

引用格式: 林燕, 李斌, 罗浩东, 等. 热核聚变发电厂储能系统运行模式研究 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(3): 1-7. LIN Yan, LI Bin, LUO Haodong, et al. Research on operation mode of energy storage system for thermonuclear fusion power plant [J]. Southern energy construction, 2024, 11(3): 1-7. DOI: 10.16516/j.ceec.2023-327.

热核聚变发电厂储能系统运行模式研究

林燕[✉], 李斌, 罗浩东, 向魁, 朱光涛

(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)

摘要: [目的] 核聚变作为一种新型核能利用形式, 其清洁绿色特性被视为人类未来的“终极能源”, 也是我国在能源发展道路上的必经之路。在热核聚变发电厂中, CFETR (China Fusion Engineering Test Reactor, 中国聚变工程实验堆) 聚变反应堆具有一定周期性、脉冲式的输出特性, 而汽轮发电机组的运行是稳定、连续的, 因此核岛和常规岛之间需配有储能岛以进行储能缓冲; 为实现其储能缓冲的功能, 储能系统需选择合适的运行模式。[方法] 核岛与常规岛耦合运行或解耦运行, 对应着储能系统不同的运行模式; 文章基于 CFETR 核岛侧的功率输出特性, 从系统配置、设备选型和运行控制等方面对储能系统运行模式的不同方案进行分析和对比。[结果] 研究表明, 核岛与常规岛的解耦运行模式在常规岛发电效率、设备设计技术成熟性和机组运行控制上都更具优势, 因此推荐热核聚变发电厂储能系统采用解耦运行模式。[结论] 储能系统解耦的运行模式方案大都采用成熟技术, 可进行规模化的商业应用, 因此可为实现热核聚变发电厂的商业化设计提供支撑。

关键词: 核聚变; 核电厂; 储能; 运行模式

中图分类号: TL4; TK02

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)03-0001-07

DOI: 10.16516/j.ceec.2023-327

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Research on Operation Mode of Energy Storage System for Thermonuclear Fusion Power Plant

LIN Yan[✉], LI Bin, LUO Haodong, XIANG Kui, ZHU Guangtao

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] As a new form of nuclear energy utilization that is green and clean, nuclear fusion is regarded as the "ultimate energy" of mankind in the future and also as an inevitable route for China's energy development. In thermonuclear fusion power plants, China Fusion Engineering Test Reactors (CFETR) have periodic and pulse energy output, while turbine generator units operate stably and continuously. Therefore, an energy storage island is required between a nuclear island and a conventional island for energy storage buffering. To realize such a buffering function, a suitable operation mode needs to be selected for the energy storage system. [Method] The coupling and decoupling operation of the nuclear island and conventional island corresponded to different operation modes of the energy storage island. Based on the power output characteristics of CFETR, different operation mode schemes were analyzed and compared from aspects such as system configuration, equipment design and operation control. [Result] The results show that the decoupling operation mode of a nuclear island and conventional island is superior in terms of power generation efficiency, maturity of equipment design technology and operation control of generator units, so it is recommended to adopt the decoupling operation mode for the energy storage system in a thermonuclear fusion power plant. [Conclusion] Most of the decoupling operation mode schemes for the energy storage system adopt mature technologies, so they can be put into commercial applications on a large scale and provide support

收稿日期: 2023-11-13 修回日期: 2023-12-15

基金项目: 中国能建“揭榜挂帅”项目“热核聚变发电岛概念设计研究”(CEEC2021-ZDYF-08)

for the commercial design of thermonuclear fusion power plants.

Key words: nuclear fusion; nuclear power plant; energy storage; operation mode

2095-8676 © 2024 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/>).

