

引用格式: 蒋戈凌. 气冷微堆微电网电气系统设计 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(4): 60-67. JIANG Geling. Design of the electrical system for a gas-cooled microreactor-based microgrid [J]. Southern energy construction, 2025, 12(4): 60-67. DOI: 10.16516/j.ceeec.2025-055.

气冷微堆微电网电气系统设计

蒋戈凌[✉]

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: [目的] 考虑到目前移动应急电源车存在容量小、持续供电时间有限、高污染问题, 文章对以气冷微堆微作为主电源的微电网开展了电气系统设计, 以气冷微堆、储能为主构成可移动微型核电源, 实现孤岛与并网稳定运行及多种控制策略的平滑切换, 为负荷提供高质量电能, 满足特定场景下的电能需求。[方法] 首先, 结合气冷微堆微的技术需求及运行要求, 合理配置各个电源。其次, 根据实际运行需求, 设计气冷微堆微电网电气主接线。最后, 按照气冷微堆微电网多场景运行需求及组网方案, 设计运行方案。[结果] 所设计的气冷微堆微电网电气系统及运行方案可实现核能微电网在各种工况下的稳定运行, 具备黑启动及独立停堆能力。[结论] 该电气系统设计具有实际工程意义, 有助于加速实现可移动微型核电源的实际落地, 为偏远山区、海岛及小型工业园区等提供高品质持续的电能供应。

关键词: 可移动微型核电源; 移动应急电源车; 气冷微堆微电网; 多场景运行

DOI: 10.16516/j.ceeec.2025-055

文章编号: 2095-8676(2025)04-0060-08

CSTR: 32391.14.j.ceeec.2025-055

中图分类号: TL424; TM727



论文二维码

Design of the Electrical System for a Gas-Cooled Microreactor-Based Microgrid

JIANG Geling[✉]

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: [Objective] Considering the current problems of mobile emergency power supply vehicles, such as small capacity, limited continuous power supply time, and high pollution, this paper conducts an electrical system design for a microgrid with a gas-cooled micro reactor as the main power source. It forms a mobile micro nuclear power source mainly composed of a gas-cooled micro reactor and energy storage, achieving stable operation in both island and grid-connected modes and smooth switching between various control strategies, providing high-quality electricity for loads and meeting the power demands in specific scenarios. [Method] Firstly, based on the technical requirements and operational needs of the gas-cooled microreactor-based microgrid, the parameters of each power source were reasonably configured. Secondly, according to the actual operational demands, the main electrical connection of the gas-cooled microreactor-based microgrid was designed. Lastly, operational schemes were formulated in accordance with the multi-scenario operational requirements and networking plans of the gas-cooled microreactor-based microgrid. [Result] The designed electrical system and operational scheme for the gas-cooled microreactor-based microgrid enable stable operation of the nuclear microgrid under various conditions, possessing capabilities for black start and independent reactor shutdown. [Conclusion] The design of this electrical system holds practical engineering significance, contributing to accelerating the practical implementation of mobile micro nuclear power sources. It provides high-quality electrical energy supply for regions such as remote mountainous areas, islands, and small industrial parks.

Key words: mobile micro nuclear power source; mobile emergency power supply vehicle; gas-cooled microreactor-based microgrid; multi-scenario operation

2095-8676 © 2025 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/>).

收稿日期: 2025-03-05 修回日期: 2025-05-08

基金项目: 中国核电工程有限公司科技项目“气冷微堆型号研发项目-能量管理系统及设备制造技术”(KY19105)

0 引言

配电网发生故障时,可移动应急电源车可以根据需要快速移动到不同的地点,提供即时的电力支持。然而,当前可移动应急电源车主要是储能或柴油发电机,需要反复充电或大量柴油补给,且储能应急电源车可供电时长一般不超过6 h,柴油应急电源车亦不宜长时间供电。但对于一些位置偏远且长期孤立于大电网、区域电网的用电场景以及应急恢复时间较长,外部电源稳定性、安全性差、容易丧失的用电场景,长期持续提供大功率电源的可行性较低,且柴油发电机在运行过程中产生的排放物对环境构成显著污染,难以满足用电系统对于持续、稳定功率支撑的需求^[1-4]。相比之下,基于气冷微堆构建的可移动核能微电网,凭借其大容量、小体积及可以年为单位长时间供电的显著优势,为可移动应急电源车的现有不足提供了解决方案^[5-6]。

可移动气冷微堆微电网作为分布式发电的一种创新形式,正逐渐成为研究热点,《“十四五”能源领域科技创新规划》明确指出要开展轻型、智能核电源装置设计与关键技术研究,形成具备可移动能力的先进核电源装置方案^[7]。

