

具有 CO₂ 负排放的风电高温储能系统模拟

周 驰, 向文国, 陈时熠, 徐游波

(能源热转换及其过程测控教育部重点实验室(东南大学), 江苏省南京市 210096)

摘要: 风能的反调峰特性使得弃风现象较为严重。针对该情况, 提出了 CaO 高温储能耦合生物质发电厂消纳风电的方法, 有望实现风电的规模化储存和 CO₂ 负排放, 并构建了 CaO 储能耦合生物质发电并捕集 CO₂ 的系统模型; 此外, 基于 Aspen Plus 软件平台对系统的热力性能进行了模拟, 分析了碳酸化炉接入位置对系统储电效率和 CO₂ 捕集量的影响。同时, 结合对碳酸化炉和 CaCO₃ 煅烧炉的灵敏度分析, 得到了最佳工作条件下的集成系统储电效率和消纳单位风电的 CO₂ 捕集量。

关键词: 风电消纳; CaO 储能; 生物质发电厂; CO₂ 排放

0 引言

能源利用和环境保护是实现中国可持续发展战略的重点^[1]。目前, 中国的电力供应仍以燃煤发电为主。煤炭作为不可再生能源, 在当前的消耗速度下仅能持续供应 115 年^[2]。此外, 燃煤排放的 CO₂ 等温室气体也给环境带来了较大威胁。因此, 大力寻求和发展清洁、可再生能源发电技术是实现电力行业健康、稳定发展的重要保证。风能是一种资源丰富、洁净的可再生能源, 风力发电是目前新能源发电技术中最成熟、最具规模化的发电方式之一。中国风能资源丰富, 陆上和近海区域 50 m 高度可开发利用的风能储量约为 2 580 GW, 风电发展具有良好的资源条件^[3]。但由于风电具有随机性、间歇性及反调峰性的特点, 在夜间用电负荷低谷时段, 弃风现象比较突出, 造成风能资源的浪费, 因此需有可行的解决方案消纳弃风, 促进风电的大规模发展。目前, 解决上述问题的主要技术途径是将风电与大规模储能技术相结合, 如抽水蓄能电站和压缩空气储能。抽水蓄能电站作为一种目前使用较为广泛的大规模电力储能系统, 具有技术成熟、效率高、容量大、储能周期长等优点, 但其选址困难, 建设周期很长^[4]; 压缩空气储能技术^[5-8] 则具有容量大、运行周期长、成本相对较低的优点, 但传统的压缩空气储能依赖燃烧化石燃料额外充能, 不符合绿色排放要求, 且大型压缩空气储能系统需要特定的地理条件建造储气室, 限制了该技术的应用。

因此, 解决弃风问题的关键是要找到高性价比的储能介质, 以实现风电能量的大规模储存与输出。石灰石成本低廉, 且能通过 CaO-CaCO₃ 的循环将风电系统与常规生物质燃烧发电系统结合, 实现风能的高品位储存与输出。随着温室效应的加剧, 被认为是“CO₂ 零排放”的生物质燃料日益受到关注^[9]。作为一个农业大国, 中国的生物质资源十分丰富, 可大力发展生物质发电^[10-11], 并对生物质燃烧发电产生的 CO₂ 进行捕集封存, 从而实现 CO₂ 的负排放。

为此, 本文提出将风电系统、生物质燃烧发电系统以及 CaO-CaCO₃ 循环系统相结合, 通过在风电场与生物质发电厂之间架设专有线路, 实现风电消纳系统与常规生物质燃烧发电系统间的结合。在夜间用电负荷低谷时段, 利用风电煅烧 CaCO₃ 生成高温 CaO 和高温 CO₂ 实现风能的高品位储存, 对高温 CO₂ 进行余热利用后压缩封存, 实现 CO₂ 的负排放; 而在白天用电负荷高峰时段则将高温 CaO 投入生物质燃烧发电系统, 吸收烟气中的 CO₂, 将反应释放的高品位热能转化成电能增加发电量, 以这种系统联合的形式实现弃风消纳、增加生物质发电量和确保 CO₂ 负排放的目的。

1 系统流程与参数设计

本文设计的基于 CaO 高温储能耦合生物质燃烧发电的 CO₂ 负排放系统包括以下 3 个部分: 生物质燃烧发电系统、风电消纳系统和 CO₂ 捕集封存系统。系统结构如图 1 所示。

