



移动扫码阅读

韩爱, 林俊宏, 张宇, 等. 风光储直流微电网的改进下垂控制研究[J]. 能源环境保护, 2023, 37(6): 111-118.

HAN Ai, LIN Junhong, ZHANG Yu, et al. An improved droop control method for wind-PV-storage DC microgrids[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(6): 111-118.

风光储直流微电网的改进下垂控制研究

韩爱¹, 林俊宏¹, 张宇¹, 刘少俊^{1,2,*}, 宋浩^{1,2},

吴卫红^{1,2}, 郑成航^{1,2}

(1. 浙江大学能源高效清洁利用全国重点实验室 国家环境保护燃煤大气污染控制工程技术中心, 浙江杭州 310027; 2. 浙江大学浙江省清洁能源与碳中和重点实验室, 浙江杭州 310027)

摘要:在风光储直流微电网中,采用下垂控制可以确保并联电源之间按比例功率共享,无需电源之间的通信。然而,传统的下垂控制并不能保证光伏和风机输出最大功率。本文提出了改进的下垂控制方法,将最大功率点跟踪算法与下垂控制相结合,既保证了光伏和风电优先输出最大功率,又能与储能系统功率共享。为了验证改进方法的有效性,利用 MATLAB/Simulink 进行仿真,并与传统的下垂控制方法进行了对比。仿真结果表明,在一个由 5 kW 光伏、7.34 kW 风电和 10 kW 负载构成的典型系统中,在相同运行环境下,采用改进的下垂控制方法可以使光伏供能占比最大提升 8%,风电供能占比最大提升 9%,电池的储能占比提高 10%,同时直流母线电压波动基本不变。改进的下垂控制方法相比传统方法在风光储直流微电网中具有明显的优势,对提升系统的整体性能和可靠性具有重要意义。

关键词:微电网;最大功率点跟踪算法;下垂控制

中图分类号:X382

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2023)06-0111-08

An improved droop control method for wind-PV-storage DC microgrids

HAN Ai¹, LIN Junhong¹, ZHANG Yu¹, LIU Shaojun^{1,2,*},

SONG Hao^{1,2}, WU Weihong^{1,2}, ZHENG Chenghang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, State Environmental Protection Center for Coal-Fired Air Pollution Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Key Laboratory of Clean Energy and Carbon Neutrality of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In the wind-photovoltaic (PV)-storage DC microgrid, the use of droop control ensures the proportional power sharing between parallel power sources without the need for communication between the sources. However, the traditional droop control does not enable the output of the maximum PV and wind turbine (WT) power. Therefore, this paper proposes an improved droop control method that combines the maximum power point tracking (MPPT) algorithm with droop control. The method can not only ensure that PV and WT output the maximum power, but also realize the power sharing with the energy storage system (ESS). In order to verify the effectiveness of the improved method, we conducted simulations using MATLAB/Simulink and compared it with the traditional droop control method. The simulation results showed that in a typical system consisting of 5 kW PV, 7.34 kW WT and 10 kW load, under the same operating environment, the improved droop control method could increase the PV power supply ratio up to 8%, the WT power supply share by up to 9%, and the battery energy storage

收稿日期:2023-07-14

DOI:10.20078/j.eep.20230906

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2601605);国家自然科学基金资助项目(51836006)

作者简介:韩爱(2000—),男,四川成都人,硕士研究生,主要研究方向为多能互补优化调度控制。E-mail: 22160318@zju.edu.cn

通讯作者:刘少俊(1981—),男,河南洛阳人,副教授,主要研究方向为智慧能源系统工程。E-mail: phoenix205@zju.edu.cn

share by up to 10%, while the DC bus voltage fluctuation was basically unchanged. The improved droop control method has obvious advantages over the traditional method in the wind-PV-storage DC microgrid, which is of great significance for improving the overall performance and reliability of the system.

Keywords: Microgrid; Maximum power point tracking; Droop control

0 引言

2016 年全球 178 个国家签署了《巴黎协定》，指明了全球绿色低碳发展转型的大方向，中国作为世界上最大的发展中国家，于 2020 年向国际承诺“力争 2030 年实现碳达峰，2060 年实现碳中和”^[1]。在全球可持续发展、节能减排和减少温室气体排放的背景下，使用可再生能源是解决能源危机和环境污染的一种有效的途径，相比于传统化石能源，可再生能源具有低排放的优势，更符合人类对绿色环保的要求^[2-3]。

微电网作为连接可再生和储能系统的平台，相比于传统电网更容易实现分布式控制^[4]。微电网按照电流类型可分为交流微电网和直流微电网，其中直流微电网不存在无功功率、集肤效应、电能质量等问题，相较于交流微电网更受到关注^[5-6]。此外，直流微电网减少了不必要的交直流功率转换，微电网的整体效率有所提高，更易于储能设备的集成^[7]。直流微电网的研究主要集中在规划、运行和控制等层面。规划主要是考虑可再生能源的不确定性、负荷需求变化、发电中断等因素，利用混合整数线性规划、鲁棒优化、线性规划等优化技术确定系统各单元最优容量，使总运行成本最小^[8-10]。在运行层面，主要根据发电单元的可用性、负荷需求和发电成本，进行机组承诺 (unit commitment) 和经济调度 (economic dispatch)，以实现总成本最小化和利润最大化^[11-13]。控制层面则通过控制电源转换器实现功率的分配，从而提高电网的可靠性^[14-16]。

