



# AMTEC 与超临界 CO<sub>2</sub> 循环的混合 太阳能热发电系统初探

上海发电设备成套设计研究院有限责任公司 ■ 郑开云

**摘要：** 为了进一步提高太阳能热发电效率，以太阳能热为高温热源，将碱金属热电转换器 (AMTEC) 与在空冷条件下仍有显著热效率优势的超临界 CO<sub>2</sub> 循环组成高效的混合太阳能热发电系统，AMTEC 冷凝器释放的热量品位高，可以作为余热发电。结果显示，该系统的光电转换效率可达 25% 以上。

**关键词：** 太阳能热发电；AMTEC；超临界 CO<sub>2</sub> 循环；效率

## 0 引言

太阳能热发电的主流技术路线包括塔式、槽式、菲涅尔式、碟式等。将热能转换为电能的方式包括采用动力机械的热力发电技术和无运动部件的直接热电转换技术，前者主要用于大功率的发电装置，如汽轮机组；后者主要用于小功率的发电装置，如温差发电装置。随着新型热能发电技术不断被开发，这一领域的创新空间也不断得到拓展。

近年来，新型的超临界 CO<sub>2</sub> 循环成为研究热点，理论和试验均证实了这一循环的热效率高，并且系统紧凑、动力机械体积小、制造成本较低<sup>[1]</sup>。在太阳能热发电领域，超临界 CO<sub>2</sub> 循环是第 3 代聚光太阳能热发电动力循环的可选技术路线之一。国际上，美国能源部于 2011 年启动了“Sunshot 计划”，其中，针对塔式聚光太阳能热

发电的一项任务是开发高参数的超临界 CO<sub>2</sub> 循环，要求透平入口温度达到 700 °C 以上，空冷条件下循环效率达到 50%。有关研究机构正在通过 STEP 项目建造 10 MW<sub>e</sub> 超临界 CO<sub>2</sub> 循环试验装置，用于验证上述参数目标<sup>[2]</sup>。超临界 CO<sub>2</sub> 循环也是我国太阳能热发电行业高度关注的前沿技术之一，“超临界 CO<sub>2</sub> 太阳能热发电技术”是 2018 年第 20 届中国科协年会发布的《能源动力领域十项重大工程技术难题》之一。2019 年初，国家重点研发计划“可再生能源与氢能技术”重点专项之“超临界 CO<sub>2</sub> 太阳能热发电关键基础问题研究”项目立项。同时，在商业化应用方面，北京首航艾启威节能技术股份有限公司与法国电力集团 (Electricite De France) 合作，于 2018 年启动了“超临界 CO<sub>2</sub> 循环光热发电技术研发项目”，共同开发高效率的太阳能热发电技术，以降低太阳能热发电成本。

收稿日期：2019-02-13

通信作者：郑开云 (1980—)，男，博士、高级工程师，主要从事先进能源技术方面的研究。zhengkaiyun@speri.com.cn

超临界  $\text{CO}_2$  循环中的工质在高温高压参数下运行, 根据高温材料的许用条件, 目前其最高温度可达到  $700\text{ }^\circ\text{C}$  的等级。受此限制, 超临界  $\text{CO}_2$  循环效率提升空间不大。与此同时, 新型的直接热电转换技术——碱金属热电转换器 (AMTEC) 也得到了发展。AMTEC 是以  $\beta''$  氧化铝固体电解质 (BASE) 为选择性渗透膜, 以液态或气态碱金属 (如钠) 为循环工质的高效面积型热能与电能直接转换装置, 工质在常压附近运行, 适用于温度为  $600\sim 1000\text{ }^\circ\text{C}$  的热源<sup>[3-4]</sup>, 可作为太阳能热发电的热电转换装置<sup>[5]</sup>。AMTEC 无运动部件、无噪声、无需维护, 但其冷凝器释放的热量品位高, 效率损失较大, 最好增加底循环, 回收余热来发电, 而超临界  $\text{CO}_2$  循环恰好是其理想的底循环。

本文以太阳能热为高温热源, 将 AMTEC 配合超临界  $\text{CO}_2$  循环组成新型高效太阳能热发电系统, 并对集成方案和系统的光电转换效率进行了初步研究。

