

新能源微电网耦合小型反应堆的需求分析

梁继越, 张 婷, 乔鹏瑞, 王利霞, 王 雪

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要 新能源微电网以光伏、风力等为基础能源, 是电力供应体系的重要一环, 但目前仍然存在电力输出受风光环境影响大、输出不稳定、不可预测等多种问题亟待解决。本文分析了微电网的基本特征, 结合小型反应堆电源输出稳定、功率灵活可调、无需补给等特点, 梳理出了独立型微电网耦合小型反应堆实现持续稳定运行的潜在需求。基于国内外在微电网、小型反应堆电源方面的技术现状和发展趋势, 本文提出了将小型反应堆电源和风力、光伏、储能等新能源耦合配置构成微电网, 解决传统新能源微电网短板问题, 共同构建新的清洁能源体系的方案。

关键词 微电网; 核电源; 小型反应堆; 新能源; 稳定输出

中图分类号: TM61

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)10-0001-03

新能源微电网是指由风、光等新型能源、能量转换装置、用电单位、输配电系统等组成的小型发配用电网络^[1], 其能量来源主要是风能、光能等新能源。在没有大电网覆盖的地区, 新能源微电网可以发挥重要作用, 以实现区域供电。从使用场景来看, 新能源微电网主要包括: (1) 民用微电网, 如山区村庄、聚居区等; (2) 工商业微电网, 如开发区、高耗能企业等; (3) 特殊保障性微电网, 如偏远基地、机场、信息中心等; (4) 孤岛微电网, 如没有电网覆盖的海上孤岛等。新能源微电网按照是否接入大电网, 可以分为并网型和独立型, 可实现独立运行管理^[2]。并网型微电网通常与外部电网相连, 可以根据需要进行并网或独立运行模式的切换。独立型微电网不依赖于外部电网, 可以通过风、光等分布式电源、储能系统独立的给负荷供电。新能源微电网在今后的电力供应体系中具有重要地位。

1 传统微电网特征及问题

1.1 传统微电网特征

典型的新能源微电网由风力发电机组、光伏系统、柴油发电机组和储能装置等关键系统组成(见图 1)^[3]。其中风力发电机组和光伏系统是主要的能量来源, 柴油发电机组是整个微电网的备用能源, 在储能装置容量降低且电网需要持续输出时, 启动柴油发电机给电网供电。储能装置主要用于稳定微电网的电力输出, 在新能源微电网中起到能量调节和平衡负载功能。

并网型微电网由于其能源供给有外部大电网支撑, 因此其配置相对简单, 可以不设置储能装置及柴油发电机, 当微电网发电功率大于用电负荷时, 多余的电能向外部电网输送, 并通过外部电网供给整个网内负

荷使用。微电网发电功率小于所供负荷的情况下, 外部电网向微电网内部负荷供电, 以补充微电网的供电缺口。在外部电网的支持下, 并网型微电网虽然对内电力供给相对稳定, 但其在对外输出电力时, 依然需要储能装置或复杂的控制策略来稳定输出。对于独立型微电网, 由于风、光等能源具有季节特征显著、受环境因素影响严重、能量输出不可预测等多种不稳定因素, 目前的独立型微电网都必须配以储能装置来平抑波动, 以稳定电力输出, 同时配以可靠的柴油发电机组, 以弥补由于自然条件变化或负荷变化导致的风、光等能源输出不足时的空缺^[4]。

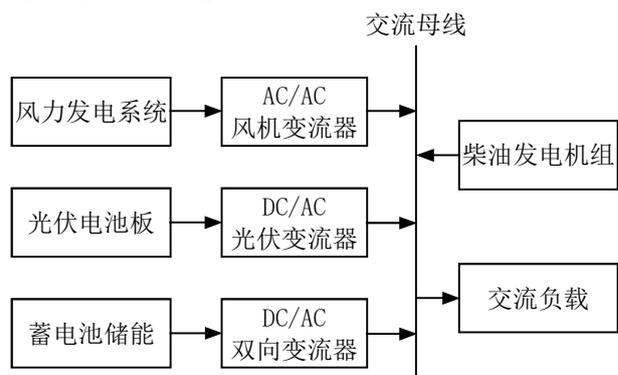


图 1 典型新能源微电网结构示意图

1.2 存在的问题分析

结合新能源微电网目前的发展现状和困扰问题分析, 并网型微电网对电力稳定输出的要求不高, 通过采用储能、优化控制策略等方式可以满足上网要求, 因此其对电力稳定输出的要求较低。

独立型微电网的布置地点通常处于孤立海岛、偏远地区等特殊使用场景, 在这种场景下的微电网采用

柴油发电机进行电力补充存在多种弊端：（1）新能源微电网配以柴油发电机的方案需要首先进行油料补给保障，如设置大型油料储罐、频繁的油料运输等，而这些在孤立海岛、偏远地区等特殊场景难以实现；（2）特殊场景对电力供应的稳定性和持续性要求极高，而柴油发电机的启停具有不稳定性，尤其是在潮湿的海岛、高原等地域环境存在紧急情况下无法启动的风险；