0 引言

在全球应对气候变化行动中,能源结构绿色低碳转型是最重要的措施,具有清洁低碳、稳定高效优势的核能在推动能源转型中的作用愈加受到重视^[1]。原子核反应中释放的能量为核能,包括裂变能、聚变能和衰变能,可大规模应用的为裂变能和聚变能,目前用于发电的核能是核裂变能^[2]。不同于核裂变产生的高放射性核废料存在安全隐患的问题,核聚变产生的唯一废料氦气不具有放射性,是一种清洁绿色能源,被视为人类未来的“终极能源”^[3-5]。

聚变堆是能受控制释放聚变能量的装置。1983年我国就提出了“热堆-快堆-聚变堆”的核能发展“三步走”路径^[6-7]。核聚变作为一种新型核能利用形式,是我国在能源发展道路上的必经之路。由于具有优良的等离子体约束性能,目前托卡马克装置被认为是最有可能率先成功的受控热核聚变装置^[8-10]。中国聚变工程实验堆(China Fusion Engineering Test Reactor, CFETR)是我国在国际热核聚变实验反应堆(International Thermonuclear Experiment Reactor, ITER)技术的基础上,开展的下一代超导聚变堆研究的重大项目;计划到 2035 年建成试验堆,2050 年开始建设商业聚变示范电站^[11-12]。

热核聚变发电厂工程的目的是实现托卡马克聚变堆输出热能、热能转换成电能、并把电能输送到电网。托卡马克装置由于线圈磁体伏秒数的限制,现阶段只能以脉冲模式运行,随着加热能力及物理模式的发展,等离子体脉冲时长已延长到分钟量级,稳态高约束模式放电时间可达 400 s 以上^[13-16]。CFETR 聚变反应堆具有周期性、脉冲式的输出特性。而常规岛内汽轮发电机组的典型运行模式是稳定、连续的。因此需要在聚变反应堆核岛与常规岛间设置储能缓冲系统(中间回路),将核岛间断的能量输出调整为连续的能量输出,再传递给汽轮机组发电。为实现其储能缓冲的功能,储能系统需选择合适的运行模式;文章对储能系统不同的运行模式进行深

入分析研究,从而得到最优的运行模式。

1 发电厂运行特性及容量

1.1 核岛运行特性

根据我国热核聚变堆的预期及当前规划,现阶段热核聚变发电厂的运行特性假定如下。核岛侧能量输出为:

1)核岛的额定输出热功率为 1.25 GW。

2)核岛的典型运行模式为:以额定热功率运行 2 h,而后零功率输出 20 min,以此反复运行;功率运行时略有小幅波动,此阶段暂不考虑。

3)采用氦气作为包层冷却介质,即核岛一回路工质为氦气;蓄热换热中氦气侧的参数为 300 °C(入口)/600 °C(出口)/12 MPa。

针对每个托卡马克装置配置一套储能装置、一套汽轮发电机组,即一堆一储一机配置方案。中间回路相关的系统、设备及附属设施统称为储能岛。常规岛和储能岛尽量采用当前成熟技术,以实现规模化商业应用。

1.2 发电厂能量转换

热核聚变发电厂发电过程中的能量转换基本环节如图 1 所示。

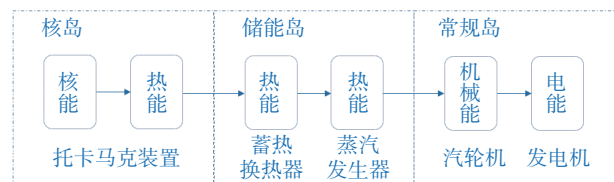


图 1 核聚变发电厂能量转换过程

Fig. 1 Energy transformation process in nuclear fusion power plant

托卡马克装置聚变反应产生的核能在加热核岛回路冷却剂氦气的过程中转换为氦气的热能(内能),实现核能到热能的转变。

核岛回路中的高温氦气经托卡马克加热后出核岛进入储能岛蓄热换热器,将储能回路中的储热介质加热为高温。核岛回路氦气的热能转换为储能回路储热介质的热能。被冷却后的氦气回到核岛。

储能回路的高温储热介质通过蒸汽发生器释放热量, 加热常规岛回路的水产生高温蒸汽, 即储能回路的热能转换为常规岛回路水蒸汽的热能。放热后的低温储热介质由储能泵送回到蓄热换热器中再次储热, 以此循环。