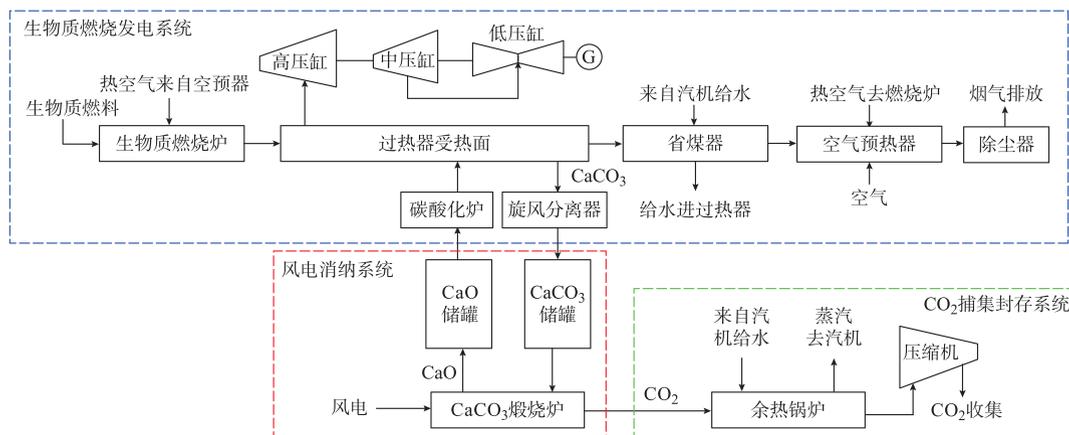


图 1 基于 CaO 高温储能耦合生物质燃烧发电的 CO₂ 负排放系统

Fig.1 Integration of biomass combustion power generation and CaO heat storage for wind power disposal and CO₂ negative emission

1.1 生物质燃烧发电系统

生物质燃烧发电系统在已有的 30 MW 生物质直燃电厂^[12]基础上增加了碳酸化炉和旋风分离器, 本文的生物质直燃电厂采用 M 型布置的高温高压蒸汽锅炉, 其结构如图 2 所示。图中, 烟气从炉膛依次经过三级过热器、四级过热器、二级过热器、一级过热器, 这 4 级过热器的布置对应于图 1 中的过热器受热面。在白天用电负荷高峰时段, 将碳酸化炉和旋风分离器与过热器受热面串接, 根据不同的串接位置有 3 种方案。方案 1: 碳酸化炉和旋风分离器串接在四级过热器和二级过热器之间。方案 2: 碳酸化炉和旋风分离器串接在二级过热器和一级过热器之间。方案 3: 碳酸化炉和旋风分离器串接在一级过热器和省煤器之间。在夜间用电负荷低谷时段则将碳酸化炉和旋风分离器旁路。

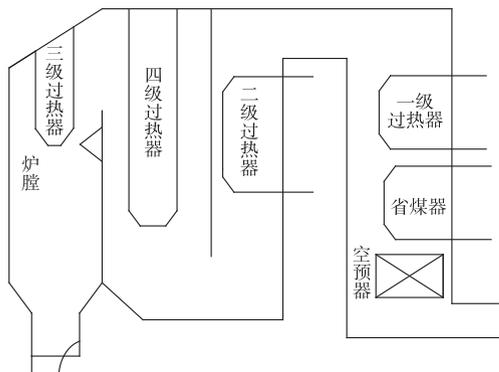


图 2 生物质直燃电厂结构

Fig.2 Structure of biomass-fired power plant

选取白天用电负荷高峰时段来介绍生物质发电流程。以方案 1 为例, 选用取自徐州地区的生物质燃料, 其低位热值为 14.47 MJ/kg。将生物质燃料

投入生物质燃烧炉, 生物质燃料在炉内发生高温分解并与已预热的空气混合燃烧, 炉膛出口烟气温度达 900~1 000 °C, 高温烟气经过三级、四级过热器导入至碳酸化炉中, 与高温 CaO 发生反应并放出热量, 如式(1)所示:

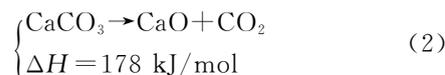


式中: ΔH 为反应放热量。

其中, 高温 CaO 由 CaO 储罐进入碳酸化炉中。碳酸化炉温度设置为 650~750 °C, 在该温度范围内 CaO 与 CO₂ 有较好的反应特性, 但由于碳酸化炉中的反应处于无水状态, 干法脱硫脱硝的效果有限, 因此产生的 CaCO₃ 纯度很高。反应放出的热量被蒸汽吸收, 反应产物经旋风分离器脱除掉其中的固体 CaCO₃。最后, 除去 CaCO₃ 后的烟气依次流过二级过热器、一级过热器、省煤器、空气预热器等受热面, 经除尘后被排放。

