



(21) 申请号 201910600132.0

(22) 申请日 2019.07.04

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 110244568 A

(43) 申请公布日 2019.09.17

(73) 专利权人 华翔翔能科技股份有限公司

地址 413002 湖南省益阳市赫山区龙岭工业园学府路西1号

(72) 发明人 周斌 邓丽君 李文芳 冯广

黎灿兵 游玫瑰

(74) 专利代理机构 长沙智勤知识产权代理事务

所(普通合伙) 43254

专利代理师 彭凤琴

(51) Int. Cl.

G05B 13/04 (2006.01)

(56) 对比文件

US 5457721 A, 1995.10.10

CN 110428110 A, 2019.11.08

CN 110458353 A, 2019.11.15

CN 109327042 A, 2019.02.12

Bin Zhou 等. Optimal Scheduling of Biogas-Solar-Wind Renewable Portfolio for Multicarrier Energy Supplies.《IEEE Transactions on Power Systems》.2018,第33卷(第6期),6229-6239.

Da Xu 等. Distributed Multienergy Coordination of Multimicrogrids With Biogas-Solar-Wind Renewables.《IEEE Transactions on Industrial Informatics》.2018,第15卷(第6期),3254-3266.

冯广. 工业型综合能源微网建模及其多能流优化调度方法.《中国优秀博硕士学位论文全文数据库(硕士)工程科技II辑》.2020,第3章.

戴世刚. 电热联合微网协调消纳与梯级优化策略研究.《中国优秀博硕士学位论文全文数据库(硕士)工程科技II辑》.2020,第4章. (续)

审查员 薛瑞峰

权利要求书4页 说明书11页 附图2页

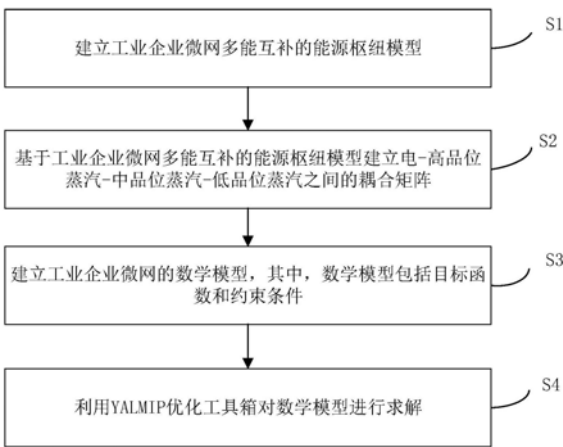
(54) 发明名称

工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法,包括如下步骤:建立工业企业微网多能互补的能源枢纽模型;基于工业企业微网多能互补的能源枢纽模型建立电-高品位蒸汽-中品位蒸汽-低品位蒸汽之间的耦合矩阵;建立工业企业微网的数学模型,其中,数学模型包括目标函数和约束条件;利用YALMIP优化工具箱对数学模型进行求解。该工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法,通过建立电-高品位蒸汽热-中品位蒸汽热-低品位蒸汽热能流之间的耦合矩阵,充分考虑多种能量流之间的互补耦合关系,进而能够有效提高新能源的就地消纳、提高能源的利用效

率,降低生产成本,实现工业企业微网的经济优化运行。



[接上页]

(56) 对比文件

Da Xu 等.Distributed Multi-Energy Operation of Coupled Electricity, Heating, and Natural Gas Networks.《IEEE Transactions on Sustainable Energy》.2019, 第11卷(第4期), 2457-2469.

Li Yuan.Optimization Operation of Multi-energy Complementary System based on Interval Model.《2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia)》.2019, 3837-3842.

1. 一种工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法,其特征在于,包括如下步骤:

建立工业企业微网多能互补的能源枢纽模型,所述工业企业微网多能互补的能源枢纽模型包括多种能量转换单元、蓄电池、配电网、供能单元和负载单元,所述多种能量转换单元分别与所述供能单元和所述负载单元相连,所述供能单元用于向多种能量转换单元输入电能、热能、煤炭和天然气,所述负载单元包括高品位蒸汽热负荷、中品位蒸汽热负荷、低品位蒸汽热负荷和电负荷,所述配电网分别与所述供能单元、所述电负荷和所述蓄电池相连;所述多种能量转换单元包括热电联产系统、工业锅炉、电锅炉、废热锅炉、汽轮机、低温余热发电系统、减温减压器和蒸汽驱动设备,电能由外部大电网、风力发电、光伏发电、煤炭及天然气通过能量转换单元产生,热能由光热系统、煤炭及天然气通过能量转换单元产生,所述高品位蒸汽热负荷为工业企业炼钢炼油所需热负荷,所述中品位蒸汽热负荷为工业生产所需热负荷,所述低品位蒸汽热负荷为生产生活所需热负荷;

基于所述工业企业微网多能互补的能源枢纽模型建立电-高品位蒸汽-中品位蒸汽-低品位蒸汽之间的耦合矩阵;

建立工业企业微网的数学模型,其中,所述数学模型包括目标函数和约束条件,所述约束条件包括功率平衡约束、储能系统约束、设备运行约束、电网联络线功率约束;

利用YALMIP优化工具箱对所述数学模型进行求解;

利用基于状态变量的方法将所述电-高品位蒸汽-中品位蒸汽-低品位蒸汽之间的耦合矩阵进行处理,得到如下式的线性系统:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} L_e \\ L_h^{S3} \\ L_h^{S2} \\ L_h^{S1} \end{bmatrix}}_L = \underbrace{\begin{bmatrix} \eta_T & 1 & 1 & 0 & q_g \eta_{ge,CHP} & q_c \eta_{ce,CHP} & 0 & 1 & -1/\eta_B & 1 & 0 & 0 & \eta_{LT} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_g \eta_{gh,CHP} & q_c \eta_{ch,CHP} & 0 & 0 & 1 & h_{ele} \eta_{h,ST} / \eta_{e,ST} & 1 & 0 & 0 & -1/\eta_{SD} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_c \eta_{IB} & 0 & 0 & -1/\eta_{e,ST} & -1/\eta_{LV} & \eta_{YR} & 0 & 0 \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} P_G \\ P_{WT} \\ P_{pve} \\ P_{pvh} \\ V_{GS} \\ F_{coal,CHP} \\ F_{coal,IB} \\ P_{BES} \\ S_B \\ P_{ST} \\ D_{LV} \\ Q_{FR} \\ D_{YR} \\ D_{SD} \end{bmatrix}}_P$$

其中, S_B 为电锅炉的中品位蒸汽热能输出, P_{ST} 为汽轮机的电能输出, D_{LV} 为减温减压器的中品位蒸汽热能输出, D_{SD} 为蒸汽驱动设备的低品位蒸汽热能输出, $F_{coal,CHP}$ 和 $F_{coal,IB}$ 分别为CHP系统和工业锅炉所需要的煤炭量, h_{ele} 为电能热值;

所述电-高品位蒸汽-中品位蒸汽-低品位蒸汽之间的耦合矩阵通过下式表示:

$$\begin{bmatrix} L_e \\ L_h^{S3} \\ L_h^{S2} \\ L_h^{S1} \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_T v_e & \eta_T v_B \eta_B v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & \eta_T v_B \eta_B v_{S2} & 0 \\ f_{WT} v_e & f_{WT} v_B \eta_B v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & f_{WT} v_B \eta_B v_{S2} & 0 \\ f_{pve} v_e & f_{pve} v_B \eta_B v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & f_{pve} v_B \eta_B v_{S2} & 0 \\ 0 & f_{pvh} v_{S3} & 0 & 0 \\ q_g \eta_{ge,CHP} v_e & q_g (\eta_{ge,CHP} v_B \eta_B + \eta_{gh,CHP}) v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & q_g (\eta_{ge,CHP} v_B \eta_B + \eta_{gh,CHP}) v_{S2} & 0 \\ q_c (v_{CHP} \eta_{ce,CHP} + v_{IB} \eta_{IB} v_{ST} \eta_{e,ST}) v_e & q_c (v_{CHP} \eta_{ce,CHP} v_B \eta_B + v_{CHP} \eta_{ch,CHP} + v_{IB} \eta_{IB} v_{ST} \eta_{h,ST} + v_{IB} \eta_{IB} v_{LV} \eta_{LV}) v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & q_c (v_{CHP} \eta_{ce,CHP} + v_{IB} \eta_{IB} v_{ST} \eta_{e,ST}) v_B \eta_B + v_{CHP} \eta_{ch,CHP} + v_{IB} \eta_{IB} v_{ST} \eta_{h,ST} + v_{IB} \eta_{IB} v_{LV} \eta_{LV}) v_{S2} & q_c v_{IB} \eta_{IB} v_{S1} \\ v_e & v_B \eta_B v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & v_B \eta_B v_{S2} & 0 \\ \eta_{FR} v_{ST} \eta_{e,ST} v_e & \eta_{FR} (v_{ST} \eta_{h,ST} + v_{ST} \eta_{e,ST} v_B \eta_B + v_{LV} \eta_{LV}) v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & \eta_{FR} (v_{ST} \eta_{h,ST} + v_{ST} \eta_{e,ST} v_B \eta_B + v_{LV} \eta_{LV}) v_{S2} & \eta_{FR} v_{S1} \\ \eta_{YR} v_e & \eta_{YR} v_B \eta_B v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & \eta_{YR} v_B \eta_B v_{S2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_G \\ P_{WT} \\ P_{pve} \\ P_{pvh} \\ V_{GS} \\ F_{coal} \\ P_{BES} \\ Q_{FR} \\ D_{YR} \\ F \end{bmatrix}$$

