

doi: 10.7690/bgzdh.2025.06.016

混合储能构网系统在低惯量军事哨所电网中的应用研究

荆启文, 郝思鹏

(南京工程学院电力工程学院, 南京 211167)

摘要: 针对偏远地区或独立供电军事哨所的特殊需求, 对混合储能构网系统在低惯量军事哨所电网中的应用进行研究。分析系统惯量动力学和频率控制机制, 阐明混合储能系统如何模拟同步发电机, 探讨混合储能系统相较于单一电池储能系统在频率调节、孤岛运行和电网再同步等关键问题中的应用优势。研究结果表明: 该技术对于提升偏远地区电网的稳定性、确保军事设施的可靠运行以及推动向可持续能源格局的转型具有较为重要的意义。

关键词: 混合储能系统; 低惯量系统; 电力系统控制

中图分类号: TM7 **文献标志码:** A

Research on Application of Hybrid Energy Storage System in Low Inertia Military Post Power Grid

Jing Qiwen, Hao Sipeng

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Aiming at the special requirements of remote areas or independent power supply military sentry posts, the application of hybrid energy storage system in low-inertia military sentry post power grid is studied. The inertia dynamics and frequency control mechanism of the system are analyzed, and how the hybrid energy storage system simulates the synchronous generator is clarified. The application advantages of the hybrid energy storage system compared with the single battery energy storage system in key issues such as frequency regulation, island operation and grid resynchronization are discussed. The results show that this technology is of great significance for improving the stability of power grids in remote areas, ensuring the reliable operation of military facilities and promoting the transformation to a sustainable energy pattern.

Keywords: hybrid energy storage system; low inertia system; power system control

0 引言

在偏远地区或独立供电的军事哨所中, 稳定、高效的电力供应至关重要。随着全球范围内发电去碳化的推进, 可再生能源技术的广泛应用, 尤其是太阳能和风能的部署规模迅速扩大^[1]。这些可再生能源通过跟网型变流器接入电网, 利用变流器与电网的频率和电压同步, 从而实现电力并网^[2]。跟网型变流器依赖于电网频率和电压, 并调整其输出进行适配。这种技术逐步取代了传统的基于同步发电机的发电模式, 但也引发了电网稳定性的新挑战^[3]。

随着可再生能源发电渗透率的提升, 电网脆弱性问题愈发凸显, 依赖跟网型变流器的可再生能源发电受到技术限制, 难以在高渗透率下提供足够的系统惯量支持^[4]。相比之下, 构网型变流器能够主动建立并控制电网的电压和频率, 即使在完全没有同步发电机的情况下, 也能为电网提供惯量和稳定性支持, 成为解决上述问题的重要工具^[5]。

近年来, 模拟同步发电机行为的控制算法研究迅速发展^[6], 其中虚拟同步发电机技术因其在惯量支持方面的潜力受到广泛关注。构网型变流器采用直接电压控制技术, 可以模拟或产生发电机电势的效果, 从而实现与传统同步发电机相似的功能^[7]。与跟网型变流器不同, 构网型变流器能够独立运行, 并在孤岛模式下提供频率和电压支撑, 特别适合应用于军事哨所等偏远地区的独立供电场景^[8]。

构网型变流器的高效运行往往需要与储能系统结合使用, 尤其是在瞬态事件中提供快速响应支持^[9]。储能系统(如电池和超级电容器)可在频率调节、电压支持和电网韧性方面发挥重要作用, 但单一储能技术通常难以同时满足高功率和高能量密度的需求, 且可能因过大设计而导致成本上升及储能系统过度退化^[10]。

为解决这一问题, 笔者提出一种混合储能系统的方法, 结合超级电容器和电池储能系统的优势,

收稿日期: 2024-08-13; 修回日期: 2024-09-14

基金项目: 江苏省科技成果转化专项资金(BA2022105)

第一作者: 荆启文(2000—), 男, 江苏人, 硕士。

实现电力和能量的解耦。在该方案中, 超级电容器提供高功率密度和快速响应服务, 而电池则承担基于能量的长期支撑任务, 从而优化系统设计, 延长电池寿命, 并降低总体成本。储能系统与构网型变流器的直流侧集成, 可以为偏远地区哨所的独立电网提供高效、稳定的运行支持。