本文则是从控制层面出发，在确保微网内电能的供需平衡下，研究并联电源之间的能量分配。微电网的控制方法一般分为主从控制和下垂控制两种。相比于主从控制，下垂控制的最大优点是并联电源之间可以在不进行任何通信的情况下实现功率共享。虽然下垂控制可以实现并联电源之间无通信功率共享，但是无法保证微电网从可再生能源中获得最大能量以及调节其功率流^[17]。因此，需要对传统的水下控制进行改进。LIU 等^[18]提出了基于功率的水下控制，可以实现潮流

控制和下垂控制的自主切换。WANG 等^[19]提出一种改进的分布式虚拟电池下垂控制方法，该方法具有维持母线电压平衡、负载功率分配、储能系统电量平衡等功能。陈树泉等^[20]提出以蓄电池为主控单元的风光储直流微电网模糊下垂控制策略，该方法在超调量和调整时间上都优于前馈下垂控制。此外，有文献将储能电池的电量或储氢水平作为考虑因子来更新下垂电阻，改善储能设备过充过放问题^[21-23]。

为了提高可再生能源利用率，本文从发电单元角度出发，将最大功率跟踪 (MPPT) 技术与传统的水下控制相结合，提出了改进的水下控制方法，可优先保证风、光的最大出力，随后储能系统吸收或补充功率。

1 系统与模型

利用 MATLAB/Simulink 搭建了一套微电网模型，其拓扑结构如图 1 所示，其中 DC-DC 转换器 (直流-直流) 采用 Boost 斩波电路，AC/DC 整流器 (交流-直流) 采用三相桥式整流电路，双向 DC/DC 转换器 (双向直流-直流) 采用双向 Buck/Boost 电路，AC/DC 逆变器 (直流-交流) 采用三相桥式逆变电路。该系统中光伏和风机始终工作在最大功率点，当光伏和风机产生的电量大于负载需求时，多余的电量存储在电池中。当自然条件不足或者负载消耗过多电力时，电池提供额外的电力。光伏和风电通过 DC/DC 转换器实现放电和最大功率点跟踪 (MPPT)，电池则通过双向 DC/DC 变换器来实现充放电。该微电网包含 5 kW (温度 25 °C，光照强度 1 000 W/m²) 的光伏系统，7.34 kW (桨距角 0°，风速 10 m/s) 的风电系统，电压为 400 V 的锂离子电池储能系统，以及 15 kW 的交流负载，各模块具体参数见表 1。

1.1 光伏系统

光伏电池 (PV) 等效电路图如图 2 所示。因此，光伏电池的 I-V 特性曲线可以表示为^[24]：

$$I = I_{sc} [1 - C_1 (e^{\frac{V}{C_2 V_{oc}}} - 1)] \quad (1)$$

式(1)中， I_{sc} 为短路电流，A； V_{oc} 为开路电压，V；系数 C_1 和 C_2 可由下列方程组求解：

表 1 各模块参数
Table 1 Parameters of each component

模块	技术参数
光伏	$V_{oc} = 312.5 \text{ V}$, $I_{sc} = 25 \text{ A}$, $V_m = 250 \text{ V}$, $I_m = 20 \text{ A}$
风机	桨距角 0° , 风叶半径 2.75 m ,
锂离子电池	额定电压 400 V , 容量 20 Ah
直流母线	电压 700 V
电网	线电压 380 V , 频率 50 Hz

