

CFETR 聚变发电厂概念设计技术研究

向魁^{1,✉}, 梁展鹏¹, 李华², 朱光涛¹

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;
2. 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: [目的] 基于中国聚变工程实验堆 (CFETR) 功率输出特性, 在聚变堆最大热功率 1.25 GW 条件下, 提出一种 CFETR 聚变发电厂概念设计方案。[方法] 针对 CFETR 聚变堆周期性长脉冲输出特性与常规岛设备连续稳定输入需求之间的矛盾, 采用储能技术方案以“削峰填谷”的方式实现 CFETR 聚变发电安全稳定运行。讨论了 CFETR 聚变水冷与氦冷两种不同包层方案下的储能以及一回路与二回路之间耦合与解耦运行模式的组合方案, 并通过方案比较, 给出 CFETR 聚变堆不同包层对应的最佳储能运行组合建议。[结果] 结果表明: 水冷包层、氦冷包层聚变堆分别对应的最佳组合方案是导热油+解耦储热方案与熔盐+耦合储热方案。[结论] 从常规岛侧而言, 相对于水冷包层方案, 采用氦冷包层方案的 CFETR 聚变发电厂技术经济性更好。研究提出的 CFETR 聚变发电厂概念设计方案对后续聚变发电技术研究以及工程设计, 具有较高的参考价值。

关键词: 中国聚变工程实验堆; 概念设计; 聚变; 托卡马克; 发电厂; 储能

中图分类号: TL4; TM623

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)02-0045-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Conceptual Design Technology Research of CFETR Fusion Power Plant

XIANG Kui^{1,✉}, LIANG Zhanpeng¹, LI Hua², ZHU Guangtao¹

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;
2. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China)

Abstract: [Introduction] Based on the power output characteristics of China Fusion Engineering Experimental Reactor (CFETR) and under the condition of the maximum thermal power 1.25 GW, this paper aims to provide a conceptual design scheme of CFETR fusion power plant. [Method] To resolve the confliction between the periodic long pulse output characteristics of CFETR fusion reactor and the continuous stable input requirements of conventional island equipment, the energy storage technology scheme was adopted to realize the safe and stable operation of CFETR fusion power generation in the way of "peak cutting and valley filling". We discussed energy storage under two different cladding schemes of CFETR fusion water cooling and helium cooling, as well as the combination scheme of coupling and decoupling operation modes between primary and secondary circuits. Through scheme comparison, the optimal energy storage operation combination corresponding to different cladding of CFETR fusion reactor was given. [Result] The results show that the best combination scheme of water-cooled cladding and helium cooled cladding fusion reactor is heat transfer oil + decoupled heat storage scheme and molten salt + coupled heat storage scheme. [Conclusion] From the conventional island side, compared with the water-cooled cladding scheme, the technical economy of CFETR fusion power plant with the helium cooled cladding scheme is better. The conceptual design scheme of CFETR fusion power plant has high reference value for the subsequent fusion power generation technology research and engineering design.

Key words: CFETR; conceptual design; fusion; tokamak; power plant; energy storage

收稿日期: 2022-01-07 修回日期: 2022-01-21

基金项目: 中国能建广东院科技项目“核聚变发电厂常规岛概念设计技术研究”(EV05571W)

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

人类社会的持续发展,离不开能源的持续供应。传统化石能源濒临枯竭,而且燃烧化石燃料给人类生存环境带来了巨大的负面影响。人类不断增长的能源需求与现有能源资源短缺、温室气体排放限制之间的矛盾日趋尖锐。核能是清洁能源,无论从经济上,还是环保上来说,都是一种不可或缺的替代能源。随着核能技术的发展成熟,以 AP1000、EPR、“华龙一号”等为代表的更安全、更先进的第三代核裂变能已逐渐成为当今世界重要能源来源之一^[1-2]。尽管如此,核裂变仍存在核燃料资源稀缺、核燃料利用率低、核泄漏安全隐患仍不能完全消除、核电厂选址困难、核废料处理昂贵且仍存在二次污染风险等等一系列潜在问题^[3-5]。

相对于核裂变,核聚变从燃料资源丰富性、利用安全性、环境友好性等方面具有得天独厚的优势。自 20 世纪中叶以来,随着托卡马克(Tokamak)装置的深入研究,可控核聚变技术取得了长足发展。其中以欧洲的 JET 装置、日本的 JT-60U 装置、美国的 TFTR 装置等为代表的大型托卡马克(Tokamak)装置,在等离子体温度、输出功率等方面都取得了突破性的进展,验证了可控核聚变的可行性^[6-8]。