## 1 AMTEC 的工作原理及特点

AMTEC 的工作原理如图 1 所示。整个装置封装于充有工质 (通常为碱金属钠) 的容器内, 由循环泵和 BASE 膜将其分为高温高压区和低温低压区<sup>[3-4]</sup>。装置运行过程中, 通过工质的循环流动不断将热能转换为电能。从高温高压区开始, 外部输入的热量加热液态钠至高温 (图 1 所示为高温液态钠), 也可加热至气化, 温度范围为  $600\sim 1000\text{ }^\circ\text{C}$ ; 然后, 钠以  $[\text{Na}^+]$  离子 ( $\text{Na}^0 \rightarrow [\text{Na}^+ + \text{e}]$ ) 的形态在 BASE 膜两侧的压差驱动下迁移, 同时电子从负极离开, 经过负载, 到达正极,  $[\text{Na}^+]$  离子穿过 BASE 膜后, 在多孔电极 / BASE 膜界面与电子重新复合成中性钠原子; 接着, 钠以蒸汽的形式经过低温低压区气相空间到达冷凝器, 温度范围为  $150\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ , 向外部释放凝结热; 最后, 冷凝后的液态钠经循环泵返回到高温高压区, 从而完成循环。从热力循环的角度来说,

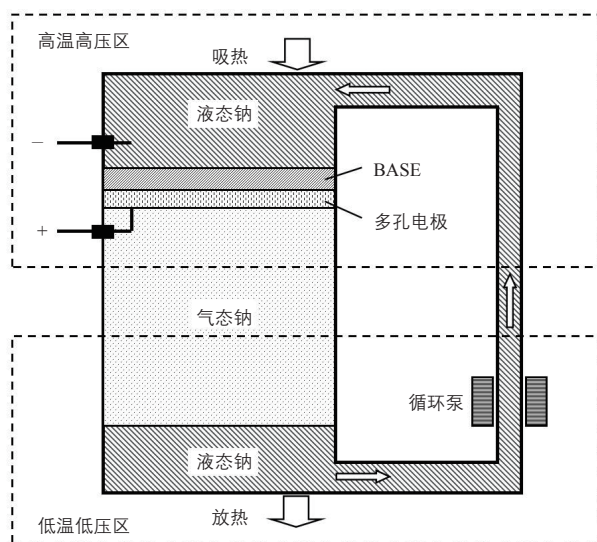


图 1 AMTEC 的工作原理示意图

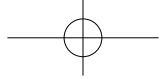
BASE 膜及其界面中发生的过程相当于从高压到低压的等温膨胀过程, 但是不需要类似于膨胀机的运动机械, 而是直接将热能转换为电能。

AMTEC 具有以下几方面优点:

- 1) 效率高。理论上其热电转换效率可达 40%。
- 2) 功率密度高。功率密度可达  $500\text{ W/kg}$  以上。
- 3) 无运动部件。若使用电磁泵或吸液芯, 则装置运行不需要运动机械, 装置运行中仅有的运动只是工质的循环流动。
- 4) 工程化条件佳。装置中的温度和压力均在常规可获得工程材料的许用范围内, 所涉及的关键技术可利用成熟的  $\beta''$  氧化铝陶瓷制备技术和液态 / 气态碱金属处理技术。
- 5) 适用热源多。其可与核能、化石能、太阳能等结合, 既可做成小型、可移动电源, 也可以多模块组合成中、大型发电厂。
- 6) 余热输出品位高。可进一步采用其他手段发电, 从而提高热电转换效率。

## 2 AMTEC 与超临界 $\text{CO}_2$ 循环集成方案

根据上文所述的 AMTEC 独特的构造和运行条件, 其十分适用于太阳能热发电, 如塔式和碟式聚光太阳能热发电系统, 两者均可实现  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  以上的运行温度<sup>[5]</sup>。但相比于现有的太阳能热



发电或光伏发电系统,单独采用 AMTEC 的太阳能发电系统在发电效率上无明显优势。显然,给 AMTEC 配置余热发电装置可提高其发电效率。针对 AMTEC 的余热品位,可选用的余热发电方式有蒸汽朗肯循环、有机工质朗肯循环、超临界  $\text{CO}_2$  循环、塞贝克效率温差电转换装置等。本文以超临界  $\text{CO}_2$  循环作为余热发电方式。

相比于其他方式,超临界  $\text{CO}_2$  循环的优势主要有:1) 适用的热源温度范围大,冷端可空冷,循环效率较高;2) 系统简单,结构紧凑,响应速度快;3) 在较大的发电功率跨度(百 kW 级至百 MW 级)均可保持较高效率,与 AMTEC 既可组成小型发电装置,也可组成中、大型发电装置;4)  $\text{CO}_2$  工质与金属钠几乎不反应,可避免类似于“钠水反应”的安全隐患。

目前,太阳能热发电、核电、火电等各个发电领域均在密集开展超临界  $\text{CO}_2$  循环技术的研发工作,并已开始对关键设备和系统进行试验验证,有望在近几年内实现商业化<sup>[6]</sup>。因此,AMTEC 与超临界  $\text{CO}_2$  循环集成的技术风险小,工程化前景好。

