

下垂控制在多储能微电网中的应用研究

王宏东^{1*}, 容韦聪¹, 吴升军²

(1. 广东茂名农林科技职业学院, 广东 茂名 525024; 2. 广东电网有限责任公司
茂名化州供电局, 广东 茂名 525100)

摘要: 随着新能源发电技术的发展, 含分布式储能的微电网已成为小区域电网的重要组成部分。下垂控制技术作为无通信条件下微电网实现分布式控制的核心技术, 在应对多储能系统功率分配与电压稳定性问题方面具有显著优势。文章介绍了下垂控制的基本原理, 系统梳理了下垂控制在交流/直流微电网中的改进策略与技术进展, 分析其在动态响应、荷电状态均衡、阻抗匹配等场景的应用效能, 为分布式储能微电网控制策略研究提供参考。

关键词: 新能源发电; 下垂控制; 分布式储能; 微电网

中图分类号: TM727

DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2509A017

CSTR: 32400.14.ncdqh.2509A017

Application Research of Droop Control in Multi-Energy Storage Microgrids

WANG Hongdong^{1*}, RONG Weicong¹, WU Shengjun²

(1. Guangdong Maoming Institute of Agriculture, Forestry and Technology, Guangdong Maoming 525024, China;
2. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Maoming Huazhou Power Supply Bureau, Guangdong Maoming 525100, China)

Abstract: With the development of renewable energy power generation technology, microgrids with distributed energy storage have become an important part of small regional power grids. As the core technology for achieving distributed control in microgrids without communication conditions, droop control technology has significant advantages in dealing with the power distribution and voltage stability of multiple energy storage systems. This paper introduces the underlying technical principles of droop control, systematically reviews the technical progress of improved strategies of droop control in AC/DC microgrids, analyzes its application efficiency in scenarios such as dynamic response, state of charge balance, and impedance matching, and provides a reference for the research on control strategies of distributed energy storage microgrids.

Keywords: renewable energy power generation; droop control; distributed energy storage; microgrid

0 引言

随着光伏发电、风力发电、水力发电等绿色能源的发展, 在新能源周围建立小区域电力控制系统, 就地服务用户变得尤为重要^[1-2]。在风、水、光等自然资源丰富的农村地区, 小型电力控制系统常被用于服务农林园区, 实现农林园区的自给自足^[3-4]。这种小型电力系统实际上就是微电网, 逐渐成为新型电力系统的关键组成部分。图1为一种交流微电网的拓扑图, 该系统将风力、水力和光伏发电等能源组合起来, 通过微电网系统就地给负载供电, 实现自给自足。微电网面临的核心挑战在于多源协同控制与系统的动态稳定控制^[5-7]。在众多控制策略中,

基金项目: 茂名市科技计划资助项目 (2025034)。
收稿日期: 2025-09-09

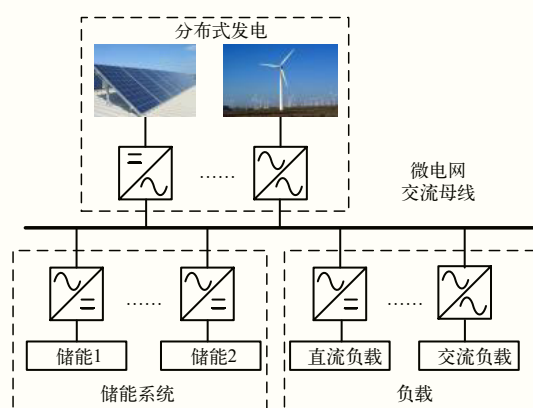


图1 一种交流微电网拓扑图

下垂控制通过模拟同步发电机的外特性, 可以在无通信的情况下实现储能单元的功率分配, 稳定系统频率, 逐渐成为微电网孤岛模式下的首选控制策

略^[8]。然而，随着可再生能源渗透率提升与负荷复杂度增加，传统的下垂控制在阻抗不匹配、荷电状态（state of charge, SoC）失衡等问题中表现不佳，须对传统下垂控制加以改进。

