽发生器(6)的高温出口与汽轮发电机(8)的入口连接，汽轮发电机(8)的出口通过凝汽器(7)与蒸汽发生器(6)的低温入口连接，以实现蒸汽循环。

2. 根据权利要求1所述的一种含有电加热装置的光热电站，其特征在于，该光热电站建模满足以下约束：

等式约束：

热盐储罐节点的热功率平衡约束为：

$$H_t^{\text{Rec}} + H_t^{\text{EH}} + H_t^{\text{TSout}} - H_t^{\text{TSin}} - H_t^{\text{SG}} = 0$$

式中， H_t^{Rec} ， H_t^{EH} 分别表示t时刻经吸热器、电加热装置流入热盐储罐的热功率； H_t^{TSout} ， H_t^{TSin} 分别表示t时刻热盐储罐释放、存储的热功率； H_t^{SG} 表示t时刻流向蒸汽发生器的热功率；

电加热装置的热电转换关系为：

$$H_t^{\text{EH}} = \eta^{\text{EH}} \cdot P_t^{\text{EH}}$$

式中， η^{EH} 表示电加热装置的电-热转换效率； P_t^{EH} 表示t时刻电加热装置的电功率；

热盐储罐逐时的储热状态方程为：

$$E_t^{\text{TS}} = E_{t-1}^{\text{TS}} + (H_{t-1}^{\text{TSin}} - H_{t-1}^{\text{TSout}}) \cdot \Delta t$$

式中， E_t^{TS} 表示t时刻热盐储罐存的储热量； Δt 为计算的时间间隔；

热盐储罐不跨周期调节，计算周期内存储热量等于释放热量：

$$\sum_t H_t^{\text{TSin}} = \sum_t H_t^{\text{TSout}}$$

输入蒸汽发生器的热功率主要用途分为两部分：

$$H_t^{\text{SG}} = H_t^{\text{Start}} + H_t^{\text{PC}}$$

式中： H_t^{Start} 表示t时刻用于启动汽轮发电机的热功率， H_t^{PC} 表示t时刻输入汽轮发电机的热功率；

进入汽轮发电机的热量达到汽轮发电机最小启动要求约束：

$$H_k^{\text{Start}} \cdot \Delta t + H_{k+1}^{\text{Start}} \cdot \Delta t = E_0^{\text{Start}}, s_k^{\text{Start}} = 1$$

式中： E_0^{Start} 表示用于启动汽轮发电机的所需的最小热量； s_k^{Start} 为表示k时刻机组是否启动的0-1变量，该值为1时，表示k时刻机组启动； Δt 为计算的时间间隔；

汽轮发电机的热电转换关系为：

$$P_t^{\text{PC}} = f(H_t^{\text{PC}})$$

式中: P_t^{PC} 表示t时刻光热电站的出力,汽轮发电机的效率曲线为非线性的,本文中用分段线性表示;

不等式约束:

输入蒸汽发生器的热功率不超过蒸汽发生器最大输入功率:

$$H_t^{SG} \leq H_{max}^{SG}$$

式中: H_{max}^{SG} 表示蒸汽发生器最大输入功率;

汽轮发电机组最小启停机约束:

$$\begin{cases} x_t^{PC} - x_{t-1}^{PC} \leq x_\tau^{PC}, & \forall \tau \in [t+1, \min\{t+T_{on}-1, T_n\}] \\ x_{t-1}^{PC} - x_t^{PC} \leq 1 - x_\tau^{PC}, & \forall \tau \in [t+1, \min\{t+T_{off}-1, T_n\}] \end{cases}$$

式中, x_t^{PC} 为表示t时刻机组启停状态的0-1变量,1表示开机; T_{on} , T_{off} 为最小开机、停机时间; T_n 为计算周期;

汽轮发电机组启动时刻约束:

$$x_t^{PC} - x_{t-1}^{PC} \leq s_t^{Start}$$

汽轮发电机组启动时刻约束:

$$x_{t-1}^{PC} - x_t^{PC} \leq s_t^{Close}$$

式中: s_t^{Close} 为表示t时刻停机的0-1变量,1表示光热电站在t时刻停机;

机组出力限制约束:

$$P_{min}^{PC}(x_t^{PC} - s_t^{Start}) \leq P_t^{PC} \leq P_{max}^{PC}(x_t^{PC} - s_t^{Start})$$

式中: P_{min}^{PC} , P_{max}^{PC} 分别表示机组的出力下限、上限,需要指出的是,在开机时刻机组需要先热机,剩余热量不能满足出力要求;

热盐储罐释放、存储的热功率要满足约束:

$$\begin{cases} 0 \leq H_t^{TSin} \leq c_t^{TSin} H_{max}^{TSin} \\ 0 \leq H_t^{TSout} \leq (1 - c_t^{TSin}) H_{max}^{TSout} \end{cases}$$

式中: H_{max}^{TSin} , H_{max}^{TSout} 分别表示热盐储罐存储、释放热功率的最大值, c_t^{TSin} 为表示热盐储罐存储状态的0-1变量,1表示热盐储罐存储,热罐不能同时既存储又释放热量;

热盐储罐的存储热量要满足约束:

$$E_{min}^{TS} \leq E_t^{TS} \leq E_{max}^{TS}$$

式中: E_{min}^{TS} , E_{max}^{TS} 分别表示热盐储罐存储容量的下限、上限。

3.根据权利要求1所述的一种含有电加热装置的光热电站,其特征在于,该光热电站独立运行时的优化目标函数为:

$$\max \sum_{t=1}^T (p^{CSP} P_t^{PC} - (1 - x_t^{PC}) p^E E^{BUY} - p^{EH} P_t^{EH})$$

式中,第一项为光热电站售电收入,第二项为电站停机购电成本,第三项为电站购买弃

电的成本; p^{CSP} 表示光热电站的售电电价; p^{F} 表示电站从电网购电电价; p^{EH} 表示电站从电网购买弃电的电价; E^{BUY} 表示机组停机时从电网购电电量;

该光热电站还需满足的约束条件为:

$$0 \leq P_t^{\text{EH}} \leq P_t^{\text{EH}(0)}, \quad \forall t$$

式中, $P_t^{\text{EH}(0)}$ 为 t 时刻光热电站可从系统购买的弃电电力。

4. 根据权利要求1所述的一种含有电加热装置的光热电站,其特征在于,含有该光热电站的多能互补系统的优化目标函数为:

$$\min \left[\begin{array}{l} \lambda_1 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^W (P_{i,t}^{W(0)} - P_{i,t}^W) + \lambda_2 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^S (P_{i,t}^{S(0)} - P_{i,t}^S) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{\text{CSP}} (\lambda_3 (\eta^{\text{Rec}} \cdot H_{i,t}^{\text{Rec}} - P_{i,t}^{\text{PC}}) + \lambda_4 x_{i,t}^{\text{PC}} + \lambda_5 P_{i,t}^{\text{EH}}) \\ + \lambda_6 \sum_{t=1}^T P_t^L \end{array} \right]$$

式中,前两项分别为弃风、弃光惩罚;第三项为对光热惩罚,其中,第一项为少发电惩罚,第二项为停机购电费用,第三项为电加热惩罚;最后一项为通道空闲惩罚, λ_i 为惩罚系数; $P_{i,t}^{W(0)}$, $P_{i,t}^{S(0)}$ 为风电、光伏预测出力, $P_{i,t}^W$, $P_{i,t}^S$ 为风电、光伏实际出力; η^{Rec} 为热-电转化效率; P_t^L 为通道空闲容量;

多能互补系统还需满足的约束条件为:

$$\sum_{i=1}^W P_{i,t}^W + \sum_{i=1}^S P_{i,t}^S + \sum_{i=1}^{\text{CSP}} P_{i,t}^{\text{PC}} + P_t^L = P_t^D, \quad \forall t$$

$$\sum_{i=1}^W P_{i,t}^{Wt} + \sum_{i=1}^S P_{i,t}^{St} = \sum_{i=1}^{\text{CSP}} P_{i,t}^{\text{EH}}, \quad \forall t$$

式中, P_t^D 为 t 时刻通道送电能力; $P_{i,t}^{Wt}$, $P_{i,t}^{St}$ 为风电、光伏原弃电部分用于电加热的出力;

$$0 \leq P_{i,t}^W \leq P_{i,t}^{W(0)}, \quad \forall i, t$$

$$0 \leq P_{i,t}^S \leq P_{i,t}^{S(0)}, \quad \forall i, t$$

$$0 \leq P_{i,t}^{Wt} \leq P_{i,t}^{W(0)} - P_{i,t}^W, \quad \forall i, t$$

$$0 \leq P_{i,t}^{St} \leq P_{i,t}^{S(0)} - P_{i,t}^S, \quad \forall i, t$$

5. 根据权利要求1所述的一种含有电加热装置的光热电站,其特征在于,所述的聚光集热系统(1)为塔式或槽式集热系统。

6. 一种含有电加热装置的光热电站的建模和优化运行方法,其特征在于,包括以下步骤:

对于该电站独立运行时,建立含有电加热装置和储能装置的光热电站模型,该模型由目标函数和约束条件构成;以光热电站收益最大为优化目标,考虑光热电站本体运行约束;最后,通过混合整数优化求解算法对模型求解,求得的最优解作为光热电站有功出力计划和储罐充放策略;

对于含有该电站的多能互补系统时,首先建立含有电加热装置和储能装置的光热电站模型,然后建立含有风电、光伏、光热电站构成的多能互补系统的优化运行模型,该模型由目标函数和约束条件构成;目标函数为多能互补系统运行总成本最小,约束条件分为电力

系统运行约束条件和光热电站本体运行约束；最后，通过混合整数优化求解算法对多能互补系统机组组合模型求解，将得到的最优解作为多能互补系统机组运行策略。

7. 根据权利要求6所述的含有电加热装置的光热电站的建模和优化运行方法，其特征在于，建立含有电加热装置的光热电站模型是指冷盐储罐熔盐经泵送往电加热装置，经电加热后进入热盐储罐，熔盐从冷盐储罐到热盐储罐多一条并行通路，实现电到热的转换并存储。

8. 根据权利要求6所述的含有电加热装置的光热电站的建模和优化运行方法，其特征在于，含有电加热装置的光热电站模型的约束如下：

1) 等式约束

热盐储罐节点的热功率平衡约束为：

$$H_t^{\text{Rec}} + H_t^{\text{EH}} + H_t^{\text{TSout}} - H_t^{\text{TSin}} - H_t^{\text{SG}} = 0$$

式中， H_t^{Rec} ， H_t^{EH} 分别表示t时刻经吸热器、电加热装置流入热盐储罐的热功率； H_t^{TSout} ， H_t^{TSin} 分别表示t时刻热盐储罐释放、存储的热功率； H_t^{SG} 表示t时刻流向蒸汽发生器的热功率；

电加热装置的热电转换关系为：

$$H_t^{\text{EH}} = \eta^{\text{EH}} \cdot P_t^{\text{EH}}$$

式中， η^{EH} 表示电加热装置的电-热转换效率； P_t^{EH} 表示t时刻电加热装置的电功率；

热盐储罐逐时的储热状态方程为：

$$E_t^{\text{TS}} = E_{t-1}^{\text{TS}} + (H_{t-1}^{\text{TSin}} - H_{t-1}^{\text{TSout}}) \cdot \Delta t$$

式中， E_t^{TS} 表示t时刻热盐储罐存的储热量； Δt 为计算的时间间隔；

热盐储罐不跨周期调节，计算周期内存储热量等于释放热量：

$$\sum_t H_t^{\text{TSin}} = \sum_t H_t^{\text{TSout}}$$

输入蒸汽发生器的热功率主要用途分为两部分：

$$H_t^{\text{SG}} = H_t^{\text{Start}} + H_t^{\text{PC}}$$

式中： H_t^{Start} 表示t时刻用于启动汽轮发电机的热功率， H_t^{PC} 表示t时刻输入汽轮发电机的热功率；

进入汽轮发电机的热量达到汽轮发电机最小启动要求约束：

$$H_k^{\text{Start}} \cdot \Delta t + H_{k+1}^{\text{Start}} \cdot \Delta t = E_0^{\text{Start}}, s_k^{\text{Start}} = 1$$

式中： E_0^{Start} 表示用于启动汽轮发电机的所需的最小热量； s_k^{Start} 为表示k时刻机组是否启动的0-1变量，该值为1时，表示k时刻机组启动； Δt 为计算的时间间隔；

汽轮发电机的热电转换关系为：

$$P_t^{\text{PC}} = f(H_t^{\text{PC}})$$

式中： P_t^{PC} 表示t时刻光热电站的出力；汽轮发电机的效率曲线为非线性的，本文中用分段线性表示；

2) 不等式约束

输入蒸汽发生器的热功率不超过蒸汽发生器最大输入功率:

$$H_t^{\text{SG}} \leq H_{\max}^{\text{SG}}$$

式中: H_{\max}^{SG} 表示蒸汽发生器最大输入功率;

汽轮发电机组最小启停机约束:

$$\begin{cases} x_t^{\text{PC}} - x_{t-1}^{\text{PC}} \leq x_t^{\text{PC}}, & \forall t \in [t+1, \min\{t+T_{\text{on}}-1, T_n\}] \\ x_{t-1}^{\text{PC}} - x_t^{\text{PC}} \leq 1 - x_t^{\text{PC}}, & \forall t \in [t+1, \min\{t+T_{\text{off}}-1, T_n\}] \end{cases}$$

式中, x_t^{PC} 为表示 t 时刻机组启停状态的 0-1 变量, 1 表示开机, T_{on} , T_{off} 为最小开机、停机时间; T_n 为计算周期;

汽轮发电机组启动时刻约束:

$$x_t^{\text{PC}} - x_{t-1}^{\text{PC}} \leq s_t^{\text{Start}}$$

汽轮发电机组启动时刻约束:

$$x_{t-1}^{\text{PC}} - x_t^{\text{PC}} \leq s_t^{\text{Close}}$$

式中: s_t^{Close} 为表示 t 时刻停机的 0-1 变量, 1 表示光热电站在 t 时刻停机;

机组出力限制约束:

$$P_{\min}^{\text{PC}}(x_t^{\text{PC}} - s_t^{\text{Start}}) \leq P_t^{\text{PC}} \leq P_{\max}^{\text{PC}}(x_t^{\text{PC}} - s_t^{\text{Start}})$$

式中: P_{\min}^{PC} , P_{\max}^{PC} 分别表示机组的出力下限、上限;

热盐储罐释放、存储的热功率要满足约束:

$$\begin{cases} 0 \leq H_t^{\text{TSin}} \leq c_t^{\text{TSin}} H_{\max}^{\text{TSin}} \\ 0 \leq H_t^{\text{TSout}} \leq (1 - c_t^{\text{TSin}}) H_{\max}^{\text{TSout}} \end{cases}$$

式中: H_{\max}^{TSin} , H_{\max}^{TSout} 分别表示热盐储罐存储、释放热功率的最大值, c_t^{TSin} 为表示热盐储罐存储状态的 0-1 变量, 1 表示热盐储罐存储, 热罐不能同时既存储又释放热量;

热盐储罐的存储热量要满足约束:

$$E_{\min}^{\text{TS}} \leq E_t^{\text{TS}} \leq E_{\max}^{\text{TS}}$$

式中: E_{\min}^{TS} , E_{\max}^{TS} 分别表示热盐储罐存储容量的下限、上限。

9. 根据权利要求 6 所述的含有电加热装置的光热电站的建模和优化运行方法, 其特征在于, 该光热电站独立运行时的优化目标函数为:

$$\max \sum_{t=1}^T (p^{\text{CSP}} P_t^{\text{PC}} - (1 - x_t^{\text{PC}}) p^{\text{E}} E^{\text{BUY}} - p^{\text{EH}} P_t^{\text{EH}})$$

式中, 第一项为光热电站售电收入, 第二项为电站停机购电成本, 第三项为电站购买弃电的成本; p^{CSP} 表示光热电站的售电价; p^{E} 表示电站从电网购电电价; p^{EH} 表示电站从电网购买弃电的电价; E^{BUY} 表示机组停机时从电网购电量;

该光热电站还需满足的约束条件为:

$$0 \leq P_t^{\text{EH}} \leq P_t^{\text{EH}(0)}, \forall t$$

式中, $P_t^{\text{EH}(0)}$ 为 t 时刻光热电站可从系统购买的弃电电力。

10. 根据权利要求6所述的含有电加热装置的光热电站的建模和优化运行方法,其特征在于,含有该光热电站的多能互补系统的优化目标函数为:

$$\min \left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^W (P_{i,t}^{W(0)} - P_{i,t}^W) + \lambda_2 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^S (P_{i,t}^{S(0)} - P_{i,t}^S) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{\text{CSP}} (\lambda_3 (\eta^{\text{Rec}} \cdot H_{i,t}^{\text{Rec}} - P_{i,t}^{\text{PC}}) + \lambda_4 x_{i,t}^{\text{PC}} + \lambda_5 P_{i,t}^{\text{EH}}) \\ + \lambda_6 \sum_{t=1}^T P_t^L \end{array} \right\}$$