1.2 风电消纳系统

经旋风分离器分离出的固体 CaCO₃ 储存于 CaCO₃ 储罐中, 到夜间用电负荷低谷时段投入到 CaCO₃ 煅烧炉中煅烧, 在 850 °C 以上, CaCO₃ 煅烧吸热分解为 CaO 和 CO₂, 反应如式(2)所示^[13]:



CaCO₃ 煅烧所需的热量由风电加热提供, 煅烧炉的温度达 900~1 000 °C, 电热转化效率为 92%。煅烧产生高温 CaO 和高温 CO₂, 经分离后高温 CaO 送入 CaO 储罐中储存, 高温 CO₂ 则送入 CO₂ 捕集封存系统。

1.3 CO₂ 捕集封存系统

CaCO₃ 煅烧炉分离出的 CO₂ 温度为 900~1 000 °C, 进入余热锅炉中加热给水, 产生蒸汽推动汽轮机做功, 假定这部分余热的利用效率为 90%, 余热的热功转化效率与主机相同。余热利用后的 CO₂ 通过多级中间水冷式压缩机被压缩至 12 MPa/35 °C 储存, 其中, 单级压缩机压比为 3, 压缩效率为 80%。

2 系统评估

原生物质直燃电厂机组的发电效率为:

$$\eta_n = \frac{W_n}{m_{\text{biomass}} A_{\text{LHV, biomass}}} \quad (3)$$

式中: W_n 为碳酸化炉和旋风分离器旁路时的原机组发电功率; m_{biomass} 为投入的生物质燃料的总质量流量; $A_{\text{LHV, biomass}}$ 为生物质燃料的低位热值。

将消纳风电和 CO₂ 捕集封存系统集成到原生物质直燃电厂机组中, 根据实际情况设定每天平均消纳弃风时间, 则该集成系统的日平均发电效率为:

$$\eta_c = \frac{G_{\text{sys}}}{tm_{\text{biomass}} A_{\text{LHV, biomass}}} \quad (4)$$

$$G_{\text{sys}} = t_d W_d + t_n (W_n + W_{\text{CO}_2} - W_{\text{comp}}) + (t - t_d - t_n) W_n \quad (5)$$

式中: t 为单日时长, 即 24 h; G_{sys} 为该集成系统的日平均发电量; W_d 和 t_d 分别为原生物质直燃电厂接入碳酸化炉和旋风分离器后的改进机组发电功率和运行时间; t_n 为消纳弃风的时间; W_{CO_2} 为高温 CO₂ 余热做功; W_{comp} 为储存 CO₂ 所消耗的压缩功。

CaO 高温储热消纳弃风的储电效率定义为消纳单位风电使改进机组增加的发电量, 如式(6)所示:

$$\eta_e = \frac{\Delta G_e}{G_{\text{wind}}} \quad (6)$$

$$\Delta G_e = t_d (W_d - W_n) \quad (7)$$

式中: G_{wind} 为 1 d 内消纳的风电量; ΔG_e 为改进机组较原生物质直燃电厂机组每日增加发电量。

以集成系统消纳单位风电(1 kW·h)捕集的 CO₂ 量 C_{CO_2} 来表征集成系统的 CO₂ 捕集能力:

$$C_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2} t_n}{G_{\text{wind}}} \quad (8)$$

式中: m_{CO_2} 为每小时内捕集的 CO₂ 量。

3 系统模拟与分析

3.1 系统模拟

在 Aspen Plus 软件中, 搭建好完整的系统模型并对其进行模拟, 模拟是基于稳态及热力学平衡状态进行的, 系统主要模块和物性的参数设定见表 1。物性参数选取 Combust, Queous, Inorganic, Solids 等数据库类型, 物流特性根据 PR-BM 状态方程得到, 并按照美国机械工程师学会(ASME)标准修正汽水物流的参数。对于碳酸化炉、生物质燃烧以及 CaCO₃ 煅烧均采用 RGibbs 模型进行计算, 该模型基于吉布斯自由能最小原则, 可以用于计算任意配比下反应物转化为生成物的平衡方程。对于生物质的高温分解, 选用 RYield 模型进行计算, 该模型适用于化学反应式和各产物间的相对产率已知, 而化学计量关系未知的情况。