气冷微堆具有固有安全性,且凭借其显著的高能量密度特性、长期的稳定运行能力以及对环境影响的极小化,成为向微电网提供稳定且可持续能源供应的核心要素^[8]。

微电网技术通过利用多种控制方式,构建由多个自治发电单元组成的互联网络,实现电能的优化管理,提高供电质量及可靠性^[9]。

此二者的深度融合不仅显著提升了能源转换与利用的整体效率,还极大增强了系统的韧性与安全性,确保了电能供应在长时间尺度上的稳定性和可靠性。相较于传统的可移动应急电源车,该系统在技术与性能层面实现了跨越性进步,为微网领域的应急能源解决方案开辟了全新的发展路径。

综上,可移动微型核能供电系统集成微型核反应堆与先进微电网技术的互补优势,旨在达成能源自给自足、高效转换及灵活调控的综合目标。

具体而言,可移动微型核电源的应用前景广阔,首先,在偏远地区或海岛等难以接入大电网的区域^[10-11],可移动微型核电源能够提供稳定可靠的电力供应,满足当地居民的基本生活需求。其次,在紧急

情况下,如自然灾害或军事冲突,可移动微型核电源能够迅速部署并提供应急电力,保障关键基础设施和救援设备的正常运行^[12]。最后,在偏远矿区、深海探测、军事基地等特殊场景下,可移动微型核电源也能够为相关设备提供持久稳定的能源支持。

然而,截至目前,关于可移动微型核电源技术的实际部署与商业化应用尚未实现,仍处于研发初步阶段,在微网实践领域尚未见证其具体的落地实例。

针对上述问题,本文为可移动微型核电源的落地设计了一套气冷微堆微电网电气系统。该系统可填补上述微网实践领域的空白,其主要包含如下几个部分。

首先,结合气冷微堆微电网的技术需求及运行要求,设计气冷微堆微电网中所包含的各个电源参数,保证各个工况下的电源稳定支撑。其次,基于上述电源及微堆微电网负荷,设计气冷微堆微电网电气主接线。最后,考虑到气冷微堆微电网多场景运行需求及组网方案,设计运行方案。

1 气冷微堆微电网架构设计

气冷微堆是一种采用氦气作为冷却介质的微型反应堆技术,由于微堆的紧凑性结构、高效性及安全性^[13],可将其配合储能、柴油发电机等电源构成气冷微堆微电网安装在移动能源车上。

由于气冷微堆微电网是装在可移动能源车上,为偏远地区以及紧急情况下提供电能支撑,对于气冷微堆微电网电气系统的设计需要满足如下用户需求和应用场景需求。

1.1 气冷微堆微电网需求

1.1.1 用户需求

1)微堆微电网功率值不低于1 MW,电能质量满足国家相关标准要求^[14]。

2)微堆微电网与用户的电源接入不少于2个。

3)微堆应具备黑启动能力,不需要用户对其启动和停运提供外部电源支持^[15]。

4)微堆微电网应具备孤岛运行的能力^[16]。

5)微堆微电网的运行不依赖外部电源,且不需要大量的其他能量持续供给。

1.1.2 应用场景需求

1)用户为无其他电源,微堆为用户的唯一电源装置。

2)配置柴油发电机、风光储或其他形式的微型发电装置,且有自己的电源管理系统。

3)用户有外部大电网或区域电网接入,且内部自备微型燃气机、柴油机等自备电源。

1.2 气冷微堆微电网负荷

如表 1 所示,气冷微堆微电网负荷共分为 2 类,一类为气冷微堆自用电负荷,包括 1 辆反应堆发电机车负荷,2 辆热阱车负荷,1 辆辅助车辆用电负荷和 1 辆电气仪控系统车负荷;另一类为外部负荷,由用户需求可知微堆微电网功率值不低于 1 MW,因此外部负荷功率确定为 1 MW,并设定 3 个等级,一级负荷 250 kW,二级负荷为 2 路 300 kW,三级负荷 150 kW。

表 1 气冷微堆微电网负荷

Tab. 1 Load of gas-cooled microreactor-based microgrid

负荷类别	设备名称	数量	额定功率/kW
自用电负荷	反应堆发电机车	1	—
	热阱车	2	—
	辅助车辆用电负荷	1	—
	电气仪控系统负荷	1	—
外部用电负荷	一级负荷	1	250
	二级负荷1	1	300
	二级负荷2	1	300
	三级负荷	1	150

1.3 气冷微堆微电网电源选择

根据微电网与用户的接入电源不少于 2 个的需求及气冷微堆发电特性,选定高速永磁同步发电机与储能系统作为微电网的主电源,由微型核反应堆驱动氦气轮机旋转,进而带动永磁同步发电机完成电能转换。同时考虑到微堆微电网需要具备黑启动及独立停堆能力,储能系统由于容量体积限制不能长时间为系统供电^[17],因此考虑加入柴油发电机作为黑启动电源^[18]。下面进行各个电源间的参数设计。