式中,前两项分别为弃风、弃光惩罚;第三项为对光热惩罚,其中,第一项为少发电惩罚,第二项为停机购电费用,第三项为电加热惩罚;最后一项为通道空闲惩罚; λ_i 为惩罚系数; $P_{i,t}^{W(0)}$, $P_{i,t}^{S(0)}$ 为风电、光伏预测出力, $P_{i,t}^W$, $P_{i,t}^S$ 为风电、光伏实际出力; η^{Rec} 为热-电转化效率; P_t^L 为通道空闲容量;

多能互补系统还需满足的约束条件为:

$$\sum_{i=1}^W P_{i,t}^W + \sum_{i=1}^S P_{i,t}^S + \sum_{i=1}^{\text{CSP}} P_{i,t}^{\text{PC}} + P_t^L = P_t^D, \forall t$$

$$\sum_{i=1}^W P_{i,t}^{W'} + \sum_{i=1}^S P_{i,t}^{S'} = \sum_{i=1}^{\text{CSP}} P_{i,t}^{\text{EH}}, \forall t$$

式中, P_t^D 为 t 时刻通道送电能力; $P_{i,t}^{W'}$, $P_{i,t}^{S'}$ 为风电、光伏原弃电部分用于电加热的出力;

$$0 \leq P_{i,t}^W \leq P_{i,t}^{W(0)}, \forall i, t$$

$$0 \leq P_{i,t}^S \leq P_{i,t}^{S(0)}, \forall i, t$$

$$0 \leq P_{i,t}^{W'} \leq P_{i,t}^{W(0)} - P_{i,t}^W, \forall i, t$$

$$0 \leq P_{i,t}^{S'} \leq P_{i,t}^{S(0)} - P_{i,t}^S, \forall i, t$$

一种含有电加热装置的光热电站及其建模和优化运行方法

技术领域

[0001] 本发明涉及光热技术领域,特别涉及一种含有电加热装置的光热电站及其建模和优化运行方法。

背景技术

[0002] 太阳能光热发电技术是除光伏发电以外另一种主要的太阳能利用方式。我国可以满足光热电站光照条件要求的地区大多位于西北和北部,这些地区风电、太阳能资源均较丰富,风电、光伏的大规模接入给电力系统的日前和实时调度带来了困难。含储热的光热电站储热环节的引入使光热电站的出力平稳可控,光热电站与风电、光伏组成联合多能互补系统发电时,可降低风电、光伏的不确定性,一定程度上降低新能源的弃电率。但对于新能源渗透率过高的西北地区而言,受限于调峰电站、储能设施的容量限制,依然存在弃电率过高的问题。

发明内容

[0003] 本发明的目的在于提供一种含有电加热装置的光热电站的建模及其优化运行方法。可有效地减少新能源的弃电量,有利于提高光热电站及多能互补系统的运行经济性。从而提高光热电站运行的灵活性,具有实际意义和推广价值。

[0004] 为了实现上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0005] 一种含有电加热装置的光热电站,包括聚光集热系统、吸热系统、储热装置、换热系统和汽轮发电机;所述的聚光集热系统用于给吸热器提供热能;吸热器的出口与储热装置的热盐储罐的第一入口连接,吸热器的入口与储热装置的冷盐储罐的第一出口连接;冷盐储罐的第二出口通过电加热装置与热盐储罐的第二入口连接;热盐储罐的出口与换热系统的蒸汽发生器的高温入口连接,蒸汽发生器的低温出口与冷盐储罐的入口连接,以实现熔盐循环;蒸汽发生器的高温出口与汽轮发电机的入口连接,汽轮发电机的出口通过凝汽器与蒸汽发生器的低温入口连接,以实现蒸汽循环。

[0006] 该光热电站建模满足以下约束:

[0007] 等式约束:

[0008] 热盐储罐节点的热功率平衡约束为:

$$H_t^{\text{Rec}} + H_t^{\text{EH}} + H_t^{\text{TSout}} - H_t^{\text{TSin}} - H_t^{\text{SG}} = 0$$

[0010] 式中, H_t^{Rec} , H_t^{EH} 分别表示 t 时刻经吸热器、电加热装置流入热盐储罐的热功率; H_t^{TSout} , H_t^{TSin} 分别表示 t 时刻热盐储罐释放、存储的热功率; H_t^{SG} 表示 t 时刻流向蒸汽发生器的热功率;

[0011] 电加热装置的热电转换关系为:

$$H_t^{\text{EH}} = \eta^{\text{EH}} \cdot P_t^{\text{EH}}$$

[0013] 式中, η^{EH} 表示电加热装置的电-热转换效率; P_t^{EH} 表示t时刻电加热装置的电功率;

[0014] 热盐储罐逐时的储热状态方程为:

$$E_t^{TS} = (1 - \gamma^{TS}) \cdot E_{t-1}^{TS} + (H_{t-1}^{TSin} - H_{t-1}^{TSout}) \cdot \Delta t$$

[0016] 式中, E_t^{TS} 表示t时刻热盐储罐存的储热量; γ^{TS} 表示热盐储罐熔盐热量的耗散系数; Δt 为计算的时间间隔;

[0017] 本发明进一步的改进在于:根据工程经验,熔盐每天下降约1°C, γ^{TS} 很小可忽略, 上式可简化为:

$$E_t^{TS} = E_{t-1}^{TS} + (H_{t-1}^{TSin} - H_{t-1}^{TSout}) \cdot \Delta t$$

[0019] 热盐储罐不跨周期调节,计算周期内存储热量等于释放热量:

$$\sum_t H_t^{TSin} = \sum_t H_t^{TSout}$$

[0021] 输入蒸汽发生器的热功率主要用途分为两部分:

$$H_t^{SG} = H_t^{\text{Start}} + H_t^{\text{PC}}$$

[0023] 式中: H_t^{Start} 表示t时刻用于启动汽轮发电机的热功率, H_t^{PC} 表示t时刻输入汽轮发电机的热功率;

[0024] 进入汽轮发电机的热量达到汽轮发电机最小启动要求约束:

$$H_k^{\text{Start}} \cdot \Delta t + H_{k+1}^{\text{Start}} \cdot \Delta t = E_0^{\text{Start}}, s_k^{\text{Start}} = 1$$

[0026] 式中: E_0^{Start} 表示用于启动汽轮发电机的所需的最小热量; s_k^{Start} 为表示k时刻机组是否启动的0-1变量,该值为1时,表示k时刻机组启动; Δt 为计算的时间间隔;

[0027] 汽轮发电机的热电转换关系为:

$$P_t^{\text{PC}} = f(H_t^{\text{PC}})$$

[0029] 式中: P_t^{PC} 表示t时刻光热电站的出力,汽轮发电机的效率曲线为非线性的,本文中用分段线性表示;

[0030] 不等式约束:

[0031] 输入蒸汽发生器的热功率不超过蒸汽发生器最大输入功率:

$$H_t^{SG} \leq H_{\max}^{SG}$$

[0033] 式中: H_{\max}^{SG} 表示蒸汽发生器最大输入功率;

[0034] 汽轮发电机组最小启停机约束:

$$[0035] \begin{cases} x_t^{\text{PC}} - x_{t-1}^{\text{PC}} \leq x_{\tau}^{\text{PC}}, & \forall \tau \in [t+1, \min\{t+T_{\text{on}}-1, T_n\}] \\ x_{t-1}^{\text{PC}} - x_t^{\text{PC}} \leq 1 - x_{\tau}^{\text{PC}}, & \forall \tau \in [t+1, \min\{t+T_{\text{off}}-1, T_n\}] \end{cases}$$

[0036] 式中, x_t^{PC} 为表示t时刻机组启停状态的0-1变量,1表示开机; $T_{\text{on}}, T_{\text{off}}$ 为最小开机、停机时间; T_n 为计算周期;

[0037] 汽轮发电机组启动时刻约束:

[0038] $x_t^{\text{PC}} - x_{t-1}^{\text{PC}} \leq s_t^{\text{Start}}$

[0039] 汽轮发电机组启动时刻约束:

[0040] $x_{t-1}^{\text{PC}} - x_t^{\text{PC}} \leq s_t^{\text{Close}}$

[0041] 式中: s_t^{Close} 为表示 t 时刻停机的 0-1 变量, 1 表示光热电站在 t 时刻停机;

[0042] 机组出力限制约束:

[0043] $P_{\min}^{\text{PC}}(x_t^{\text{PC}} - s_t^{\text{Start}}) \leq P_t^{\text{PC}} \leq P_{\max}^{\text{PC}}(x_t^{\text{PC}} - s_t^{\text{Start}})$