AMTEC 与超临界  $\text{CO}_2$  循环集成的一种简单方案是直接 AMTEC 的余热供给超临界  $\text{CO}_2$  循环的主加热器,即以 AMTEC 为顶循环,超临界  $\text{CO}_2$  循环为底循环。但此时超临界  $\text{CO}_2$  循环的运行温度较低,热效率不够高。所以,本文采取的方案是将 AMTEC 的余热供给超临界  $\text{CO}_2$  循环的低温段,同时还向其高温段输入太阳能热,使循环在更高的温度参数下工作,产生更高的热效率<sup>[7]</sup>。本文采取的 AMTEC 与超临界  $\text{CO}_2$  循环集成方案如图 2 所示。

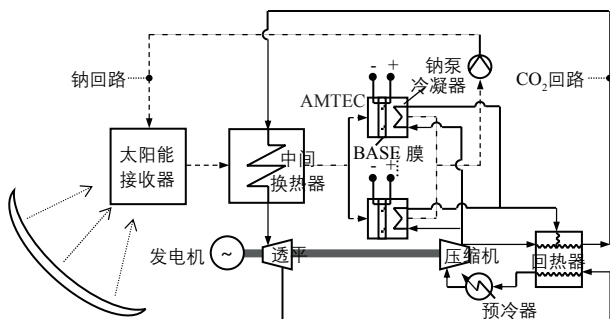


图 2 AMTEC 与超临界  $\text{CO}_2$  循环集成方案示意图

在上述方案中,AMTEC 的运行过程为:太阳光聚焦到太阳能接收器内,加热 AMTEC 中的钠至高温饱和和气态;然后高温饱和和气态钠进入中间换热器将热量传递给超临界  $\text{CO}_2$  循环中的  $\text{CO}_2$  工质,并有一部分转变为饱和和液态,再进入 AMTEC 模块组(串联或并联);饱和态的钠经 BASE 后产生电能,然后气态钠经冷凝器冷凝,将凝结热释放给另一侧的  $\text{CO}_2$ ,同时气态钠转变为液态,液态钠由钠泵增压并传输回太阳能接收器。

超临界  $\text{CO}_2$  循环的运行过程为:压缩机将  $\text{CO}_2$  工质压缩至高压;在压缩机出口,  $\text{CO}_2$  工质分为 2 路,一路进入回热器,另一路再分为并联的多路,分别进入各 AMTEC 模块中的冷凝器,吸收钠的凝结热,再从各冷凝器出来合并汇入回热器;回热器出来的  $\text{CO}_2$  工质一并进入中间换热器,经高温液态钠加热后  $\text{CO}_2$  工质升温;再进入透平膨胀做功,推动发电机产生电能;透平排气进入回热器将部分热量传递给压缩机出口的一路  $\text{CO}_2$  工质,再经预冷器冷却,然后返回到压缩机。

在此集成方案中,钠既是 AMTEC 的工质,也是超临界  $\text{CO}_2$  循环从外界获取热量的传热介质,来自液态金属钠冷却快中子反应堆的经验可为本文的系统提供重要参考<sup>[8]</sup>。钠在整个回路中的最高压力与大气压接近,对太阳能接收器材料强度要求不高,中间换热器仅需要考虑  $\text{CO}_2$  侧压力边界的承压设计即可。

### 3 系统效率初步分析

系统总的光电转换效率  $\eta_0$  为光热转换效率  $\eta_1$  与热电转换效率  $\eta_2$  的乘积,可表示为:

$$\eta_0 = \eta_1 \eta_2 \quad (1)$$

本文假设采用塔式聚光热发电系统,其光热转换效率  $\eta_1$  近似取 60%。热电转换效率  $\eta_2$  为 AMTEC 的热电转换效率  $\eta_{2-\text{AMTEC}}$  与超临界  $\text{CO}_2$  循环效率  $\eta_{2-\text{CO}_2}$  的耦合。对于 AMTEC,假设高温端为 927 °C (1200 K)、低温端为 227 °C (500 K),  $\eta_{2-\text{AMTEC}}$  为 35%<sup>[4]</sup>,余热全部经冷凝器释放





给超临界 CO<sub>2</sub> 循环。对于超临界 CO<sub>2</sub> 循环, 根据相关文献选取循环系统的参数<sup>[9]</sup>, 具体如表 1 所示。