2 气冷微堆微电网电源及主接线设计

2.1 永磁同步电机参数设计

永磁同步发电系统中,气冷微堆提供原动力带动永磁同步发电机转动发电,永磁同步发电机经过背靠背换流器并入交流微网中为系统供电,其结构如图 1 所示。

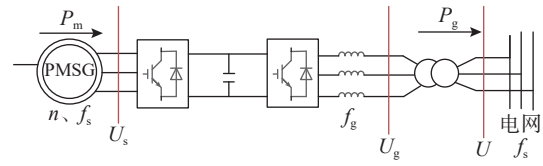


图 1 PMSG 系统结构图

Fig. 1 Diagram of the PMSG System Structure

根据气冷微堆转速会随着温度变化的特性,随着启动阶段温度的不断升高,转速随之增加。设定发电机额定频率 f_s 为 550 Hz,发电机额定转速 n 为 1.65 万 r/min。 U_s 为机侧电压,规定为 690 V; P_m 为额定输出功率,结合用户用电需求及发电机体积限制,设计为 1.5 MW; P_g 为并网功率,为 1.5 MW; U_g 为并网电压,为 690 V; f_g 并网频率,为 50 Hz。

基于上述要求,对永磁同步发电机进行参数设计,包括磁极对数 p 、磁链 ψ_f 及额定机械转矩 T_m 。

根据电机转速方程式(1)得磁极对数 p 为 2。

$$n = \frac{60f_s}{p} \quad (1)$$

根据式(2)得发电机机械角速度 ω_m 为 1727.876。

$$\omega_m = \frac{2\pi n}{60} \quad (2)$$

进而根据式(3)得 PMSG 额定机械转矩 T_m 为-868.12。

$$T_m = -\frac{P_m}{\omega_m} \quad (3)$$

当 PMSG 稳定输出额定功率时,转速稳定在额定转速 n ,此时机械转矩 T_m 和电磁转矩 T_e 相等,电磁转矩可以表示为:

$$T_e = -\frac{3}{2}p\psi_f i_{sq} \quad (4)$$

$$i_{sq} = \frac{\sqrt{2}P_m}{\sqrt{3}U_s} \quad (5)$$

式中:

i_{sq} ——发电机定子电流 q 轴分量,根据式(5)求得为 204.09 A。

$$\psi_f = -\frac{T_e}{1.5pi_{sq}} \quad (6)$$

根据式(6)得 PMSG 的磁链 ψ_f 为 1.418。

2.2 柴油发电机容量确定

气冷微堆启动和停堆过程持续时间较长,在启动和停堆过程中由柴油发电机给自用电负荷提供所需要的功率。

柴油发电机容量的确定需要考虑长期连续运行功率,并校验短时过负荷能力。

1) 考虑长期连续运行功率确定额定容量:

$$\begin{cases} S_{fe} \geq S_c \\ P_{fe} \geq P_c \\ Q_{fe} \geq Q_c \end{cases} \quad (7)$$

式中:

S_{fe} ——柴油发电机组额定视在功率(kVA);

P_{fe} ——柴油发电机组额定有功功率(kW);

Q_{fe} ——柴油发电机组额定无功功率(kvar);

S_c ——长期连续运行负载的视在功率(kVA);

P_c ——长期连续运行负载的有功功率(kW);

Q_c ——长期连续运行负载的无功功率(kvar)。

S_c 、 P_c 、 Q_c 的确定需考虑电动机负荷和静止负荷,如下所示:

$$P_c = \sum P_D K_1 + \sum P_J K_2 \quad (8)$$

$$Q_c = \sum P_D K_1 \tan(\varphi_D) + \sum P_J K_2 \tan(\varphi_J) \quad (9)$$

式中:

$\sum P_D$ ——连续运行的电动机额定功率之和(kW);

$\sum P_J$ ——连续运行的静止负荷之和(kW);

φ_D ——电动机负荷正常运行状态下的功率因数角;

φ_J ——静止负荷的功率因数角;

K_1 ——运算系数,取 0.9;

K_2 ——运算系数,取 0.32。

长期连续运行所需要的视在功率 S_c 为:

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \quad (10)$$

根据自用电负荷的长期连续运行功率,选择 200 kW,功率因数为 0.8 的柴油发电机组。

2) 校验发电机短时过载能力确定额定容量:

$$S_{fe} \geq \frac{S_{Qm}}{K_{GF}} \quad (11)$$

式中:

S_{Qm} ——柴油发电机组启动时负荷的最大值(kVA);

