

低压交直流微电网系统与分布式电源并网技术研究

李 潇 林 鑫 李一林 刘文魁 庞素敏
平高集团有限公司 河南平顶山 467000

摘 要: 在大力倡导发展绿色低碳经济的今天, 光伏和储能等分布式电源在新兴电力系统建设方面具有巨大的潜力。本文利用自主搭建的四端口低压交直流微电网系统, 对光伏、储能单一分布式电源和混合分布式电源并网进行了模拟, 验证了该系统的可行性和运行稳定性, 同时模拟了不同场景下光伏和储能的协同配合, 对分布式电源大规模并网应用提供支撑。

关键词: 微电网; 分布式电源; 光伏; 储能

Research on Low-voltage AC-DC microgrid System and Distributed Power Grid connection Technology

Xiao Li, Xin Lin, Yilin Li, Wenkui Liu, Sumin Pang
Pinggao Group Co., Ltd. Henan Pingdingshan 467000

Abstract: In today's vigorously advocating the development of green and low-carbon economy, distributed power sources such as photovoltaic and energy storage have great potential in the construction of emerging power systems. This paper uses the construction of four-port low voltage ac / dc micro grid system, the photovoltaic, energy storage single distributed power and hybrid distributed power grid simulation, verify the feasibility and operation stability of the system, and simulated the different scenarios of photovoltaic and energy storage coordination, provide support for distributed power large-scale grid application.

Keywords: Microgrid; Distributed power supply; Photovoltaic; Energy storage

引言:

随着电网规模的不断扩大, 传统电网因可观测性和可控制性较差, 始终受到大规模停电事故的威胁, 难以满足不同用户多样性的用电需求, 不利于资源的优化配置和电力工业与社会和环境的协调发展^[1-2]。以智能电网建设为核心的未来电网越来越成为电网结构发展趋势^[3-4]。分布式发电和微电网技术在智能电网的发展中占据重要的地位, 能够有效实现可再生能源建设与电网建设的协调、可持续发展, 支持国家低碳经济, 为社会提供安全、可靠、清洁、优质的电力保障^[5-8]。

最早的微电网概念雏形由美国 Wisconsin 大学的 R. H. Lasseter 教授于 2001 年提出^[9], 之后官方定义由电力可靠性技术解决方案协会 (CERTS) 正式给出^[10]。交直流混合微电网属于微电网结构进一步发展的成果, 其概念由新加坡南洋理工大学的 Poh Chiang Loh 教授在 2010 年提出^[11], 并给出了典型的交直流混合微电网拓扑结构图。

国内在此方面起步较晚, 最早在河北电力科技园进行了交直流混合微电网实际应用, 其采用“光—储—热”一体化系统结构。2015 年, “863” 计划项目“高密度分布式能源接入交直流混合微电网关键技术” 正式启动, 并于 2017 年 8 月正式投运。

为响应国家“双碳”目标, 平高集团自主搭建了低压交直流微电网系统, 实现了典型直流源、网、荷、储系统中所包括的各种元件的动态模拟, 通过调节各种动态模拟设备参数以及投切负荷等操作模拟直流微电网的各种运行方式。本文首先对该交直流微电网系统原理进行了介绍, 并在此基础上利用该系统模拟了光伏、储能并网运行特性, 为进一步提升分布式电源可靠性并入电力系统奠定基础。

一、低压交直流微电网系统

低压交直流微电网系统是由四个 MMC 构成的四端口微电网, 可通过模拟组合柜进行灵活配置, 构建直流电

压等级 750V，交流电压等级 380V 的交直流微电网拓扑结构，形成包含模拟光伏发电、风电场、储能电池接入电网等多种分布式电源并网场景的微电网系统，借助本系统可以开展对光伏、风电和储能等分布式电源并网技术的研究。低压交直流微电网系统拓扑如图 1 所示。

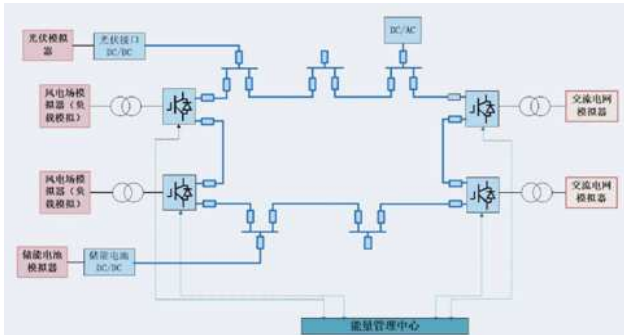


图 1 低压交直流微电网系统拓扑

从图 1 可以看出，低压交直流微电网系统包含 MMC 换流阀、低压直流开关、DC/AC 换流器、交流电网模拟器、光伏模拟器、DC/DC 接口、储能电池模拟器、风电场模拟器等设备。模拟分布式电源并网时，电网模拟器通过 MMC 换流阀与直流微电网相连，为直流微电网构建稳定的 750V 直流电压。光伏模拟器输出的直流电经过光伏 DC/DC 升压至 750V 后并入直流微电网中，储能电池模拟器通过储能 DC/DC 并入直流微电网中，可以实现储能电池和直流微电网之间的能量双向流动，风电场模拟器输出的交流电通过 MMC 换流阀并入直流微电网中。