其中, P_G 为外部电网输送的电能, P_{WT} 、 P_{pve} 和 P_{pvh} 分别为风电出力、光电出力和光热出力, V_{GS} 、 F_{coal} 分别为输入的天然气量、煤炭量, P_{BES} 为蓄电池储存的电能, Q_{FR} 、 D_{YR} 分别为生产装置中工艺过程中的高温烟气余热、副产的中压蒸汽, L_e 、 L_h^{S3} 、 L_h^{S2} 和 L_h^{S1} 分别为电负荷、低品位蒸汽热负荷、中品位蒸汽热负荷和高品位蒸汽热负荷需求, η_T 、 η_B 、 η_{SD} 、 η_{LV} 、 η_{IB} 、 η_{FR} 和 η_{YR} 分别为变压器、电锅炉、蒸汽驱动设备、减温减压器、工业锅炉、废热锅炉和低温余热发电装置的转换效率, $\eta_{e,ST}$ 、 $\eta_{h,ST}$ 分别为汽轮机的电、中品位蒸汽热的转换效率, $\eta_{ge,CHP}$ 、 $\eta_{gh,CHP}$ 、 $\eta_{ce,CHP}$ 和 $\eta_{ch,CHP}$ 分别为天然气、煤炭经热电联产系统转换成电、中品位蒸汽热的效率, v_B 、 v_{SD} 、 v_{CHP} 、 v_{IB} 、 v_{ST} 、 v_{LV} 、 v_e 、 v_{S3} 、 v_{S2} 、 v_{S1} 分别为输入能量对电锅炉、蒸汽驱动设备、热电联产系统、工业锅炉、汽轮机、减温减压器、电负荷、低品位蒸汽负荷、中品位蒸汽负荷和高品位蒸汽负荷的分配因子, f_{WT} 、 f_{pve} 和 f_{pvh} 分别为风力发电机组电能转换效率、太阳能光电机组电能转换效率和太阳能光热机组低品位蒸汽热能转换效率, q_g 、 q_c 分别为天然气、煤炭的热值;

所述目标函数通过下式表示;

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 - C_6,$$

其中, $\min C$ 为工业企业日运行最小成本, C_1 为燃料成本, C_2 为工业企业微网与外部大电网的交互成本, C_3 为设备运行维护成本, C_4 为设备折旧成本, C_5 为环境成本, C_6 为工业企业微网风光可再生能源发电所获补贴成本。

2. 如权利要求1所述的工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法, 其特征在于,

燃料成本 $C_1 = \sum_{t=1}^T C_g V_{GS,t} + \sum_{t=1}^T C_{coal} F_{coal,t}$, 其中, $V_{GS,t}$ 、 $F_{coal,t}$ 分别为t时刻天然气、煤炭的消耗量, C_g 、 C_{coal} 分别为天然气、煤炭的单位价格;

工业企业微网与外部大电网的交互成本 $C_2 = \sum_{t=1}^T (C_{B,t} P_{G,t} \delta_t + C_{S,t} P_{G,t} (1 - \delta_t))$, 其中, $P_{G,t}$ 为t时刻工业企业微网与外部大电网的交互功率, $C_{B,t}$ 、 $C_{S,t}$ 分别为t时刻的外购电价和上网电价, δ_t 为工业企业微网与外部电网的能量交互状态, 取1或者0, 分别为外购电和系统外送电;

设备运行维护成本 $C_3 = \sum_i \sum_{t=1}^T C_{M,i} P_{i,t}$, 其中, $P_{i,t}$ 为设备 i 在 t 时刻的输出功率, $C_{M,i}$ 为设备 i 单位输出功率的运行维护费用;

设备折旧成本 $C_4 = \frac{C_{\text{bat,rep}}}{Q_{\text{all}}}$, 其中, $C_{\text{bat,rep}}$ 为蓄电池的更换成本, Q_{all} 为电池单体全寿命输出总电量;

环境成本 $C_5 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^3 c_j F_{\text{coal},t} \frac{m_j}{E_{q,j}}$, 其中, m_j 、 $E_{q,j}$ 、 c_j 分别为第 j 种大气污染物排放量、当量值、环境纳税额;

工业企业微网风光可再生能源发电所获补贴成本 $C_6 = \sum_s \rho_s \sum_t (C_{\text{WT}} P_{\text{WT},t} + C_{\text{pve}} P_{\text{pve},t})$, 其中, $P_{\text{WT},t}$ 、 $P_{\text{pve},t}$ 分别为风、光电机组在 t 时刻的输出功率, C_{WT} 、 C_{pve} 分别为风力、光伏发电的单位补贴价格, N_s 为场景总数, ρ_s 为风光出力场景 s 的概率, $\sum_{s=1}^{N_s} \rho_s = 1$ 。

3. 如权利要求2所述的工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法, 其特征在于, 所述功率平衡约束包括:

电功率平衡约束: $L_{e,t} + P_{\text{BES},t} + P_{\text{B},t} = P_{\text{WT},t} + P_{\text{pve},t} + P_{\text{G},t} + P_{\text{CHP},t} + P_{\text{YR},t} + P_{\text{ST},t}$, 其中, $P_{\text{WT},t}$ 为 t 时刻风电机组发电功率, $P_{\text{pve},t}$ 为 t 时刻光电机组发电功率, $P_{\text{G},t}$ 为 t 时刻工业企业微网与电网关口功率大小, 大于0为系统外购电, 小于0为系统外送上网电, $P_{\text{CHP},t}$ 为 t 时刻热电联产系统发电功率, $P_{\text{YR},t}$ 的为 t 时刻低温余热发电系统发电功率, $P_{\text{ST},t}$ 的为 t 时刻蒸汽轮机发电功率, $L_{e,t}$ 为 t 时刻的电负荷, $P_{\text{BES},t}$ 为 t 时刻的蓄电池储存电功率, $P_{\text{B},t}$ 为 t 时刻的电锅炉消耗的电功率;

高品位蒸汽功率平衡约束: $\sum_{t=1}^{T_h} (L_{h,t}^{\text{S1}} + H_{\text{LV},t}^{\text{S1}} + H_{\text{ST},t}^{\text{S1}}) = \sum_{t=1}^{T_h} (H_{\text{IB},t} + H_{\text{YR},t})$, 其中, T_h 为蒸汽平衡时间尺度, $H_{\text{IB},t}$ 为 t 时刻的工业锅炉生产的高品位蒸汽功率, $H_{\text{YR},t}$ 为 t 时刻废热锅炉回收高温烟气生产的高品位蒸汽功率, $L_{h,t}^{\text{S1}}$ 为 t 时刻的高品位蒸汽热负荷, $H_{\text{LV},t}^{\text{S1}}$ 为 t 时刻的减温减压器消耗的高品位蒸汽功率, $H_{\text{ST},t}^{\text{S1}}$ 为 t 时刻的汽轮机消耗的高品位蒸汽功率;

中品位蒸汽功率平衡约束: $\sum_{t=1}^{T_h} (L_{h,t}^{\text{S2}} + H_{\text{SD},t}^{\text{S2}} + H_{\text{YR},t}^{\text{S2}}) = \sum_{t=1}^{T_h} (H_{\text{CHP},t} + H_{\text{ST},t}^{\text{S2}} + H_{\text{LV},t}^{\text{S2}} + H_{\text{B},t})$, 其中, $H_{\text{CHP},t}$ 为 t 时刻的热电联产系统生产的中品位蒸汽功率, $H_{\text{ST},t}^{\text{S2}}$ 为 t 时刻的汽轮机生产的中品位蒸汽功率, $H_{\text{LV},t}^{\text{S2}}$ 为 t 时刻的减温减压器生产的中品位蒸汽功率, $H_{\text{B},t}$ 为 t 时刻的电锅炉生产的中品位蒸汽功率, $L_{h,t}^{\text{S2}}$ 为 t 时刻的中品位蒸汽热负荷, $H_{\text{SD},t}^{\text{S2}}$ 为 t 时刻的蒸汽驱动设备消耗的中品位蒸汽功率, $H_{\text{YR},t}^{\text{S2}}$ 为 t 时刻的生产系统副产的中品位蒸汽功率;

低品位蒸汽功率平衡约束: $\sum_{t=1}^{T_h} L_{h,t}^{\text{S3}} = \sum_{t=1}^{T_h} (P_{\text{pvh},t} + H_{\text{SD},t}^{\text{S3}})$, 其中, $P_{\text{pvh},t}$ 为 t 时刻的光热机组发电功率, $H_{\text{SD},t}^{\text{S3}}$ 为 t 时刻的蒸汽驱动设备生产的低品位蒸汽功率, $L_{h,t}^{\text{S3}}$ 为 t 时刻的低品位蒸汽