1 系统分析

如图 1 所示, 笔者研究的场景是一个与 2.5 MW 电网转换系统相连的弱电网。该系统由作为外部电网的等效发电机、电池、超级电容器、本地负载、交/直流电源转换器和变压器组成。在该测试基准中, 外部电网由一个等效发电装置模拟, 该装置由等效惯量和阻尼组成。此外, 还增加了一个本地负载, 以便在系统中产生不同的事件^[11]。

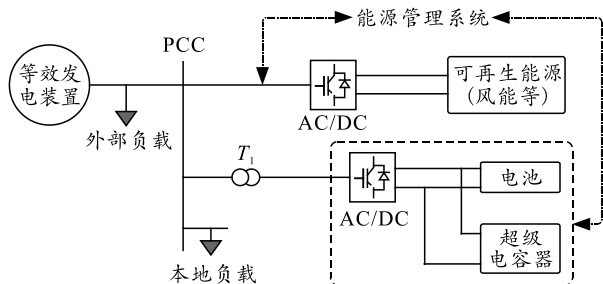


图 1 具有等效外部电网的一般模拟场景

由图 1 可见: 能源管理系统 (energy management system, EMS) 是一个硬件和软件控制平台^[12], 集成了各种算法, 旨在帮助终端用户在深入了解存储技术及其在网络规模实际应用中的性能的基础上进行优化规划和多服务操作^[13]。管理电池或其他储能装置 (如超级电容器) 以及各种系统组件的电池管理系统工作^[14]。此外, EMS 还可充当 SCADA 系统, 收集和处理数据, 用于实时决策、实时分析和数据存档, 以备将来分析之用。

开发系统的外部电网等效额定值: 100 MVA, 12 kV, 惯量为 3 s; 外部负载 $P=30$ MW, $Q=6$ Mvar; 本地负载 $P=1.62$ MW, $Q=0$, 电缆长度 0.5 km, $R=0.125$ Ω /km, $X_1=0.106$ Ω /km, $C=0.306$ μ F/km。

对与混合储能系统相连的电力电子设备进行控

制和参数设置, 同时提供快速响应服务, 利用从直流母线上快速获取的信号。在更高层次上, 还将有另一个能源管理系统, 负责微电网管理、SCADA 监控以及与其他电力设备的连接^[15]。

2 分层控制结构

图 2 展示了用于执行跟网型电力电子发电装置不同控制级别的一般分层控制结构。为了实现灵活的高级控制, 设计了该系统用于验证混合储能系统和构网型系统的能力。该系统使用 Modbus TCP 进行通信。Modbus TCP 是本研究中使用的标准通信协议, 用于 InMS 设备控制其他设备并与 SCADA 监控等其他系统进行通信。

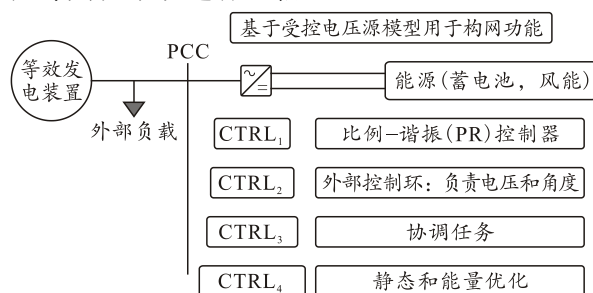


图 2 基于构网型功率转换器的动态研究单元的控制结构

由图 2 可见: 第一控制级 (CTRL₁) 由内环电流控制器、功率电子级组成, 可向变流器提供调制电压信号。CTRL₂ 主要与外环控制器和电网功能有关, 可向 CTRL₁ 提供适当的输入信号。其他电网功能可作为 CTRL₂ 和 CTRL₃ 外环控制的一部分, 如虚拟惯量和频率控制或功率振荡阻尼 (power oscillation damping, POD)。

图 3 显示了构网动作的核心, 位于 CTRL₂ 层, 用于管理电压和相角。在本项目中, 直流侧由电池和超级电容器组成, 这样超级电容器可以完成快速响应操作, 而电池则可以完成其他操作。通过混合 2 种技术, 可以提供不同类型的服务, 如快速削峰、同步虚拟惯量、频率控制和 POD。CTRL₃ 和 CTRL₄ 主要涉及附加任务或组件的协调和虚拟化。图 3 显示了所使用的辅助控制回路: 无功功率/电压下降控制。