常规岛回路高温高压水蒸汽, 进入汽轮机做功, 即热能转换为机械能。做功后的乏汽在凝汽器中凝结成水, 经给水泵送回到蒸汽发生器中, 被高温储热介质加热再次产生高温水蒸汽。

汽轮机带动发电机转动产生电量, 对外输送, 即机械能转换为电能。

1.3 项目容量

根据核聚变堆的典型运行模式, 定义 T 为一个运行周期的时长, 其中 $0 \sim T_{op}$ 时段内托卡马克输出 100% 功率 P_{ni} , $T_{op} \sim T$ 时段内托卡马克输出功率为 0。经过储能系统调节后进入常规岛的能量功率应该是连续、稳定的, 即在 T 周期内均为 P_{ci} , 由能量平衡可得以下关系:

$$P_{ni}T_{op} = P_{ci}T \quad (1)$$

在托卡马克运行期, 即 $0 \sim T_{op}$ 时段内储能系统处于储能模式, 如果核岛直接给常规岛传递热量, 同时将多余热量传递给储能系统, 此时储能系统充能功率最小:

$$P_{si,in} = P_{ni} - P_{ci} = \left(1 - \frac{T_{op}}{T}\right)P_{ni} \quad (2)$$

在托卡马克运行期, 若核岛能量都由储能系统吸收, 则此时储能系统充能功率最大:

$$P_{si,in} = P_{ni} \quad (3)$$

在托卡马克间歇期, 即 $T_{op} \sim T$ 时段内储能系统处于释放模式, 其放能功率为:

$$P_{si,out} = P_{ci} = \frac{T_{op}}{T}P_{ni} \quad (4)$$

储能系统理论所需储能容量为:

$$Q_{si} = P_{si,in}T_{op} = \left(1 - \frac{T_{op}}{T}\right)T_{op}P_{ni} \quad (5)$$

根据核岛的边界条件, 各参数计算汇总如表 1 所示。

由表 1 可知, 未考虑损耗的理论计算下, 核岛通过储能系统释放的平均能量为 1 071.4 MW, 按发电效率为 40% 进行估算, 常规岛汽轮发电机组为 400 MW 等级; 储能系统的储能容量为 357.1 MWh, 充能

表 1 储能岛及发电机组容量

Tab. 1 Capacity of energy storage island and conventional island

参数	数值
核岛运行时额定输出功率/MW	1 250
一个运行周期内核岛输出额定功率时间/min	120
一个运行周期/min	140
常规岛额定输入功率/MW	1 071.4
储能系统充能功率/MW	178.6 ~ 1 250
储能系统容量/MWh	357.1
储能系统放能功率/MW	1 071.4
发电机额定功率/MW	428

功率为 178.6 ~ 1 250 MW, 放能功率为 1 071.4 MW。

2 储能运行模式

2.1 储能系统简介

依据核岛回路中的氦气参数, 储能岛推荐采用显热储热形式、储热介质采用熔融盐。熔融盐是目前在光热电站中普遍应用、较为成熟的中高温储热介质。本项目储能岛采用间接式双罐储热系统^[17-19], 间接式双罐储热系统运行控制简单明确, 是当前聚变发电研究中的主流储热方案^[20-22]。

