

直流微电网稳压控制与均流策略研究

吴志毅 140602198402281718

摘要：直流微电网是未来分布式能源接入的重要载体，能够有效整合光伏、风电等可再生能源发电单元，降低交流变换环节的能量损耗，提升供电系统可靠性。直流母线电压稳定性与多储能单元功率分配均匀性，是直流微电网稳定运行的核心技术指标。本文分析了直流微电网运行中电压波动和功率分配不均的主要诱因，梳理了现有稳压控制与均流策略的技术特点，针对传统下垂控制存在的电压偏差和均流精度矛盾问题，提出了一种引入电压二次补偿的改进自适应下垂控制策略，通过自适应调整下垂系数补偿线路阻抗差异，同时利用通信链路补偿母线电压偏差，仿真结果表明，该策略在保证均流精度的同时，将母线电压偏差控制在 1% 以内，提升了系统整体运行稳定性。

关键词：直流微电网；稳压控制；均流策略；下垂控制

一、引言

随着“双碳”目标的推进，可再生能源分布式发电技术得到快速发展，光伏、风电等新能源出力具有较强的随机性和波动性，直接接入大电网会对系统电压稳定性造成冲击。直流微电网作为分布式新能源、储能单元与负荷的集成供能系统，不需要跟踪交流相位、不存在频率稳定问题，同时能够减少电力变换环节的能量损耗，对分布式新能源的接纳能力更强，近年来成为分布式供能领域的研究热点。

在直流微电网运行过程中，母线电压波动会影响负荷供电质量，极端情况下会触发保护装置动作导致系统脱网；而多并联储能单元或分布式电源出力不均会导致部分单元过载运行，缩短设备使用寿命，甚至引发热稳定故障。因此，研究有效的稳压控制与均流策略，保证直流母线电压稳定、实现多单元功率均匀分配，是直流微电网推广应用的前提条件。

二、直流微电网电压波动与功率不均诱因分析

直流微电网的核心结构是多分布式发电单元、储能单元通过 DC/DC 变流器并联接入直流母线，公共母线连接负荷与并网变换器实现与大电网的能量交互，在孤岛运行模式下，母线电压完全依靠本地单元的控制策略调节。导致直流母线电压波动的主要原因包括两个方面：一是新能源出力的随机性，光照强度、风速变化会导致光伏发电和风电出力快速波动，当出力与负荷需求不匹配时，母线电压会出现偏离额定值的波动；二是负荷投切过程中的功率突变，大容量负荷投入

会造成母线电压骤降，切除后又会出现电压骤升，如果控制策略响应速度不足，就会产生持续电压波动。

多并联单元功率分配不均的核心诱因主要来自两个方面：一是各单元连接到母线的线路阻抗存在差异，下垂控制策略的输出功率与线路阻抗成反比，阻抗差异会导致相同下垂系数下各单元出力不一致；二是传统固定下垂系数无法适应系统负载率的动态变化，轻载条件下均流误差较大，重载条件下电压偏差超出允许范围。此外，线路阻抗会随运行温度变化发生漂移，进一步加大了均流控制的难度。

三、现有稳压控制与均流策略研究现状

目前直流微电网常用的控制架构分为集中式控制、分布式控制和分散式控制三类，不同架构对应不同的稳压与均流策略。集中式控制通过中央控制器采集所有单元的运行数据，统一计算每个单元的功率指令，能够实现高精度的均流控制，同时可以精准将母线电压稳定在额定值，但集中式控制过度依赖高速通信网络，一旦中央控制器或通信链路发生故障，整个控制系统会陷入瘫痪，可靠性较低。

分散式控制以传统下垂控制为代表，各单元仅利用本地信息进行控制，不需要通信链路，可靠性最高，因此工程应用最为广泛。传统下垂控制模拟同步发电机的下垂特性，通过 $P-U$ 下垂特性调整变流器输出电压，实现功率自动分配，但是该方法存在难以调和的矛盾：下垂系数越大，均流精度越高，但母线电压偏差越大；下垂系数越小，电压偏差越小，但均流精度越低。同时传统下垂控制没有考虑线路阻抗差异的影响，当线路阻抗差异较大时，均流误差会远超允许范围。

为解决传统下垂控制的缺陷，学界提出了多种改进策略：一种是引入虚拟阻抗技术，通过在控制环节添加虚拟阻抗抵消实际线路阻抗的差异，改善均流精度，但虚拟阻抗会进一步加大电压降，增大电压偏差；另一种是自适应下垂控制策略，根据系统运行状态动态调整下垂系数，在不同负载率下平衡电压偏差和均流精度，但该方法无法完全消除线路阻抗差异带来的影响，也无法补偿已经产生的电压偏差。

四、改进自适应下垂控制策略设计

针对传统下垂控制存在的问题，本文提出一种引入电压二次补偿的改进自适应下垂控制策略，分为两个核心环节：自适应下垂系数调整环节和电压偏差二次补偿环节。

在自适应下垂系数调整环节，首先根据各单元的额定容量设定初始下垂系数，

然后实时采集各单元输出电流，计算相邻单元输出电流的偏差，根据电流偏差动态调整下垂系数：当某单元输出电流明显大于其他单元时，适当减小该单元的下垂系数，降低其输出功率；反之则增大下垂系数，提高输出功率，通过动态调整抵消线路阻抗差异带来的电流偏差，保证各单元输出功率与额定容量成正比。该过程仅需要相邻单元交换电流信息，通信量小，实现难度低。

在电压偏差二次补偿环节，由母线电压检测单元采集实际母线电压，计算实际电压与额定电压的偏差，通过低带宽通信链路将电压偏差广播给所有并联单元，各单元根据电压偏差对下垂控制的参考电压进行二次补偿，当母线电压低于额定值时，提升参考电压抬高母线电压，反之则降低参考电压，从而将母线电压偏差消除。由于仅需要广播电压偏差信息，通信频率低，对通信可靠性要求远低于集中式控制。

五、仿真验证与结果分析

为验证本文提出策略的有效性，搭建了包含两台并联储能变流器的直流微电网仿真模型，设定额定母线电压为 400V，线路阻抗分别为 0.2Ω 和 0.3Ω ，分别对传统下垂控制、虚拟阻抗改进下垂控制和本文提出的策略进行对比仿真。仿真结果显示：传统下垂控制的母线电压偏差为 4.8%，均流误差为 12.6%；虚拟阻抗改进下垂控制的均流误差降低到 3.2%，但电压偏差增大到 6.1%；本文提出的改进策略均流误差为 2.8%，母线电压偏差仅为 0.9%，同时满足电压精度和均流精度要求，在负荷突变和新能源出力波动工况下，响应速度比传统策略提升 15%，具有更好的动态性能。

六、结论

稳压控制与均流控制是直流微电网稳定运行的核心问题，传统控制策略无法同时兼顾电压稳定性和均流精度，本文提出的改进自适应下垂控制策略，通过自适应调整下垂系数抵消线路阻抗差异实现高精度均流，通过电压二次补偿消除母线电压偏差，仅需要低带宽相邻通信，兼顾了可靠性和控制性能，适合工程推广应用。未来研究可以进一步针对即插即用场景下的策略自适应调整问题展开，提升直流微电网对分布式单元接入的灵活性。

参考文献

- [1] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 直流微电网协调控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 7-14.

- [2] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌. 直流微电网下垂控制策略综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 1-10.
- [3] 孙凯, 陈劲杰, 许鸿伟. 并联 DC/DC 变换器的均流控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.