热负荷。

4.如权利要求1所述的工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法,其特征在于,

$$\text{储能系统约束为: } S_{\text{BES},t+\Delta t} = (1 - \sigma_{\text{BES}}) S_{\text{BES},t} + \left(\eta_{\text{ch}} \delta_t P_{\text{ch},t} - \frac{\varphi_t P_{\text{dis},t}}{\eta_{\text{dis}}} \right) \Delta t \text{ 和 } \begin{cases} S_{\text{BES}}^{\min} \leq S_{\text{BES},t} \leq S_{\text{BES}}^{\max} \\ S_{\text{BES},0} = S_{\text{BES},T} \\ 0 \leq P_{\text{ch},t} \leq \delta_t P_{\text{ch}}^{\max} \\ 0 \leq P_{\text{dis},t} \leq \varphi_t P_{\text{dis}}^{\max} \\ 0 \leq \delta_t + \varphi_t \leq 1 \end{cases},$$

其中, $S_{\text{BES},t}$ 、 $P_{\text{ch},t}$ 和 $P_{\text{dis},t}$ 分别为电池在t时刻的电池储能量、充电功率以及放电功率, σ_{BES} 为电池的自损耗系数, η_{ch} 、 η_{dis} 分别为电池充电及放电效率, $S_{\text{BES}}^{\min}$ 、 $S_{\text{BES}}^{\max}$ 分别为电池最大及最小容量, $S_{\text{BES},0}=S_{\text{BES},T}$ 表示蓄电池调度的连续性, δ_t 、 φ_t 分别为t时刻的充放电0-1状态变量, δ_t 取1表示充电, φ_t 表示放电,两者不同时取1;

设备运行约束为: $P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max}$ 和 $|P_{i,t} - P_{i,t-1}| \leq R_i^{\text{ramp}}$,其中, $P_i^{\min}$ 、 $P_i^{\max}$ 分别为设备i输出的最小、最大出力, R_i^{ramp} 为设备i的最大爬坡速率,设备i表示风电机组、光电机组、光热机组、热电联产系统、电锅炉、工业锅炉、废热锅炉、汽轮机、低温余热发电装置、减温减压器、蒸汽驱动设备;

电网联络线功率约束为: $|P_{G,t}| \leq P_G^{\max}$,其中, $P_G^{\max}$ 为工业企业微网与外部电网联络线传输的最大功率。

工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及能量管理技术领域,尤其涉及一种工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法。

背景技术

[0002] 近年来,国家持续加大节能减排及淘汰落后产能的力度,能耗和环保标准越来越高。钢铁、建材、石油、化工等众多高耗能领域的工业型微网无疑是工业节能工作的重点,这些工业型微网集中供应电能、蒸汽等各类负荷需求,资源能源消耗量大,生态环境问题比较突出。迫切需要加快构建科技含量高、资源消耗少,环境污染低的绿色发展模式。

[0003] 工业企业微网大多为以工业负荷为主的复杂能源系统,包含多种产能及用能设备,供电、热可靠性要求高,但普遍存在工业生产结构不合理,能源利用率低、环境污染等问题,对工业企业微网进行用能优化管理,降低运行成本和提高能源利用率具有重要的意义。

[0004] 目前,已提出多种综合能源系统多能协同优化模型,这些模型虽然能够或多或少地提高能源的利用效率,但均未充分考虑能量的梯级利用,工业企业微网蒸汽负荷大多具有需求量大、类型多样的特点,若不充分考虑蒸汽热能的品位,则无法对工业企业生产过程中剩余蒸汽热能进行回收利用,不能最大限度地提高能源的利用效率,造成工业企业微网能源的浪费。

发明内容

[0005] 本发明旨在至少在一定程度上解决相关技术中的技术问题之一。为此,本发明的目的在于提出一种工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法,以提高新能源的就地消纳、提高能源的利用效率,降低生产成本,实现工业企业微网的经济优化运行。

[0006] 为达到上述目的,本发明实施例提出了一种工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法,包括如下步骤:建立工业企业微网多能互补的能源枢纽模型;基于所述工业企业微网多能互补的能源枢纽模型建立电-高品位蒸汽-中品位蒸汽-低品位蒸汽之间的耦合矩阵;建立工业企业微网的数学模型,其中,所述数学模型包括目标函数和约束条件;利用YALMIP优化工具箱对所述数学模型进行求解。

[0007] 本发明实施例的工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法,通过对多种能量流之间的转化耦合关系进行分析,得到工业企业微网多能互补的能源枢纽模型中电-高品位蒸汽热-中品位蒸汽热-低品位蒸汽热能流之间的耦合矩阵,充分考虑多种能量流之间的互补耦合关系,进而能够有效提高新能源的就地消纳、提高能源的利用效率,降低生产成本,实现工业企业微网的经济优化运行。

[0008] 具体地,所述工业企业微网多能互补的能源枢纽模型包括多种能量转换单元、蓄电池、配电网、供能单元和负载单元,所述多种能量转换单元分别与所述供能单元和所述负载单元相连,所述供能单元用于向多种能量转换单元输入电能、热能、煤炭和天然气,所述负载单元包括高品位蒸汽热负荷、中品位蒸汽热负荷、低品位蒸汽热负荷和电负荷,所述配

电网分别与所述供能单元、所述电负荷和所述蓄电池相连。

[0009] 进一步地,所述多种能量转换单元包括热电联产系统、工业锅炉、电锅炉、废热锅炉、汽轮机、低温余热发电系统、减温减压器和蒸汽驱动设备,电能由外部大电网、风力发电、光伏发电、煤炭及天然气通过能量转换单元产生,热能由光热系统、煤炭及天然气通过能量转换单元产生,所述高品位蒸汽热负荷为工业企业炼钢炼油所需热负荷,所述中品位蒸汽热负荷为工业生产所需热负荷,所述低品位蒸汽热负荷为生产生活所需热负荷。

[0010] 其中,所述电-高品位蒸汽-中品位蒸汽-低品位蒸汽之间的耦合矩阵通过下式表示:

$$[0011] \quad \underbrace{\begin{bmatrix} L_e \\ L_h^{S3} \\ L_h^{S2} \\ L_h^{S1} \end{bmatrix}}_L = \underbrace{\begin{bmatrix} \eta_T v_e & \eta_T v_B \eta_B v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & \eta_T v_B \eta_B v_{S2} & 0 \\ f_{WT} v_e & f_{WT} v_B \eta_B v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & f_{WT} v_B \eta_B v_{S2} & 0 \\ f_{pve} v_e & f_{pve} v_B \eta_B v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & f_{pve} v_B \eta_B v_{S2} & 0 \\ 0 & f_{pvh} v_{S3} & 0 & 0 \\ q_g (\eta_{ge,CHP} v_B \eta_B + \eta_{gh,CHP}) v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & q_g (\eta_{ge,CHP} v_B \eta_B + \eta_{gh,CHP}) v_{S2} & 0 & 0 \\ q_c (v_{CHP} \eta_{ce,CHP} + v_{IB} \eta_{IB} v_{ST} \eta_{e,ST}) v_e & q_c (v_{CHP} \eta_{ce,CHP} v_B \eta_B + v_{CHP} \eta_{ch,CHP} + v_{IB} \eta_{IB} v_{ST} \eta_{h,ST} + v_{IB} \eta_{IB} v_{LV} \eta_{LV}) v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & q_c ((v_{CHP} \eta_{ce,CHP} + v_{IB} \eta_{IB} v_{ST} \eta_{e,ST}) v_B \eta_B + v_{CHP} \eta_{ch,CHP} + v_{IB} \eta_{IB} v_{ST} \eta_{h,ST} + v_{IB} \eta_{IB} v_{LV} \eta_{LV}) v_{S2} & q_c v_{IB} \eta_{IB} v_{S1} \\ v_e & v_B \eta_B v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & v_B \eta_B v_{S2} & 0 \\ \eta_{FR} v_{ST} \eta_{e,ST} v_e & \eta_{FR} (v_{ST} \eta_{h,ST} + v_{ST} \eta_{e,ST} v_B \eta_B + v_{LV} \eta_{LV}) v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & \eta_{FR} (v_{ST} \eta_{h,ST} + v_{ST} \eta_{e,ST} v_B \eta_B + v_{LV} \eta_{LV}) v_{S2} & \eta_{FR} v_{S1} \\ \eta_{YR} v_e & \eta_{YR} v_B \eta_B v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & \eta_{YR} v_B \eta_B v_{S2} & 0 \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} P_G \\ P_{WT} \\ P_{pve} \\ P_{pvh} \\ V_{GS} \\ F_{coal} \\ P_{BES} \\ Q_{FR} \\ D_{YR} \\ F \end{bmatrix}}_F^T$$