中国核聚变研究起步虽晚,但随着“HL”环流系列、EAST 等为代表的自主化核聚变装置的研究成果突破,中国快速跻身于国际核聚变研究前列^[9-10]。中国聚变工程实验堆(CFETR, China Fusion Engineering Test Reactor, 简称 CFETR),将是中国在可控核聚变科研项目中的又一个科技制高点。CFETR 项目是中国自主设计和研制、以中国为主联合国际合作的重大科学工程。CFETR 聚变堆是介于 ITER 与 DEMO 之间的阶段性托卡马克装置,其首要任务是通过 D-T 反应实现可利用的聚变能,探索未来聚变能的开发与应用潜力^[11]。

目前核聚变在“自持燃烧”、“稳态运行”等方面仍存在一定不足,给核聚变在发电等领域的工程应用带来巨大挑战。根据 CFETR 中远期规划,预期本世纪中叶左右实现核聚变电站商用。现阶段对核聚变发电开展前期技术探索,将具有十分重要的前瞻性意义。

1 CFETR 聚变发电简介

1.1 CFETR 聚变发电基本原理

按规划,CFETR 聚变发电厂(Fusion Power Plant - FPP)将成为世界上第一个演示核聚变能发电的装置,目标是实现 1~2 GW 的聚变输出功率,发电功率可达到 350~800 MW。CFETR 聚变发电厂的设计意义是为未来建设可稳定运行的 GW 级聚变示范堆奠定基础。

如图 1 所示,CFETR 聚变发电原理,与裂变堆发电原理类似,CFETR 是通过托卡马克聚变装置来产生热量。托卡马克装置冷却回路分为一回路和二回路。一回路冷却剂穿过托卡马克包层(及偏滤器),经管道进入热交换器(蒸汽发生器),通过热换热器与二回路冷却剂在互不接触情况下完成热量交换。降温以后的一回路冷却剂经主泵又重新循环回到托卡马克内部。通过热交换器的换热,二回路产生高温高压的水蒸汽,推动汽轮机发电机组发电。降温以后的二回路冷却剂经循环水泵和凝结水泵,通过除氧器、给水泵,重新回到蒸汽发生器。

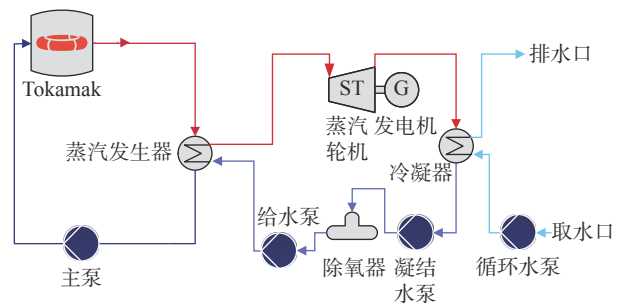


图 1 聚变发电厂原理图

Fig. 1 Schematic diagram of fusion power plant

1.2 CFETR 聚变发电边界条件

根据 CFETR 聚变堆初步预期及规划,CFETR 聚变发电边界条件假定如下:

CFETR 聚变堆额定热功率输出暂按 1.25 GW。

CFETR 聚变堆运行典型规律:以额定功率维持稳定运行 2 h,而后无功率输出,即聚变堆停止输出 20 min,周而复始;稳定输出时,功率有小幅波动,暂忽略不计。

CFETR 聚变堆的包层有两种选择方案:

方案一:采用水作为包层冷却介质。

方案二:采用氦气作为包层冷却介质。

两种包层方案下,CFETR 聚变堆一回路参数如表 1 所示:

表 1 不同包层的一回路参数

Tab. 1 Primary circuit parameters of different claddings

项目	水冷包层	氦冷包层
一回路介质	水	氦气
一回路出口参数	~325 °C/~15.5 MPa	~600 °C/~12 MPa
一回路入口参数	~290 °C	~300 °C

1.3 CFETR 聚变发电技术难点

与传统的火电、裂变堆核电等发电形式相比,聚变堆发电具有一定独特性。与常规发电模式最大不同之处在于,现阶段的聚变反应是具有一定周期性的、脉冲式的输出特性,且周而复始,即在聚变反应长脉冲能量输出结束之后,需要较长的停机等待时间为下一次反应输出做准备,如此反复。