（3）孤立海岛等环境具有地域面积狭小的特征，柴油发电机的使用将带来巨大的噪声、空气和废液污染，对岛上环境造成严重破坏。柴油发电机的多种弊端成为特殊地区采用新能源微电网布置的痛点问题之一，亟须一种新型能源来实现稳定独立型微电网输出的功能，同时消除柴油发电机带来的困扰。

小型反应堆核电源电力供应稳定，功率水平从兆瓦级到百兆瓦级，可根据需要进行灵活配置和调节。小型反应堆核电源在一次建设后即可在不需要燃料补给的情况下长期稳定运行，一般在15~30年之间。另外，小型反应堆核电源的建设占地面积小，可以快速在现有场址上开展建设工作。

结合以上分析，小型反应堆核电源具有替代独立型新能源微电网中柴油发电机的潜在优势，可以在已建或待建的新能源微电网中与风力、光伏、储能等能源进行融合，以实现有效稳定微电网输出特性、显著延长微电网持续供能时间的功能。

2 微电网国内外研究现状

2.1 国外研究现状

新能源微电网在清洁能源、区域供电等领域具有着巨大的潜力和优势，发展前景广阔，全球各国都对新能源微电网的发展表现出极大兴趣。欧美等国在新能源微电网相关技术研究方面研发布局较早，并对新能源微电网与外部大电网的协调运行领域给予重点关注。国内在新能源微电网领域的研究起步较晚，但目前研究活跃，处于基础研究、关键问题攻关和工程建设并进的阶段。综合来看，世界各国结合各自新能源基本特征和发展情况，初步形成了新能源微电网发展技术路线和规划。

1. 美国。微电网的概念最早由美国电力可靠性技术协会（CERTS）在1999年首次提出，并主要对微电网的经济性和可靠性进行了讨论^[5]。关于微电网的完整概念，直到2002年才被进一步明确和完善，关于微电网的框架结构以及控制策略等理论逐渐形成。

美国针对微电网的研究工作主要集中在解决微电网的稳定性和可靠性方面，提出了“即插即用”的控

制策略。基于相关研究工作，美国还建设了一批微电网实验设施以及示范工程，用以测试相关理论工作，并为后续工程建设提供支撑。

2. 欧盟。欧盟在微电网研究方面主要集中在微电网的主从控制技术方面，重点解决微电网在外部电网中的接入技术问题，从而增加风力、光伏等各类分布式能源在电力系统中的比例。欧盟多所研究机构都在开展微电网技术研究工作，其中雅典国立大学（NTUA）较为深入，提出了多个微电网的结构与控制理论，为分布式能源系统接入外部电网的研究工作贡献了重要力量。

在保持微电网仿真技术、运行机制以及控制策略等理论技术研究的基础上，欧盟还通过各类支持计划，建设了一批微电网示范工程项目，如希腊基斯诺斯岛微电网、葡萄牙EDP项目、西班牙LABEIN项目等，进一步推动了微电网相关技术发展。

3. 日本。日本是亚洲研究和开发新能源微电网技术较早的国家，其国土面积狭小，本土能源资源匮乏，但光照和风力等资源相对充足，因此日本非常重视新能源的开发和应用研究工作^[6]。日本的微电网技术研究主要集中在混合型微电网和直流微电网等方面，重点解决能源资源的多元化供给问题。为了协调国内重点资源研究新能源微电网技术，日本成立了新能源产业技术综合开发机构（NEDO），自2003年开始就组织国内高校、科研机构和企业等开展微电网技术开发工作。日本目前建设了一批微电网示范工程，包括Hachinohe微电网项目、Aichi微电网项目等^[7-10]。

2.2 国内研究现状

我国在微电网技术研究领域的发展起步相对较晚，但在能源战略转型和环境友好发展的大背景下，国内对新能源微电网技术的发展给予高度重视。在“十二五”规划的推动下，国内先后出台了多个新能源微电网研究和建设指导文件，以支持新能源微电网技术的发展。在近年碳达峰、碳中和目标的牵引下，国内微电网技术呈现出蓬勃发展的势头。

国内试点工程中微电网主要形式以风、光、柴、储为主，由于是依靠自然资源进行发电，具有不可控和不可预知性的特点，因此必须配备补充能源，应对新能源电源不能发电的情况。现阶段，常见的补充能源是柴油发动机。

近年来，国内独立型微电网已进入实际探索阶段。主要典型案例有位于福鼎台山岛风光柴储一体化项目、瑞安市北龙岛光储柴互补微电网示范项目、珠海万山岛智能微电网示范项目、舟山的摘箬山岛新能源微电

网项目及东福山岛“风、光、柴、储”及海水淡化综合系统工程等项目。

2.3 国内外研究现状总结

综合目前情况来看, 新能源微电网功率范围通常在 MW 级至百 MW 之间, 独立型微电网以 MW 级功率为主, 且全部配置了柴油发电机作为备用电源。

小型核反应堆由于其具有功率密度大、寿期长、安全性高、机动灵活性好等优点, 世界各国都在积极开展研发工作, 但在与风、光等新能源微电网的耦合使用方面还没有相关报道, 处于概念研究阶段。我国在小型反应堆设计、建设和运行方面已经积累了一定的经验和基础, 具备开展新能源微电网耦合小型反应堆方案设计条件^[11-15]。