1 下垂控制的基本原理

在微电网系统中，其输电线路阻抗主要呈现感性^[9]。储能输出的有功功率与系统频率存在比例关系，输出的无功功率与系统公共点电压存在比例关系。传统的下垂控制表达式为：

$$f = f^* - k_p(P - p) \quad (1)$$

$$u = U - k_q(Q - q) \quad (2)$$

式中： f 、 f^* 分别为系统输出频率和额定频率； p 、 P 分别为系统实时有功功率和额定有功功率； u 、 U 分别为系统电压和额定电压； q 、 Q 分别为系统实时无功功率和额定无功功率； k_p 、 k_q 分别为有功下垂系数和无功下垂系数，且均大于0。图2为传统下垂控制曲线。

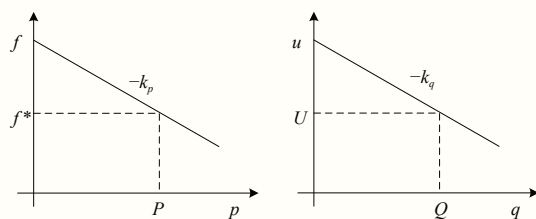


图2 传统下垂控制曲线

由图2可知，系统输出的功率与下垂系数存在关联。在系统其他参数不变的情况下，改变下垂系数可以调整曲线的斜率，进而调节功率，实现对储能输出的有功功率和无功功率的控制。该控制方法原理简单，储能之间无须通信，具有“即插即用”的特点，因此被广泛应用于孤岛运行的微电网中^[10]。

2 实现路径

下垂控制的实现主要包含以下3个步骤：1) 实时功率计算。测量储能输出的实时电压和电流，通过 dq 变换，计算储能的实时有功和无功功率；2) 电压合成。根据下垂控制表达式，结合三相平衡电压的特点，进行电压合成；3) 电压电流双环控制。电压电流解耦后进行PI控制，得到电压调制波，电压调制波通过脉冲发生器产生PWM波对系统进行控制。图3是下垂控制整体框图。

传统的下垂控制虽然可以在无通信的情况下实现对功率输出的控制，但也存在一些问题：1) 功率不能合理分配。在传统的下垂控制中，可实现对有功功率的均分，但各储能模块不能根据自身的荷电状态水平合理输出有功功率，导致荷电水平高的储能模块与荷电水平低的模块输出的功率一样，不利于储能的功率均衡。2) 系统的电压跌落和无功不能被均分的问题。在微电网输电线路中，各微源与负荷的距离各不相同，阻抗不相等，导致负荷的无功功率不能被均分，且距离越远，电压跌落越严重。3) 系统的稳定性问题。当负荷发生突变或发生故障时，系统容易出现频率降低到临界值的危险，甚至系统崩溃。综上所述，须对传统的下垂控制进行改进。

3 改进的下垂控制策略与技术进展

3.1 基于荷电状态的改进下垂控制

针对传统下垂控制不能使储能合理输出功率的问题，有学者提出了变下垂控制技术。通过在下垂系数中引入储能的荷电状态（SoC）水平因子，构建储能荷电状态与下垂系数的新数学模型，使储能的荷电状态参与输出功率调节，从而实现储能根据

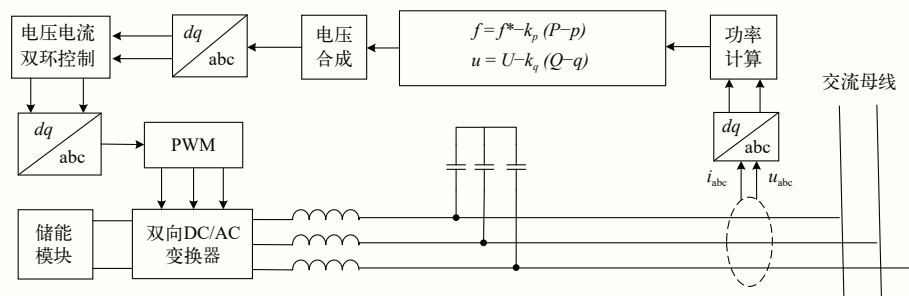


图3 下垂控制整体框图

自身荷电状态水平控制输出功率的目的。该方法对所提出的数学模型要求较高，如 SoC 权重过小则达不到控制效果，过大又会导致系统不稳定。目前最优方法是构建储能荷电状态与下垂控制的幂指数函数模型。该模型既可稳定系统频率，又能使储能根据自身荷电状态水平输出有功功率，其表达式为：

$$k_p=S_{oc}^m e^{yS_{oc}^n} \tag{3}$$

式中： m 、 y 、 n 分别为下垂系数控制因子，用于控制均衡速率和系统稳定性。本研究搭建了 2 台储能单元组成的微电网系统，仿真参数见表 1。初始下垂系数 k_p 、 k_q 、 m 、 y 、 n 分别为 1×10^{-5} 、 3×10^{-4} 、3、7、5。