注:光伏模块中, V_{oc} 为开路电压, I_{sc} 为短路电流, V_m 为最大功率点电压, I_m 为最大功率点电流

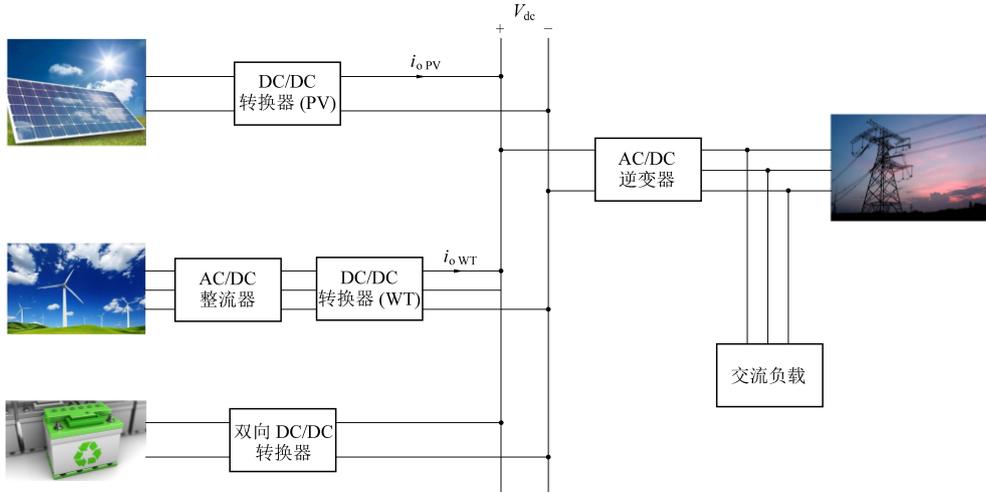


图 1 系统拓扑结构

Fig. 1 Structure of the system

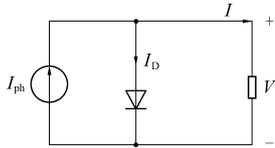


图 2 光伏电池等效电路

Fig. 2 The equivalent circuit diagram of PV

电机(PMSG)组成。根据贝茨定律(Betz' Law),风力机的特征可以表示为^[25]:

$$P_w = 0.5\rho\pi R^2 v^3 C_p \quad (3)$$

式(3)中, P_w 为输出功率,W; ρ 为空气密度,取 1.29 kg/m^3 ; R 为转子半径,m; v 为叶尖迎风速度,m/s; C_p 为风能利用系数。

C_p 可以通过下式计算:

$$C_p(\lambda, \theta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_1} - c_3 \theta - c_4 \right) e^{\left(\frac{-c_5}{\lambda_1} \right)} + c_6 \lambda \quad (4)$$

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1} \quad (5)$$

式(4)~(5)中, λ 为叶尖速比; θ 为桨距角,rad; $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ 分别取 $0.5176, 116, 0.4, 5, 21, 0.0068$; λ 可以表示为:

$$\begin{cases} C_1 = \left(\frac{V_m}{V_{oc}} - 1 \right) / \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \\ C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) e^{-\frac{V_m}{c_2 V_{oc}}} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, I_m 和 V_m 分别为最大功率点的电流(A)和电压(V)。

1.2 风电系统

风力发电系统采用直驱式风力发电机(D-WTG),直驱式风电机主要由风力机(WT)和永磁同步发

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (6)$$

式(6)中, ω 是风力机的角速度,也是发电机转子的角速度,rad/s。

1.3 储能系统

对于锂离子电池,其数学模型可由下式描述。

对于放电过程($i^* > 0$),

$$\begin{aligned} f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - \\ K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \end{aligned} \quad (7)$$

对于充电过程($i^* < 0$),

$$\begin{aligned} f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{it+0.1Q} \cdot i^* - \\ K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \end{aligned} \quad (8)$$

式(7)~(8)中, E_0 为恒定电压,V; K 为极化电阻, Ω ; i^* 为低频电动力,A; i 为电池电流,A; it 为提取容量,A·h; Q 为电池最大容量,A·h; A 为电压指数; B 为容量指数。

2 控制策略

2.1 传统的下垂控制

传统的下垂控制是将系统作为一个虚拟电阻,通过控制变换器的汲取电流来控制输出电压,从而实现电源间的功率分配比例。将变流器的输出电流乘以虚拟电阻得到下垂,然后反馈到系统的参考电压得到新的参考电压值,系统新的参考值计算如下^[2]:

$$V_{ref}^* = V_{ref} - R_d i_o \quad (9)$$

式(9)中, V_{ref} 为参考电压, V ; V_{ref}^* 为下垂控制实现后新的参考电压, V ; R_d 为转换器的虚拟电阻, Ω ; i_o

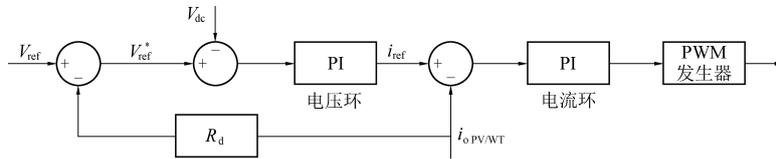


图3 光伏/风电的传统下垂控制框图

Fig. 3 Block diagram of traditional PV/WT droop control

角速度共同影响,传统的下垂控制并不能保证光伏和风机输出最大功率。因此,为了最大化利用可再生能源,需要对光伏和风电系统采用最大功率点跟踪技术。本研究中,光伏和风电系统首先均采用扰动观察法(Perturbation and Observation algorithm, P&O)实现最大功率点跟踪,其算法流程图分别如图4(a)和图5所示^[25-28],再将电导增量法(Incremental Conductance algorithm, IC)用于