[0012] 其中, P_G 为外部电网输送的电能, P_{WT} 、 P_{pve} 和 P_{pvh} 分别为风电出力、光电出力和光热出力, V_{GS} 、 F_{coal} 分别为输入的天然气量、煤炭量, P_{BES} 为蓄电池储存的电能, Q_{FR} 、 D_{YR} 分别为生产装置中工艺过程中的高温烟气余热、副产的中压蒸汽, L_e 、 L_h^{S3} 、 L_h^{S2} 和 L_h^{S1} 分别为电负荷、低品位蒸汽热负荷、中品位蒸汽热负荷和高品位蒸汽热负荷需求, η_T 、 η_B 、 η_{SD} 、 η_{LV} 、 η_{IB} 、 η_{FR} 和 η_{YR} 分别为变压器、电锅炉、蒸汽驱动设备、减温减压器、工业锅炉、废热锅炉和低温余热发电装置的转换效率, $\eta_{e,ST}$ 、 $\eta_{h,ST}$ 分别为汽轮机的电、中品位蒸汽热的转换效率, $\eta_{ge,CHP}$ 、 $\eta_{gh,CHP}$ 、 $\eta_{ce,CHP}$ 和 $\eta_{ch,CHP}$ 分别为天然气、煤炭经热电联产系统转换成电、中品位蒸汽热的效率, v_B 、 v_{SD} 、 v_{CHP} 、 v_{IB} 、 v_{ST} 、 v_{LV} 、 v_e 、 v_{S3} 、 v_{S2} 、 v_{S1} 分别为输入能量对电锅炉、蒸汽驱动设备、热电联产系统、工业锅炉、汽轮机、减温减压器、电负荷、低品位蒸汽负荷、中品位蒸汽负荷和高品位蒸汽负荷的分配因子, f_{WT} 、 f_{pve} 和 f_{pvh} 分别为风力发电机组电能转换效率、太阳能光电机组电能转换效率和太阳能光热机组低品位蒸汽热能转换效率, q_g 、 q_c 分别为天然气、煤炭的热值。

[0013] 进一步地,工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法,还包括:利用基于状态变量的方法将所述电-高品位蒸汽-中品位蒸汽-低品位蒸汽之间的耦合矩阵进行处理,得到如下式的线性系统:

$$[0014] \quad \begin{bmatrix} L_e \\ L_h^{S3} \\ L_h^{S2} \\ L_h^{S1} \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_T & 1 & 1 & 0 & q_g \eta_{ge,CHP} & q_c \eta_{ce,CHP} & 0 & 1 & -1/\eta_B & 1 & 0 & 0 & \eta_{LT} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_g \eta_{gh,CHP} & q_c \eta_{ch,CHP} & 0 & 0 & 1 & h_{ele} \eta_{h,ST} / \eta_{e,ST} & 1 & 0 & 0 & -1/\eta_{SD} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_c \eta_{IB} & 0 & 0 & -1/\eta_{e,ST} & -1/\eta_{LV} & \eta_{YR} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_G \\ P_{WT} \\ P_{pvc} \\ P_{pvh} \\ V_{GS} \\ F_{coal,CHP} \\ F_{coal,IB} \\ P_{BES} \\ S_B \\ P_{ST} \\ D_{LV} \\ Q_{FR} \\ D_{YR} \\ D_{SD} \end{bmatrix}$$

[0015] 其中, S_B 为电锅炉的中品位蒸汽热能输出, P_{ST} 为汽轮机的电能输出, D_{LV} 为减温减压器的中品位蒸汽热能输出, D_{SD} 为蒸汽驱动设备的低品位蒸汽热能输出, $F_{coal,CHP}$ 和 $F_{coal,IB}$ 分别为CHP系统和工业锅炉所需要的煤炭量, h_{ele} 为电能热值。

[0016] 具体地, 所述目标函数通过下式表示;

$$[0017] \quad \min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 - C_6,$$

[0018] 其中, $\min C$ 为工业企业日运行最小成本, C_1 为燃料成本, C_2 为工业企业微网与外部大电网的交互成本, C_3 为设备运行维护成本, C_4 为设备折旧成本, C_5 为环境成本, C_6 为工业企业微网风光可再生能源发电所获补贴成本。

[0019] 其中, 燃料成本 $C_1 = \sum_{t=1}^T C_g V_{GS,t} + \sum_{t=1}^T C_{coal} F_{coal,t}$, 其中, $V_{GS,t}$ 、 $F_{coal,t}$ 分别为t时刻天然气、煤炭的消耗量, C_g 、 C_{coal} 分别为天然气、煤炭的单位价格;

[0020] 工业企业微网与外部大电网的交互成本 $C_2 = \sum_{t=1}^T (C_{B,t} P_{G,t} \delta_t + C_{S,t} P_{G,t} (1 - \delta_t))$, 其中, $P_{G,t}$ 为t时刻工业企业微网与外部大电网的交互功率, $C_{B,t}$ 、 $C_{S,t}$ 分别为t时刻的外购电价和上网电价, δ_t 为工业企业微网与外部电网的能量交互状态, 取1或者0, 分别为外购电和系统外送电;

[0021] 设备运行维护成本 $C_3 = \sum_i \sum_{t=1}^T C_{M,i} P_{i,t}$, 其中, $P_{i,t}$ 为设备i在t时刻的输出功率, $C_{M,i}$ 为设备i单位输出功率的运行维护费用;

[0022] 设备折旧成本 $C_4 = \frac{C_{bat,rep}}{Q_{all}}$, 其中, $C_{bat,rep}$ 为蓄电池的更换成本, Q_{all} 为电池单体全寿命输出总电量;

[0023] 环境成本 $C_5 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^3 c_j F_{coal,t} \frac{m_j}{E_{q,j}}$, 其中, m_j 、 $E_{q,j}$ 、 c_j 分别为第j种大气污染物排放量、当量值、环境纳税额;

[0024] 工业企业微网风光可再生能源发电所获补贴成本

$C_6 = \sum_s \rho_s \sum_t (C_{WT} P_{WT,t} + C_{pve} P_{pve,t})$, 其中, $P_{WT,t}$ 、 $P_{pve,t}$ 分别为风、光电机组在t时刻的输出功率, C_{WT} 、 C_{pve} 分别为风力、光伏发电的单位补贴价格, N_s 为场景总数, ρ_s 为风光出力场景s的概率, $\sum_{s=1}^{N_s} \rho_s = 1$ 。

[0025] 具体地,所述约束条件包括功率平衡约束、储能系统约束、设备运行约束、电网联络线功率约束。

[0026] 其中,所述功率平衡约束包括:

[0027] 电功率平衡约束: $L_{e,t} + P_{BES,t} + P_{B,t} = P_{WT,t} + P_{pve,t} + P_{G,t} + P_{CHP,t} + P_{YR,t} + P_{ST,t}$, 其中, $P_{WT,t}$ 为t时刻风电机组发电功率, $P_{pve,t}$ 为t时刻光电机组发电功率, $P_{G,t}$ 为t时刻工业企业微网与电网关口功率大小, 大于0为系统外购电, 小于0为系统外送上网电, $P_{CHP,t}$ 为t时刻热电联产系统发电功率, $P_{YR,t}$ 的为t时刻低温余热发电系统发电功率, $P_{ST,t}$ 的为t时刻蒸汽轮机发电功率, $L_{e,t}$ 为t时刻的电负荷, $P_{BES,t}$ 为t时刻的蓄电池储存电功率, $P_{B,t}$ 为t时刻的电锅炉消耗的电功率;

[0028] 高品位蒸汽功率平衡约束: $\sum_{t=1}^{T_h} (L_{h,t}^{S1} + H_{LV,t}^{S1} + H_{ST,t}^{S1}) = \sum_{t=1}^{T_h} (H_{IB,t} + H_{YR,t})$, 其中, T_h 为蒸汽平衡时间尺度, $H_{IB,t}$ 为t时刻的工业锅炉生产的高品位蒸汽功率, $H_{YR,t}$ 为t时刻废热锅炉回收高温烟气生产的高品位蒸汽功率, $L_{h,t}^{S1}$ 为t时刻的高品位蒸汽热负荷, $H_{LV,t}^{S1}$ 为t时刻的减温减压器消耗的高品位蒸汽功率, $H_{ST,t}^{S1}$ 为t时刻的汽轮机消耗的高品位蒸汽功率;

[0029] 中品位蒸汽功率平衡约束:

$\sum_{t=1}^{T_h} (L_{h,t}^{S2} + H_{SD,t}^{S2} + H_{YR,t}) = \sum_{t=1}^{T_h} (H_{CHP,t} + H_{ST,t}^{S2} + H_{LV,t}^{S2} + H_{B,t})$, 其中, $H_{CHP,t}$ 为t时刻的热电联产系统生产的中品位蒸汽功率, $H_{ST,t}^{S2}$ 为t时刻的汽轮机生产的中品位蒸汽功率, $H_{LV,t}^{S2}$ 为t时刻的减温减压器生产的中品位蒸汽功率, $H_{B,t}$ 为t时刻的电锅炉生产的中品位蒸汽功率, $L_{h,t}^{S2}$ 为t时刻的中品位蒸汽热负荷, $H_{SD,t}^{S2}$ 为t时刻的蒸汽驱动设备消耗的中品位蒸汽功率, $H_{YR,t}$ 为t时刻的生产系统副产的中品位蒸汽功率;

[0030] 低品位蒸汽功率平衡约束: $\sum_{t=1}^{T_h} L_{h,t}^{S3} = \sum_{t=1}^{T_h} (P_{pvh,t} + H_{SD,t}^{S3})$, 其中, $P_{pvh,t}$ 为t时刻的光热机组发热功率, $H_{SD,t}^{S3}$ 为t时刻的蒸汽驱动设备生产的低品位蒸汽功率, $L_{h,t}^{S3}$ 为t时刻的低品位蒸汽热负荷。