间接式双罐储热系统可分为两种形式, 如图 2 和图 3 所示。二者运行模式的主要区别在于核岛与

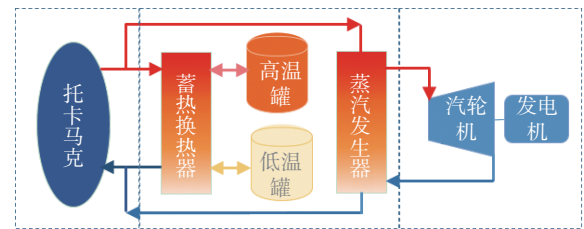


图 2 核岛与常规岛耦合运行

Fig. 2 Coupling operation of nuclear island and conventional island

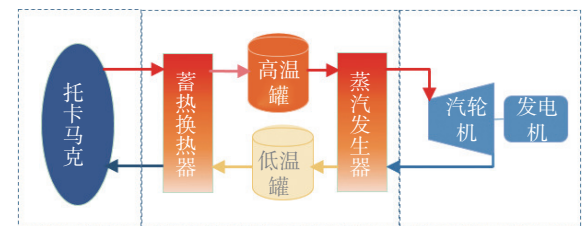


图 3 核岛与常规岛解耦运行

Fig. 3 Decoupling operation of nuclear island and conventional island

常规岛是否可以解耦运行。方案一如图 2 所示,核岛与常规岛是耦合运行的;方案二如图 3 所示,核岛与常规岛是解耦运行的。

储能岛由蓄放热系统、蒸汽发生系统和防凝、排盐等附属系统组成,主要设备包括蓄热换热器、蒸汽发生器、高温罐、低温罐和冷、热盐泵等。

2.2 储能系统运行模式

图 2 所示方案一的主要特点是核岛回路与常规岛朗肯循环有直接的换热。方案一与现有槽式光热电站的主流储热方案类似,只是槽式光热电站中储热介质采用导热油。方案一的运行方式如下:

1) $0 \sim T_{op}$ 期

被托卡马克加热后的高温氦气一分为二,从核岛出来后一路进入蒸汽发生器与水非接触性换热产生高温蒸汽,蒸汽去往常规岛发电;另一路进入蓄热换热器与从低温储罐经冷盐泵送入的液态熔盐非接触性换热、加热熔盐,高温熔盐进入高温储罐储存;两路氦气分别被冷却后,汇合重新回到核岛进入托卡马克。

2) $T_{op} \sim T$ 期

氦气从核岛出来后进入蓄热换热器与从高温储罐经热盐泵送入的液态熔盐非接触性换热;放热后的熔盐回到冷盐罐储存;被加热后的高温氦气进入蒸汽发生器与水非接触性换热产生高温蒸汽、蒸汽去往常规岛发电;被冷却后的氦气回到核岛进入托卡马克。

图 3 所示方案二的主要特点是核岛回路与常规岛朗肯循环没有直接的换热,两者之间的所有热量传递都经过储热系统。方案二与现有塔式光热电站的主流储热方案类似。方案二的运行方式如下:

1) $0 \sim T_{op}$ 期

被托卡马克加热后的高温氦气从核岛出来后进入蓄热换热器与经冷盐泵送入的液态熔盐非接触性换热、加热熔盐;氦气被冷却后回到核岛进入托卡马克;高温熔盐进入高温储罐储存;同时部分高温熔盐经热盐泵送往蒸汽发生器与水非接触性换热、产生高温蒸汽,蒸汽去往常规岛发电;熔盐放热后回到低温储罐。

2) $T_{op} \sim T$ 期

氦气从核岛出来后进入蓄热换热器,此时由于蓄热换热器熔盐侧管道被隔离,氦气未经换热又重

新回到核岛进入托卡马克;高温储罐中储存的剩余高温熔盐经热盐泵送往蒸汽发生器与水非接触性换热、产生高温蒸汽,蒸汽去往常规岛发电;熔盐放热后回到低温储罐。

2.3 运行模式方案对比

2.3.1 常规岛回路参数

方案一在 $T_{op} \sim T$ 核岛零功率输出期间,蓄热后的熔盐需再换热给氦气,通过氦气在蒸汽发生器中传热产生高温水蒸汽。即热量传递过程经过氦气、熔盐、氦气、水蒸气,经过了 3 次换热;而方案二中,热量传递过程经过氦气、熔盐、水蒸气,只经过两次换热。因此,相比方案一,方案二中常规岛的主蒸汽可实现更高的温度。考虑换热器最小 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的端差,即方案一的主蒸汽温度将比方案二低 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,这将降低常规岛回路的热效率。方案一若要实现同方案二的主蒸汽参数,则对蒸汽发生器在端差等控制设计上提出更高的要求。