图 2 是一个典型周期的聚变等离子体电流驱动方案。通过该图可以看出,在一个典型反应周期内,受限于当前物理模型、等离子体运行机制等综合因素影响,聚变反应过程中的等离子体电流难以做到长期稳定运行,是不连续的。而维持“燃料”稳定的等离子体电流状态是聚变反应的重要前提,一旦无法维持,核聚变反应应立即停止,能量输出也随之中断。简而言之,聚变堆能量输出具有周期性间断,热功率断崖式变化的特点。

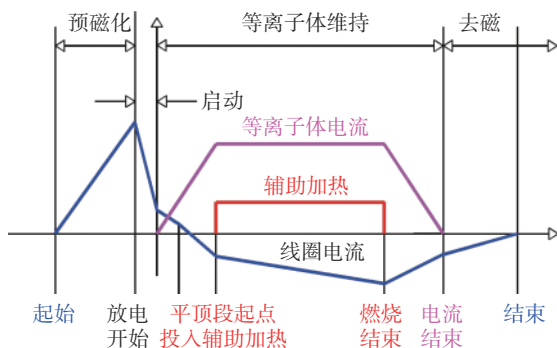


图 2 典型聚变等离子体电流驱动方案

Fig. 2 Typical fusion plasma current driving scheme

众所周知,汽轮发电机组是一套旋转机械设备与电气设备的组合装置,通过介质推动汽轮机旋转做功,带动发电机发电,将热能转换为电能。从汽轮发电机组运行安全、设备寿命、发电品质等角度而

言,这个转换过程对能量输入的品质要求必须是稳定且持续的。这使得聚变堆能量输出特性难以与常规汽轮发电机组运行要求相匹配。若要使得汽轮发电机组安全、稳定、持续地运行,就必须要求核聚变输出稳定性进一步提升,这也将是核聚变研究在现阶段需要不断攻克与提升的方向。

短期内 CFETR 聚变堆输出稳定性条件有限的情况下,如何解决汽轮发电机组安全、稳定、持续运行与 CFETR 聚变堆间断输出特性之间的矛盾,则是当前 CFETR 聚变发电厂概念设计亟需解决的技术问题,这也是当前 CFETR 在发电领域实现工程应用的主要“绊脚石”。

因而,CFETR 聚变发电概念设计阶段,主要探讨聚变堆与常规岛(汽轮发电机组)功率匹配以及稳定运行等关键问题的解决方案。为解决这个问题,CFETR 聚变发电厂需要配置对应的储能系统,以“削峰填谷”的方式将核岛能量间断、不稳定输出转变为连续、稳定输出,从而确保常规岛汽轮发电机组安全、持续、稳定运行。

2 CFETR 聚变发电厂概念设计方案

2.1 CFETR 聚变发电厂总体方案规划

2.1.1 项目规模

根据 CFETR 核聚变假定边界条件,本项目按一套额定功率 1.25 GW 的核岛来规划相应常规岛,本期考虑设计一套(1×350 MWe 级)常规岛主厂房(包括对应储能部分)。考虑后续核岛功率热功率存在提升空间,可预留一套同容量的常规岛主厂房扩建条件。

2.1.2 总体原则

1)现阶段采用一堆一机配备方案,机组容量选择与 CFETR 聚变堆运行特性相匹配。

2)核岛与常规岛之间配置一套储能缓冲系统,以确保发电厂持续稳定运行。

3)常规岛系统配置应符合 1×350 MWe 级聚变堆汽轮发电机组并网发电要求。

4)考虑核岛侧的独立性,常规岛相关系统暂不考虑与核岛侧系统的深度耦合,减少对核岛侧的影响。

5)在常规岛故障情况下,考虑核岛物理实验需求,为了不影响核岛持续运行,需配置一套独立的辅助散热系统,导出核聚变热量。

6)常规岛机组尽量采用常规的、成熟的技术路线。

2.1.3 总体方案

CFETR 核聚变发电厂总体方案如图 3 所示,除核岛一回路以及常规岛二回路系统外,还包括储能缓冲系统、辅助散热系统等。

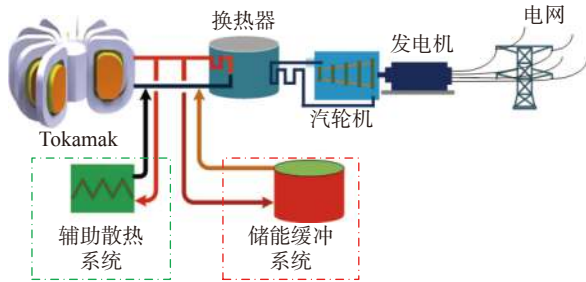


图 3 核聚变发电厂总体方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of overall scheme of nuclear fusion power plant