[0031] 进一步地, 储能系统约束为: $S_{BES,t+\Delta t} = (1 - \sigma_{BES}) S_{BES,t} + \left(\eta_{ch} \delta_t P_{ch,t} - \frac{\varphi_t P_{dis,t}}{\eta_{dis}} \right) \Delta t$ 和

$$\begin{cases} S_{\text{BES}}^{\min} \leq S_{\text{BES},t} \leq S_{\text{BES}}^{\max} \\ S_{\text{BES},0} = S_{\text{BES},T} \\ 0 \leq P_{\text{ch},t} \leq \delta_t P_{\text{ch}}^{\max} \\ 0 \leq P_{\text{dis},t} \leq \varphi_t P_{\text{dis}}^{\max} \\ 0 \leq \delta_t + \varphi_t \leq 1 \end{cases}, \text{其中}, S_{\text{BES},t}, P_{\text{ch},t} \text{和} P_{\text{dis},t} \text{分别为电池在} t \text{时刻的电池储能量、充电功率}$$

以及放电功率, σ_{BES} 为电池的自损耗系数, η_{ch} 、 η_{dis} 分别为电池充电及放电效率, $S_{\text{BES}}^{\min}$ 、 $S_{\text{BES}}^{\max}$ 分别为电池最大及最小容量, $S_{\text{BES},0} = S_{\text{BES},T}$ 表示蓄电池调度的连续性, δ_t 、 φ_t 分别为 t 时刻的充放电 0-1 状态变量, δ_t 取 1 表示充电, φ_t 表示放电, 两者不同时取 1;

[0032] 设备运行约束为: $P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max}$ 和 $|P_{i,t} - P_{i,t-1}| \leq R_i^{\text{ramp}}$, 其中, $P_i^{\min}$ 、 $P_i^{\max}$ 分别为设备 i 输出的最小、最大出力, R_i^{ramp} 为设备 i 的最大爬坡速率, 设备 i 表示风电机组、光电机组、光热机组、热电联产系统、电锅炉、工业锅炉、废热锅炉、汽轮机、低温余热发电装置、减温减压器、蒸汽驱动设备;

[0033] 电网联络线功率约束为: $|P_{G,t}| \leq P_G^{\max}$, 其中, $P_G^{\max}$ 为工业企业微网与外部电网联络线传输的最大功率。

[0034] 本发明附加的方面和优点将在下面的描述中部分给出, 部分将从下面的描述中变得明显, 或通过本发明的实践了解到。

附图说明

[0035] 图1是本发明一个实施例的业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法的流程图;

[0036] 图2是本发明一个示例的工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补的能源枢纽模型的结构示意图;

[0037] 图3是一个示例的工业企业微网采用本发明采用的方法与相关技术运行时的运行成本对比图。

具体实施方式

[0038] 下面详细描述本发明的实施例, 所述实施例的示例在附图中示出, 其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的, 旨在用于解释本发明, 而不能理解为对本发明的限制。

[0039] 下面参考附图描述本发明实施例的工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法的流程图。

[0040] 图1是本发明一个实施例的工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法的流程图。

[0041] 如图1所示, 工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法包括如下步骤:

[0042] S1, 建立工业企业微网多能互补的能源枢纽模型。

[0043] 具体地,如图2所示,工业企业微网多能互补的能源枢纽模型包括多种能量转换单元、蓄电池、配电网、供能单元和负载单元,多种能量转换单元分别与供能单元和负载单元相连,供能单元用于向多种能量转换单元输入电能、热能、煤炭和天然气,负载单元包括高品位蒸汽热负荷、中品位蒸汽热负荷、低品位蒸汽热负荷和电负荷,配电网分别与供能单元、电负荷和蓄电池相连。

[0044] 其中,参见图2,多种能量转换单元包括热电联产系统、工业锅炉、电锅炉、废热锅炉、汽轮机、低温余热发电系统、减温减压器和蒸汽驱动设备,电能由外部大电网、风力发电、光伏发电、煤炭及天然气通过能量转换单元产生,热能由光热系统、煤炭及天然气通过能量转换单元产生,高品位蒸汽热负荷为工业企业炼钢炼油所需热负荷,中品位蒸汽热负荷为工业生产所需热负荷,低品位蒸汽热负荷为生产生活所需热负荷。

[0045] 具体而言,工业企业微网多能互补的能源枢纽模型具有风、光、电、煤炭及天然气多种能源输入,这些输入能量经各种能量转换单元(如热电联产系统、工业锅炉、电锅炉、废热锅炉、汽轮机、低温余热发电系统、减温减压器、蒸汽驱动设备)转换成输出端口所需的电能、不同品位蒸汽热能,可用的电能及不同品位蒸汽热能通过输电线及蒸汽管道进行传输利用。

[0046] S2,基于工业企业微网多能互补的能源枢纽模型建立电-高品位蒸汽-中品位蒸汽-低品位蒸汽之间的耦合矩阵。

[0047] 具体地,对于工业企业微网多能互补的能源枢纽模型,主要是通过多种能量之间的耦合关系,实现新能源转电能以及煤炭-天然气转电能、不同品位蒸汽热能等多种不同能量之间的转换。例如,风能和太阳能通过风电机组、光伏机组和光热机组转换为电能、低品位蒸汽热能,以提供电负荷和热水负荷,多余的电能可以直接存储在蓄电池中,也可以通过电锅炉转换为中品位蒸汽(S_2 蒸汽)供给中品位蒸汽热负荷。工业锅炉加热水产生高品位蒸汽(S_1 蒸汽)满足生产系统的热用户需求后,剩余高品位蒸汽可进入汽轮机用于发电也可经减温减压器变为中品位蒸汽。实际生产中大型生产装置在生产过程中消耗大量中品位蒸汽的同时副产中品位蒸汽,这部分蒸汽重新汇入到中品位蒸汽管网并进入余热发电装置中用以发电,此外,中品位蒸汽也可由CHP(Combined Heat and Power,热电联产)机组排汽供给。除了光热机组产生的低品位蒸汽热能外,低品位蒸汽热负荷(S_3 蒸汽)还可以由蒸汽驱动设备提供。为降低生产成本,通过废热锅炉将大型生产装置生产过程中释放的高温烟气热量进行统一回收后变成高温高压的高品位蒸汽。

[0048] 为了进一步分析工业企业微网系统内部固有的经济性和运行调度性,可建立电-高品位蒸汽-中品位蒸汽-低品位蒸汽之间的耦合矩阵,用以表示四者之间的耦合关系,其中,该电-高品位蒸汽-中品位蒸汽-低品位蒸汽之间的耦合矩阵可通过下式(1)表示:

$$\begin{aligned}
 [0049] \quad \underbrace{\begin{bmatrix} L_e \\ L_h^{S3} \\ L_h^{S2} \\ L_h^{S1} \end{bmatrix}}_L &= \underbrace{\begin{bmatrix} \eta_T v_e & \eta_T v_B \eta_B v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & \eta_T v_B \eta_B v_{S2} & 0 \\ f_{WT} v_e & f_{WT} v_B \eta_B v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & f_{WT} v_B \eta_B v_{S2} & 0 \\ f_{pve} v_e & f_{pve} v_B \eta_B v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & f_{pve} v_B \eta_B v_{S2} & 0 \\ 0 & f_{pvh} v_{S3} & 0 & 0 \\ q_g \eta_{ge,CHP} v_e & q_g (\eta_{ge,CHP} v_B \eta_B + \eta_{gh,CHP} v_{SD} \eta_{SD} v_{S3}) & q_g (\eta_{ge,CHP} v_B \eta_B + \eta_{gh,CHP} v_{S2}) & 0 \\ q_c (v_{CHP} \eta_{ce,CHP} + v_{IB} \eta_{IB} v_{ST} \eta_{e,ST}) v_e & q_c (v_{CHP} \eta_{ce,CHP} v_B \eta_B + v_{CHP} \eta_{ch,CHP} + v_{IB} \eta_{IB} v_{ST} \eta_{h,ST} + v_{IB} \eta_{IB} v_{LV} \eta_{LV}) v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & q_c ((v_{CHP} \eta_{ce,CHP} + v_{IB} \eta_{IB} v_{ST} \eta_{e,ST}) v_B \eta_B + v_{CHP} \eta_{ch,CHP} + v_{IB} \eta_{IB} v_{ST} \eta_{h,ST} + v_{IB} \eta_{IB} v_{LV} \eta_{LV}) v_{S2} & q_c v_{IB} \eta_{IB} v_{S1} \\ v_e & v_B \eta_B v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & v_B \eta_B v_{S2} & 0 \\ \eta_{FR} v_{ST} \eta_{e,ST} v_e & \eta_{FR} (v_{ST} \eta_{h,ST} + v_{ST} \eta_{e,ST} v_B \eta_B + v_{LV} \eta_{LV}) v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & \eta_{FR} (v_{ST} \eta_{h,ST} + v_{ST} \eta_{e,ST} v_B \eta_B + v_{LV} \eta_{LV}) v_{S2} & \eta_{FR} v_{S1} \\ \eta_{YR} v_e & \eta_{YR} v_B \eta_B v_{SD} \eta_{SD} v_{S3} & \eta_{YR} v_B \eta_B v_{S2} & 0 \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} P_G \\ P_{WT} \\ P_{pve} \\ P_{pvh} \\ V_{GS} \\ F_{coal} \\ P_{BES} \\ Q_{FR} \\ D_{YR} \\ F \end{bmatrix}}_F \quad (1)
 \end{aligned}$$