总体而言,方案二更有利于常规岛回路实现较高的热效率。

2.3.2 设备选型设计

根据核岛的功率输出特性,图 4 列出了不同方案下机组的储能出力需求。

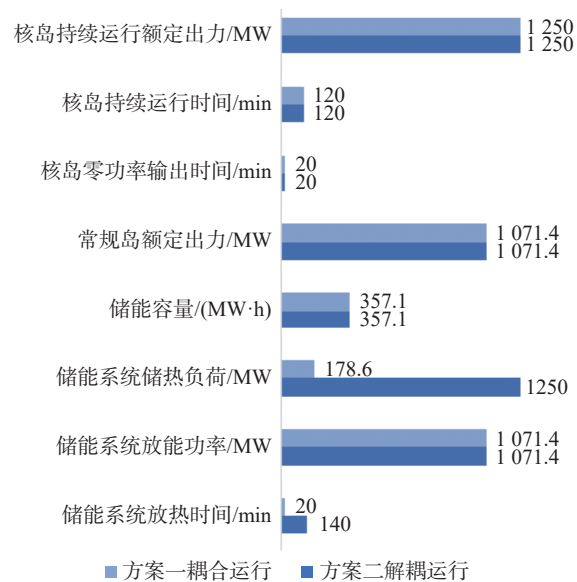


图 4 储能岛出力对比表

Fig. 4 Comparison of outputs from energy storage island

两个方案的换热介质均为氦气和熔盐。基于图 4 的功能要求,蓄热换热器的初步参数计算结果如图 5 所示。

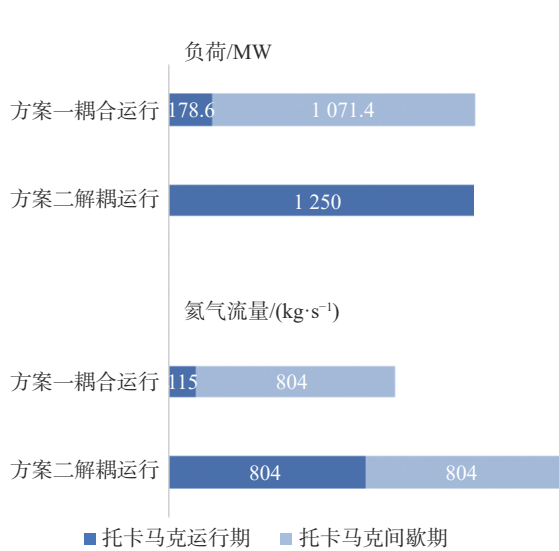


图 5 蓄热换热器参数表

Fig. 5 Parameters of regenerative heat exchanger

从图 5 可以看出,在储热侧,方案一在 $0 \sim T_{op}$ 托卡马克运行期储热负荷为 178.6 MW,在 $T_{op} \sim T$ 托卡马克间歇期储热负荷为 1071.4 MW,方案二整个运行期间的储热负荷为 1250 MW。两个方案的蓄热换热器换热介质均为氦气-熔盐。因此对蓄热换热器而言,方案一比方案二的换热面积可略少。

为满足常规岛回路侧的负荷稳定,在储热和放热阶段,需保证蒸汽发生器的输入热负荷相同。为实现该功能,方案二中蓄热换热器在周期运行期内的负荷及参数变化较大。在储热阶段,蓄热换热器的负荷为 178.6 MW,氦气流量为 114.8 kg/s,进出口温度为 600/300 °C;在放热阶段,蓄热换热器的负荷为 1071.4 MW,氦气流量为 803.5 kg/s,进出口温度为 300/600 °C。在周期运行期内的不同阶段,设备内的介质流量变化大,而且进、出口温度是相反的。因此,对蓄热换热器的设计制造也提出很高得的要求,需进行深入的专项研究。方案一中蓄热换热器在整个周期运行期负荷虽有变化,但介质流量及温度保持稳定,相对可用常规的成熟设计即可。

基于图 4 的功能要求,蒸汽发生器的初步参数如图 6 所示。在耦合运行的方案一中,蒸汽发生器内发生氦气与水的换热;在解耦运行的方案二中,蒸汽发生器换热的两个介质为熔盐与水。