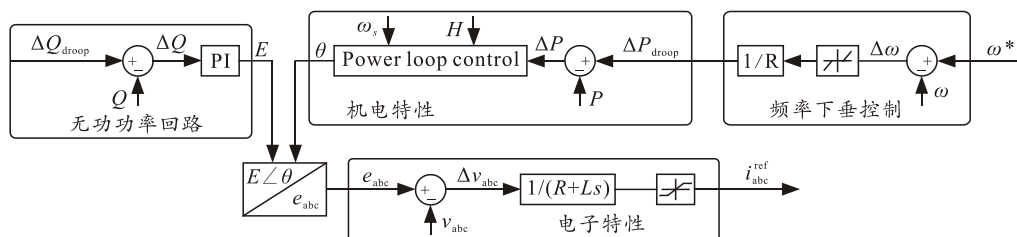


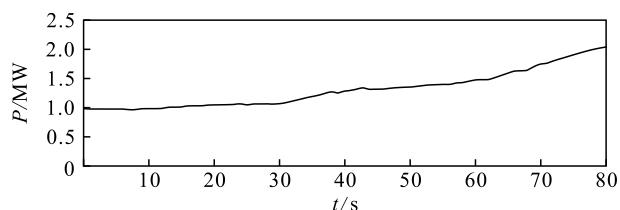
图 3 TRL2 级别的外部控制环路

图 3 所示的自同步机制允许变流器与外部电网同步运行。自同步机制有不同的变体,如功率频率解耦控制($P-f$)或虚拟同步机控制。这种机制会产生一个参考角输出,作为 CTRL₂ 的输入。

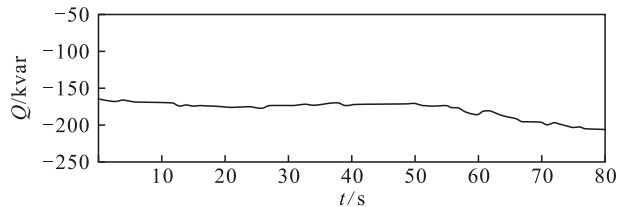
3 仿真实验

笔者利用图 1 所示的等效电网对开发的构网控制概念进行测试。为了适配所使用的小型系统的晶闸管,笔者选择一个较小的虚拟导纳。本次测试的目的是检查以下能力:1) 变流器的启动和孤岛模式下的工作;2) 负载变化和重新同步时的孤岛模式支撑;3) 从孤岛运行模式切换到并网运行模式。

仿真包括 PSCAD 中的初始化部分,先检查混合储能系统变流器在孤岛模式下的启动情况,然后仿真显示混合储能系统的并网运行,测试其为本地负载供电的能力以及与外部主电网的同步性。图 4、5 显示了这种情况下使用的风力功率曲线。