[0050] 其中, P_G 为外部电网输送的电能, P_{WT} 、 P_{pve} 和 P_{pvh} 分别为风电出力、光电出力和光热出力, V_{GS} 、 F_{coal} 分别为输入的天然气量、煤炭量, P_{BES} 为蓄电池储存的电能, Q_{FR} 、 D_{YR} 分别为生产装置中工艺过程中的高温烟气余热、副产的中压蒸汽, L_e 、 L_h^{S3} 、 L_h^{S2} 和 L_h^{S1} 分别为电负荷、低品位蒸汽热负荷、中品位蒸汽热负荷和高品位蒸汽热负荷需求, η_T 、 η_B 、 η_{SD} 、 η_{LV} 、 η_{IB} 、 η_{FR} 和 η_{YR} 分别为变压器、电锅炉、蒸汽驱动设备、减温减压器、工业锅炉、废热锅炉和低温余热发电装置的转换效率, $\eta_{e,ST}$ 、 $\eta_{h,ST}$ 分别为汽轮机的电、中品位蒸汽热的转换效率, $\eta_{ge,CHP}$ 、 $\eta_{gh,CHP}$ 、 $\eta_{ce,CHP}$ 和 $\eta_{ch,CHP}$ 分别为天然气、煤炭经热电联产系统转换成电、中品位蒸汽热的效率, v_B 、 v_{SD} 、 v_{CHP} 、 v_{IB} 、 v_{ST} 、 v_{LV} 、 v_e 、 v_{S3} 、 v_{S2} 、 v_{S1} 分别为输入能量对电锅炉、蒸汽驱动设备、热电联产系统、工业锅炉、汽轮机、减温减压器、电负荷、低品位蒸汽负荷、中品位蒸汽负荷和高品位蒸汽负荷的分配因子, f_{WT} 、 f_{pve} 和 f_{pvh} 分别为风力发电机组电能转换效率、太阳能光电机组电能转换效率和太阳能光热机组低品位蒸汽热能转换效率, q_g 、 q_c 分别为天然气、煤炭的热值。

[0051] 在上述耦合矩阵中, 考虑到系统能源的分配与转换, 耦合矩阵 C 中的耦合因子既有分配因子又有效率因子。

[0052] 进一步地, 由于多能流系统中调度因子的影响, 上述的工业企业微网多能互补的能源枢纽模型是一个高度的非线性系统。因此, 需要利用基于状态变量的方法避免由分配因子引起的非线性。通常将转换器间接输出及直接连接的量指定为状态变量, 从而避免引入分配因子。选取电锅炉的中品位蒸汽热能输出 S_B 、汽轮机的电能输出 P_{ST} 、减温减压器的中品位蒸汽热能输出 D_{LV} 、蒸汽驱动设备的低品位蒸汽热能输出 D_{SD} 为状态变量, 并用 $F_{coal,CHP}$ 和 $F_{coal,IB}$ 分别表示 CHP 机组和工业锅炉所需要的煤炭量, 则可将上述非线性系统转化为线性系统, 即可利用基于状态变量的方法将所述电-高品位蒸汽-中品位蒸汽-低品位蒸汽之间的耦合矩阵进行处理, 得到如下式 (2) 的线性系统:

$$[0053] \quad \begin{bmatrix} L_e \\ L_h^{S3} \\ L_h^{S2} \\ L_h^{S1} \\ L \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \eta_T & 1 & 1 & 0 & q_g \eta_{ge,CHP} & q_c \eta_{ce,CHP} & 0 & 1 & -1/\eta_B & 1 & 0 & 0 & \eta_{LT} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_g \eta_{gh,CHP} & q_c \eta_{ch,CHP} & 0 & 0 & 1 & h_{ele} \eta_{h,ST} / \eta_{e,ST} & 1 & 0 & 0 & -1/\eta_{SD} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_c \eta_{IB} & 0 & 0 & -1/\eta_{e,ST} & -1/\eta_{LV} & \eta_{YR} & 0 & 0 \end{bmatrix}}_C \begin{bmatrix} P_G \\ P_{WT} \\ P_{pve} \\ P_{pvh} \\ V_{GS} \\ F_{coal,CHP} \\ F_{coal,IB} \\ P_{BES} \\ S_B \\ P_{ST} \\ D_{LV} \\ Q_{FR} \\ D_{YR} \\ D_{SD} \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0054] 其中, S_B 为电锅炉的中品位蒸汽热能输出, P_{ST} 为汽轮机的电能输出, D_{LV} 为减温减压器的中品位蒸汽热能输出, D_{SD} 为蒸汽驱动设备的低品位蒸汽热能输出, $F_{coal,CHP}$ 和 $F_{coal,IB}$ 分别为CHP系统和工业锅炉所需要的煤炭量, h_{ele} 为电能热值。

[0055] S3, 建立工业企业微网的数学模型, 其中, 数学模型包括目标函数和约束条件。

[0056] 具体地, 以考虑设备全生命周期成本的工业企业日运行成本最小为目标, 其中包括: 燃料成本、与外部大电网的交互成本、设备运行维护成本、设备的折旧成本、环境成本以及工业企业微网风光可再生能源发电所获补贴成本。目标函数可通过下式 (3) 表示;

$$[0057] \quad \min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 - C_6 \quad (3)$$

[0058] 其中, $\min C$ 为工业企业日运行最小成本, C_1 为燃料成本, C_2 为工业企业微网与外部大电网的交互成本, C_3 为设备运行维护成本, C_4 为设备折旧成本, C_5 为环境成本, C_6 为工业企业微网风光可再生能源发电所获补贴成本。

[0059] 具体而言, 燃料成本 $C_1 = \sum_{t=1}^T C_g V_{GS,t} + \sum_{t=1}^T C_{coal} F_{coal,t}$, 其中, $V_{GS,t}$ 、 $F_{coal,t}$ 分别为t时刻天然气、煤炭的消耗量, C_g 、 C_{coal} 分别为天然气、煤炭的单位价格。

[0060] 工业企业微网与外部大电网的交互成本 $C_2 = \sum_{t=1}^T (C_{B,t} P_{G,t} \delta_t + C_{S,t} P_{G,t} (1 - \delta_t))$, 其中, $P_{G,t}$ 为t时刻工业企业微网与外部大电网的交互功率, $C_{B,t}$ 、 $C_{S,t}$ 分别为t时刻的外购电价和上网电价, δ_t 为工业企业微网与外部电网的能量交互状态, 取1或者0, 分别为外购电和系统外送电。

[0061] 设备运行维护成本 $C_3 = \sum_i \sum_{t=1}^T C_{M,i} P_{i,t}$, 其中, $P_{i,t}$ 为设备i在t时刻的输出功率, $C_{M,i}$ 为设备i单位输出功率的运行维护费用。

[0062] 设备折旧成本主要指蓄电池的折旧成本。一般情况下, 蓄电池的充放电可循环次数随着放电深度的增加而降低, 但循环充放电总量基本保持不变。故设备折旧成本可表示为: $C_4 = \frac{C_{bat,rep}}{Q_{all}}$, 其中, $C_{bat,rep}$ 为蓄电池的更换成本, Q_{all} 为电池单体全寿命输出总电量。

[0063] 由于天然气燃烧只产生 CO_2 , 可视作广义上的清洁能源, 因此本发明目标函数中的

环境成本可只计算燃烧煤炭所产生的污染物排放成本。环境成本 $C_5 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^3 c_j F_{coal,t} \frac{m_j}{E_{q,j}}$, 其中, m_j 、 $E_{q,j}$ 、 c_j 分别为第 j 种大气污染物排放量、当量值、环境纳税额, j 可取 1、2、3, 分别表示 SO_2 、 NO_X 、 CO 。

[0064] 工业企业微网风光可再生能源发电所获补贴成本

$C_6 = \sum_s \rho_s \sum_t (C_{WT} P_{WT,t} + C_{pve} P_{pve,t})$, 其中, $P_{WT,t}$ 、 $P_{pve,t}$ 分别为风、光电机组在 t 时刻的输出功率, C_{WT} 、 C_{pve} 分别为风力、光伏发电的单位补贴价格, N_s 为场景总数, ρ_s 为风光出力场景 s 的概率, $\sum_{s=1}^{N_s} \rho_s = 1$, 即所有场景的概率之和应等于 1。

[0065] 进一步地, 约束条件包括功率平衡约束、储能系统约束、设备运行约束、电网联络线功率约束。其中, 功率平衡约束包括电功率平衡约束、高品位蒸汽功率平衡约束、中品位蒸汽功率平衡约束和低品位蒸汽功率平衡约束。

[0066] 具体地, 考虑到工业企业微网多能互补的能源枢纽模型中不同类型的能源特性不同 (如电能可实现实时调度, 而蒸汽热能具有热惯性, 传输存在延时, 无法实现实时调度), 在调度时充分考虑不同能源在调度时间尺度上的协同。