在放热侧,两个方案的负荷是相同的,均为 1071.4 MWh,区别是方案一为氦气蒸汽发生系统,方案二为熔盐蒸汽发生系统。氦气工作压力为 12 MPa,

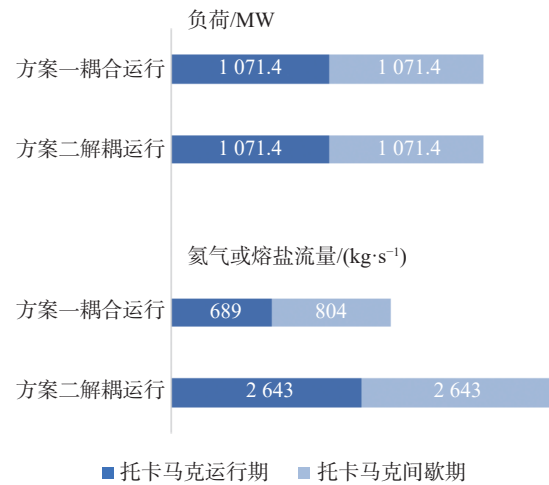


图 6 蒸汽发生器参数表

Fig. 6 Parameters of steam generator

高压水或水蒸汽的压力也大于 10 MPa,熔盐工作压力则较低,一般为 2 MPa。熔盐蒸汽发生系统可按常规设计,高压水或蒸汽一般走管程,低压的熔盐走壳程,由于壳程压力较低,换热器壳侧壁厚较小。而对于氦气蒸汽发生系统,由于氦气蒸汽发生器中氦气和水侧的工作压力都很高,无论哪种介质走壳程都会使壳程压力高,而且壳程直径通常较大,壳程壁厚通常较大。因此方案一氦气蒸汽发生器的材料成本要比方案二熔盐蒸汽发生器大,设备造价高。

为满足常规岛回路的负荷稳定,在储热和放热阶段,需保证蒸汽发生器的输入热负荷相同。为实现该功能,方案一中蒸汽发生器在不同运行期内的介质流量不同;蒸汽发生器在储热阶段的氦气流量为 688.8 kg/s,放热阶段的氦气流量为 803.5 kg/s,流量的变化约为总流量的 14.3%;蒸汽发生器如何能够提供二回路稳定参数,需进行深入的专项研究。因此,方案一对设备制造、控制切换的时点都提出比较高的要求。而方案二在整个周期运行期,蒸汽发生器内介质参数稳定,可采用常规成熟的设计方案。

2.3.3 运行切换

两个方案下,各回路泵的运行情况比较如表 2 所示。

方案一储热和放热需要周期性切换; $0 \sim T_{op}$ 储热期关闭热盐泵,启动冷盐泵将熔盐打入蓄热换热器蓄热后回到高温罐; $T_{op} \sim T$ 放热期关闭冷盐泵,启动热盐泵将熔盐打入蓄热换热器放热后进入低温罐;对于蓄热换热器需要周期性切换熔盐流动方向。

表 2 各回路泵运行情况

Tab. 2 Pump operation of each loop

项目	耦合运行	解耦运行
核岛氦气侧	运行2 h停20 min	运行2 h停20 min
储能岛熔盐侧储热	冷盐泵以1/6负荷运行2 h后停泵20 min	冷盐泵以7/6负荷运行2 h后停泵20 min
储能岛熔盐侧放热	热盐泵满负荷运行20 min后停泵2 h	热盐泵满负荷持续运行
常规岛汽水侧	持续运行	持续运行

方案二在 $0 \sim T_{op}$ 储热期启动冷盐泵将熔盐打入蓄热换热器蓄热后回到高温罐, $T_{op} \sim T$ 放热期关闭冷盐泵; $0 \sim T$ 整个运行期, 热盐泵持续运行; 蓄热换热器运行模式相对简单。

需要周期性切换的设备中, 方案一包括冷盐泵及出口隔离阀、热盐泵及出口隔离阀、低温罐入口隔离阀、高温罐入口隔离阀、氦气去蒸汽发生器隔离阀、蓄热换热器后氦气去蒸汽发生器隔离阀等; 方案二仅包括冷盐泵及出口隔离阀、蓄热换热器熔盐侧进出口隔离阀。由于核岛周期性运行的特性, 储能岛中设备周期性运行无法完全避免; 方案二相对而言周期性运行设备已减到最少。