表 1 超临界 CO<sub>2</sub> 循环参数

参数	取值
输出功率 /MW	100
透平入口温度 /°C	600
透平入口压力 /MPa	25
透平出口压力 /MPa	8
预冷器出口温度 /°C	35
压缩机等熵效率 /%	85
透平等熵效率 /%	90
回热器最小温差 /°C	10
AMTEC 冷凝器出口温度 /°C	215

根据表 1 可逐一求出超临界 CO<sub>2</sub> 循环回路各个设备进口和出口的平衡热力学状态参数的值<sup>[9]</sup>, 并求得中间换热器热功率  $H_{\text{IHx}}$  和 AMTEC 冷凝器热功率  $H_{\text{CON}}$ , 然后可求得超临界 CO<sub>2</sub> 循环效率  $\eta_{2-\text{CO}_2}$ 。其公式为:

$$\eta_{2-\text{CO}_2} = \frac{P_{\text{CO}_2}}{H_{\text{IHx}} + H_{\text{CON}}} \quad (2)$$

式中,  $P_{\text{CO}_2}$  为超临界 CO<sub>2</sub> 循环的输出功率, 本文给定为 100 MW。

作为简化, 将 AMTEC 与超临界 CO<sub>2</sub> 循环集成系统的所有能量损失 (如压损、散热、机械损失、电能转换损失等) 及钠泵和辅助设备用电归并为 10% 的总输出功率损失。总输出功率扣除此损失后即为净发电功率, 可表示为:

$$P_0 = P_1(1-10\%) \quad (3)$$

式中,  $P_0$  为净发电功率;  $P_1$  为总输出功率。

总输出功率  $P_1$  可表示为:

$$P_1 = P_{\text{CO}_2} + P_{\text{AMTEC}} \quad (4)$$

式中,  $P_{\text{AMTEC}}$  为 AMTEC 输出功率, 可用式 (5) 求得。

$$P_{\text{AMTEC}} = \frac{H_{\text{CON}}}{1-\eta_{2-\text{AMTEC}}} - H_{\text{CON}} \quad (5)$$

太阳能接收器的热功率  $H_{\text{REC}}$  可表示为:

$$H_{\text{REC}} = H_{\text{IHx}} + \frac{H_{\text{CON}}}{1-\eta_{2-\text{AMTEC}}} \quad (6)$$

太阳能热功率  $H_{\text{SOL}}$  可表示为:

$$H_{\text{SOL}} = \frac{H_{\text{REC}}}{\eta_1} \quad (7)$$

热电转换效率  $\eta_2$  可表示为:

$$\eta_2 = \frac{P_0}{H_{\text{REC}}} \quad (8)$$

将上述分析计算结果列于表 2, 其中, 分流比为进入 AMTEC 冷凝器的工质流量比例。

表 2 系统效率分析结果

参数	数值
超临界 CO <sub>2</sub> 循环分流比	0.39
AMTEC 冷凝器热功率 $H_{\text{CON}}/\text{MW}_t$	69.64
中间换热器热功率 $H_{\text{IHx}}/\text{MW}_t$	184.51
超临界 CO <sub>2</sub> 循环效率 $\eta_{2-\text{CO}_2}/\%$	39.35
太阳能接收器热功率 $H_{\text{REC}}/\text{MW}_t$	291.64
太阳能热功率 $H_{\text{SOL}}/\text{MW}_t$	486.08
AMTEC 输出功率 $P_{\text{AMTEC}}/\text{MW}$	37.50
总输出功率 $P_1/\text{MW}$	137.50
净发电功率 $P_0/\text{MW}$	123.75
热电转换效率 $\eta_2/\%$	42.43
总的光电转换效率 $\eta_0/\%$	25.46

超临界 CO<sub>2</sub> 循环效率  $\eta_{2-\text{CO}_2}$  为 39.35%, 再扣除各类损失后, 降至约 35%, 其优势并不显著。AMTEC 的热电转换效率  $\eta_{2-\text{AMTEC}}$  也为 35%, 扣除各类损失后, 降至约 32%。尽管这 2 种发电方式单独的效率均不突出, 但是两者集成后, 系统的热电转换效率  $\eta_2$  可达到 42.43%, 显著高于独立发电。这样, 整个系统总的光电转换效率  $\eta_0$  可达到 25.46%, 相比现有的塔式聚光热发电系统, 该集成方案具有一定的竞争优势。进一步将超临界 CO<sub>2</sub> 循环的透平进气温度提高至 700 °C 以上, 则系统的热电转换效率  $\eta_2$  可达到 50%, 总的光电转换效率  $\eta_0$  可达到 30%。