为转换器的输出电流, A。虚拟电阻 R_d 的值可通过下式计算:

$$R_d \leq \frac{\Delta V}{i_{o,max}} \quad (10)$$

式(10)中, ΔV 为直流母线电压的最大变化量(5%), V ; $i_{o,max}$ 为变流器的最大输出电流, A。

因此,光伏和风电系统的 R_d 分别计算可得 4.9Ω 和 3.34Ω 。光伏和风电系统的下垂控制框图如图3所示。

2.2 改进的下垂控制

光伏电池输出功率受光照强度、温度和工作电压共同影响;风机的输出功率受风速、桨距角和

光伏系统来验证改进下垂控制的通用性,其算法流程图如图4(b)所示^[29]。通过MPPT算法来调整光伏和风电系统转换器的占空比,以确保光伏和风电系统工作在最大功率点。这样可以优先考虑风能和光伏的最大出力,再通过储能电池吸收或发出功率来平衡直流母线电压。电池的下垂控制框图如图6所示。

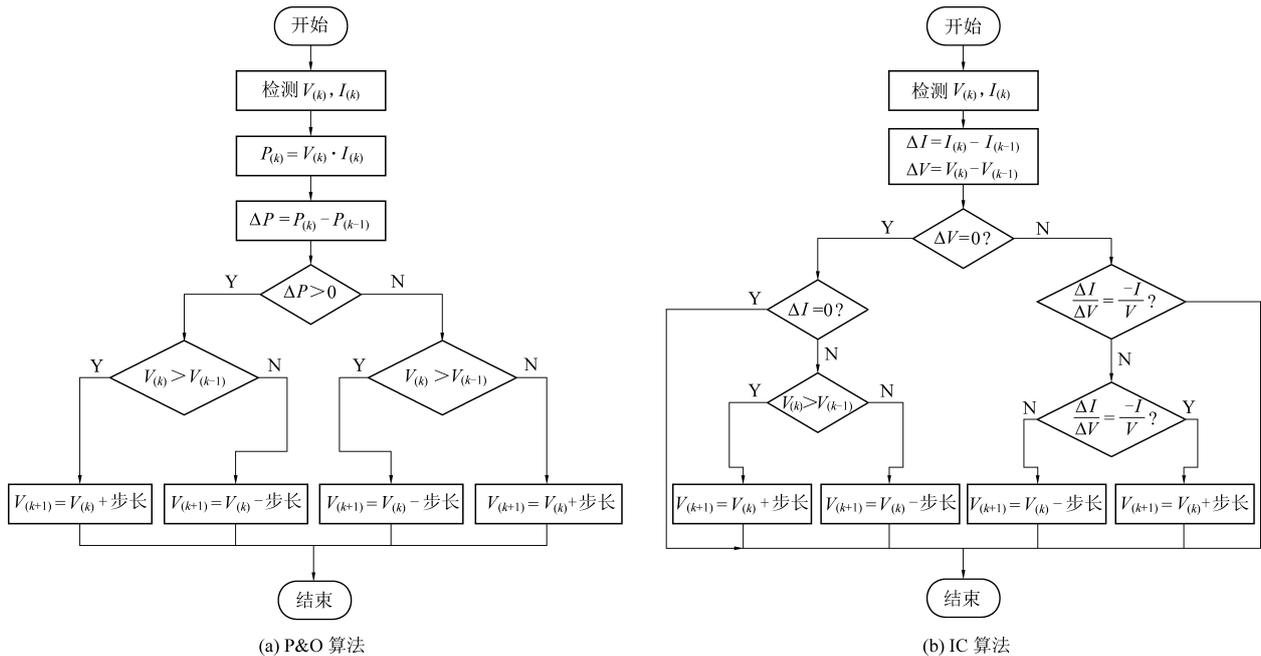


图4 光伏系统的MPPT流程图

Fig. 4 MPPT flow chart of P&O and IC of PV

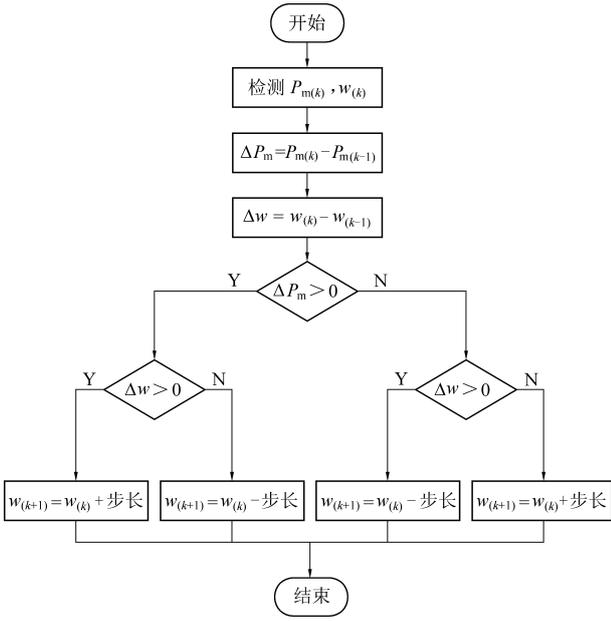


图 5 风电系统的 P&O 算法流程图

Fig. 5 Flow chart of P&O of WT

2.3 逆变器的下垂控制

三相逆变器可以通过下垂控制,将风、光、储侧的直流电逆变成电网所需要的交流电,其作用相当于负载,可以汲取特定的功率。三相逆变器的

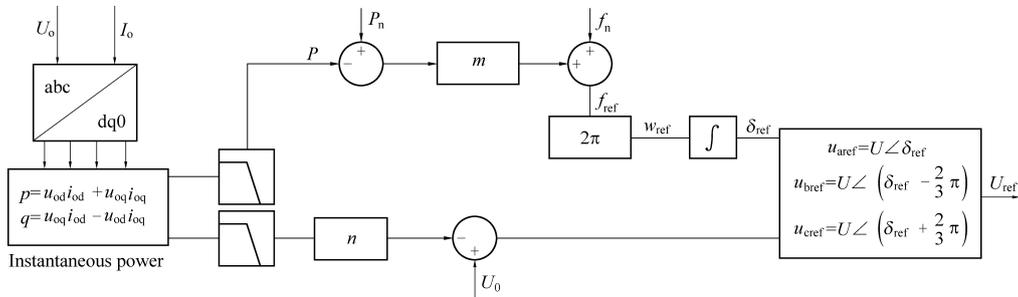


图 7 三相逆变器的下垂控制框图

Fig. 7 Block diagram of droop control of 3-phase inverter

式(11)~(12)中, P_{max} 为微源频率下降时允许输出的最大有功功率; f_{min} 为微源输出有功功率最大时相应的最小频率; Q_{max} 为微源电压幅值下降时允许输出的最大无功功率; U_{min} 为微源输出无功功率最大时相应的最小电压幅值。

3 结果与讨论