2.3.4 小结

由上述分析比较可知, 方案二相较方案一, 常规岛回路可产生更高的蒸汽参数, 进而汽轮发电机组得到更高的热效率; 在蓄热换热器和蒸汽发生器的设计、制造上, 可采用相对成熟的技术, 技术风险低、方案的可行性更高; 在周期性运行切换上, 对设备和阀门的制造和控制要求相对更低。因此, 推荐采用方案二。

3 结论

储能系统合理的运行模式关系着热核聚变发电厂电能稳定输出的顺利实现; 核岛与常规岛耦合运行还是解耦运行, 对应着储能系统不同的运行模式。文章基于 CFETR 功率输出的特性, 对储能系统从系统配置、技术成熟性、运行方便性等方面进行全面地分析研究。经对比分析可知, 核岛与常规岛解耦的运行模式在常规岛发电效率、蓄热换热器等关键设备选型设计和机组运行控制上都更具优势, 因此热核聚变发电厂的储能系统推荐采用该运行模式。储能系统解耦的运行模式大都采用目前成熟的技术

方案, 因此可实现规模化的商业应用。

此外, 由于托卡马克的脉冲式运行特性, 热核聚变发电厂不可避免存在周期性运行的设备和阀门, 建议下一阶段对其进行深入的评估分析。

参考文献:

- [1] 中国核能行业协会. 中国核能发展与展望 (2023) [EB/OL]. (2023-07-19) [2023-10-01]. <http://www.china-nea.cn/site/content/43211.html>.
China Nuclear Energy Association. China's Nuclear Energy Development and Outlook 2023 [EB/OL]. (2023-07-19) [2023-10-01]. <http://www.china-nea.cn/site/content/43211.html>.
- [2] 邱励俭, 王相綦, 吴斌. 核能物理与技术概论 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2012: 5-8.
QIU L J, WANG X Q, WU B. Introduction on nuclear energy physics and technology [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2012: 5-8.
- [3] 许勤华, 张艳伟. 绿色能源的技术突破和未来能源产业前瞻 [J]. 人民论坛, 2023(16): 45-49. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3381.2023.16.009.
XU Q H, ZHANG Y W. Green energy technology breakthrough and future energy industry prospects [J]. People's tribune, 2023(16): 45-49. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3381.2023.16.009.
- [4] 邱励俭. 聚变能及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
QIU L J. Fusion energy and its application [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [5] 马翔泉. 核能开发与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
MA X Q. Nuclear energy development and application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [6] 张军, 石烁, 汤维祺. 中国核聚变产业化的挑战与能源强国战略规划思路 [J]. 发展研究, 2023, 40(8): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0670.2023.08.003.
ZHANG J, SHI S, TANG W Q. The challenge of China nuclear fusion industrialization and energy power strategic scheme [J]. Development research, 2023, 40(8): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0670.2023.08.003.
- [7] 张国书. 核聚变能源的开发现状与新进展 [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.
- [8] 陈兴国. 核能发电原理导论 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2010.
CHEN X G. Introduction to the principles of nuclear power generation [M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 2010.
- [9] 王辉辉. 磁约束聚变堆托卡马克误差场研究进展综述 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(2): 1-18. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.001.