K_{GF} ——发电机短时过负荷系数,取 1.5。

考虑气冷微堆的热阱、棒控系统、电气仪控车、辅助车负荷成组启动,并选用成组启动负荷投入最为严重的情况校验柴油发电机短时过载能力:

$$\begin{cases} P_{Zq} = P_{Zq0} + K_3 P_D + K_2 P_J \\ P_{Zq0} = \sum P_{D0} K_1 + \sum P_{J0} K_2 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} Q_{Zq} = Q_{Zq0} + k_3 P_D \tan(\varphi_{DQ}) + K_2 P_J \tan(\varphi_J) \\ Q_{Zq0} = \sum P_{D0} K_1 \tan(\varphi_D) + \sum P_{J0} K_2 \tan(\varphi_J) \end{cases} \quad (13)$$

$$S_{Zq} = \sqrt{P_{Zq}^2 + Q_{Zq}^2} \quad (14)$$

式中:

P_{Zq} ——成组启动后的有功负荷(kW);

Q_{Zq} ——成组启动后的无功负荷(kvar);

S_{Zq} ——成组启动后的视在负荷(kVA);

P_{Zq0} ——已带机组成组启动的有功负荷(kW);

Q_{Zq0} ——已带机组成组启动的无功负荷(kvar);

P_{D0} ——已带机组成组启动的电动机负荷(kW);

P_{J0} ——已带机组成组启动的静止负荷(kW);

K_3 ——运算系数;

φ_{DQ} ——电动机负荷启动状态下的功率因数角。

分步进行热阱投入、机组棒控系统投入、机组电气仪控车投入和机组辅助车投入校验柴油发电机的成组启动短时过载能力,确定柴油发电机额定功率为 250 kW,并考虑到移动电源车空间有限,考虑以仪控电源车车头作为柴油发电机。

2.3 储能系统容量确定

根据设计需求,储能系统配备 2 套,一套为构网型储能系统,一套为构网/跟网灵活转换型储能系统,二者互为备用。储能系统的容量选择主要考虑气冷微堆启动、系统功率运行及停堆等运行工况。

1) 反应堆启动

反应堆启动时,储能系统和柴油发电机组共同给自用电负荷供电(约 330 kW)。柴油发电机的额定功率为 250 kW,此时 2 台储能放电 80 kW。在启动过程中气冷微堆发电机输出功率达到 80 kW 需要 10 h,假定气冷微堆功率线性增加,随着发电机功率增加,储能功率减小,因此一套储能系统的功率为 40 kW,总容量应不低于 200 kWh。

2) 功率运行过程

气冷微堆发电机启动完成,输出功率 370 kW,切除柴油发电机。此时,由 2 台储能和发电机共同给自用电和外部负荷供电。当外部负荷依次接入时,最大的负荷变化为 300 kW,考虑气冷微堆功率调节速度为 15 kW/min,发电机功率增加 300 kW 需要 20 min,在此期间,一套储能系统的功率为 150 kW,

容量应不低于 25 kWh。

3) 停堆过程

停堆过程中, 需要按顺序切除四路外部负荷, 同功率运行过程, 最大负荷变化为 300 kW, 一套储能系统的功率为 150 kW, 容量应不低于 25 kWh。

综上, 考虑 2 倍以上的裕度, 最终选定储能系统的容量为 400 kW/400 kWh。

2.4 电气主接线设计

考虑供电可靠性及车载电源空间的有限性, 设计可移动微型核电源电气主接线如图 2 所示。考虑车载系统母线可靠性高, 且考虑到空间有限, 采用单母线接线。开关设备、储能系统和换流器布置在仪控车中。为了保证微电网在甩负荷、故障等场景下的稳定性, 微电网还配置了一定的模拟负载。