为了评估改进后的下垂控制方法,利用 MATLAB/Simulink 对几种工作场景进行了仿真,见表 2。首先,将传统的下垂控制方法应用于所有变换器。然后,将基于 P&O 算法的下垂控制应用于光伏和风电系统的变换器。由于该微网要并入相电压为 220 V、频率为 50 Hz 的大电网,因此需要将

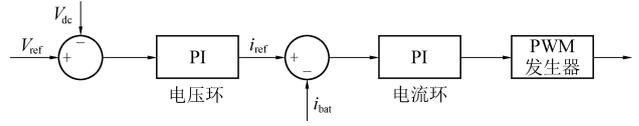


图 6 电池的下垂控制框图

Fig. 6 Block diagram of battery droop control

下垂控制与 DC/DC 转换器略有不同。其原理是检测逆变器的输出功率,将有功功率和无功功率独立解耦,通过下垂特性得到输出频率和电压幅值的参考值,从而合理分配系统的有功功率和无功功率^[30]。三相逆变器的下垂控制框图如图 7 所示, u_o 和 i_o 为逆变器的输出电压和电流, P_n 为微源在额定功率运行下输出的有功功率, f_n 和 U_0 为电网的额定频率和电压幅值, m 和 n 分别是有功下垂系数和无功下垂系数, f_{ref} 、 ω_{ref} 和 δ_{ref} 分别为逆变器输出的参考频率、参考角频率和参考相角。

有功下垂系数 m 和无功下垂系数 n 的计算公式为:

$$m = \frac{f_n - f_{min}}{P_{max} - P_n} \quad (11)$$

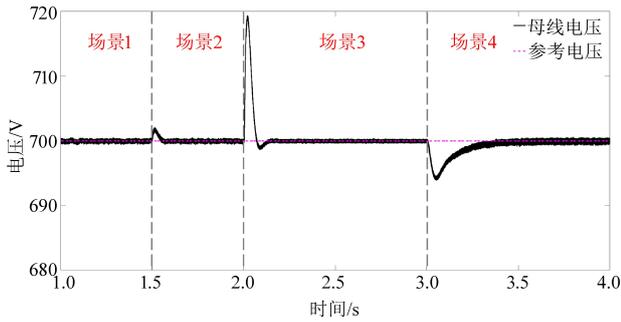
$$n = \frac{U_0 - U_{min}}{Q_{max}} \quad (12)$$

直流母线电压控制在 700 V。

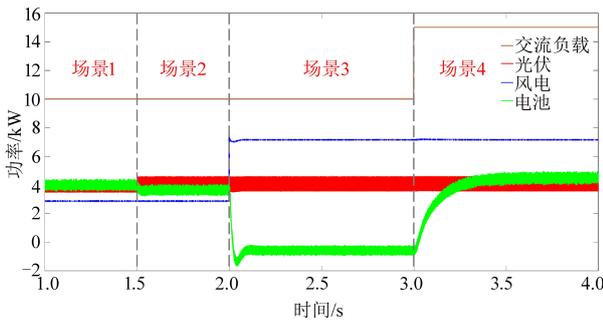
当微电网采用传统的下垂控制方法时,直流母线电压变化情况如图 8(a) 所示。场景 2 变换至场景 3 时出现最大电压波动,即偏离参考电压 2.7% (一般要求为小于 10%)。微电网采用传统的下垂控制方法时,其能量流动情况如图 8(b) 所示。在场景 1 下,光伏输出 3.7 kW,风电输出 2.9 kW,电池输出 4 kW;运行至场景 2 时,光伏输出 4.2 kW,风电输出仍为 2.9 kW,电池输出功率降至 3.6 kW;运行至场景 3 时,光伏输出仍然为 4.2 kW,风电输出功率增至 7.2 kW,电池变为吸收功率 0.6 kW;运行至场景 4 时,光伏和风电输出均不变,电池变为输出功率 3.8 kW。