[0044] 式中: P_{\min}^{PC} , P_{\max}^{PC} 分别表示机组的出力下限、上限, 需要指出的是, 在开机时刻机组需要先热机, 剩余热量不能满足出力要求;

[0045] 热盐储罐释放、存储的热功率要满足约束:

[0046]
$$\begin{cases} 0 \leq H_t^{\text{TSin}} \leq c_t^{\text{TSin}} H_{\max}^{\text{TSin}} \\ 0 \leq H_t^{\text{TSout}} \leq (1 - c_t^{\text{TSin}}) H_{\max}^{\text{TSout}} \end{cases}$$

[0047] 式中: H_{\max}^{TSin} , H_{\max}^{TSout} 分别表示热盐储罐存储、释放热功率的最大值, c_t^{TSin} 为表示热盐储罐存储状态的 0-1 变量, 1 表示热盐储罐存储, 热罐不能同时既存储又释放热量;

[0048] 热盐储罐的存储热量要满足约束:

[0049] $E_{\min}^{\text{TS}} \leq E_t^{\text{TS}} \leq E_{\max}^{\text{TS}}$

[0050] 式中: E_{\min}^{TS} , E_{\max}^{TS} 分别表示热盐储罐存储容量的下限、上限。

[0051] 该光热电站独立运行时的优化目标函数为:

[0052] $\max \sum_{t=1}^T (p^{\text{CSP}} P_t^{\text{PC}} - (1 - x_t^{\text{PC}}) p^{\text{E}} E^{\text{BUY}} - p^{\text{EH}} P_t^{\text{EH}})$

[0053] 式中, 第一项为光热电站售电收入, 第二项为电站停机购电成本, 第三项为电站购买弃电的成本; p^{CSP} 表示光热电站的售电电价; p^{E} 表示电站从电网购电电价; p^{EH} 表示电站从电网购买弃电的电价; E^{BUY} 表示机组停机时从电网购电电量;

[0054] 该光热电站还需满足的约束条件为:

[0055] $0 \leq P_t^{\text{EH}} \leq P_t^{\text{EH}(0)}, \forall t$

[0056] 式中, $P_t^{\text{EH}(0)}$ 为 t 时刻光热电站可从系统购买的弃电电力。

[0057] 含有该光热电站的多能互补系统的优化目标函数为:

[0058]
$$\min \left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^W (P_{i,t}^{W(0)} - P_{i,t}^W) + \lambda_2 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^S (P_{i,t}^{S(0)} - P_{i,t}^S) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{\text{CSP}} (\lambda_3 (\eta^{\text{Rec}} \cdot H_{i,t}^{\text{Rec}} - P_{i,t}^{\text{PC}}) + \lambda_4 x_{i,t}^{\text{PC}} + \lambda_5 P_{i,t}^{\text{EH}}) \\ + \lambda_6 \sum_{t=1}^T P_t^L \end{array} \right\}$$

[0059] 式中, 前两项分别为弃风、弃光惩罚; 第三项为对光热惩罚, 其中, 第一项为少发电惩罚, 第二项为停机购电费用, 第三项为电加热惩罚; 最后一项为通道空闲惩罚, λ_i 为惩罚系数; $P_{i,t}^{W(0)}$, $P_{i,t}^{S(0)}$ 为风电、光伏预测出力, $P_{i,t}^W$, $P_{i,t}^S$ 为风电、光伏实际出力; η^{Rec} 为热-电转化

效率; P_t^L 为通道空闲容量;

[0060] 多能互补系统还需满足的约束条件为:

$$[0061] \sum_{i=1}^W P_{i,t}^W + \sum_{i=1}^S P_{i,t}^S + \sum_{i=1}^{CSP} P_{i,t}^{PC} + P_t^L = P_t^D, \quad \forall t$$

$$[0062] \sum_{i=1}^W P_{i,t}^{W'} + \sum_{i=1}^S P_{i,t}^{S'} = \sum_{i=1}^{CSP} P_{i,t}^{EH}, \quad \forall t$$

[0063] 式中, P_t^D 为 t 时刻通道送电能力; $P_{i,t}^{W'}$, $P_{i,t}^{S'}$ 为风电、光伏原弃电部分用于电加热的出力;

$$[0064] 0 \leq P_{i,t}^W \leq P_{i,t}^{W(0)}, \quad \forall i, t$$

$$[0065] 0 \leq P_{i,t}^S \leq P_{i,t}^{S(0)}, \quad \forall i, t$$

$$[0066] 0 \leq P_{i,t}^{W'} \leq P_{i,t}^{W(0)} - P_{i,t}^W, \quad \forall i, t$$

$$[0067] 0 \leq P_{i,t}^{S'} \leq P_{i,t}^{S(0)} - P_{i,t}^S, \quad \forall i, t$$

[0068] 所述的聚光集热系统(1)为塔式或槽式集热系统。

[0069] 一种含有电加热装置的光热电站的建模和优化运行方法,包括以下步骤:

[0070] 对于该电站独立运行时,建立含有电加热装置和储能装置的光热电站模型,该模型由目标函数和约束条件构成;以光热电站收益最大为优化目标,考虑光热电站本体运行约束;最后,通过混合整数优化求解算法对模型求解,求得的最优解作为光热电站有功出力计划和储罐充放策略;

[0071] 对于含有该电站的多能互补系统时,首先建立含有电加热装置和储能装置的光热电站模型,然后建立含有风电、光伏、光热电站构成的多能互补系统的优化运行模型,该模型由目标函数和约束条件构成;目标函数为多能互补系统运行总成本最小,约束条件分为电力系统运行约束条件和光热电站本体运行约束;最后,通过混合整数优化求解算法对多能互补系统机组组合模型求解,将得到的最优解作为多能互补系统机组运行策略。

[0072] 作为本发明的进一步改进,建立含有电加热装置的光热电站模型是指冷盐储罐熔盐经泵送往电加热装置,经电加热后进入热盐储罐,熔盐从冷盐储罐到热盐储罐多一条并行通路,实现电到热的转换并存储。

[0073] 作为本发明的进一步改进,含有电加热装置的光热电站模型的约束如下:

[0074] 1) 等式约束

[0075] 热盐储罐节点的热功率平衡约束为:

$$[0076] H_t^{\text{Rec}} + H_t^{\text{EH}} + H_t^{\text{TSout}} - H_t^{\text{TSin}} - H_t^{\text{SG}} = 0$$

[0077] 式中, H_t^{Rec} , H_t^{EH} 分别表示 t 时刻经吸热器、电加热装置流入热盐储罐的热功率;

H_t^{TSout} , H_t^{TSin} 分别表示 t 时刻热盐储罐释放、存储的热功率; H_t^{SG} 表示 t 时刻流向蒸汽发生器的热功率;

[0078] 电加热装置的热电转换关系为:

$$[0079] H_t^{\text{EH}} = \eta^{\text{EH}} \cdot P_t^{\text{EH}}$$

[0080] 式中, η^{EH} 表示电加热装置的电-热转换效率; P_t^{EH} 表示t时刻电加热装置的电功率;

[0081] 热盐储罐逐时的储热状态方程为:

$$E_t^{TS} = (1-\gamma^{TS}) \cdot E_{t-1}^{TS} + (H_{t-1}^{TSin} - H_{t-1}^{TSout}) \cdot \Delta t$$

[0083] 式中, E_t^{TS} 表示t时刻热盐储罐存的储热量; γ^{TS} 表示热盐储罐熔盐热量的耗散系数; Δt 为计算的时间间隔;

[0084] 本发明进一步的改进在于:根据工程经验,熔盐每天下降约1°C, γ^{TS} 很小可忽略, 上式可简化为:

$$E_t^{TS} = E_{t-1}^{TS} + (H_{t-1}^{TSin} - H_{t-1}^{TSout}) \cdot \Delta t$$

[0086] 热盐储罐不跨周期调节,计算周期内存储热量等于释放热量:

$$\sum_t H_t^{TSin} = \sum_t H_t^{TSout}$$

[0088] 输入蒸汽发生器的热功率主要用途分为两部分:

$$H_t^{SG} = H_t^{Start} + H_t^{PC}$$

[0090] 式中: H_t^{Start} 表示t时刻用于启动汽轮发电机的热功率, H_t^{PC} 表示t时刻输入汽轮发电机的热功率;

[0091] 进入汽轮发电机的热量达到汽轮发电机最小启动要求约束:

$$H_k^{Start} \cdot \Delta t + H_{k+1}^{Start} \cdot \Delta t = E_0^{Start}, s_k^{Start} = 1$$