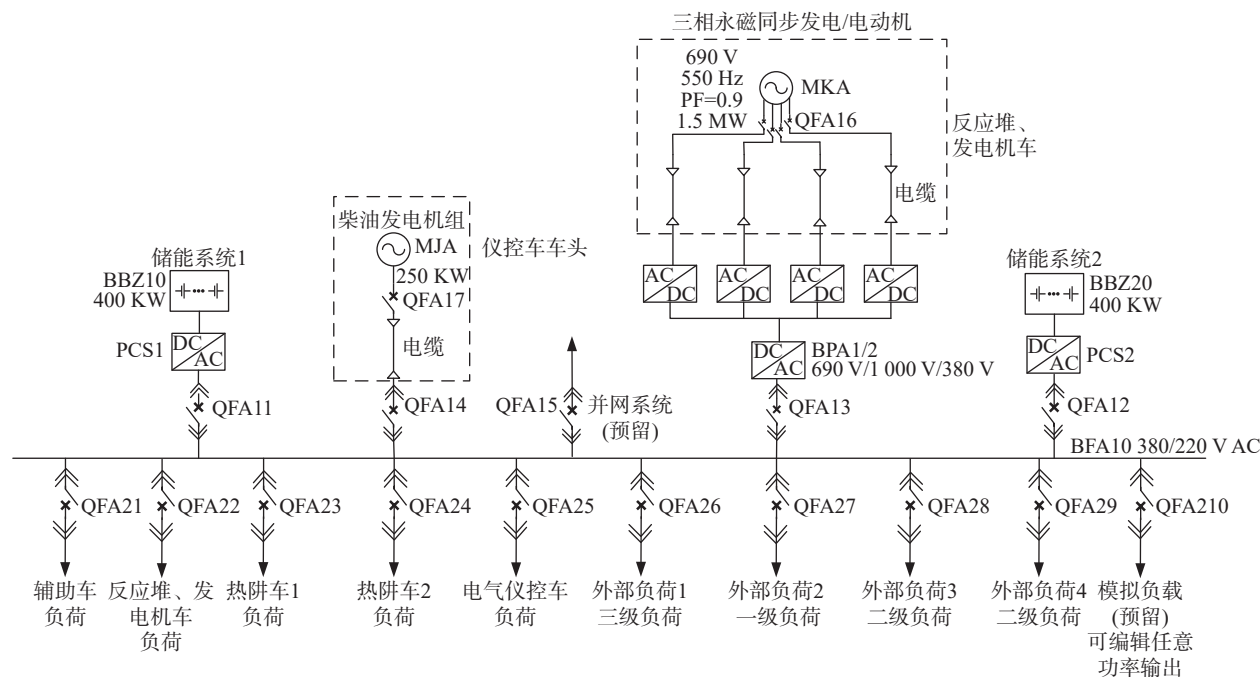


图 2 可移动微型核电源电气主接线图

Fig. 2 Electrical main wiring diagram of a mobile miniature nuclear power source

3 运行方案说明

3.1 运行方案

根据设计的气冷微堆交流微电网结构, 设计了如下的微电网运行方案, 如图 3 所示。

1) 反应堆启动过程: 柴油发电机先启动, 柴油发电机采用定频率定电压控制, 建立交流母线电压和频率。交流母线电压正常后, 储能系统 1 启动, 储能系统 1 采用构网控制, 和柴油发电机一起维持交流母线的电压和频率; 随后储能系统 2 启动, 储能系统 2 采用跟网控制; 储能系统启动完成之后, 气冷微堆开始启动, 在此过程中, 2 套储能系统和柴油发电机一起维持微电网的功率平衡。启动完成后, 柴油发电机退出运行, 储能 2 由跟网转构网运行, 随后气冷微堆微电网进入功率运行阶段。

2) 反应堆功率运行过程: 功率运行过程中, 2 套储能采用构网控制维持交流母线电压和频率。发电机按照调度下发的指令发电, 在发电机功率调节过程中, 功率差额由储能系统承担。在出现突然甩负荷引起频率突然升高时, 改变模拟负载的功率实现功率匹配。

3) 反应堆停堆过程: 在计划停堆过程中, 启动柴油发电机, 气冷微堆开始降功率, 在发电机功率降低过程中, 逐步退出外部负荷。柴油发电机和储能系统共同维持交流母线电压和频率, 保证停堆过程中的微电网功率平衡。

3.2 仿真验证

在 MATLAB/Simulink 中搭建如图 2 所示的气冷微堆微电网系统, 并进行全工况仿真验证, 仿真结果如图 4 所示, 0 ~ 50 s 是反应堆启动过程, 50 ~ 65 s