[0067] 电功率平衡约束为 $L_{e,t} + P_{BES,t} + P_{B,t} = P_{WT,t} + P_{pve,t} + P_{G,t} + P_{CHP,t} + P_{YR,t} + P_{ST,t}$, 即实时平衡, 其中, $P_{WT,t}$ 为 t 时刻风电机组发电功率, $P_{pve,t}$ 为 t 时刻光电机组发电功率, $P_{G,t}$ 为 t 时刻工业企业微网与电网关口功率大小, 大于 0 为系统外购电, 小于 0 为系统外送上网电, $P_{CHP,t}$ 为 t 时刻热电联产系统发电功率, $P_{YR,t}$ 的为 t 时刻低温余热发电系统发电功率, $P_{ST,t}$ 的为 t 时刻蒸汽轮机发电功率, $L_{e,t}$ 为 t 时刻的电负荷, $P_{BES,t}$ 为 t 时刻的蓄电池储存电功率, $P_{B,t}$ 为 t 时刻的电锅炉消耗的电功率。

[0068] 高品位蒸汽功率平衡约束为 $\sum_{t=1}^{T_h} (L_{h,t}^{S1} + H_{LV,t}^{S1} + H_{ST,t}^{S1}) = \sum_{t=1}^{T_h} (H_{IB,t} + H_{YR,t})$, 即在蒸汽平衡时间尺度 T_h 内总量平衡, 其中, T_h 为蒸汽平衡时间尺度, $H_{IB,t}$ 为 t 时刻的工业锅炉生产的高品位蒸汽功率, $H_{YR,t}$ 为 t 时刻废热锅炉回收高温烟气生产的高品位蒸汽功率, $L_{h,t}^{S1}$ 为 t 时刻的高品位蒸汽热负荷, $H_{LV,t}^{S1}$ 为 t 时刻的减温减压器消耗的高品位蒸汽功率, $H_{ST,t}^{S1}$ 为 t 时刻的汽轮机消耗的高品位蒸汽功率。

[0069] 中品位蒸汽功率平衡约束为

$\sum_{t=1}^{T_h} (L_{h,t}^{S2} + H_{SD,t}^{S2} + H_{YR,t}) = \sum_{t=1}^{T_h} (H_{CHP,t} + H_{ST,t}^{S2} + H_{LV,t}^{S2} + H_{B,t})$, 即在蒸汽平衡时间尺度 T_h 内总量平衡, 其中, $H_{CHP,t}$ 为 t 时刻的热电联产系统生产的中品位蒸汽功率, $H_{ST,t}^{S2}$ 为 t 时刻的汽轮机生产的中品位蒸汽功率, $H_{LV,t}^{S2}$ 为 t 时刻的减温减压器生产的中品位蒸汽功率, $H_{B,t}$ 为 t 时刻的电锅炉生产的中品位蒸汽功率, $L_{h,t}^{S2}$ 为 t 时刻的中品位蒸汽热负荷, $H_{SD,t}^{S2}$ 为 t 时刻的蒸汽驱动设备消耗的中品位蒸汽功率, $H_{YR,t}$ 为 t 时刻的生产系统副产的中品位蒸汽功率。

[0070] 低品位蒸汽功率平衡约束为 $\sum_{t=1}^{T_h} L_{h,t}^{S3} = \sum_{t=1}^{T_h} (P_{pvh,t} + H_{SD,t}^{S3})$, 即在蒸汽平衡时间尺度 T_h 内总量平衡, 其中, $P_{pvh,t}$ 为 t 时刻的光热机组发热功率, $H_{SD,t}^{S3}$ 为 t 时刻的蒸汽驱动设备生产的低品位蒸汽功率, $L_{h,t}^{S3}$ 为 t 时刻的低品位蒸汽热负荷。

[0071] 蓄电池将多余的电能进行储存, 可以实现电能在时间上的转移。储能系统约束, 即蓄电池的充放电状态需满足约束, $S_{BES,t+\Delta t} = (1 - \sigma_{BES}) S_{BES,t} + \left(\eta_{ch} \delta_t P_{ch,t} - \frac{\varphi_t P_{dis,t}}{\eta_{dis}} \right) \Delta t$ 和

$$\begin{cases} S_{BES}^{\min} \leq S_{BES,t} \leq S_{BES}^{\max} \\ S_{BES,0} = S_{BES,T} \\ 0 \leq P_{ch,t} \leq \delta_t P_{ch}^{\max} \\ 0 \leq P_{dis,t} \leq \varphi_t P_{dis}^{\max} \\ 0 \leq \delta_t + \varphi_t \leq 1 \end{cases}, \text{以防止过度充电或放电。其中, } S_{BES,t}, P_{ch,t} \text{ 和 } P_{dis,t} \text{ 分别为电池在 } t \text{ 时刻}$$

的电池储能量、充电功率以及放电功率, σ_{BES} 为电池的自损耗系数, η_{ch} 、 η_{dis} 分别为电池充电及放电效率, $S_{BES}^{\min}$ 、 $S_{BES}^{\max}$ 分别为电池最大及最小容量, $S_{BES,0} = S_{BES,T}$ 表示蓄电池调度的连续性, 即每日结束时刻 T 的状态和初始时刻状态一致, δ_t 、 φ_t 分别为 t 时刻的充放电 0-1 状态变量, δ_t 取 1 表示充电, φ_t 表示放电, 两者不同时取 1。

[0072] 工业企业微网多能互补的能源枢纽模型中设备如风电机组、光电机组、光热机组、热电联产系统、电锅炉、工业锅炉、废热锅炉、汽轮机、低温余热发电装置、减温减压器、蒸汽驱动设备等的输出应符合其容量限制以及爬坡约束。故设备运行约束为 $P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max}$ 和 $|P_{i,t} - P_{i,t-1}| \leq R_i^{\text{ramp}}$, 其中, $P_i^{\min}$ 、 $P_i^{\max}$ 分别为设备 i 输出的最小、最大出力, R_i^{ramp} 为设备 i 的最大爬坡速率, 设备 i 表示风电机组、光电机组、光热机组、热电联产系统、电锅炉、工业锅炉、废热锅炉、汽轮机、低温余热发电装置、减温减压器、蒸汽驱动设备。

[0073] 由于工业企业微网上网传输功率过大会影响外部大电网的稳定性, 工业企业微网与外部大电网的交互功率应负荷传输限制。可将电网联络线功率约束为 $|P_{G,t}| \leq P_G^{\max}$, 其中, $P_G^{\max}$ 为工业企业微网与外部电网联络线传输的最大功率。

[0074] S4, 利用YALMIP优化工具箱对数学模型进行求解。

[0075] 针对风速、光照强度的不确定性, 本发明采用场景分析来对其进行预测。场景分析是模拟可能出现的场景, 使原本不确定的因素变为确定。电力系统模拟一个可能出现的运行状态的时间序列称为一个场景 s , 场景集 S 是所有场景 s 的集合。为了得到考虑风机及光伏出力不确定的出力情况, 需要对每个时段的风机及光伏出力的数据进行采样, 由于采样的数据总数较大, 需要利用K-means聚类的方法, 以欧几里得距离最小为目标生成 S 个典型场景。

[0076] 在此步骤中, 可采用MATLAB中的YALMIP优化工具箱求解模型, 求解热电联产机组、工业锅炉、电锅炉、废热锅炉、汽轮机、减温减压器、低温余热发电系统、蒸汽驱动设备等能

量转换单元在未来控制时域T时段的出力。

[0077] 按照上述流程编制了该系统模型的算法实现程序。实施例中测试参数设置如下：风机容量50MW，光伏热系统容量为30MW，热电联产装置容量为50MW，工业锅炉容量为50MW，电锅炉容量为9MW，汽轮机容量为50MW，电池储能系统充放电最大功率为5MW，电负荷基准值为120MW，高品位蒸汽负荷基准值为40MW，中品位蒸汽负荷基准值为150MW，低品位蒸汽负荷基准值为30MW，变压器效率为0.98，天然气及煤炭经CHP系统转换为电、热的效率分别为0.45、0.35、0.45和0.45，电锅炉热效率为0.9，废热锅炉热效率为0.8，汽轮机的电效率和热效率分别为0.3和0.45，减温减压器转换效率为0.99，蒸汽驱动设备转换效率为0.5。设置在线优化时段数为24，每个时段时长为1小时。对上述例子进行工业企业微网不同运行方式下的运行成本对比，如图3所示。