[0093] 式中: E_0^{Start} 表示用于启动汽轮发电机的所需的最小热量; s_k^{Start} 为表示k时刻机组是否启动的0-1变量,该值为1时,表示k时刻机组启动; Δt 为计算的时间间隔;

[0094] 汽轮发电机的热电转换关系为:

$$P_t^{PC} = f(H_t^{PC})$$

[0096] 式中: P_t^{PC} 表示t时刻光热电站的出力;汽轮发电机的效率曲线为非线性的,本文中用分段线性表示;

[0097] 2) 不等式约束

[0098] 输入蒸汽发生器的热功率不超过蒸汽发生器最大输入功率:

$$H_t^{SG} \leq H_{max}^{SG}$$

[0100] 式中: H_{max}^{SG} 表示蒸汽发生器最大输入功率;

[0101] 汽轮发电机组最小启停机约束:

$$[0102] \begin{cases} x_t^{PC} - x_{t-1}^{PC} \leq x_{\tau}^{PC}, & \forall \tau \in [t+1, \min\{t+T_{on}-1, T_n\}] \\ x_{t-1}^{PC} - x_t^{PC} \leq 1 - x_{\tau}^{PC}, & \forall \tau \in [t+1, \min\{t+T_{off}-1, T_n\}] \end{cases}$$

[0103] 式中, x_t^{PC} 为表示t时刻机组启停状态的0-1变量,1表示开机, T_{on} , T_{off} 为最小开机、停机时间; T_n 为计算周期;

[0104] 汽轮发电机组启动时刻约束:

[0105] $x_t^{\text{PC}} - x_{t-1}^{\text{PC}} \leq s_t^{\text{Start}}$

[0106] 汽轮发电机组启动时刻约束:

[0107] $x_{t-1}^{\text{PC}} - x_t^{\text{PC}} \leq s_t^{\text{Close}}$

[0108] 式中: s_t^{Close} 为表示 t 时刻停机的 0-1 变量, 1 表示光热电站在 t 时刻停机;

[0109] 机组出力限制约束:

[0110] $P_{\min}^{\text{PC}}(x_t^{\text{PC}} - s_t^{\text{Start}}) \leq P_t^{\text{PC}} \leq P_{\max}^{\text{PC}}(x_t^{\text{PC}} - s_t^{\text{Start}})$

[0111] 式中: P_{\min}^{PC} , P_{\max}^{PC} 分别表示机组的出力下限、上限;

[0112] 热盐储罐释放、存储的热功率要满足约束:

[0113]
$$\begin{cases} 0 \leq H_t^{\text{TSin}} \leq c_t^{\text{TSin}} H_{\max}^{\text{TSin}} \\ 0 \leq H_t^{\text{TSout}} \leq (1 - c_t^{\text{TSin}}) H_{\max}^{\text{TSout}} \end{cases}$$

[0114] 式中: H_{\max}^{TSin} , H_{\max}^{TSout} 分别表示热盐储罐存储、释放热功率的最大值, c_t^{TSin} 为表示热盐储罐存储状态的 0-1 变量, 1 表示热盐储罐存储, 热罐不能同时既存储又释放热量;

[0115] 热盐储罐的存储热量要满足约束:

[0116] $E_{\min}^{\text{TS}} \leq E_t^{\text{TS}} \leq E_{\max}^{\text{TS}}$

[0117] 式中: E_{\min}^{TS} , E_{\max}^{TS} 分别表示热盐储罐存储容量的下限、上限。

[0118] 作为本发明的进一步改进, 该光热电站独立运行时的优化目标函数为:

[0119] $\max \sum_{t=1}^T (p^{\text{CSP}} P_t^{\text{PC}} - (1 - x_t^{\text{PC}}) p^E E^{\text{BUY}} - p^{\text{EH}} P_t^{\text{EH}})$

[0120] 式中, 第一项为光热电站售电收入, 第二项为电站停机购电成本, 第三项为电站购买弃电的成本; p^{CSP} 表示光热电站的售电电价; p^E 表示电站从电网购电电价; p^{EH} 表示电站从电网购买弃电的电价; E^{BUY} 表示机组停机时从电网购电电量;

[0121] 该光热电站还需满足的约束条件为:

[0122] $0 \leq P_t^{\text{EH}} \leq P_t^{\text{EH}(0)}, \forall t$

[0123] 式中, $P_t^{\text{EH}(0)}$ 为 t 时刻光热电站可从系统购买的弃电电力。

[0124] 含有该光热电站的多能互补系统的优化目标函数为:

[0125]
$$\min \left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^W (P_{i,t}^{W(0)} - P_{i,t}^W) + \lambda_2 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^S (P_{i,t}^{S(0)} - P_{i,t}^S) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{\text{CSP}} (\lambda_3 (\eta^{\text{Rec}} \cdot H_{i,t}^{\text{Rec}} - P_{i,t}^{\text{PC}}) + \lambda_4 x_{i,t}^{\text{PC}} + \lambda_5 P_{i,t}^{\text{EH}}) \\ + \lambda_6 \sum_{t=1}^T P_t^L \end{array} \right\}$$

[0126] 式中, 前两项分别为弃风、弃光惩罚; 第三项为对光热惩罚, 其中, 第一项为少发电惩罚, 第二项为停机购电费用, 第三项为电加热惩罚; 最后一项为通道空闲惩罚; λ_i 为惩罚系数; $P_{i,t}^{W(0)}$, $P_{i,t}^{S(0)}$ 为风电、光伏预测出力, $P_{i,t}^W$, $P_{i,t}^S$ 为风电、光伏实际出力; η^{Rec} 为热-电转化效率; P_t^L 为通道空闲容量;

[0127] 多能互补系统还需满足的约束条件为：

$$[0128] \sum_{i=1}^W P_{i,t}^W + \sum_{i=1}^S P_{i,t}^S + \sum_{i=1}^{CSP} P_{i,t}^{PC} + P_t^L = P_t^D, \quad \forall t$$

$$[0129] \sum_{i=1}^W P_{i,t}^{W'} + \sum_{i=1}^S P_{i,t}^{S'} = \sum_{i=1}^{CSP} P_{i,t}^{EH}, \quad \forall t$$

[0130] 式中, P_t^D 为 t 时刻通道送电能力; $P_{i,t}^{W'}$, $P_{i,t}^{S'}$ 为风电、光伏原弃电部分用于电加热的出力;

$$[0131] 0 \leq P_{i,t}^W \leq P_{i,t}^{W(0)}, \quad \forall i, t$$

$$[0132] 0 \leq P_{i,t}^S \leq P_{i,t}^{S(0)}, \quad \forall i, t$$

$$[0133] 0 \leq P_{i,t}^{W'} \leq P_{i,t}^{W(0)} - P_{i,t}^W, \quad \forall i, t$$

$$[0134] 0 \leq P_{i,t}^{S'} \leq P_{i,t}^{S(0)} - P_{i,t}^S, \quad \forall i, t.$$

[0135] 相对于现有技术,本发明具有以下优点:

[0136] 本发明的光热电站通过在光热电站内部装设电加热装置,利用电热装置回收系统的弃风、弃光电量,可有效地减少新能源的弃电量,有利于提高光热电站及多能互补系统的运行经济性。从而提高光热电站运行的灵活性,具有实际意义和推广价值。

[0137] 本发明的一种含有电加热装置的光热电站的建模和优化运行方法能够优化含有电加热装置的光热电站运行,提高新能源消纳能和光热电站的运行经济性。模型适用于独立运行的光热电站及含有风电、光伏、光热发电的多能互补系统等场景,其中考虑了多种运行约束,包括:以热盐罐为节点的热功率平衡约束、电加热装置的热电转换关系约束、热罐逐时的储热状态约束、计算周期内存储热量等于释放热量约束、汽轮发电机的热电转换约束、汽轮机的启动热量约束和电力平衡约束、用于电加热装置的弃风弃光电力约束等。采用混合整数线性优化技术求解该优化问题。结果表明通过在光热电站加装适量的电加热装置,可有效地减少新能源的弃电量,增加光热发电量,有利于提高光热电站及多能互补系统的运行经济性。

附图说明

[0138] 图1是含有电加热装置的塔式(槽式亦可适用)熔盐光热电站原理图;

[0139] 图2汽轮发电机效率曲线图;

[0140] 图3未装设电加热装置的多能互补基地运行图;

[0141] 图4装设电加热装置的多能互补基地运行图;