表1 仿真参数

参数	取值
储能模块1额定电压/V	800
储能模块额定容量/(A·h)	10
储能模块2额定电压/V	800
储能模块2额定容量/(A·h)	10
储能1初始荷电状态水平 SoC ₁ /%	90
储能2初始荷电状态水平 SoC ₂ /%	80
公共负荷/kW	30

按照表 1 的参数进行仿真，在 400 s 时增加有功负载 4 kW，在 600 s 时去掉有功负载 4 kW。图 4 为储能模块输出的有功功率。由图 4 可以看出，荷电状态水平高的储能模块比荷电状态水平低的模块输出更大的功率，并且在负荷发生突变时，仍然保持策略的有效性，功率分配更加合理。图 5 为 2 个储能荷电水平差值。由图 5 可以看出，随着时间的推移，2 个储能模块的荷电状态差值逐渐减小，并趋向于 0，达到荷电状态的动态平衡。这是由于储能 1 比储能 2 的电量多，输出更大的功率，随着荷电水平差值的减小，2 个储能输出的功率逐渐趋于一致；在负荷发生突变时仍然保持功率的合理分配。

对于公式 (3) 中的下垂系数控制因子 m 、 y 、 n 的取值大小会直接影响系统的均衡速率。根据幂指数函数模型可知， y 越大， m 、 n 越小，均衡速率越快，控制效果越明显。为了保证系统的稳定性，它们的取值不能无限增大或减小。经过测试， m 、 y 、 n 的取值分别为 3、7、5 时，控制效果和稳定

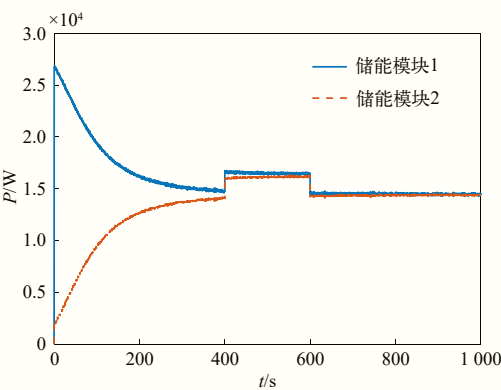


图4 储能模块输出的有功功率

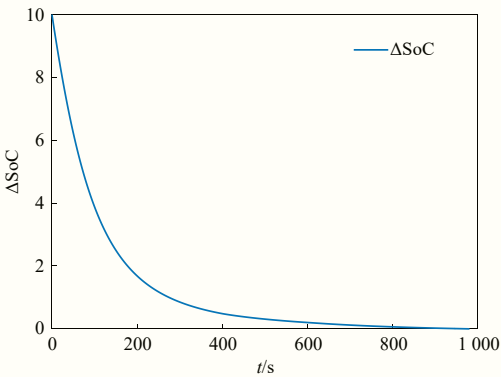


图5 储能模块的荷电状态差值

性最优。

3.2 基于虚拟阻抗的改进下垂控制

在微电网中，由于每个储能单元距离负载的距离不同，而输电线路存在阻抗，这种输电距离和阻抗的差异导致了阻抗不匹配的问题。在传统的下垂控制中，当式 (2) 中的下垂系数 k_q 为常数时，由于输电线路阻抗不匹配，系统会出现电压跌落和无功分配不均的问题^[11]。

在提出的众多解决方法中，最典型且最直接的方法是虚拟阻抗法。该方法通过增加一个较大的虚拟阻抗来抵消线路阻抗不一致的影响，从而使负荷的无功功率被储能模块均分，但较大的虚拟阻抗无疑增加了储能的无功消耗；另一种方法是通过测量每条输电线路的阻抗值，再相应增加或减少虚拟阻抗来达到平衡无功输出的目的，这种方法通常需要增加中央控制器来共享阻抗信息，与下垂控制“即插即用”的特点相悖。