1) 储能缓冲系统

无论是运行间隔还是等离子体破裂,都使得聚变堆一回路输出能量断崖式下跌,会进一步导致汽轮机的进汽参数急剧下降,无法满足机组持续稳定运转要求,最终会导致停机或者设备损坏。与此同时,这种模式下发电品质也无法保证,对电网冲击危害巨大。这种情况,无论是对机组寿命还是发电品质而言,均是十分不利的。因而,针对核岛功率输出的不稳定性,CFETR 聚变发电厂需考虑设置中间储能缓冲系统。

在 CFETR 聚变稳定期时,通过储能缓冲系统,将 CFETR 聚变能中的一部分能量先预留起来,临时存储于储能缓冲系统中(简称“储能”过程),其余用于发电;而 CFETR 聚变间歇期时,CFETR 无能量输出,此时将之前预先存储于储能缓冲系统中的能量释放出来(简称“释能”过程),以持续输出至汽轮发电机组用于稳定发电。在储能与释能环节,输出至汽轮发电机组的功率应是平衡稳定的。即无论 CFETR 是在稳定期还是在间歇期,储能缓冲系统以“削峰填谷”方式解决核岛与常规岛能量传递特性匹配问题,确保典型周期内汽轮发电机组的输入能量是稳定且持续的,进而实现聚变发电厂能够安全、平稳运行,并生产出高品质稳定电力。

2) 辅助散热系统

现阶段 CFETR 在探索发电工程应用的过程中,还需肩负着科研试验任务。在 CFETR 运行期间,核岛物理实验需求不得受到常规岛影响而停机,即要求考虑在常规岛机组无论是停机检修还是意外故障状态下,核岛仍能继续运转而不受影响。因此,为满足核岛不间断运行的要求,常规岛侧还需考虑额外设置一套辅助散热系统。

在汽轮发电机组停机时,启用辅助散热系统,旁路常规岛汽轮发电机组,即通过在一回路侧并联辅助散热系统,通过辅助散热系统的换热设备持续导出核聚变热量,确保核岛持续运行。

2.2 CFETR 聚变发电厂储能方案选择

针对 CFETR 的输出特性以及不同包层设计方案,需对储能缓冲系统的储能介质选择、储能容量计算、储能运行模式等方面予以分析探讨。

2.2.1 储能介质选择

对于储能系统而言,储能介质的选择至关重要。储能介质一方面要物性稳定安全、经济可靠,另外一方面储能介质特性与 CFETR 聚变堆一回路参数相匹配,即能适应一回路温度变化范围。按照储热方式的不同,储能介质可以分为导热油/熔盐/液态金属/混凝土等为代表的显热储热材料、潜热储热(相变储热)材料以及热化学储热材料三类。其中显热储热材料是利用材料自身在温度升高和降低过程中热能的变化进行热能的储存/释放,显热储热材料主要有水、导热油、熔融盐等。显然储热材料是目前应用最为广泛、安全性最高、成本最低的储热材料^[12]。

根据 CFETR 聚变堆在一回路冷却包层预想方案,分为水冷包层与氦冷包层。不同冷却包层对应一回路温度范围不同,对应储能介质选择也不同。对于 CFETR 水冷包层方案,一回路温度范围偏低(290~325℃),可考虑采用导热油作为中间储能介质,且常规岛侧汽轮机主蒸汽参数可参考采用压水堆电站典型蒸汽参数(主汽温度按~260℃);对于 CFETR 氦冷包层方案,一回路温度范围较高(300~600℃),可考虑采用熔盐作为中间储能介质,且常规岛侧汽轮机主蒸汽参数可参考采用高温气冷堆核电站典型蒸汽参数(主汽温度按~525℃)^[13-15]。

参考光热发电等储能应用工程经验,本项目采用间接式双罐显热储热形式^[14,16]。

2.2.2 储能容量计算

根据 CFETR 聚变堆典型运行模式, 在核岛典型运行时间周期内, CFETR 聚变堆额定热功率能够维持稳定运行时间为 2 h, 零功率输出时间则为 20 min。

经计算, 典型运行周期中, 核岛侧、储能侧、常规岛侧状态及参数罗列如表 2 所示:

表 2 CFETR 储能功率参数表
Tab. 2 CFETR energy storage power parameter table

时段	核岛侧		储能侧			常规岛侧	
	状态	功率/MW	状态	功率/MW	理论容量/MWh	状态	功率/MW
2 h	稳定期	1 250	储能	178.57	357.14	稳定输入	1 071.43
$\frac{1}{3}$ h	间歇期	0	释能	1 071.43			