二、分布式电源并网技术研究

本文利用四端口低压交直流微电网系统研究光伏、储能等分布式电源并网运行特征。

1. 光伏并网

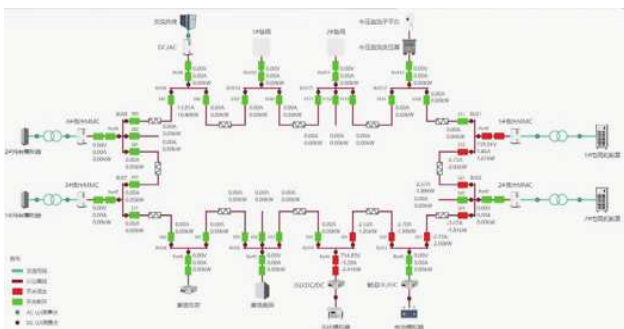


图 2 模拟光伏并网拓扑图

启动低压交直流微电网系统中光伏电源模拟器、光伏 DC/DC、1#MMC 和 1#电网模拟器、低压开关等设备模拟光伏并网系统，如图 2 所示（其中红色表示低压开关处于闭合状态，绿色表示低压开关处于断开状态）。1#电网模拟器设置为 220V、50Hz 的工频交流，1#MMC 工作

在定直流电压模式下，用以维持 750V 母线电压。光伏模拟器经光伏 DC/DC 连接至母线。其中光伏 DC/DC 工作在最大功率追踪控制模式下^[12, 13]，光伏模拟器采用 SAS 模式来模拟实际光伏板的电流和电压输出。SAS 模式下模型公式为：

$$V = \frac{V_{oc} \ln\left(2 - \left(\frac{I}{I_{sc}}\right)^N\right)}{\ln(2) - R_s \frac{I - I_{sc}}{V_{oc}}}$$

其中

$$R_s = \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}}, \quad N = \frac{\ln(2 - 2^a)}{\ln\left(\frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right)}$$

$$a = \frac{V_{mp} \left(1 + \frac{R_s I_{sc}}{V_{oc}}\right) + R_s (I_{mp} - I_{sc})}{V_{oc}}$$

式中， V_{oc} 为开路电压， I_{sc} 为短路电流， V_{mp} 为最大功率点电压， I_{mp} 为最大功率点电流。



图 3 光伏并网功率曲线图

SAS 模式下光伏输出功率分别设置为 2.5kW、4kW 和 8.5kW，相应的 1#电网模拟器、光伏 DC/DC、光伏模拟器的功率曲线如图 3 所示。在考虑线路损耗的情况下，1#电网从光伏模拟器中吸收的功率分别为 -1.6kW、-3.2kW 和 -7.5kW（负值表示电网从光伏模拟器吸收电能）。

2. 储能并网

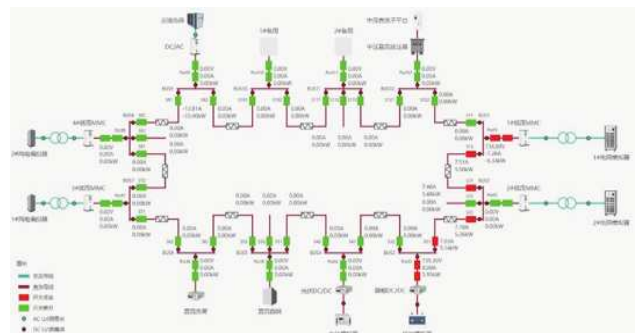


图 4 模拟储能并网拓扑图

启动低压交直流微电网系统中储能电池模拟器、储能DC/DC、1#MMC和1#电网模拟器、低压开关等设备模拟储能并网系统，如图4所示。1#MMC和1#电网模拟器参数设置保持不变，储能电池模拟器经储能DC/DC连接至母线，储能DC/DC为双向DC/DC换流器，此工况下采用定功率控制。当储能模拟器处于放电状态时，储能DC/DC工作在升压模式，并向直流母线提供电能；当储能模拟器处于充电状态时，储能DC/DC工作在降压模式，并储存网侧多余电能^[14, 15]。

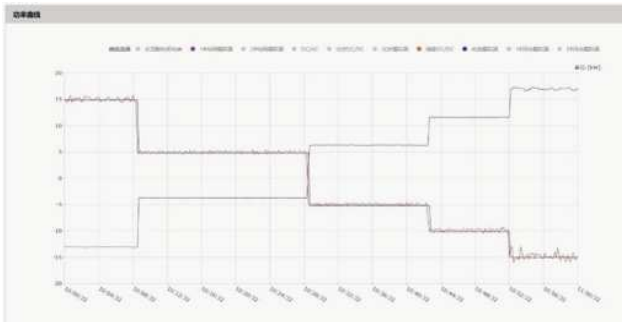


图5 储能并网功率曲线图

模拟储能并网运行结果如图5所示，储能电池模拟器输出功率分别为15kW、5kW、-5kW、-10kW和-15kW（正值表示储能处于放电状态，负值表示储能处于充电状态）。当储能处于放电状态时，对应的1#电网模拟器吸收功率分别为-13.1kW和-3.8kW；当储能处于充电状态时，对应的1#电网模拟器向储能电池模拟器提供功率分别为6.3kW、11.5kW和17kW。