表 1 系统主要模块的物性参数
Table 1 Physical parameters of main system modules

| 模块 | 温度/°C | 压力/MPa |
|-----------------------|---------|---------|
| 生物质燃烧炉 | 950 | 0.101 3 |
| 碳酸化炉 | 650~720 | 0.101 3 |
| CaCO ₃ 煅烧炉 | 900~950 | 0.101 3 |
| 主蒸汽 | 540 | 9.900 0 |

根据风电及用电负荷的规律, 假设消纳弃风的时间是当晚 22:00 至次日 06:00, 共 8 h^[14]; 白天用电负荷高峰时段, 即加入碳酸化炉设备的工作时间也为 8 h。选取生物质燃料的质量流量为 1 kg/s, CaO 的质量流量为 0.58 kg/s, 对上述 3 种方案所对应的系统进行模拟。根据模拟结果采集数据并按系统评价指标测算系统性能, 结果如表 2 所示。

表 2 系统性能参数
Table 2 System performance parameters

| 方案 | 碳酸化炉温度/°C | 改进机组发电功率/kW | 原机组发电功率/kW | CO ₂ 余热做功功率/kW | 压缩功率/kW | 日平均发电量/(MW·h) | 消纳风电功率/kW | 每日增加发电量/(MW·h) | CO ₂ 捕集量/(kg·h ⁻¹) | 原机组发电效率/% | 日平均发电效率/% | 储电效率/% | C _{CO2} /(kg·(kW·h) ⁻¹) |
|------|-----------|-------------|------------|---------------------------|---------|---------------|-----------|----------------|---|-----------|-----------|--------|--|
| 方案 1 | 700 | 4 670.2 | 3 929 | 244.79 | 478.11 | 98.359 | 2 000 | 5.929 6 | 1 573.89 | 27.15 | 28.32 | 37.06 | 0.787 |
| 方案 2 | 670 | 4 717.1 | 3 929 | 246.53 | 482.12 | 98.715 | 2 000 | 6.304 2 | 1 584.22 | 27.15 | 28.43 | 39.40 | 0.792 |
| 方案 3 | 650 | 4 609.6 | 3 929 | 249.69 | 492.38 | 97.799 | 2 000 | 5.444 8 | 1 596.12 | 27.15 | 28.16 | 34.03 | 0.798 |

3.2 系统性能分析

方案 1 至方案 3 可改变碳酸化炉和旋风分离器的串接位置,相应的系统性能参数如表 2 所示。分析表 2 可知,集成系统储电效率最高的是方案 2,为 39.40%,较集成系统储电效率次之的方案 1 高 2.34%。方案 2 中碳酸化炉和旋风分离器串接在二级过热器和一级过热器之间,与方案 1 相比,碳酸化炉的温度低 30 °C,减少了从旋风分离器分离出的固体 CaO 和 CaCO₃ 带走的热量,因此,方案 2 的集成系统储电效率较方案 1 高,风电利用更为充分。方案 3 集成系统储电效率最低,为 34.03%,由于其碳酸化炉和旋风分离器串接在低温受热面之间,相应的系统排烟温度达 191 °C,排烟热损失较大。

从表 2 也可以看出,方案 1 至方案 3 中集成系统的 CO₂ 捕集量 C_{CO₂} 呈增大的趋势,碳酸化炉的温度越低,集成系统的 CO₂ 捕集量越大。方案 3 的碳酸化炉温度最低,为 650 °C,其对应的 C_{CO₂} 达 0.798 kg/(kW·h),比 C_{CO₂} 最小的方案 1 高 0.011 kg/(kW·h),可看出 3 种方案对应的 C_{CO₂} 相

差很小。

采用集成系统发电将弃风转化为有效电能,集成系统的日平均发电效率最高可达到 28.43%,较原生物质直燃电厂机组的发电效率高 1.28%。计算结果显示,3 种方案对应的集成系统的 CO₂ 捕集量相差很小。因此,从能量有效利用的角度考虑,方案 2 的集成系统储电效率最高,风能利用最有效,其碳酸化炉和旋风分离器的串接方式最优。