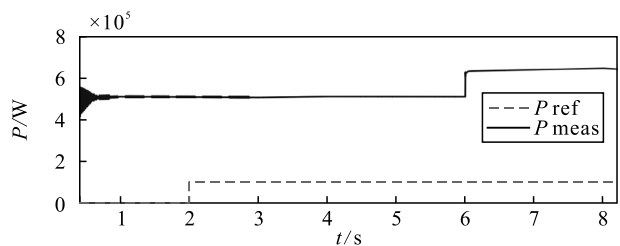


(a) 风电场的有功功率

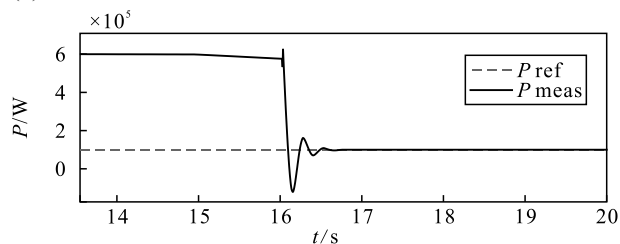


(b) 风电场的无功功率

图 4 风电场的有功功率和无功功率



(a) 变流器初始化和孤岛模式下负载变化时的有功功率



(b) 同步和并网时的有功功率

图 5 混合储能系统变流器的有功功率

图 5 和 6 显示了采用构网控制的混合储能系统有功和无功功率输出的变化情况。

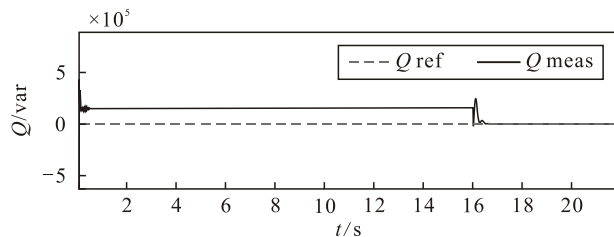


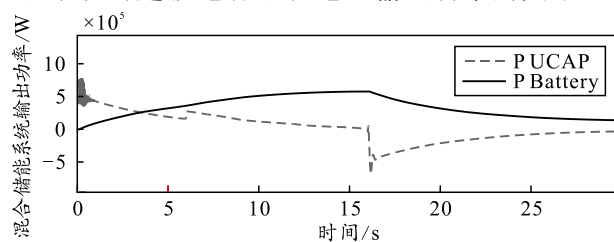
图 6 混合储能系统变流器的无功功率(16 s 时从孤岛模式切换到并网模式)

由图 5、6 可以看出:混合储能构网系统和风力模型能够通过 PSCAD 的初始化部分,并在孤岛模式下成功启动。构网变流器系统能够通过向当地剩余的约 500 kW 负荷供电来组成电网。为了测试构网变流器在孤岛模式下为本地负荷供电的能力,在 6 s 时,孤岛负载阶跃增加了约 120 kW。

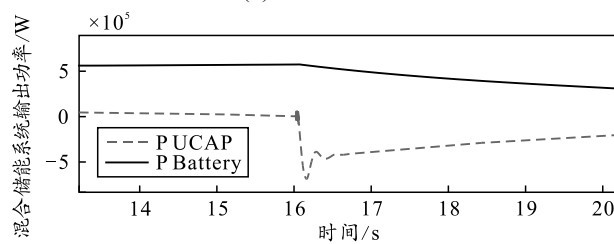
变流器能够自动增加输出功率,为本地负载供电。重新同步发生在 $t=16$ s。构网变流器系统的自动切换发生在模拟时间的 16 s 左右,这表明系统的同步逻辑运行成功。在切换到并网模式后,变流器根据并网模式运行所需的功率设定值(本例中设定为 1 MW)改变其有功功率输出,而在孤岛模式运行期间,它仅向本地负载供电。

无功功率支撑也存在同样的问题如图 6 所示,在孤岛模式下,构网技术为本地负载提供一些无功功率支撑,而在并网模式下运行($t=16$ s)后,移动到零无功功率设定值。

构网变流器的平稳反应归功于由超级电容器和电池技术组成的直流侧混合能源支持。图 7 显示了混合系统对超级电容器和电池输出功率的贡献。



(a) 总体响应



(b) 重新同步和并网时段的特写

图 7 储能技术的输出功率比较

由图 7 可以看出：所有的快速反应都由超级电容器来补偿，而电池的作用是支持混合解决方案的长期恢复。超级电容器的这些快速反应发生在 $t=6$ s 时，即本地阶跃负载变化时，以及 16 s 时，即从孤岛同步切换到并网模式后。为响应本地负载的增加，超级电容器的输出功率增加，而在切换到并网模式时，超级电容器吸收剩余功率，使变流器在并网模式下遵循所要求的设定点。从孤岛模式切换到并网模式时，超级电容器在不到 10 s 的时间内就消耗了近 10% 的剩余电量 (state of charge, SOC)，这比电池快得多。