- WANG H H. The progress of error field investigation in magnetically confined fusion Tokamak reactor [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(2): 1-18. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.001).
- [10] 胡星光, 宋执权, 高格, 等. ITER 聚变装置及其电源系统 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(2): 19-25. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.002).
- HU X G, SONG Z Q, GAO G, et al. ITER fusion device and its power supply system [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(2): 19-25. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.002).
- [11] 李建刚, 宋云涛, 刘永, 等. 聚变工程实验堆装置主机设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- LI J G, SONG Y T, LIU Y, et al. Main engine design of fusion engineering test reactor [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [12] 高翔, 万宝年, 宋云涛, 等. CFETR 物理与工程研究进展 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49(4): 045202. DOI: [10.1360/SSPMA2018-00235](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00235).
- GAO X, WAN B N, SONG Y T, et al. Progress on CFETR physics and engineering [J]. *Scientia sinica physica, mechanica & astronomica*, 2019, 49(4): 045202. DOI: [10.1360/SSPMA2018-00235](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00235).
- [13] 万宝年, 徐国盛. EAST 全超导托卡马克高约束稳态运行实验研究进展 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49(4): 045205. DOI: [10.1360/SSPMA2018-00233](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00233).
- WAN B N, XU G S. Advances in experimental research towards high confinement and steady state operation on the experimental advanced superconducting Tokamak [J]. *Scientia sinica physica, mechanica & astronomica*, 2019, 49(4): 045205. DOI: [10.1360/SSPMA2018-00233](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00233).
- [14] 向魁, 梁展鹏, 李华, 等. CFETR 聚变发电厂概念设计技术研究 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(2): 45-52. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.006](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.006).
- XIANG K, LIANG Z P, LI H, et al. Conceptual design technology research of CFETR fusion power plant [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(2): 45-52. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.006](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.006).
- [15] TRAN M Q, AGOSTINETTI P, AIELLO G, et al. Status and future development of heating and current drive for the EU DEMO [J]. *Fusion engineering and design*, 2022, 180: 113159. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2022.113159](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113159).
- [16] 新华通讯社. 403 秒! 中国“人造太阳”获重大突破 [EB/OL]. (2023-04-13) [2023-12-15]. http://www.news.cn/2023-04/13/c_1129517477.htm.
- Xinhua News Agency. 403 seconds! China's "artificial sun" has made a major breakthrough [EB/OL]. (2023-04-13) [2023-12-15]. http://www.news.cn/2023-04/13/c_1129517477.htm.
- [17] 梁展鹏, 向魁, 李华, 等. CFETR 聚变发电厂的储能技术适用性分析 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(2): 53-62. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.007](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.007).
- LIANG Z P, XIANG K, LI H, et al. Applicability analysis of energy storage techniques for CFETR fusion power plant [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(2): 53-62. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.007](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.007).
- [18] BUBELIS E, HERING W, PEREZ-MARTIN S. Conceptual designs of PHTS, ESS and PCS for DEMO BoP with helium cooled BB concept [J]. *Fusion engineering and design*, 2018, 136: 367-371. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2018.02.040](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.02.040).
- [19] WARMER F, BUBELIS E. First considerations on the balance of plant for a HELIAS fusion power plant [J]. *Fusion engineering and design*, 2019, 146: 2259-2263. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2019.03.167](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.167).
- [20] BUBELIS E, HERING W, PEREZ-MARTIN S. Industry supported improved design of DEMO BoP for HCPB BB concept with energy storage system [J]. *Fusion engineering and design*, 2019, 146: 2334-2337. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2019.03.183](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.183).
- [21] BARUCCA L, BUBELIS E, CIATTAGLIA S, et al. Pre-conceptual design of EU DEMO balance of plant systems: objectives and challenges [J]. *Fusion engineering and design*, 2021, 169: 112504. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2021.112504](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112504).
- [22] MALINOWSKI L, LEWANDOWSKA M, GIANNETTI F. Design and optimization of the secondary circuit for the WCLL BB option of the EU-DEMO power plant [J]. *Fusion engineering and design*, 2021, 169: 112642. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2021.112642](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112642).

作者简介:



林燕

林燕 (第一作者, 通信作者)

1983-, 女, 正高级工程师, 硕士, 主要从事发电厂热机设计研究和技术管理工作(e-mail) linyan@gedi.com.cn。

李斌

1993-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事发电厂热机设计研究工作。

罗浩东

1991-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事发电厂热机设计研究工作。

向魁

1984-, 男, 主任工程师, 硕士, 主要从事发电厂热机设计研究和技术管理工作。

朱光涛

1971-, 男, 副总工程师, 正高级工程师, 硕士, 主要从事发电厂设计研究和技术管理工作。

(编辑 徐嘉铨)