注: (1)本表格计算中, 为了核算理论储能容量, 暂忽略储能系统的转换效率以及散热损失影响。故表中常规岛侧输入功率数据未扣除以上因素。在估算电厂发电量以及效率时, 需考虑相关影响; (2)对于储能实际选型容量, 鉴于 Tokamak 运行期功率输出波动以及系统本身损耗等影响, 需额外考虑一定裕量。

2.2.3 储能运行模式

核岛与常规岛之间设置有储能缓冲系统, 而储能缓冲系统既可与常规岛并联运行, 也可与常规岛串联运行, 即存在两种储能运行模式。其中, 储能缓冲系统与常规岛并联模式, 即核岛与储能缓冲系统、常规岛之间可直接换热, 简称为耦合运行模式; 储能缓冲系统与常规岛串联模式, 即核岛只能与储能缓冲系统换热, 不能与常规岛直接换热, 简称为解耦运行模式。

考虑核岛与常规岛是否可以解耦运行, 储能缓冲系统储能运行模式有两种可选方案(以导热油为例)。

耦合运行模式如图 4 所示, 具体运行方式如下:

1)核岛一回路: Tokamak 运行期, 被 Tokamak 加热后的一回路高温水一部分直接进入蒸汽发生器加热水产生蒸汽发电, 另一部分进入换热器加热从冷油罐来的低温导热油, 蒸汽发生器返回的低温水和换热器换热后的低温水汇合, 再进入 Tokamak 进行下一次加热。Tokamak 运行间歇期, 从 Tokamak 出来的一回路水全部进入换热器被热油罐来的高温导热油加热, 加热后的一回路高温水进入蒸汽发生器加热水产生蒸汽发电, 然后返回 Tokamak 温度继续下一个循环。

1)本表格计算中, 为了核算理论储能容量, 暂忽略储能系统的转换效率以及散热损失影响。故表中常规岛侧输入功率数据未扣除以上因素。在估算电厂发电量以及效率时, 需考虑相关影响。

2)对于储能实际选型容量, 鉴于 Tokamak 运行期功率输出波动以及系统本身损耗等影响, 需额外考虑一定裕量。

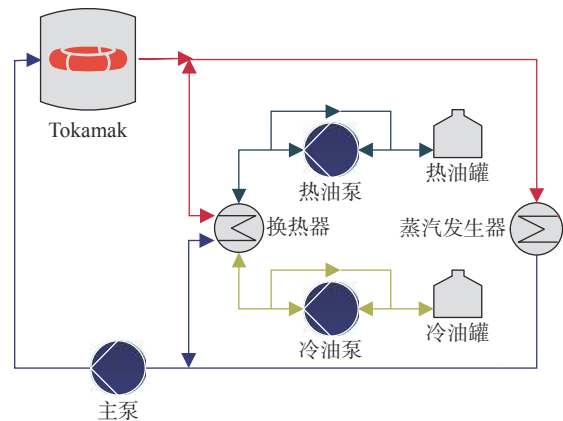


图 4 核岛与常规岛耦合运行模式

Fig. 4 Coupling operation mode of nuclear island and conventional island

2)储热工质回路: Tokamak 运行期, 低温导热油通过冷油泵输送至换热器, 经一回路水加热变成高温导热油后进入热油罐蓄存起来。Tokamak 运行间歇期, 高温导热油通过热油泵输送至换热器, 对一回路水加热后变成低温导热油后进入冷油罐蓄存起来。

解耦运行模式如图 5 所示, 具体运行方式如下:

1)核岛一回路: Tokamak 运行期, 被 Tokamak 加热后的一回路高温水全部进入换热器加热从冷油罐来的低温导热油, 换热器出口的低温水返回 Tokamak

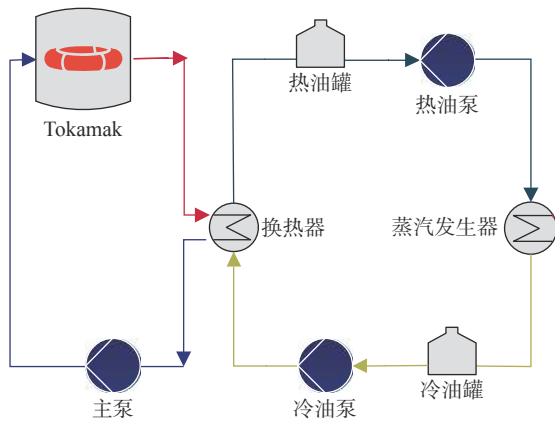


图5 核岛与常规岛解耦运行模式

Fig. 5 Decoupled operation mode of nuclear island and conventional island

进行下一次加热。Tokamak 运行间歇期, 仅一回路循环保持循环工作(核岛的要求), 而换热器油侧被隔离。

2) 储热工质回路: Tokamak 运行期, 低温导热油通过冷油泵输送至换热器, 经一回路水加热变成高温导热油后进入热油罐蓄存起来。无论在 Tokamak 运行期还是 Tokamak 运行间歇期, 只要油罐液位正常, 高温导热油都通过热油泵输送至蒸汽发生器加热水产生蒸汽发电。