图 8 和 9 显示了电池储能系统和超级电容器在混合储能系统中的 SOC 曲线，显示了超级电容器在很短时间内吸收大量电能的演变过程。

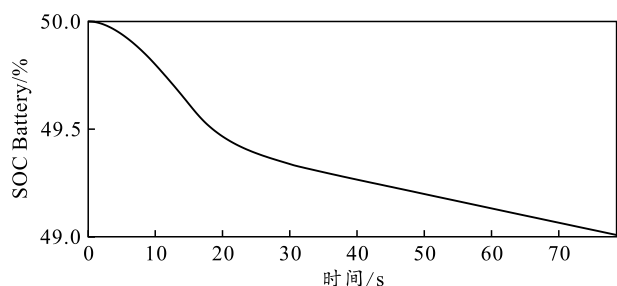


图 8 电池系统的 SOC

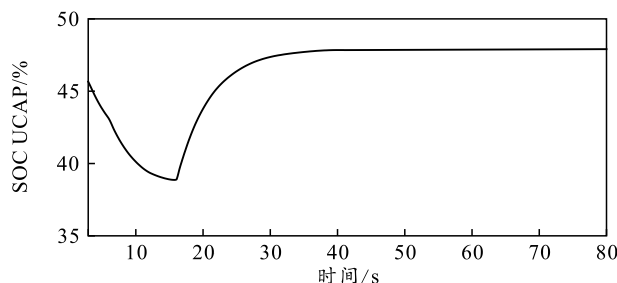


图 9 超级电容器组件的 SOC

由于超级电容器的快速反应，在电池运行期间压力水平可以显著降低。可以减少电池的尺寸，降低电池的运行和维护成本，并增加与其他电网服务的协同作用，提高经济效益 (如削峰填谷或套利)。

4 结束语

笔者基于 PSCAD 仿真分析，提出一种适用于偏远地区军事哨所的混合储能构网系统解决方案，主要结论如下：1) 高效电网形成：系统可在孤岛与并网模式间自动切换，并在孤岛模式下独立形成电网，确保供电稳定；2) 灵活性与稳定性：电池与超级电容器的混合设计提高了动态稳定性，优化了运行灵活性；3) 减少电池衰减：高频事件由超级电容器处理，有效降低了电池老化并改善了服务响应能

力；4) 优化配置：合理设计超级电容器容量和调整构网变流器参数，可显著提升系统整体性能；5) 该系统在孤岛模式下能稳定应对负载变化，在并网模式下提供可靠的调节服务，为偏远地区独立供电的关键设施提供高效解决方案。

综上所述，笔者提出的混合储能构网系统为偏远地区军事哨所的独立供电提供了可靠的解决方案。该系统不仅能够在孤岛模式下同步并稳定供电，而且在负载阶跃变化的情况下也能维持供电稳定；在并网模式下还能够提供频率调节和其他辅助服务，显著提升了供电系统的灵活性与可靠性。

参考文献：

- [1] HE C, GENG H, RAJASHEKARA K, et al. Analysis and Control of Frequency Stability in Low-Inertia Power Systems: A Review[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(12): 2363-2383.
- [2] 李月明, 丁泽民, 余又红, 等. 采用变分模态分解的微型燃气轮机发电系统混合储能功率分配策略[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(10): 183-195.
- [3] 冯俊宗, 叶志祥, 丁嘉熹, 等. 电力系统惯量安全机组组合优化决策研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022, 27(5): 122-129.
- [4] 赵宏程, 李再华, 赖俊宏, 等. 基于 RPC 的混合储能接入双流制牵引供电系统协调运行方法[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(9): 2862-2870.
- [5] 叶林, 王凯丰, 赖业宁, 等. 低惯量下电力系统频率特性分析及电池储能调频控制策略综述[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 446-464.
- [6] 孙志媛, 彭博雅, 孙艳. 考虑多能互补的电力电量平衡优化调度策略[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 115-122.
- [7] 赵强, 张玉琼, 陈紫薇, 等. 计及储能的低惯量电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 904-914.
- [8] 刘昕, 谢丽蓉, 马兰, 等. 考虑风电最大效益的混合储能双层平抑控制模型[J]. 太阳能学报, 2024, 45(12): 596-605.
- [9] 陈厚合, 齐文博, 姜涛, 等. 提升海上风电经 VSC-MTDC 接入的低惯量系统频率稳定综合控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 103-110.
- [10] 虞启辉, 高胜显, 孙国鑫, 等. 基于风光互补发电系统的压缩空气混合储能系统容量优化[J]. 新能源进展, 2024, 12(1): 74-81.
- [11] 牛景瑶, 王德林, 喻心, 等. 提高风电消纳水平的低惯性电网参数优化[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(2): 111-120.