3.3 系统经济性分析

由于生物质燃烧发电系统基于已有的 30 MW 生物质直燃电厂建立^[13],因此实际每日增加发电量 $\Delta G_{e-total}$ 满足式(10):

$$\Delta G_{e-total} = \frac{30\,000}{W_n} \Delta G_e \quad (10)$$

3 种方案的初期投资包括碳酸化炉、旋风分离器、风电消纳系统以及 CO₂ 捕集封存系统等的设备费用、施工费、设计费,且设备接入位置的温度越高,设备成本越高。年直接收益按年发电 6 000 h,上网电价 0.5 元/(kW·h) 计算,计算结果如表 3 所示。

表 3 系统经济性参数
Table 3 System economic parameters

| 方案 | 碳酸化炉、旋风分离器、风电消纳系统设备费用/万元 | CO ₂ 捕集封存系统设备费用/万元 | 总设备费用/万元 | 施工费/万元 | 设计费/万元 | 总投资/万元 | $\Delta G_{e-total}/$ (MW·h) | 年直接收益/万元 | 静态投资回收期/月 |
|------|--------------------------|-------------------------------|----------|--------|--------|--------|------------------------------|----------|-----------|
| 方案 1 | 350 | 300 | 650 | 80 | 50 | 780 | 45.276 | 565.9 | 16.6 |
| 方案 2 | 320 | 300 | 620 | 80 | 50 | 750 | 48.136 | 601.7 | 15.0 |
| 方案 3 | 280 | 300 | 580 | 80 | 50 | 710 | 41.574 | 519.7 | 16.4 |

由表 3 可知,3 种方案对应的静态投资回收期为 15.0~16.6 个月,相差较小,但方案 2 的年直接收益高于方案 1 和方案 3。因此,从系统长时间运行角度考虑,方案 2 的经济性最优。

4 灵敏度分析

灵敏度分析可以用来检验关键设计变量变化对系统性能的影响,加深对整个系统的理解。本文所述集成系统的关键连接设备包括碳酸化炉和 CaCO₃ 煅烧炉,因此,有必要对这 2 个设备进行灵敏度分析^[15-16]。以方案 2 为例,分析碳酸化炉和 CaCO₃ 煅烧炉的工作温度对集成系统的储电效率及 CO₂ 捕集能力的影响。

4.1 碳酸化炉温度

碳酸化炉温度与集成系统储电效率和 CO₂ 捕集能力的变化关系如图 3 所示。随着碳酸化炉温度的减小,集成系统储电效率逐渐增大,在 670 °C 时集成系统储电效率达到最大。由于原生物质直燃电厂机组中二级过热器出口的烟气温度达到 650 °C,加

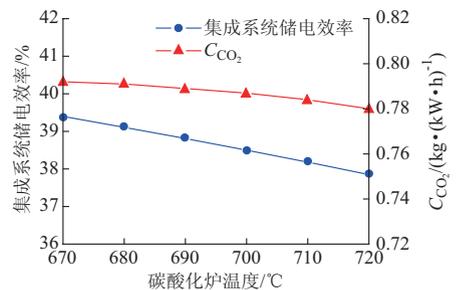


图 3 碳酸化炉温度变化对集成系统储电效率及 CO₂ 捕集量的影响

Fig.3 Influences of carbonation reactor temperature on integrated energy storage efficiency and CO₂ capture

入的高温 CaO 与 CO₂ 反应会放出热量进一步加热烟气至 670 °C 以上。CaO 和 CO₂ 反应生成的 CaCO₃ 会覆盖在 CaO 表面,增大 CO₂ 的扩散阻力^[17-18],使得碳酸化反应速度越来越慢,阻止 CaO 完全转化成 CaCO₃^[19],且两者反应会放热,温度越高,CaO 吸收 CO₂ 的效率越低^[20-21]。因此,集成系统的 CO₂ 捕集量随碳酸化炉的温度升高而减小;同

时,碳酸化炉的温度越高,分离出的固体的温度越高,排烟热损失越大,使集成系统的整体热损失增大,集成系统储电效率降低。

综上所述,本案例中碳酸化炉温度为 670 °C 时,其对应的集成系统的储电效率和 CO₂ 捕集量均为最优。

4.2 CaCO₃ 煅烧炉温度

CaCO₃ 煅烧炉内的温度变化对集成系统储电效率及 CO₂ 捕集能力的影响如图 4 所示。

由图 4 可知,随着温度的升高,集成系统储电效率稍有增加而 CO₂ 捕集量不变,这是由于在煅烧炉内发生的 CaCO₃ 分解是吸热反应,温度增加会加快 CaCO₃ 分解^[22]并提高 CO₂ 的余热利用量,增加了所消纳风电的有效利用量,提高了集成系统储电效率。由于分解的 CaCO₃ 固体量是一定的,因而对 CO₂ 捕集量并无影响。考虑到 CaCO₃ 煅烧炉温度对集成系统储电效率的影响,本案例中选择 CaCO₃ 煅烧炉的工作温度为 950 °C 较为合适。