从对发电效率的影响来看: 在 Tokamak 运行期, 耦合运行模式的一回路高温水与蒸汽发生器直接换热, 不存在其他损失; 而解耦运行模式必须经过换热器的一次换热, 存在焓损失。在 Tokamak 运行间歇期则是耦合运行模式的一回路高温水必须经过换热器的两次换热, 焓损失较大; 而解耦运行模式只经过了储热过程的一次换热, 焓损失较小。总体上, 由于 Tokamak 运行期持续时间较长, 故此耦合运行模式对应的整体发电效率会高于解耦运行模式。

从工质用量来看: 耦合运行模式的储热温度上限受 Tokamak 出口温度(325 °C)和换热器端差限制, 下限受 Tokamak 入口温度(290 °C)和换热器端差限制; 在解耦运行模式中, 冷油罐的温度不受 Tokamak 回水温度的限制, 可以取得更低、接近蒸汽发生器的给水温度(~ 226 °C), 储热系统的储热温差更大。由于解耦运行模式中储热温差远大于耦合运行模式, 因此该模式中储罐更小、储热工质用量更少, 储热区的占地面积更小。

2.2.4 不同包层方案下储能组合方案推荐

不同包层方案下, 储能介质以及运行模式存在不同组合选择如表3所示。

表3 不同包层储能运行模式组合
Tab. 3 Combination of different cladding energy storage operation modes

项目	水冷包层		氦冷包层	
储能介质	导热油		熔盐	
运行模式	耦合运行	解耦运行	耦合运行	解耦运行

对于导热油储能系统而言, 由于耦合运行模式储能系统中储能与释能环节存在二次换热, 换热端差损失相对较大。对于导热油储能而言, 由于水冷包层温差限制(一回路参数温度低、温差小), 储能系统本身可有效利用的储能温差范围本来就小, 因而换热温差对导热油介质用量影响极为敏感。在同样的释能功率条件下, 相对于解耦方案而言, 耦合运行方案中导热油介质用量大大增加。储热方案中投资占比最大部分其中之一就是工质用量。初步估算, 采用耦合运行方案相比解耦运行方案, 按当前市场价计需多出6亿元的导热油购置初投资。

因而从工程初投资、占地面积等方面考虑, 核聚变水冷包层方案对应优先推荐解耦运行的导热油储能方案。

对于氦冷包层而言, 由于氦冷包层一回路工质、储热工质的运行温度区间以及物性有别于水冷包层, 两种储热方案之间的配置差异和水冷包层的情况有所不同。相对于水冷包层, 氦冷包层方案中一回路参数温度高、温差大, 使得一回路以及储能的介质用量相对较少, 对应设备配置以及介质投资成本, 且在耦合与解耦两种运行模式下的差异影响敏感性相对较小。考虑系统的高效性, 核聚变氦冷包层方案对应优先推荐耦合运行的熔盐储能方案。

2.3 CFETR 聚变发电厂技术方案比较

根据 CFETR 聚变发电设计原则以及假定边界条件, 结合推荐的储能系统配置, 对 CFETR 聚变发电厂汽轮发电机组方案予以评估。其中, 针对水冷包层方案与氦冷包层方案常规岛方案综合对比如表4所示。

从目前发电效率而言, 水冷包层对应的发电效率较低, 而氦冷包层对应的发电效率相对较高, 具有

表4 CFETR 聚变发电不同包层技术方案综合对比

Tab. 4 Comprehensive comparison of different cladding technical schemes for CFETR fusion power generation

项目	水冷包层	氦冷包层
储能系统	采用导热油作为储能介质, 储能温度低, 储能工质需求量大, 造价高	采用熔盐作为储能介质, 储能温度较高, 储能工质需求量相对较少, 造价较低
工艺系统	主汽: 饱和蒸汽, 参数低 配置汽水分离再热器	主汽: 过热蒸汽, 参数较高 无汽水分离再热器
性能	发电功率: ~345 MW 发电效率: 33.9% 性能一般	发电功率: ~418 MW 发电效率: 41% 性能较好
占地	储能占地较大	储能占地较小(-11.2%)
造价	较高	较低(-15.9%)