3. 光伏和储能同时并网

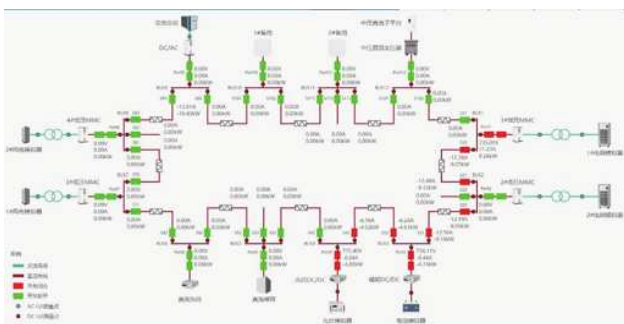


图6 模拟光伏和储能同时并网拓扑图

启动1#电网模拟器、1#MMC、光伏模拟器、光伏DC/DC、储能电池模拟器、储能DC/DC和低压开关等设备模拟光伏和储能同时并网场景。光伏模拟器、光伏DC/DC、储能电池模拟器和储能DC/DC控制策略保持不变。

光伏模拟器输出功率为5kW，储能电池模拟器输出功率依次设定为0、5kW、10kW和15kW，光伏和储能同时向电网供电，模拟光伏输出功率不足，由储能继续向

电网供电的场景，模拟结果如图7所示。1#电网模拟器吸收功率分别为-4.2kW、-8.5kW、-13kW和-17.3kW。保持其他参数不变，继续增加光伏输出功率至8.5kW，1#电网模拟器吸收功率为-20.1kW。



图7 光伏和储能向电网充电功率曲线图

光伏输出功率为10kW，储能电池模拟器功率依次设定为-5kW、-10kW、-8.5kW，功率曲线如图8所示。当储能电池模拟器功率为-5kW时，1#电网模拟器功率为-3.3kW，光伏同时向储能和电网供电，模拟光伏输出功率充足，一部分存储电能能在储能中。当储能电池模拟器功率为-10kW时，1#电网模拟器功率为1.6kW，由光伏和1#电网向储能充电；当储能电池模拟器功率为-8.5kW时，1#电网模拟器功率为0，光伏电能全部输入到储能电池模拟器中。



图8 光伏输出功率为10kW时，
光伏和储能并网功率曲线图

三、总结

本文利用低压交直流微电网系统开展光伏并网、储能并网、光伏和储能同时并网场景模拟，并研究了各种场景下的分布式电源并网运行特征，以及不同场景下光伏和储能协同控制模式的选择等，验证了低压交直流微电网系统运行稳定性，同时为分布式电源更好地接入城市大电网奠定了基础。

参考文献：

[1]陈树勇，宋书芳，李兰欣，等.智能电网技术综述[J].电网技术，2009，33（08）：1-7.

- [2] 孟凡超, 高志强, 王春璞. 智能电网关键技术及其与传统电网的比较[J]. 河北电力技术, 2009, 28 (S1): 4-5.
- [3] 李博, 高志远, 曹阳. 智能电网支撑智慧城市关键技术[J]. 中国电力, 2015, 48 (11): 123-130.
- [4] 高志远, 姚建国, 郭昆亚, 等. 智能电网对智慧城市的支撑作用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (11): 148-153.
- [5] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (02): 10-14.
- [6] 张诚, 檀志恒, 晁怀颇. “双碳”背景下数据中心氢能应用的可行性研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43 (06): 327-334.
- [7] 黄强, 郭恂, 江建华, 等. “双碳”目标下中国清洁电力发展路径[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55 (12): 1499-1509.
- [8] 刘黎明, 王雪斌. 分布式发电及其在电力系统中的运用[J]. 电器工业, 2022 (04): 75-77.
- [9] LASSETER R H. Microgrids[C]. 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. New York: IEEE, 2002:305-308.
- [10] SAHOO S K, SINHA A K, KISHORE N K. Control Techniques in AC, DC, and Hybrid AC-DC Microgrid: A Review[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(02):738-759.
- [11] LIU X, WANG P, LOH P C. A hybrid AC/DC micro-grid[C]. 2010 Conference Proceedings IPEC, Singapore: IEEE, 2010:746-751.
- [12] 赵宏, 潘俊民. 基于Boost电路的光伏电池最大功率点跟踪系统[J]. 电力电子技术, 2004, 38 (3): 55-57.
- [13] 靳肖林, 文尚胜, 倪浩智, 等. 光伏发电系统最大功率点跟踪技术综述[J]. 电源技术, 2019, 43 (03): 178-181.
- [14] 秦文, 柳雪松, 韩肖, 等. 清直流微电网储能系统自动充放电改进控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38 (7): 1827-1834.
- [15] 邱培春, 葛宝明, 毕大强. 基于蓄电池储能的光伏并网发电功率平抑控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (3): 29-33.