[0078] 本发明实施例的工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法，充分考虑工业企业对不同品位蒸汽热能的需求，对工业蒸汽热能进行梯级利用。通过调度工业企业内各个设备的运行方式与出力，充分利用工业企业内循环余热；通过废热锅炉和余热发电装置，分别将工业生产过程中产生的高温烟气热量和副产的中品位蒸汽进行回收利用，转化成可用的高品位蒸汽和电能；当新能源发电过剩时，通过电锅炉将电能转化为中品位蒸汽热能，过剩的中品位蒸汽通过蒸汽驱动设备转化为低品位蒸汽负荷供给工业企业热水负荷。即言，通过尽可能向各用能系统提供合适品位的输入能流，实现高品位、中品位和低品位蒸汽能量之间的配合与转换利用关系的合理安排，充分利用工业企业中的循环余热，实现系统流程和参数的综合优化，减少系统的不可逆损失，从而提高系统对能量的利用效率。并且，通过对多种能量流之间的转化耦合关系进行分析，得到风、光、煤炭及天然气对电、高品位蒸汽热、中品位蒸汽热和低品位蒸汽热能流之间的耦合矩阵，充分考虑多种能量流之间的互补耦合关系，优化多能转换和设备，有效提高了新能源的就地消纳、减少煤炭及天然气的消耗并提高能源的利用效率，降低生产成本，实现工业企业微网的经济优化运行。

[0079] 进一步地，本发明还提出了一种计算机可读存储介质。

[0080] 在本发明的实施例中，计算机可读存储介质上存储有计算机程序，计算机程序被处理器执行时实现上述的工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法。

[0081] 本发明实施例的计算机可读存储介质，在其上存储的与上述工业企业微网的能源枢纽模型及其多能互补优化控制方法对应的计算机程序被处理器执行时，能够减少系统的不可逆损失，提高系统对能量的利用效率，实现工业企业微网的经济优化运行。

[0082] 尽管上面已经示出和描述了本发明的实施例，可以理解的是，上述实施例是示例性的，不能理解为对本发明的限制，本领域的普通技术人员在本发明的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

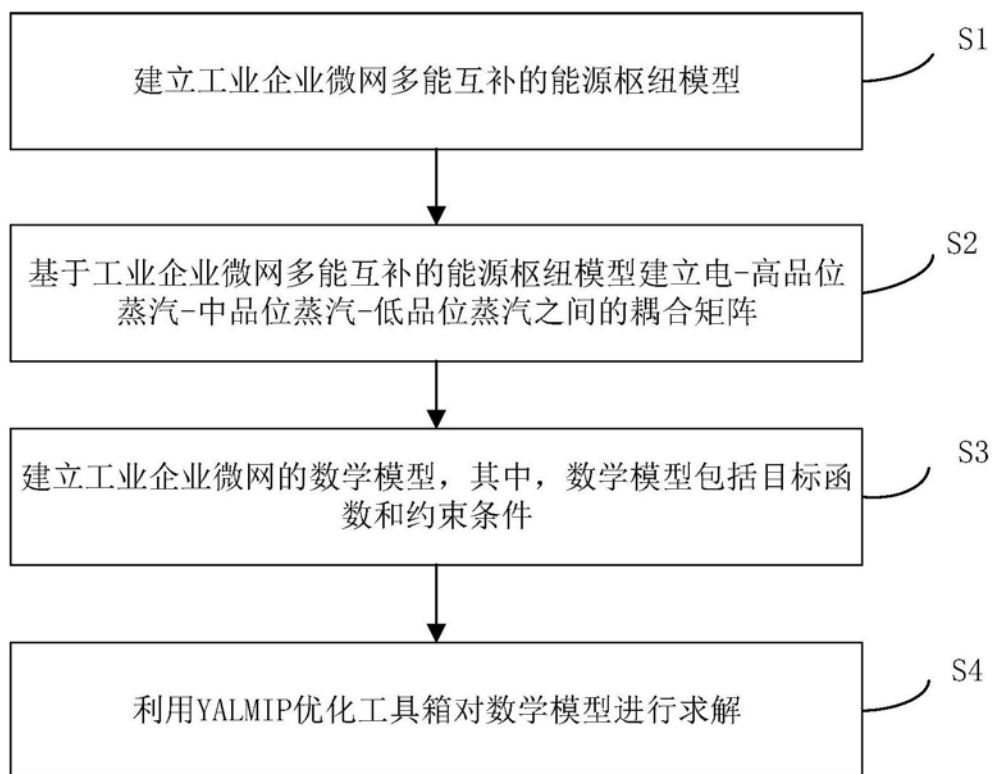


图1

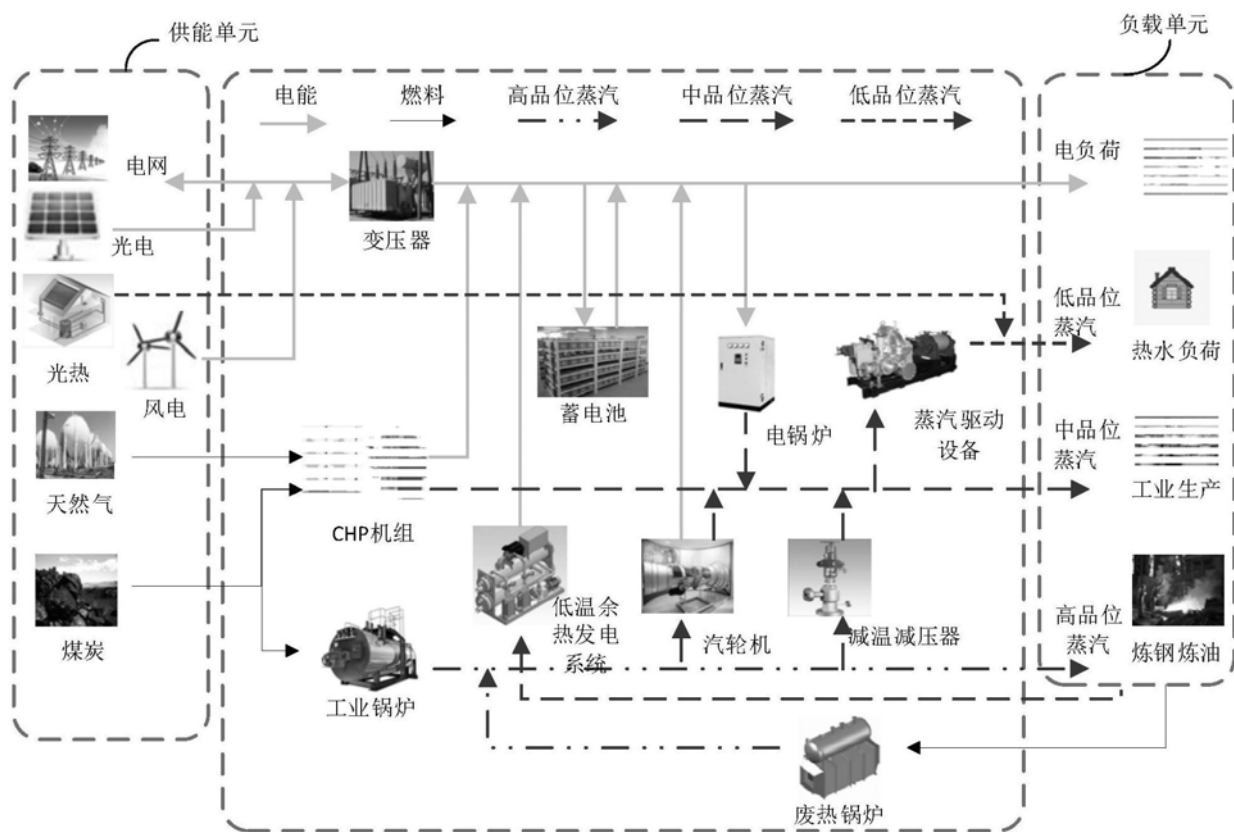


图2

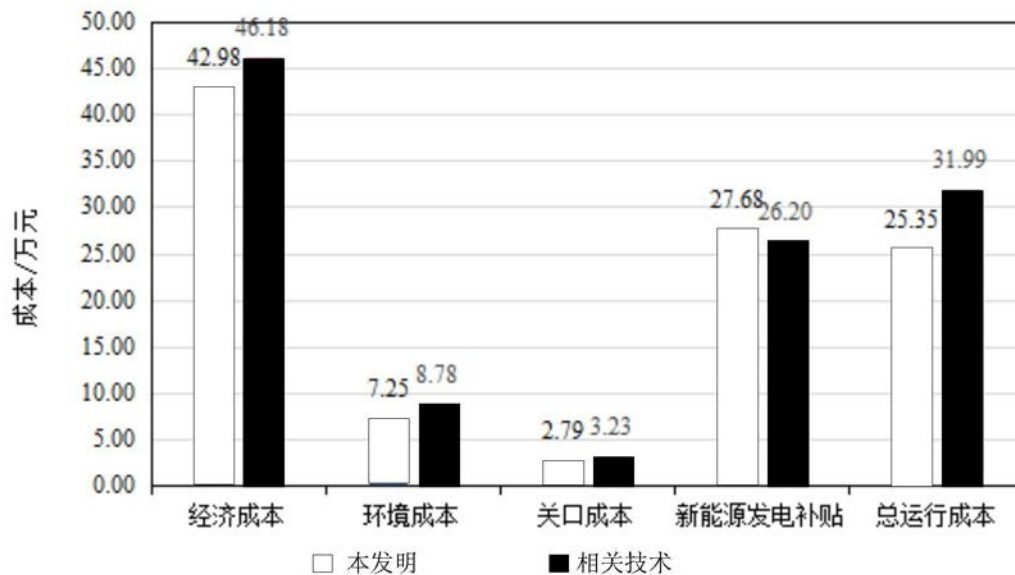


图3