[0142] 其中,1为聚光集热系统,2为吸热器,3为冷盐储罐,4为电加热装置,5为热盐储罐,6为蒸汽发生器,7为凝汽器,8为汽轮发电机,9为电力变压器。

具体实施方式

[0143] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下针对含有本光热电站的多能互补系统,结合实施例,对本发明进行进一步详细说明。独立运行的光热电站与此类似,不再做具体实例分析。应当理解,此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0144] 本发明提出了一种含有电加热装置的光热电站的建模和优化运行方法。该优化运行策略能够优化含有电加热装置的光热电站运行,提高新能源消纳能和光热电站的运行经济性。模型适用于独立运行的光热电站及含有风电、光伏、光热发电的多能互补系统等场景,其中考虑了多种运行约束,包括:以热盐罐为节点的热功率平衡约束、电加热装置的热电转换关系约束、热罐逐时的储热状态约束、计算周期内存储热量等于释放热量约束、汽轮发电机的热电转换约束、汽轮机的启动热量约束和电力平衡约束、用于电加热装置的弃风弃光电力约束等。

[0145] 如图1,一种含有电加热装置的光热电站主要由四部分构成:聚光集热系统1、吸热系统、储热装置、换热系统和汽轮发电装置。在熔盐太阳能塔式(槽式也适用)发电系统中,约290℃的熔盐经泵从冷盐储罐3送往吸热器2,在吸热器2内被聚光集热系统1反射的日光加热到565℃,再进入热盐储罐5。当需要发电时,热盐经泵进入蒸汽发生器6,产生过热蒸汽,过热蒸汽进入汽轮发电机8,通过凝汽器7进入蒸汽发生器6,实现传统的朗肯循环发电,经蒸汽发生装置放热的盐再进入冷盐储罐3,再通过吸热器2加热重复上述过程。含有电加热装置4时,冷盐储罐3熔盐经泵送往电加热器4,经电加热后进入热盐储罐5,熔盐从冷盐储罐3到热盐储罐5多了一条并行通路,实现电到热的转换并存储。

[0146] 本发明一种含有电加热装置的光热电站的建模和优化运行方法,该方法首先建立含有电加热装置和储能装置的光热电站模型,然后建立含有风电、光伏、光热电站构成的多能互补系统的优化运行策略模型,该模型由目标函数和约束条件构成;目标函数为多能互补系统运行总成本(含机会成本)最小,约束条件分为电力系统运行约束条件和光热电站本体运行约束;最后,通过混合整数线性优化技术对多能互补系统机组组合模型求解,将得到的最优解作为多能互补系统机组运行策略。

[0147] 对含有电加热装置的光热电站进行数学建模。该模型的主要约束如下。

[0148] 1) 等式约束

[0149] 以热盐储罐为节点的热功率平衡约束为:

$$H_t^{\text{Rec}} + H_t^{\text{EH}} + H_t^{\text{TSout}} - H_t^{\text{TSin}} - H_t^{\text{SG}} = 0 \quad (1)$$

[0150] 式中, H_t^{Rec} , H_t^{EH} 分别表示t时刻经吸热器、电加热装置流入热盐储罐的热功率; H_t^{TSout} , H_t^{TSin} 分别表示t时刻热盐储罐释放、存储的热功率; H_t^{SG} 表示t时刻流向蒸汽发生器的热功率。

[0152] 电加热装置的热电转换关系为:

$$H_t^{\text{EH}} = \eta^{\text{EH}} \cdot P_t^{\text{EH}} \quad (2)$$

[0154] 式中, η^{EH} 表示电加热装置的电-热转换效率; P_t^{EH} 表示t时刻电加热装置的电功率。

[0155] 热盐储罐逐时的储热状态方程为:

$$E_t^{\text{TS}} = (1 - \gamma^{\text{TS}}) \cdot E_{t-1}^{\text{TS}} + (H_{t-1}^{\text{TSin}} - H_{t-1}^{\text{TSout}}) \cdot \Delta t$$

[0157] 式中, E_t^{TS} 表示t时刻热盐储罐存的储热量; γ^{TS} 表示热盐储罐熔盐热量的耗散系数; Δt 为计算的时间间隔。

[0158] 本发明进一步的改进在于:根据工程经验,熔盐每天下降约1℃, γ^{TS} 很小可忽略,

上式可简化为：

$$[0159] E_t^{\text{TS}} = E_{t-1}^{\text{TS}} + (H_{t-1}^{\text{TSin}} - H_{t-1}^{\text{TSout}}) \cdot \Delta t$$

[0160] 热盐储罐不跨周期调节，计算周期内存储热量等于释放热量：

$$[0161] \sum_t H_t^{\text{TSin}} = \sum_t H_t^{\text{TSout}} \quad (4)$$

[0162] 输入蒸汽发生器的热功率主要用途分为两部分：

$$[0163] H_t^{\text{SG}} = H_t^{\text{Start}} + H_t^{\text{PC}} \quad (5)$$

[0164] 式中： H_t^{Start} 表示t时刻用于启动汽轮发电机的热功率， H_t^{PC} 表示t时刻输入汽轮发电机的热功率。

[0165] 汽轮发电机的冷态启动一般用时1~2h，进入汽轮发电机的热量达到汽轮发电机最小启动要求约束：

$$[0166] H_k^{\text{Start}} \cdot \Delta t + H_{k+1}^{\text{Start}} \cdot \Delta t = E_0^{\text{Start}}, s_k^{\text{Start}} = 1 \quad (6)$$

[0167] 式中： E_0^{Start} 表示用于启动汽轮发电机的所需的最小热量； s_k^{Start} 为表示k时刻机组是否启动的0-1变量，该值为1时，表示k时刻机组启动； Δt 为计算的时间间隔。

[0168] 汽轮发电机的热电转换关系为：

$$[0169] P_t^{\text{PC}} = f(H_t^{\text{PC}}) \quad (7)$$

[0170] 式中： P_t^{PC} 表示t时刻光热电站的出力。汽轮发电机的效率曲线为非线性的，本文中用分段线性表示。

[0171] 2) 不等式约束

[0172] 输入蒸汽发生器的热功率不超过蒸汽发生器最大输入功率：

$$[0173] H_t^{\text{SG}} \leq H_{\max}^{\text{SG}} \quad (8)$$

[0174] 式中： H_{\max}^{SG} 表示蒸汽发生器最大输入功率。

[0175] 机组最小启停机约束：

$$[0176] \begin{cases} x_t^{\text{PC}} - x_{t-1}^{\text{PC}} \leq x_{\tau}^{\text{PC}}, & \forall \tau \in [t+1, \min\{t+T_{\text{on}}-1, T_n\}] \\ x_{t-1}^{\text{PC}} - x_t^{\text{PC}} \leq 1 - x_{\tau}^{\text{PC}}, & \forall \tau \in [t+1, \min\{t+T_{\text{off}}-1, T_n\}] \end{cases} \quad (9)$$

[0177] 式中， x_t^{PC} 为表示t时刻机组启停状态的0-1变量，1表示开机。 $T_{\text{on}}, T_{\text{off}}$ 为最小开机、停机时间； T_n 为计算周期。

[0178] 机组启动时刻约束：

$$[0179] x_t^{\text{PC}} - x_{t-1}^{\text{PC}} \leq s_t^{\text{Start}} \quad (10)$$

[0180] 机组启动时刻约束：

$$[0181] x_{t-1}^{\text{PC}} - x_t^{\text{PC}} \leq s_t^{\text{Close}} \quad (11)$$

[0182] 式中： s_t^{Close} 为表示t时刻停机的0-1变量，1表示光热电站在t时刻停机。

[0183] 机组出力限制约束：

[0184] $P_{\min}^{\text{PC}}(x_i^{\text{PC}} - s_t^{\text{Start}}) \leq P_t^{\text{PC}} \leq P_{\max}^{\text{PC}}(x_i^{\text{PC}} - s_t^{\text{Start}})$ (12)

[0185] 式中: P_{\min}^{PC} , P_{\max}^{PC} 分别表示机组的出力下限、上限。需要指出的是,在开机时刻机组需要先热机,剩余热量不能满足出力要求。

[0186] 热盐储罐运行也要满足一定要求。首先,热盐储罐释放、存储的热功率要满足约束:

[0187]
$$\begin{cases} 0 \leq H_t^{\text{TSin}} \leq c_t^{\text{TSin}} H_{\max}^{\text{TSin}} \\ 0 \leq H_t^{\text{TSout}} \leq (1 - c_t^{\text{TSin}}) H_{\max}^{\text{TSout}} \end{cases}$$
 (13)

[0188] 式中: H_{\max}^{TSin} , H_{\max}^{TSout} 分别表示热盐储罐存储、释放热功率的最大值。 c_t^{TSin} 为表示热盐储罐存储状态的0-1变量,1表示热盐储罐存储。热罐不能同时既存储又释放热量。

[0189] 热盐储罐的存储热量要满足约束:

[0190] $E_{\min}^{\text{TS}} \leq E_t^{\text{TS}} \leq E_{\max}^{\text{TS}}$ (14)

[0191] 式中: E_{\min}^{TS} , E_{\max}^{TS} 分别表示热盐储罐存储容量的下限、上限。

[0192] 建立含有风电、光伏、光热发电的多能互补系统的优化模型如下。

[0193] 1) 目标函数

[0194]
$$\min \left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^W (P_{i,t}^{W(0)} - P_{i,t}^W) + \lambda_2 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^S (P_{i,t}^{S(0)} - P_{i,t}^S) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{\text{CSP}} (\lambda_3 (\eta^{\text{Rec}} \cdot H_{i,t}^{\text{Rec}} - P_{i,t}^{\text{PC}}) + \lambda_4 x_{i,t}^{\text{PC}} + \lambda_5 P_{i,t}^{\text{EH}}) \\ + \lambda_6 \sum_{t=1}^T P_t^L \end{array} \right\}$$
 (15)

[0195] 式中,前两项分别为弃风、弃光惩罚;第三项为对光热惩罚,其中,第一项为少发电惩罚,第二项为停机购电费用,第三项为电加热惩罚;最后一项为通道空闲惩罚。 λ_i 为惩罚系数; $P_{i,t}^{W(0)}$, $P_{i,t}^{S(0)}$ 为风电、光伏预测出力, $P_{i,t}^W$, $P_{i,t}^S$ 为风电、光伏实际出力; η^{Rec} 为热-电转化效率; P_t^L 为通道空闲容量。

[0196] 2) 约束条件

[0197] 上述优化目标函数应该要满足的约束条件为:

[0198] $\sum_{i=1}^W P_{i,t}^W + \sum_{i=1}^S P_{i,t}^S + \sum_{i=1}^{\text{CSP}} P_{i,t}^{\text{PC}} + P_t^L = P_t^D, \quad \forall t$ (16)

[0199] $\sum_{i=1}^W P_{i,t}^{W'} + \sum_{i=1}^S P_{i,t}^{S'} = \sum_{i=1}^{\text{CSP}} P_{i,t}^{\text{EH}}, \quad \forall t$ (17)

[0200] 式中, P_t^D 为t时刻通道能力; $P_{i,t}^{W'}$, $P_{i,t}^{S'}$ 为风电、光伏原弃电部分用于电加热的出力。

[0201] $0 \leq P_{i,t}^W \leq P_{i,t}^{W(0)}, \quad \forall i, t$ (18)

[0202] $0 \leq P_{i,t}^S \leq P_{i,t}^{S(0)}, \quad \forall i, t$ (19)

[0203] $0 \leq P_{i,t}^{W'} \leq P_{i,t}^{W(0)} - P_{i,t}^W, \quad \forall i, t$ (20)

[0204] $0 \leq P_{i,t}^{S'} \leq P_{i,t}^{S(0)} - P_{i,t}^S, \quad \forall i, t$ (21)

[0205] 同时要满足式(1)~(14)的约束。

[0206] 本发明的特点及有益效果是:本发明所提出的基于优化算法的含电加热装置的光热电站优化运行方法,适宜应用在调度中心主站系统中,实现系统最优化运行。结果表明通过在光热电站加装适量的电加热装置,可有效地减少新能源的弃电量,增加光热发电量,有利于提高光热电站及多能互补系统的运行经济性。

[0207] 下面通过仿真案例对考虑电加热装置的光热电站的建模和优化运行方法进行具体分析,以对本发明的应用效果作进一步的说明。

[0208] 算例系统为西北某一多能互补基地,该基地通过1回330kV线路和主网相连。系统中风电装机400MW,光伏装机200MW,光热装机一台50MW,并装配40MW的电加热装置。风电、光伏出力特性采用工程中基于多年历史数据生成的典型8760特性曲线。光热机组采用设计的塔式熔盐机组,储热小时数为12小时,太阳倍数定义为整个电站的所有聚光集热设备(定日镜)投运时吸热器输出的热功率和汽轮发电机额定负荷需要的热功率的比值,本算例中取2.8,机组效率曲线见图2。

[0209] 1) 算例1:典型日模拟

[0210] 对上述算例系统某一典型日模拟分析,对比含有电加热装置和不含电加热装置的模拟结果见图3和表1。

[0211] 在不含电加热装置时,风光出力在13:00~17:00超过通道输送能力(通道送电能力曲线如图3所示)发生弃电。光热机组在风电光伏大发的时候未运行,仅吸收热量并存储,18:00后开始满出力运行。增加电加热装置后,光热机组在弃电发生前运行3小时,随后在风电光伏大发产生弃电时停机,此时电加热装置满功率运行5小时,随后启动机组,将储热装置内的全部热量发电。

[0212] 光热机组增加电加热装置后,新能源弃电减少,电加热装置用弃电加热熔盐并存储发电。由于光热机组的热效率及启动热耗等因素,系统真正接纳的新能源发电量小于实际光热增发电量。本算例中,考虑光热机组增添电加热装置后,全天弃电减少200MWh,系统接纳的新能源发电量增加40MWh。

[0213] 表1算例系统日发电量

[0214]

单位: MWh

	风光	光热	电加热	接纳电量	弃电
无电加热	2659	299	/	2958	549
含电加热	2859	339	-200	2998	349
差值	200	40	/	40	-200

[0215] 2) 算例2:年运行结果对比分析

[0216] 加装电加热装置的效果与光照资源条件,储热时长等因素都相关。在不改变储热时长的前提下,多能互补基地年运行指标如表2所示。可以看出,增加电加热装置后,风电光伏年弃电量减少0.2亿kWh,光热机组多发电量0.07亿kWh。40MW的电加热装置需增加4000万元投资,按照光热机组上网电价1.15元/kWh,考虑到电价热装置使用的是多能互补基地的弃电,购电成本可以忽略,投资回收期为5.0年。再考虑电力市场化改革后推行调峰电价,投资收益将会进一步增加。

[0217] 表2算例系统年发电量

[0218] 单位:亿kWh

[0219]

	风光	光热	电加热	接纳电量	弃电
无电加热	10.68	1.60	/	12.28	0.69
含电加热	10.88	1.67	-0.20	12.35	0.49
差值	0.20	0.07	/	0.07	-0.20

[0220] 3) 算例3:不同电加热功率年运行结果对比分析

[0221] 装配40、60MW的电加热装置,多能互补基地年运行指标如表3所示。由表可见,电加热装置增加到60MW时,弃电量减少0.04亿kWh,全部电量用于电加热装置加热熔盐,光热机组年发电量增加0.03亿kWh,机组运行效率提高。

[0222] 表3不同电加热装置算例系统年发电量

[0223] 单位:亿kWh

[0224]

	风光	光热	电加热	接纳电量	弃电
40MW 电加热	10.88	1.67	-0.20	12.35	0.49
60MW 电加热	10.92	1.70	-0.24	12.38	0.45
差值	0.04	0.03	-0.04	0.03	-0.04

[0225] 4) 算例4:不同储热时长年运行结果对比分析

[0226] 改变储热时长,多能互补基地年运行指标如表4所示。由表可以看出,储热时长增加,电加热用电量变化不变,本算例系统中电加热用电量不受限于储热盐储罐大小。

[0227] 随着储热时长增加,系统总发电量增加:首先是由于光热机组可以多存储光照资源量,从而发电量增加;其次,由于储热时长增加,光热机组的调峰能力增强,风光弃电量减少,发电量增加。储热时长每增加1小时,增加投资约1500万元。应根据具体系统,选取合适的储热时长。

[0228] 表4不同储热时长算例系统年发电量

[0229] 单位:亿kWh

[0230]

	风光	光热	电加热	合计	弃电
含电加热	10.88	1.67	-0.20	12.35	0.49
储热时长增加 1 小时	10.89	1.67	-0.21	12.35	0.48
储热时长增加 2 小时	10.90	1.72	-0.20	12.42	0.47
储热时长增加 3 小时	10.91	1.72	-0.20	12.43	0.46
储热时长增加 4 小时	10.91	1.74	-0.20	12.45	0.46

[0231] 以上内容是对本发明所作的进一步详细说明,不能认定本发明的具体实施方式仅限于此,对于本发明所属技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明构思的前提下,还可以做出若干简单的推演或替换,都应当视为属于本发明由所提交的权利要求书确定发明的保护范围。