综上所述，考虑选取相邻 2 个储能的信息，构建一个等效的虚拟阻抗，同时增加比例积分控制环节，以消除或抵消线路阻抗的影响。其传递函数表

达式为：

$$X = \left(K + \frac{I}{s} \right) (Q - q) \quad (4)$$

式中： X 为虚拟阻抗； K 、 I 分别为比例系数和积分系数； s 为把时域变为频域的复数变量。

在该方法中，重要的是确定额定无功功率 Q ，而确定该功率须测量负载的阻抗。负载的接入或断开会影响总负荷，总负荷具有不确定性，这大大增加了该方法实施的难度。与前面相同，有学者在此基础上提出了分层的控制方法，通过中央控制器与下垂控制相结合，实时把负荷的信息收集后进行均分处理，把均分的结果作为额定无功功率的参考值。这种办法可以精准实现无功均分，但这对通信的要求较高，且一旦出现通信故障，该方法会立即失效，如果没有备份方案系统可能会出现崩溃的情况；而且此方法与下垂控制不需通信的特点相悖。综上所述，有学者提出了分布式控制方法。将组成微电网的储能模块连接成一个闭环，储能之间只需将相邻2个储能的负荷信息取平均值，并将该值作为自身额定无功功率的参考值；由于所有储能模块已连成闭环，所取得的均值即为所有负荷的均值。该方法的好处在于无须增加中央控制器，只需相邻储能的信息即可实现无功功率的均分，大大降低了对通信的要求。在储能数量较多的微电网系统中，该策略仍然有效。

4 结束语

本文对下垂控制在微电网中的应用进行了研究，并对其中2种典型改进下垂控制方式的原理和实现路径进行了系统性阐述。研究表明，基于储能荷电状态的下垂控制和基于虚拟阻抗的下垂控制能够对储能输出的有功功率和无功功率进行有效控制。

参考文献

- [1] 樊梦蝶,曾成碧,苗虹.微网逆变器无功出力按容量分配的改进控制策略[J].电力系统保护与控制,2019,47(23):100-107.
- [2] 刘畅,卓建坤,赵东明,等.利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(1):1-18,369.
- [3] 曾福顺.浅析农村新型电力系统建设方案[J].农村电气化,2024(11):15-19.
- [4] 谢立焜.风光储一体化的配电网研究[J].农村电气化,2023(8):25-28.
- [5] 贾宝山.光储型微电网运行控制仿真分析[D].东南大学,

2015.

- [6] 王宏东,邓桂瑶.基于荷电状态的多储能微电网改进下垂控制策略[J].电气技术,2025,26(4):29-36.
- [7] 王宏东.微电网多储能系统改进下垂控制研究[D].广州大学,2022.
- [8] 李俊杰,吴在军,杨士慧,等.交直流混合微电网中电力电子变压器功率控制与模式切换方法[J].电力自动化设备,2020,40(8):82-87,110,88.
- [9] ENGLER A,SOULTANIS N.Droop control in LV-grids[A].2005 International Conference on Future Power Systems[C].2005: 6.
- [10] XIAOGANG W,HONGDONG W.Improved Droop Control Strategy of Multiple Energy Storage Applications in an AC Microgrid Based on the State of Charge[J].Electronics,2021,10(14): 1726-1726.
- [11] HONGDONG W,XIAOGANG W.Distributed reactive power control strategy based on adaptive virtual reactance[J].IET Renewable Power Generation,2022,17(3): 762-773.

作者简介

王宏东(1996—),男,硕士,从事微电网、逆变器方面研究,E-mail: 1044534450@qq.com。

(责任编辑:袁航)

资讯

湖南湘西公司：研制传输网光路预警分析工具

2025年11月7日，由国网湖南湘西供电公司自主研发的“通信传输网光路预警分析工具”通过试运行正式上线。该工具的成功研制，推动国网湘西供电公司电力通信运维从“被动告警”变为“主动预警”。

电力通信网是确保电网安全、可靠、高效运行的神经中枢。传输网光路预警分析工具可智能采集传输网管的性能数据，创新运用动态基线等核心算法，精准捕捉到光功率的细微衰减与不良趋势。该工具可为每条光路生成可视化的“健康档案”，一旦发现异常，立即通过多途径向运维人员发送预警信息，实现从“事后维修”到“预测性维护”的转变。

传输网光路预警分析工具的应用，将提升通信网对电网主网架的保障能力，防范因通信问题引发的电网风险，同时可减少约70%的人工巡检量，节省紧急抢修所产生的高额费用和备件加急成本。此外，通过该工具主动预警开展“预测性维护”，可避免光路长期在过载过临界状态下工作，延长光模块约10%~20%的使用寿命。

信息来源：国家电网有限公司