3 需求总结

在当前碳达峰、碳中和政策的指引下, 独立型新能源微电网将是解决孤立海岛、偏远地区等特殊场景下电力供应问题的重要形式。尽管新能源微电网具有能源清洁、布置灵活的显著优势, 但在实际实施过程中也存在多种弊端。

传统新能源微电网具有季节特征明显、受环境影响大、输出功率难以预测等特征, 导致了主力电源具有较大不稳定性, 因此必须采用柴油发电机和储能装置来稳定输出。柴油发电机的引入为新能源微电网的推广应用带来诸多限制, 尤其是在孤立海岛、偏远地区等特殊使用场景中, 难以实现油料的频繁运输和大容量存储, 进一步限制了独立型微电网的稳定和大容量使用。另外, 柴油发电机在使用过程中产生的噪声污染、废物污染成为独立型微电网发展不得不关注的问题。因此微电网的发展急需一种稳定输出、持续运行的可靠方案^[16]。

考虑到小型反应堆具有长寿命、小型、紧凑、高效、安全、机动、多功能等突出优势, 可以采用小型反应堆电源取代传统独立型微电网中的柴油发电机部分, 配合风、光等新能源稳定运行, 补足传统新能源微电网短板, 实现功率稳定输出。另外, 独立型新能源微电网多应用于海岛等面积有限的区域, 这对新能源微电网的功率容量提升造成了限制因素, 而小型反应堆电源则具有功率灵活、占地面积小的特征, 这也可以在一定程度上解决了地域面积对新能源微电网发展带来的限制^[17-18]。

结合以上分析, 将小型反应堆电源和风力、光伏、储能等新能源耦合配置使用, 是解决传统新能源微电网短板问题的重要模式, 将小型反应堆电源与风、光

等能源共同构建新的清洁能源体系, 助力国家碳达峰、碳中和目标的实现。

参考文献:

- [1] 王成山, 许洪华, 等. 微电网技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [2] 苏剑, 刘海涛, 吴鸣, 等. 分布式电源与微电网并网技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [3] 蒋莉萍, 李琼慧, 黄碧斌, 等. 中国分布式电源与微电网发展前景及实现路径 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [4] Hassan Farhangi, Geza Joos. Microgrid Planning and Design: A Concise Guide [M]. Wiley, 2019.
- [5] 梅文龙, 施佳余, 张旭东, 等. 微电网发展研究 [J]. 电源技术, 2017, 41(02): 334-336.
- [6] 曹杨. 微电网技术的应用现状和前景分析 [J]. 信息技术时代, 2022(11): 119-121.
- [7] 张浩, 王健建. 小型反应堆发展现状及推广分析 [J]. 中外能源, 2020, 25(10): 26-30.
- [8] Georgy T, Vladimir P. Modular Lead-Bismuth Fast Reactors in Nuclear Power [J]. Sustainability, 2012, 04(09): 2293.
- [9] Zrodnikov A V, Toshinsky G I, Komlev O G, et al. SV BR-100 module-type fast reactor of the IV generation for regional power industry [J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 415(03): 237-244.
- [10] Dragunov Y G, Stepanov V S, Klimov N N, et al. Nuclear power development in market conditions with use of multi-purpose modular fast reactors SVBR-75/100 [J]. Nuclear Engineering & Design, 2006, 236(14/16): 1490-1502.
- [11] 吴宜灿. 铅基反应堆研究进展与应用前景 [J]. 现代物理知识, 2018, 30(04): 35-39.
- [12] 何晨伟, 曾献, 张勇, 等. 第四代先进核能系统防液态铅铋高温腐蚀铝化合物涂层研发进展 [C]. 中国核学会 2019 年学术年会, 2019.
- [13] 易昊钰, 梁田, 陆成旭, 等. 铅基快堆用 CL-RASS 奥氏体不锈钢热变形组织的均匀性 [J]. 材料热处理学报, 2020, 41(05): 95-101.
- [14] 赵焘, 陈映雪, 曾献, 等. 一种铅基快堆用高硅不锈钢的热处理工艺优化及铅铋相容性研究 [J]. 工程科学学报, 2020, 42(11): 1488-1498.
- [15] 王旻, 易昊钰, 杨亚倩, 等. 一种新型铅基快堆燃料组件用奥氏体不锈钢的研制 [C]. 中国核学会 2019 年学术年会, 2019.
- [16] Roche C, Revol J P, Mandrillon P, et al. Conceptual Design of A Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier [J]. Accelerators and Storage Rings, 1995, 09(29): 164.
- [17] 直面挑战 追梦核裂变能可持续发展: “未来先进核裂变能: ADS 嬗变系统” 战略性先导科技专项及进展 [J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(04): 8.
- [18] 朱春颖, 沈海军, 白俊平. 浅谈微电网发展的现状和展望 [J]. 才智, 2019(07): 219.