表2 运行场景
Table 2 Operating scenarios

场景	阶跃时间 /s	光照强度 /($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	风速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	交流负载 /kW
1	0	800	8	10
2	1.5	1 000	8	10
3	2.0	1 000	10	10
4	3.0	1 000	10	15



(a) 直流母线电压



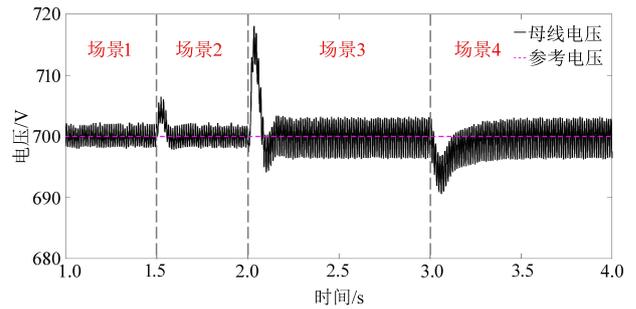
(b) 各模块能量流

图8 传统下垂控制

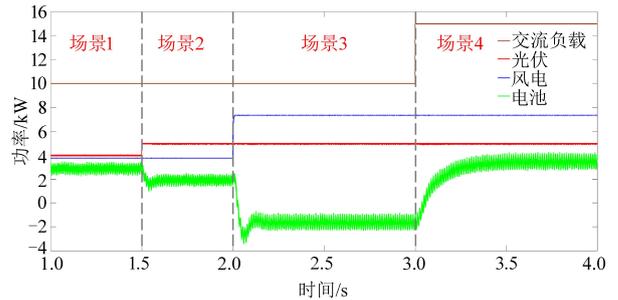
Fig. 8 Traditional droop control

当微电网采用结合 P&O 算法改进的下垂控制时,直流母线电压变化情况如图 9(a)所示。最大电压波动同样出现在场景 2 变换至场景 3 的过程中,即偏离参考电压最大为 2.57%。微电网采用改进的下垂控制方法时,其能量流动情况如图 9(b)所示。在场景 1 下,光伏输出 4 kW,风电输出 3.8 kW,电池输出 2.9 kW;在场景 2 下,光伏输出 5 kW,风电输出 3.8 kW,电池输出 1.9 kW;在场景 3 下,光伏输出 5 kW,风电输出 7.3 kW,电池吸收 1.6 kW;在场景 4 下,光伏和风电输出均不变,电池输出 3.3 kW。

根据仿真结果分析,在传统的下垂控制方法下,可再生能源和储能之间没有明显的供能优先级。而采用改进的下垂控制方法后,光伏和风电都能优先输出最大功率,储能系统再根据能量的盈亏进行吸收或输出功率,可再生能源得到了充分利用。在同样的场景下,采用改进的下垂控制方法可使光伏供能占比最大提升 8%,风电供能占



(a) 直流母线电压



(b) 各模块能量流

图9 基于 P&O 算法改进的下垂控制

Fig. 9 Improved droop control based on P&O algorithm

比最大提升 9%,电池的储能占比提高 10%。直流母线电压方面,采用改进下垂控制与传统下垂控制的波动差别不大,这是由于其波动幅度主要取决于各发电系统和储能系统的功率变化大小。另外,稳态下的母线电压基本不偏离参考电压。

尽管改进下垂控制方法应用于本文混合可再生能源(风电与光伏)微电网中,光伏供能占比和电池储能占比提升弱于单一可再生能源微电网^[17],但得益于风光资源良好的互补性,系统稳定性更高,母线电压波动更小。改进下垂控制用于混合可再生能源系统和单一可再生能源系统的性能对比见表 3。

表3 改进下垂控制对不同可再生能源微电网影响

Table 3 Influence of modified droop control on different renewable energy microgrids

	单一可再生能源 ^[17]	混合可再生能源
光伏供能占比提升	55.90	8.00
风电供能占比提升	—	9.00
电池储能占比提升	60.00	10.00
最大母线电压波动	18.75	2.57

为了进一步验证改进下垂控制算法的通用性,将光伏系统的 P&O 算法换成 IC 算法,风电系统则保持 P&O 算法不变,再按照表 2 的运行环境进行仿真,仿真结果如图 10 所示。其直流母线电压和各模块能量流动的情况与基于 P&O 算法改进的下垂控制结果基本一致,验证了改进下垂控