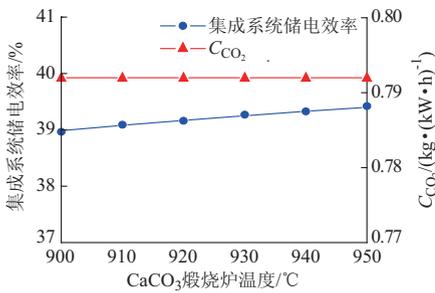


图 4 CaCO₃ 煅烧炉温度变化对集成系统储电效率及 CO₂ 捕集量的影响

Fig.4 Influence of calcinations reactor temperature on integrated energy storage efficiency and CO₂ capture

5 结论

本文基于生物质直燃电厂设计了用于风电消纳及实现 CO₂ 负排放的集成发电系统,并利用 Aspen Plus 软件对系统进行模拟,根据模拟所得的数据对系统进行综合评估,得出如下结论。

1) 利用 CaO 和 CaCO₃ 的循环实现了对弃风的消纳,将夜间弃风风能储存于高温 CaO 中,白天再将该高品位储能转化成电能输出,合理有效地提高了能源利用率。

2) 通过各方案的比较,将碳酸化炉和旋风分离器串接在二级过热器和一级过热器之间,其集成系统储电效率最高。

3) 文中设计的集成系统可实现对燃料燃烧排放的 CO₂ 的捕集,消纳单位风电的 CO₂ 捕集量达

0.792 kg/(kW·h),实现了储能过程的 CO₂ 负排放。

当然,本文也有一定的局限性,如文中的生物质直燃电厂负荷较小,其发电效率仅为 27.15%,较大程度地限制了系统储电效率。因此,如何提高其发电效率,将为下一步研究方向。

参考文献

- [1] 刘明.关于我国能源利用与环境保护的现状分析[J].山西能源与节能,2002(3):17-18.
LIU Ming. Analysis on the current situation of energy utilization and environment protection in China [J]. Shanxi Energy and Conservation, 2002(3): 17-18.
- [2] World Coal Institute [EB/OL]. [2015-03-29]. <http://www.worldcoal.org>.
- [3] 朱凌志,陈宁,韩华玲.风电消纳关键问题及应对措施分析[J].电力系统自动化,2011,35(22):29-34.
ZHU Lingzhi, CHEN Ning, HAN Hualing. Key problems and solutions of wind power accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 29-34.
- [4] LUND P D, PAATERO J V. Energy storage options for improving wind power quality [C]// Proceedings of the 3rd Nordic Wind Power Conference, May 22-23, 2006, Espoo, Finland: 5p.
- [5] AYODELE T R, OGUNJUYIGBE A S O. Mitigation of wind power intermittency: storage technology approach [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015(44): 447-456.
- [6] DÍAZ-GONZÁLEZ F, SUMPER A, GOMIS-BELLMUNT O, et al. A review of energy storage technologies for wind power applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4): 2154-2171.
- [7] 徐玉杰,陈海生,刘佳,等.风光互补的压缩空气储能与发电一体化系统特性分析[J].中国电机工程学报,2012,32(20):88-95.
XU Yujie, CHEN Haisheng, LIU Jia, et al. Performance analysis on an integrated system of compressed air energy storage and electricity production with wind-solar complementary method [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 88-95.
- [8] 陈海生.压缩空气储能技术的特点与发展趋势[J].高科技与产业化,2011(6):55-56.
CHEN Haisheng. Characteristics and development trend of compressed air energy storage technology [J]. High-technology & Industrialization, 2011(6): 55-56.
- [9] 王学斌.生物质燃烧及其还原氢氧化物的机理研究及应用[D].西安:西安交通大学,2011.
- [10] 沈明忠,王新雷.我国生物质发电的发展环境分析[J].能源技术经济,2011,23(1):41-45.
SHEN Mingzhong, WANG Xinlei. Study on environment for biomass power generation development in China [J]. Energy