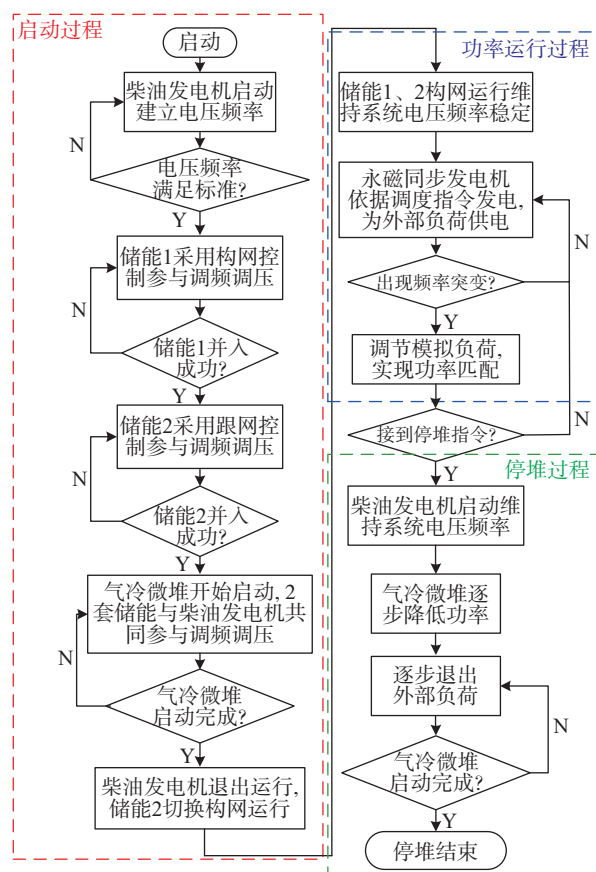


图3 运行方案总体流程

Fig. 3 Overall process of the operational scheme

是反应堆功率运行, 65 ~ 90 s 是反应堆停堆过程。

1) 反应堆启动过程: 0 s 时, 柴油发电机启动构建交流母线电压及频率; 5 s 时, 储能系统 1 接入, 和柴发一起维持交流电压和频率; 7 s 时, 储能系统 2 接入, 一同参与功率调节; 11 s 和 16 s 分别接入 2 个自用电负荷, 如图 4(c) 所示。如图 4(a) 所示, 负荷增加时, 储能 1、2 先增加功率, 但随着柴发功率增加, 储能功率降为 0; 如图 4(b) 所示, 柴发维持系统频率 50 Hz, 动态响应过程中, 系统频率波动范围不超过 ± 0.5 Hz。30 s 时, 发电机网侧换流器开启, 给直流侧电容充电, 40 s 时, 发电机机侧换流器开启, 发电机进入电动运行状态, 升速至 6600 r/min 后定转速运行; 46.4 ~ 48.4 s, 发电机进入变速运行阶段 1, 升速至 1.0633 万 r/min, 发电机仍为电动运行; 在 48.4 ~ 53.4 s, 发电机进入变速运行阶段 2, 发电机由电动运行转为发电运行, 升速至 1.65 万 r/min, 发电机转速变化曲线如图 4(d) 所示。随着发电机输出功率增加, 如图 4(a) 所示, 柴油发电机功率逐渐降低,