制的通用性。虽然对比图 10(b) 和图 9(b) 可以发现, 基于 IC 算法的光伏系统输出功率振荡比基于 P&O 算法的光伏系统输出功率振荡大, 但并不影响系统的能量分配。出现上述现象的原因是由于算法的搜索步长引起的, 此前仿真采用的 P&O 算法和 IC 算法步长均为 0.001 s, 将 IC 算法的步长减小至 1.25×10^{-4} s, 光伏系统输出功率的振荡将得到明显改善, 如图 11 所示。

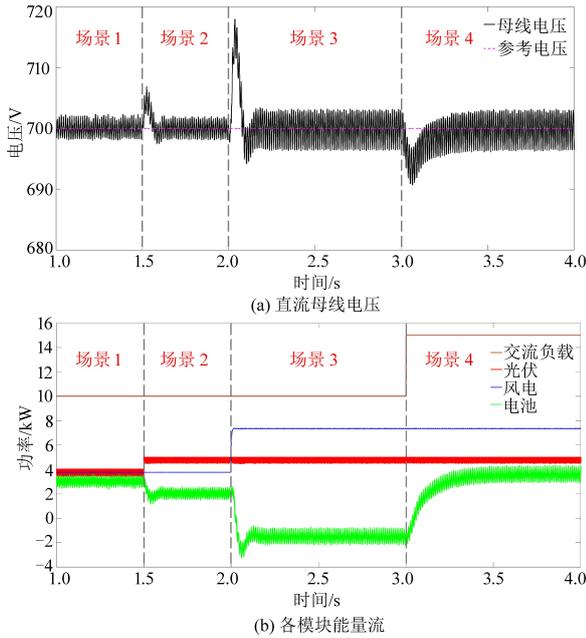


图 10 基于 P&O 和 IC 算法改进的下垂控制

Fig. 10 Improved droop control based on P&O and IC algorithm

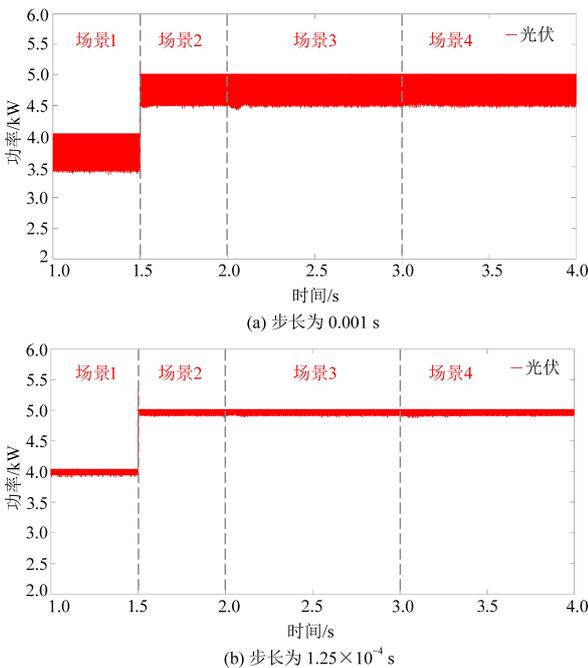


图 11 基于 IC 算法的光伏系统输出功率

Fig. 11 Output power of PV system based on IC algorithm

4 总 结

在传统的下垂控制中, 储能设备视作功率输出单元, 与光伏和风电系统共享功率。当光照辐射和风速发生变化时, 光伏和风电系统无法获得最大能量, 运行效率偏低。本文提出了一种改进的下垂控制方法, 以从光伏和风电系统中获得最大功率为目标。将最大功率点跟踪算法与传统下垂控制相结合, 优先保证光伏和风电输出最大功率, 储能系统再发挥调节单元的作用实现功率平衡。仿真结果表明, 采用传统下垂控制时, 光伏最大出力 4.2 kW, 风电最大出力 7.2 kW; 当步长为 0.001 s 的 P&O 算法用于光伏和风电系统后, 光伏系统最大出力可达 5 kW, 风电系统最大出力可达 7.3 kW。在同样的场景下, 采用改进的下垂控制方法可使光伏供能占比最大提升 8%, 风电供能占比最大提升 9%, 电池的储能占比提高 10%。将光伏系统的 P&O 算法替换成步长为 1.25×10^{-4} s 的 IC 算法, 其仿真结果基本一致, 验证了改进下垂控制的通用性。

参考文献 (References) :