一定竞争优势。另外, 单纯从常规岛的角度来看, 氦冷包层方案在常规岛侧(包括储能)的造价、占地等方面是优于水冷包层方案的。

若从整体 CFETR 聚变堆发电厂总体来看, 因氦冷温度达到 600 °C 以上, 需注意核岛材料选择、设备设计等方面因素势必会影响整体经济性, 相关结论尚需结合核岛侧情况予以综合评判。

3 结论

本文基于中国聚变工程实验堆(CFETR)功率输出特性, 在聚变堆额定功率 1.25 GW 条件下, 提出一种实现 1×350 MWe 级聚变堆发电厂概念设计方案。该方案通过采用储能缓冲系统, 即以“削峰填谷”的方式将 CFETR 聚变堆周期性长脉冲的不稳定输出转化为持续的稳定输出, 以实现 CFETR 聚变发电安全稳定运行。

CFETR 聚变堆存在两种冷却方案, 即水冷包层与氦冷包层方案, 由于两种不同包层方案下聚变堆一回路参数差异较大, 对储能缓冲系统的选择也不同。水冷包层推荐采用导热油解耦储能方案, 氦冷包层推荐采用熔盐耦合储能方案。

最后综合对比, 其中氦冷发电技术方案在发电性能、占地、造价等方面, 单从常规岛侧来说, 均具有一定优势。

本文提出了 CFETR 聚变发电初步技术方案, 属于前期概念设计工作, 距离面向工程应用与方案落地尚存在一定差距。从聚变发电厂整体而言, 常规岛与核岛之间的协同性、耦合性等系统性工程

技术细节问题尚需探讨。例如, 储能系统与聚变堆能量输出过程运行匹配问题、常规岛侧辅助系统与核岛辅助系统整合优化问题、核岛与常规岛之间控制协同问题等方面尚待进一步研究, 以为聚变发电厂技术方案工程实践提供依据。

CFETR 核聚变发电厂概念设计, 是现阶段 CFETR 在发电领域开展工程技术应用研究的一次具有前瞻性意义的初步探索, 希望为后续聚变发电技术深入研究以及工程应用方案提供一点参考。

参考文献:

- [1] 赵琛, 王一帆, 李思颖, 等. 中国未来核电发展趋势与关键技术 [J]. 能源与节能, 2020(11): 46-49+67. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0802.2020.11.021.
ZHAO C, WANG Y F, LI S Y, et al. Development trend and key technologies of nuclear power in China in the future [J]. Energy and Energy Conservation, 2020(11): 46-49+67. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0802.2020.11.021.
- [2] 欧阳予. 世界核电技术发展趋势及第3代核电技术的定位 [J]. 发电设备, 2007(5): 325-331. DOI: 10.3969/j.issn.1671-086X.2007.05.001.
OU Y Y. Development tendency of the world's nuclear power generating technique and appraisal of the 3rd generation's achievement [J]. Power Equipment, 2007(5): 325-331. DOI: 10.3969/j.issn.1671-086X.2007.05.001.
- [3] 於凡, 张永兴, 杨东. 我国核能发展需要关注的几个重要问题 [J]. 辐射防护, 2010, 30(5): 265-271.
YU F, ZHANG Y X, YANG D. Several important issues should be of attention during China's nuclear power development [J]. Radiation Protection, 2010, 30(5): 265-271.
- [4] 谭馨怡. 浅析中国核能发展状况及展望 [J]. 中国设备工程, 2021(19): 235-236. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2021.19.142.
TAN X Y. Analysis on the development status and prospect of nuclear energy in China [J]. China Plant Engineering, 2021(19): 235-236. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2021.19.142.
- [5] 邢继, 王辉, 吴宇翔, 等. 压水堆技术后续发展的思考 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(12): 7. DOI: 10.11990/jheu.202108023.
XING J, WANG H, WU Y X, et al. Consideration on follow-up development of pressurized water reactor technology [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(12): 7. DOI: 10.11990/jheu.202108023.
- [6] 杨青巍, 丁玄同, 严龙文, 等. 受控热核聚变研究进展 [J]. 中国核电, 2019, 12(5): 507-513. DOI: 10.12058/zghd.2019.05.507.
YANG Q W, DING X T, YAN L W, et al. Study and progress of controlled thermonuclear fusion carried out by China national nuclear corporation [J]. China Nuclear Power, 2019, 12(5): 507-513. DOI: 10.12058/zghd.2019.05.507.