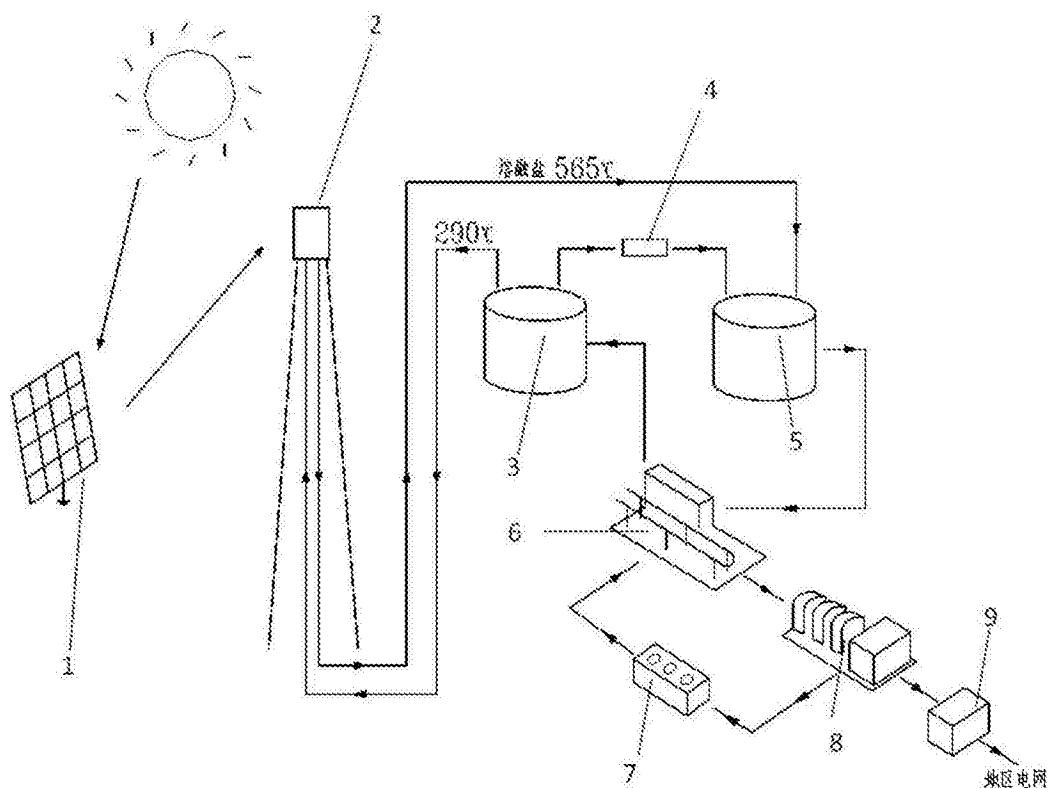


图1

机组不同出力下热效率曲线

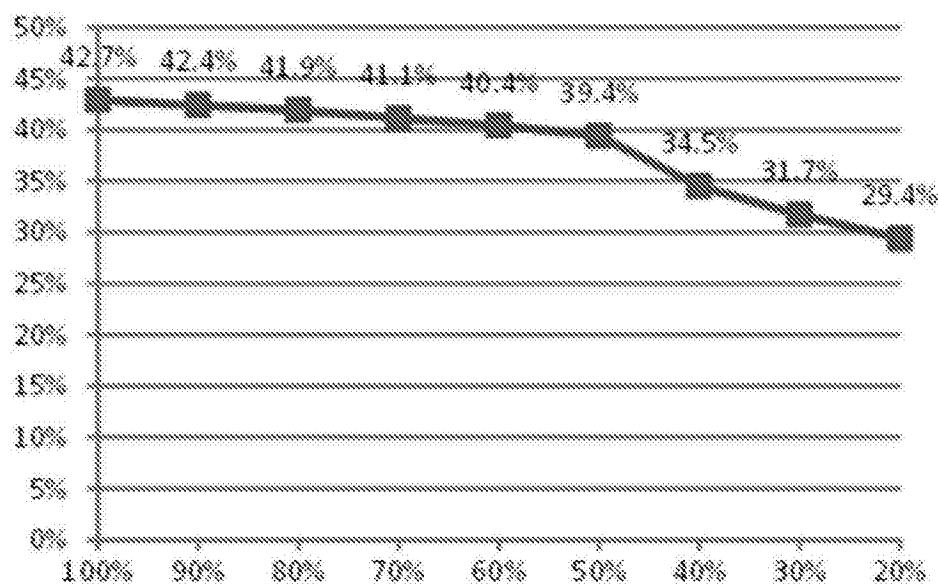


图2

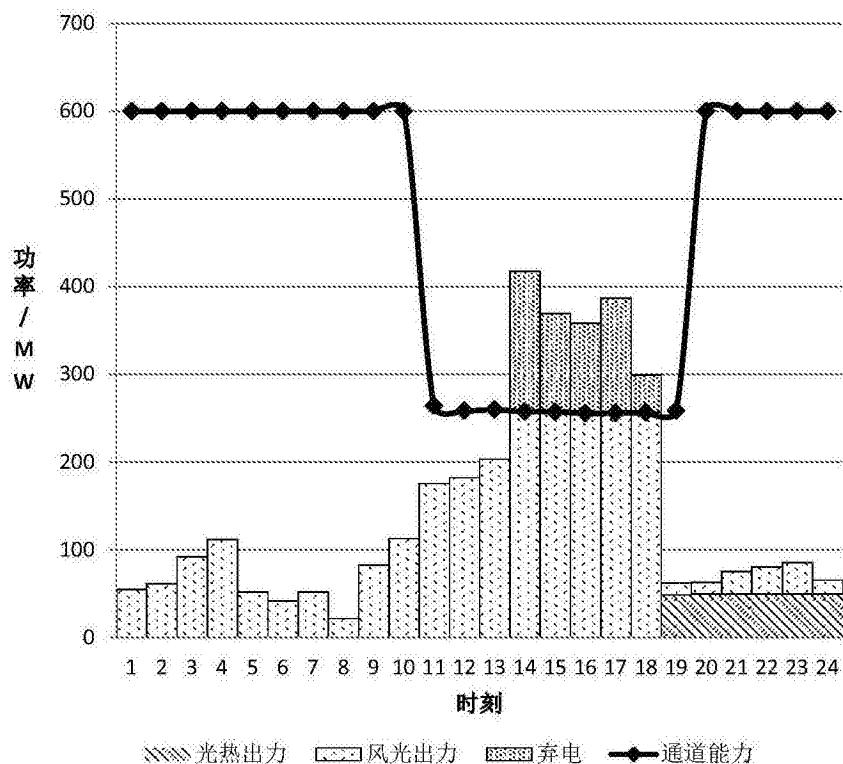


图3

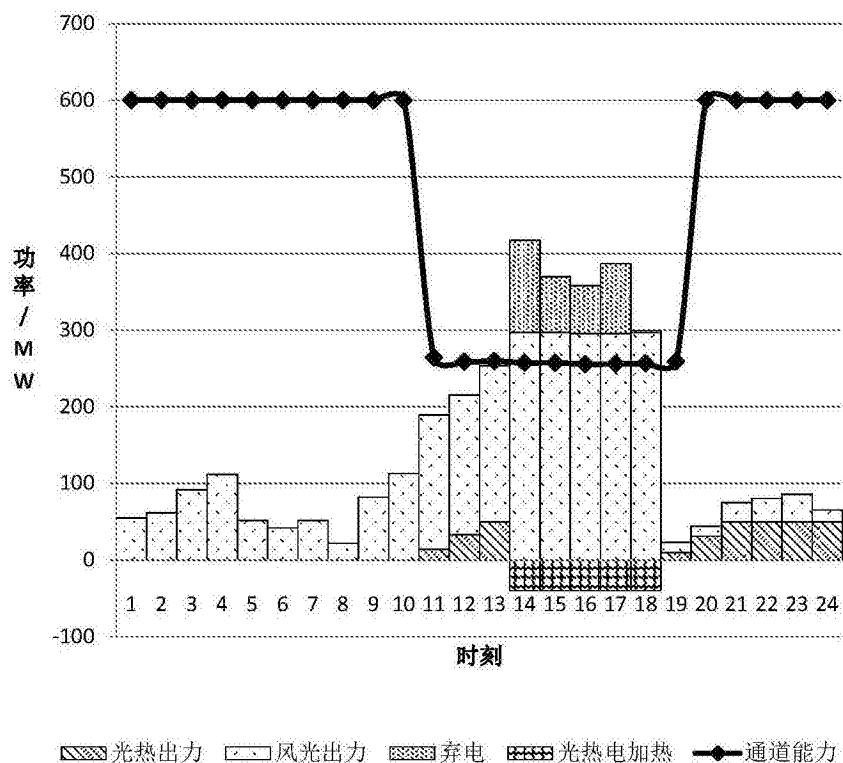


图4