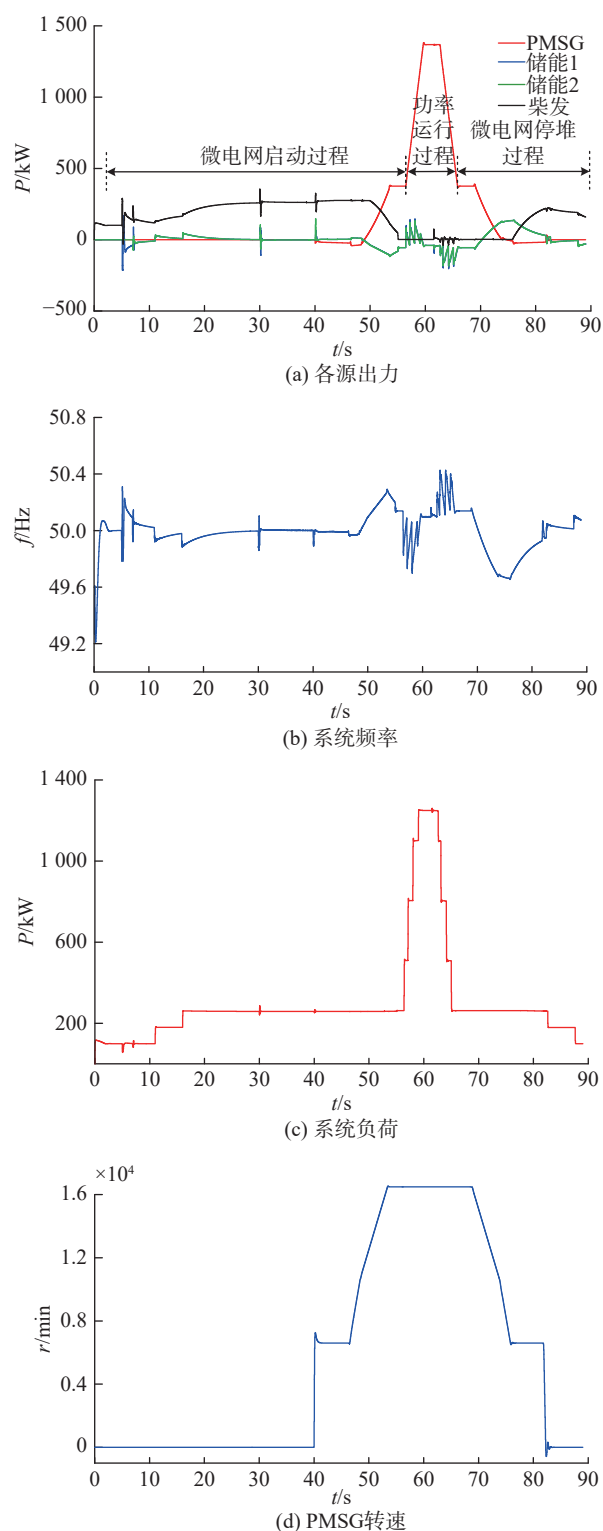


图4 仿真结果图

Fig. 4 Simulation results figure

55 s 时, 柴油发电机退出运行, 此时由 2 个储能维持交流母线电压和频率, 至此微电网启动完成。

2) 交流微电网功率运行过程: 由图 4(c) 所示,

56.4~59 s,逐步接入四路外部负荷;由图4(a)可见,负荷增加时,2个储能先增加功率,发电机按照调度下发的指令增加功率,随着发电机功率增加,储能功率减小;如图4(b)可见,在负荷接入动态过程中,系统频率波动范围不超过 ± 0.5 Hz。61.5 s时,柴油发电机重新接入62.6~65 s,逐步切除四路外部负荷,由图4可见,在这个过程中,微电网功率平衡,频率维持稳定。

3)反应堆停堆过程:如图4(d)所示,68.8~73.8 s时,PMSG进入变速运行阶段1,期间转速由1.65万r/min降至1.0633万r/min。如图4(a)、图4(d)所示,73.8~75.8 s时,PMSG进入变速运行阶段2,电动运行,期间转速由1.0633万r/min降至6600 r/min,75.8~81.8 s时,PMSG定转速运行(6600 r/min),电动运行阶段。如图4(d)所示,81.8~82.2 s,发电机转速降速至0,系统停堆完成。

4 结论

文章针对一些用电场景下,可移动应急电源车存在的容量小、环境污染严重及长时间供电可能性低等核心问题,提出了一种基于气冷微堆技术的可移动微型核电源电气系统设计方案。该方案为微电网领域的应急能源解决方案开辟了新的路径。

首先,分析了气冷微堆微电网的技术需求及运行要求,合理配置了各个电源参数。其次,基于实际运行需求设计了电气主接线。最后,按照多场景运行需求及组网方案,制定了运行方案,能够在各种工况下实现核能微电网的稳定运行,并具备黑启动及独立停堆能力。

综上,所提出的气冷微堆微电网电气系统设计方案具有实际工程意义,有望加速可移动微型核电源技术的实际落地。

在气冷微堆微电网中,其具备长期供电的特性,然而当前尚未引入可再生能源开展协同发电。为实现可再生能源的高效利用,未来计划在该微电网系统中纳入光伏发电等可再生能源发电技术,以此推动系统对可再生能源的充分利用。

参考文献:

- [1] 蔡胜,谢云云,张玉坪,等.考虑移动应急电源配置的微电网顺序恢复方法[J].中国电机工程学报,2023,43(7): 2677-2688. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.212761.
- [2] 赵梓杉,蒙志全,张俊峰,等.应急微电网中柴储移动电源的协调及均衡控制策略[J].电力系统自动化,2019,43(10): 53-59, 141. DOI: 10.7500/AEPS20180730011.
- [3] 龚立,田猛,董政呈,等.计及次生灾害影响的电力信息物理系统恢复方法研究[J].电力系统保护与控制,2025,53(1): 59-70. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240347.
- [4] 何小良,章雷其,张俊峰,等.灾害条件下移动应急电源组网和分散控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(15): 107-112, 149. DOI: 10.7500/AEPS20161008011.
- [5] 司天琪,杜宇,易珂,等.气冷微堆自启停运行方案研究[J].核动力工程,2024,45(增刊1): 58-62. DOI: 10.13832/j.jnpe.2024.S1.0058.
- [6] 侯丞,孙征,赵守智,等.基于协同进化算法的小型移动核电源堆芯功率展平研究[J].核技术,2021,44(9): 090602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.090602.
- [7] 国家能源局,科学技术部.关于印发《“十四五”能源领域科技创新规划》的通知[EB/OL].(2021-11-29)[2025-01-08].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/03/content_5683361.htm.