由于太阳能具有间歇性, 因此需要采用储热的办法解决。AMTEC 的运行温度太高, 相应的



储热难度大、成本高,但是超临界  $\text{CO}_2$  循环的运行温度相对较低,可以采用高温熔盐、相变材料、热化学等储热技术实现其连续运行。因此,在太阳光不足时,储热提供给超临界  $\text{CO}_2$  循环运行所需的热量,而 AMTEC 可以暂停运行或降参数运行,不过,此时系统效率和出力都会有所减小。

#### 4 结语

AMTEC 和超临界  $\text{CO}_2$  循环集成可作为一种新型的太阳能热发电装置,其系统简单、紧凑,并具有较高的光电转换效率。AMTEC 无运动部件、无噪声、无需维护,并且在技术上具备工程化条件,超临界  $\text{CO}_2$  循环也是正处于逐步实现商业化的进程中,集成二者的优点可产生良好的叠加效应,为太阳能热发电提供了新的探索方向。

(接第 45 页) 电流保护正确发挥作用,零序电流需取自接地变压器高压绕组中性点,即中性点小电阻处,且动作时限应与其他间隔零序电流保护相配合,即延长一个时限。

#### 5 结论

本文通过对某光伏电站 35 kV 小电阻接地系统不同位置发生单相接地故障时系统各处的电流及相位情况进行分析,得出以下结论:

1) 当一般馈线发生单相接地故障时,故障回路故障相电流等于零序电流  $3I_0$ ;金属性接地故障时,故障相电流近似等于中性点接地小电阻额定电流;接地变压器回路开关柜处三相电流相位相同,数值等于故障回路故障相电流的  $1/3$ ;接地变压器回路开关柜处零序电流等于故障回路零序电流  $3I_0$ ,但与故障回路开关柜处零序电流方向相反。

2) 当接地变压器回路发生单相接地故障时,其开关柜处故障相电流等于零序电流  $3I_0$  的  $2/3$ ,

#### 参考文献

- [1] 郑开云. 超临界二氧化碳动力循环研发现状及趋势分析 [J]. 能源工程, 2017, (5): 31 - 37.
- [2] Megan Huang, Ching-Jen Tang, Aaron McClung. Steady State and Transient Modeling for the 10 MW<sub>e</sub> SCO<sub>2</sub> Test Facility Program[A]. The 6th International Symposium Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycles[C]. Pittsburgh, Pennsylvania, 2018.
- [3] Neill Weber. A thermoelectric device based on beta-alumina solid electrolyte [J]. Energy Conversion, 1974, 14(1): 1 - 8.
- [4] Terry Cole. Thermoelectric energy conversion with solid electrolytes [J]. Science, 1983, 221 (4614): 915 - 920.
- [5] 肖兰, 吴双应, 李友荣. 基于 AMTEC 的碟式太阳能热发电系统的可行性研究 [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 2010, 37(1): 53 - 56.
- [6] Darryn Fleming, Thomas Holschuh, Tom Conboy, et al. Scaling considerations for a multi-megawatt class supercritical CO<sub>2</sub> brayton cycle and commercialization [A]. Proceedings of ASME Turbo Expo 2012[C]. New York, 2013.
- [7] 郑开云, 黄志强. 基于超临界 CO<sub>2</sub> 循环的地热与太阳能混合系统研究 [J]. 新能源进展, 2018, 6(1): 62 - 68.
- [8] 张振兴, 武林林. 应用于钠冷快堆的超临界二氧化碳布雷顿循环系统 [J]. 硅谷, 2014, (10): 192 - 193.
- [9] 郑开云. 超临界二氧化碳布雷顿循环效率分析 [J]. 发电设备, 2017, 31(5): 305 - 309. 太阳能

其他两相电流等于零序电流  $3I_0$  的  $1/3$ , 两正常相电流相位相同, 并与故障相电流相位相反, 该处零序电流为零。

3) 当接地变压器高压开关柜处零序电流保护起不到该回路接地故障保护作用时, 需使该回路零序电流取自接地变压器高压绕组中性点, 且动作时限应与其他间隔零序电流保护相配合, 即延长一个时限。

4) 光伏发电时, 其进线发生单相接地故障时, 其正常相电流基本不变, 开关柜处反映的故障相电流大小及相位与故障前负荷电流的大小及功率因数有关, 开关柜处反映的零序电流与一般馈线故障时相同。

#### 参考文献

- [1] DL/T 5222-2005, 导体和电器选择设计技术规定 [S].
- [2] 徐玉琴, 杨浩, 李鹏. 含逆变型分布式电源的小电阻接地方式配电网单相接地故障分析 [J]. 电测与仪表, 2018, 55(16): 57 - 63. 太阳能