- [7] 丁厚昌, 黄锦华. 受控核聚变研究的进展和展望 [J]. 自然杂志, 2006(3): 143-149. DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2006.03.004.
DING H C, HUANG J H. Progress and prospect of controlled nuclear fusion [J]. Chinese Journal of Nature, 2006(3): 143-149. DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2006.03.004.
- [8] 张微, 杜广, 徐国飞. 核聚变发电的研究现状与发展趋势 [J]. 产业与科技论坛, 2019, 18(8): 58-60. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5641.2019.08.030.
ZHANG W, DU G, XU G F. Research status and development trend of nuclear fusion power generation [J]. Industrial & Science Tribune, 2019, 18(8): 58-60. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5641.2019.08.030.
- [9] 李建刚. 我国超导托卡马克的现状与发展 [J]. 中国科学院院刊, 2007(5): 404-410. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2007.05.010.
LI J G. Present status and development of superconducting tokamak research in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2007(5): 404-410. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2007.05.010.
- [10] 李建刚. 托卡马克研究的现状及发展 [J]. 物理, 2016, 45(2): 88-97. DOI: 10.7693/wl20160203.
LI J G. The status and progress of tokamak research [J]. Physics, 2016, 45(2): 88-97. DOI: 10.7693/wl20160203.
- [11] 张国书. 核聚变能源的开发现状及新进展 [J]. 中国核电, 2018, 11(1): 30-34. DOI: 10.12058/zghd.2018.01.030.
ZHANG G S. Status and recent progress in the development of nuclear fusion energy [J]. China Nuclear Power, 2018, 11(1): 30-34. DOI: 10.12058/zghd.2018.01.030.
- [12] 冷光辉, 曹惠, 彭浩, 等. 储热材料研究现状及发展趋势 [J]. 储能科学与技术, 2017, 6(5): 1058-1075. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2017.00094.
LENG G H, CAO H, PENG H, et al. The new research progress of thermal energy storage materials [J]. Energy Storage Science and Technology, 2017, 6(5): 1058-1075. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2017.00094.
- [13] 何军. 熔盐和导热油蓄热储能技术在光热发电中的应用研究 [J]. 节能与环保, 2019(2): 100-101. DOI: 10.3969/j.issn.1009-539X.2019.02.047.
HE J. Application of molten salt and heat conducting oil thermal storage technology in photothermal power generation [J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2019(2): 100-101. DOI: 10.3969/j.issn.1009-539X.2019.02.047.
- [14] 汪琦, 俞红啸, 张慧芬. 熔盐和导热油蓄热储能技术在光热发电中的应用研究 [J]. 工业炉, 2016, 38(3): 34-38+48. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6988.2016.03.009.
WANG Q, YU H X, ZHANG H F. Application research of molten salt and heat conduction oil regenerative energy storage technology in solar-thermal power generation [J]. Industrial Furnace, 2016, 38(3): 34-38+48. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6988.2016.03.009.
- [15] 丁玉龙, 来小康, 陈海生. 储能技术及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
DING Y L, LAI X K, CHEN H S. Energy storage technology and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018.
- [16] 汪琦, 俞红啸, 张慧芬. 太阳能光热发电中熔盐蓄热储能循环系统的设计开发 [J]. 化工装备技术, 2014, 35(1): 11-14. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7251.2014.01.003.
WANG Q, YU H X, ZHANG H F. Design and development of the thermal and energy storage circulating system with molten salts for solar thermal power generation [J]. Chemical Equipment Technology, 2014, 35(1): 11-14. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7251.2014.01.003.

作者简介:



向魁

向魁 (第一作者, 通信作者)

1984-, 男, 湖北武汉人, 热机主任工程师, 华中科技大学热能工程硕士, 主要从事发电厂热机设计研究工作 (e-mail) xiangkui@gedi.com.cn。

梁展鹏

1983-, 男, 广东佛山人, 高级工程师, 清华大学热能工程博士, 主要从事能源经济研究与发电厂热机设计 (e-mail) 37653169@qq.com。

李华

1984-, 男, 湖北黄冈人, 助理研究员, 工学博士, 主要从事高压电源、电磁兼容与大功率直流开关技术研究 (e-mail) lihua@ipp.ac.cn。

朱光涛

1971-, 男, 吉林长春人, 副总工程师, 正高级工程师, 东北电力学院电厂热能动力工程专业硕士, 主要从事发电厂设计研究和技术监督工作 (e-mail) zhuguangtao@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)