National Energy Administration, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. Notice on the issuance of the "14th Five-Year Plan for Scientific and Technological Innovation in the Energy Field" [EB/OL]. (2021-

- 11-29) [2025-01-08]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/03/content_5683361.htm.
- [8] 邱磊磊, 范遂, 魏新宇, 等. 气冷微堆动态特性分析与稳态运行方案设计 [J]. *核动力工程*, 2024, 45(1): 139-144. DOI: 10.13832/j.jnpe.2024.01.0139.
- QIU L L, FAN S, WEI X Y, et al. Dynamic characteristics analysis and steady-state operation scheme design of gas-cooled microreactor [J]. *Nuclear power engineering*, 2024, 45(1): 139-144. DOI: 10.13832/j.jnpe.2024.01.0139.
- [9] 杨万里, 涂春鸣, 兰征, 等. 基于储能型柔性多状态开关的直流微电网与交流配电网柔性互联策略 [J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(5): 254-260. DOI: 10.16081/j.epae.202104021.
- YANG W L, TU C M, LAN Z, et al. Flexible interconnection strategy between DC microgrid and AC distribution grid based on energy storage flexible multi-state switch [J]. *Electric power automation equipment*, 2021, 41(5): 254-260. DOI: 10.16081/j.epae.202104021.
- [10] 曹梦龙. 混合能源移动发电系统优化配置研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- CAO M L. Research on optimal configuration of hybrid energy mobile power generation system [D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [11] 林加阳, 唐菟淳, 易永利, 等. 极端天气下含移动储能车的海岛微电网应急能量管理方法研究 [J]. *浙江电力*, 2021, 40(1): 95-105. DOI: 10.19585/j.zjdl.202101015.
- LIN J Y, TANG L C, YI Y L, et al. Study on emergency energy management method for islanded microgrid with mobile energy storage vehicle under extreme weather conditions [J]. *Zhejiang electric power*, 2021, 40(1): 95-105. DOI: 10.19585/j.zjdl.202101015.
- [12] 甘宇. 基于陆上可移动核电源的氦氙布雷顿系统建模仿真研究与功率预测 [D]. 北京: 华北电力大学 (北京), 2024. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2024.000739.
- GAN Y. Modeling simulation and system power prediction of Helium Xenon Brayton system based on land mobile nuclear power supply [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2024. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2024.000739.
- [13] 张成龙, 刘国明, 贺楷, 等. 气冷微堆燃料设计的中子学特性影响研究 [J]. *原子能科学技术*, 2021, 55(11): 2062-2069. DOI: 10.7538/yzk.2021.youxian.0026.
- ZHANG C L, LIU G M, HE K, et al. Research on influence of neutronics characteristics in fuel design of micro gas-cooled reactor [J]. *Atomic energy science and technology*, 2021, 55(11): 2062-2069. DOI: 10.7538/yzk.2021.youxian.0026.
- [14] 曾君, 徐冬冬, 郭华芳, 等. 面向可再生能源的微电网电能质量特点分析与综合评价方法研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(19): 10-16. DOI: 10.7667/PSPC151709.
- ZENG J, XU D D, GUO H F, et al. Renewable energy-oriented micro-grid power quality characteristic analysis and comprehensive evaluation [J]. *Power system protection and control*, 2016, 44(19): 10-16. DOI: 10.7667/PSPC151709.
- [15] 何立钢, 王怡聪, 王廷涛, 等. 含多类型异质资源的微电网两阶段黑启动恢复优化方法研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(17): 37-48. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230071.
- HE L G, WANG Y C, WANG T T, et al. A two-stage black-start restoration optimization method for a microgrid containing multi-type heterogeneous resources [J]. *Power system protection and control*, 2023, 51(17): 37-48. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230071.
- [16] 赵辉, 王涛, 胡平, 等. 改进 VSG 和下垂控制双驱动的孤岛微电网稳定运行控制策略 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2024, 36(10): 117-126. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.001401.
- ZHAO H, WANG T, HU P, et al. Control strategy for stable operation of islanded microgrid with dual-drive of improved VSG and improved droop control [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2024, 36(10): 117-126. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.001401.
- [17] 杜康, 刘艳, 叶茂, 等. 辅助风电场参与初期黑启动时储能电站容量配置策略 [J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(18): 62-68. DOI: 10.7667/PSPC161470.
- DU K, LIU Y, YE M, et al. Capacity configuration strategy of energy storage power station when assisting the wind farm in integrating into the preliminary black start [J]. *Power system protection and control*, 2017, 45(18): 62-68. DOI: 10.7667/PSPC161470.
- [18] 徐晓燕, 毛建锋, 沈云. 燃机电厂黑启动与保安柴油发电机组配置方案及启动方式研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(2): 92-100. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.013.
- XU X Y, MAO J F, SHEN Y. Research on the configuration scheme and starting method of black start and emergency diesel generator unit in gas turbine power plant [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(2): 92-100. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.013.

作者简介:



蒋戈凌

蒋戈凌 (通信作者)

1980-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事核电开发、微电网控制技术研究工作 (e-mail: jianggl@cnpe.cc).

(编辑 叶筠英)