- Technology and Economics, 2011, 23(1): 41-45.
- [11] 边光辉.我国生物质发电企业发展战略研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [12] 王焱.生物质直燃锅炉运行与控制的研究[D].济南:山东大学,2009.
- [13] 张学镭,陈海平.供能方式对钙基吸收剂循环煅烧/碳酸化法捕集 CO₂ 热力性能的影响[J].中国电机工程学报,2013,33(29): 49-56.
ZHANG Xuelei, CHEN Haiping. Influence of energy supply mode on thermodynamic performance of CO₂ capture systems with Ca-based sorbent cyclic calcination/carbonation reaction [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(29): 49-56.
- [14] 王彩霞,李琼慧,谢国辉.风电供热提高低谷风电消纳能力评估[J].中国电力,2013,46(12):100-106.
WANG Caixia, LI Qionghui, XIE Guohui. Evaluation of wind power heating in facilitating wind power integration capability during valley load period[J]. Electric Power, 2013, 46(12): 100-106.
- [15] 孙兰义.化工流程模拟实训—Aspen Plus 教程[M].北京:化学工业出版社,2012:163-166.
- [16] CHEN S, XIANG W, WANG D, et al. Incorporating IGCC and CaO sorption-enhanced process for power generation with CO₂ capture[J]. Applied Energy, 2012, 95(2): 285-294.
- [17] BARKER R. The reactivity of calcium oxide towards carbon dioxide and its use for energy storage[J]. Journal of Applied Chemistry and Biotechnology, 1974, 24(4): 221-227.
- [18] BHATIA S K, PERLMUTTER D D. Effect of the product layer on the kinetics of the CO₂-lime reaction [J]. Aiche Journal, 1983, 29(1): 79-86.
- [19] DEAN C C, BLAMEY J, FLORIN N H, et al. The calcium looping cycle for CO₂ capture from power generation, cement manufacture and hydrogen production [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2011, 89(6): 836-855.
- [20] 李英杰,赵长遂.钙基吸收剂循环煅烧/碳酸化反应过程特性研究[J].中国电机工程学报,2008,28(2):55-60.
LI Yingjie, ZHAO Changsui. Carbonation characteristics in calcium-sorbents cyclic calcination/carbonation reaction process [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(2): 55-60.
- [21] WANG W, RAMKUMAR S, FAN L S. Energy penalty of CO₂ capture for the carbonation-calcination reaction (CCR) process: parametric effects and comparisons with alternative processes[J]. Fuel, 2013(104): 561-574.
- [22] 陈鸿伟,陈江涛,危日光,等.温度对 CaCO₃ 分解反应动力学参数的影响[J].热力发电,2013,42(6):21-25.
CHEN Weihong, CHEN Jiangtao, WEI Riguang, et al. Effect of temperature on kinetic parameters of decomposition reaction of calcium carbonate[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(6): 21-25.

周 驰(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向:热力系统优化与控制。E-mail: zhouch54321@163.com

向文国(1964—),男,通信作者,博士生导师,主要研究方向:洁净煤燃烧、热力系统优化与控制。E-mail: wgxiang@seu.edu.cn

陈时熠(1986—),男,博士研究生,主要研究方向:洁净煤发电。E-mail: kerrylink@163.com

(编辑 钱梦骄)

Simulation of High-temperature Energy Storage System for Wind Power Accommodation with CO₂ Negative Emissions

ZHOU Chi, XIANG Wenguo, CHEN Shiyi, XU Youbo

(Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education (Southeast University), Nanjing 210096, China)

Abstract: The reverse peak load characteristics of wind energy result in a large portion of the wind power wasted. In order to solve this problem, a novel biomass-fired power plant integrated by CaO energy storage under high temperature for wind power accommodation with CO₂ negative emissions is proposed. A model based on CaO energy storage integrated biomass-fired power plants is built to simulate wind power accommodation and CO₂ capture. The thermodynamic performances of the system are analyzed using Aspen Plus software and the influences of the carbonation reactor positions on the energy storage efficiency and the CO₂ capture are also discussed. Meanwhile, combined with the sensitive analysis on carbonation reactor and calcinations reactor, the energy storage efficiency of the system is calculated to be 39.4% while the CO₂ capture for wind power reaches 0.792 kg/(kW·h) under the optimal operation condition.

Key words: wind power accommodation; CaO energy storage; biomass-fired power plant; CO₂ emission