- [1] 张嘉祺, 王琛, 梁发云. “双碳”背景下我国海上风电与海洋牧场协同开发初探[J]. 能源环境保护, 2022, 36(5) : 18-26. ZHANG Jiaqi, WANG Chen, LIANG Fayun. Preliminary study on cooperative development of offshore wind power & marine ranch in China under the background of 'dual carbon'[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(5) : 18-26.
- [2] LI J, CHEN S, WU Y, et al. How to make better use of intermittent and variable energy? A review of wind and photovoltaic power consumption in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 137: 110626.
- [3] 李芳盛, 齐云国, 韩文婧. 基于多层次模型对美国新能源应用情况的分析研究[J]. 能源环境保护, 2019, 33(5) : 6-11+43. LI Fangsheng, QI Yunguo, HAN Wenjing. The analysis and prediction of the application of new energy in American based on multi-layered model [J]. Energy Environmental Protection, 2019, 33(5) : 6-11+43.
- [4] GHANBARI N, BHATTACHARYA S. Adaptive droop control method for suppressing circulating currents in dc microgrids[J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2020, 7: 100-110.
- [5] BEVRANI H, FRANÇOIS B, ISE T. Microgrid dynamics and control[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.
- [6] WU W, CHEN Y, LUO A, et al. A virtual inertia control strategy for DC microgrids analogized with virtual synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(7) : 6005-6016.
- [7] AUGUSTINE S, MISHRA M K, LAKSHMINARASAMMA N.

- Adaptive droop control strategy for load sharing and circulating current minimization in low-voltage standalone DC microgrid [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, 6(1): 132-141.
- [8] BABOLI P T, BAHRAMARA S, MOGHADDAM M P, et al. A mixed-integer linear model for optimal operation of hybrid AC-DC microgrid considering Renewable Energy Resources and PHEVs[C]//IEEE. 2015 IEEE Eindhoven PowerTech. New York: IEEE, 2015: 1-5.
- [9] HUSSAIN A, BUI V H, KIM H M. Robust optimal operation of AC/DC hybrid microgrids under market price uncertainties[J]. *IEEE Access*, 2017, 6: 2654-2667.
- [10] XU Q, ZHAO T, XU Y, et al. A distributed and robust energy management system for networked hybrid AC/DC microgrids [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 11(4): 3496-3508.
- [11] ZHAO B, SHI Y, DONG X, et al. Short-term operation scheduling in renewable-powered microgrids: A duality-based approach [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 5(1): 209-217.
- [12] NGUYEN T A, CROW M L. Stochastic optimization of renewable-based microgrid operation incorporating battery operating cost[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 31(3): 2289-2296.
- [13] LI F, QIN J, KANG Y. Closed-loop hierarchical operation for optimal unit commitment and dispatch in microgrids: A hybrid system approach [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 35(1): 516-526.
- [14] ZHU X, MENG F, XIE Z, et al. An inertia and damping control method of DC-DC converter in DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019, 35(2): 799-807.
- [15] ALAM M S, ABIDO M A, AL HAMOUZ Z M. Model predictive control approach for bridge-type fault current limiter in vsc-hvdc system [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44: 2079-2089.
- [16] ZHI N, DING K, DU L, et al. An SOC-based virtual DC machine control for distributed storage systems in DC microgrids [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, 35(3): 1411-1420.
- [17] IRMAK E, GÜLER N, KABALCI E, ET AL. A modified droop control method for PV systems in island mode DC microgrid[C]//IEEE. 2019 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). New York: IEEE, 2019: 1008-1013.
- [18] LIU G, CALDOGNETTO T, MATTAVELLI P, et al. Power-based droop control in dc microgrids enabling seamless disconnection from upstream grids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 34(3): 2039-2051.
- [19] WANG S, LU L, HAN X, et al. Virtual-battery based droop control and energy storage system size optimization of a DC microgrid for electric vehicle fast charging station [J]. *Applied Energy*, 2020, 259: 114146.
- [20] 陈树泉, 张兆云, 李天利. 基于模糊下垂控制的直流微电网电压稳定控制研究[J]. *电气技术*, 2020, 21(8): 40-45.
CHEN Shuquan, ZHANG Zhaoyun, LI Tianli. Research on voltage control of DC microgrid based on fuzzy droop control [J]. *Electrical Engineering*, 2020, 21(8): 40-45
- [21] BELAL E K, YEHIA D M, AZMY A M. Adaptive droop control for balancing SOC of distributed batteries in DC microgrids [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2019, 13(20): 4667-4676.
- [22] 徐鹏, 段梦珂, 潘艳, 等. 一种适用于直流微电网的自适应动态下垂控制策略[J]. *电工电能新技术*, 2022, 41(9): 19-26.
XU Peng, DUAN Mengke, PAN Yan, et al. Novel adaptive dynamic droop control scheme in DC microgrid[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2022, 41(9): 19-26.
- [23] ALAM M, KUMAR K, DUTTA V. Droop based control strategy for balancing the level of hydrogen storage in direct current microgrid application [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 33: 102106.
- [24] 孙航, 肖海伟, 李晓辉, 等. 光伏电池模型综述[J]. *电源技术*, 2016, 40(3): 743-745.
SUN Hang, XIAO Haiwei, LI Xiaohui, et al. Review in photovoltaic cell model [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2016, 40(3): 743-745.
- [25] 刘文洲, 刘巡, 李宁, 等. 直驱永磁风力发电机组 MPPT 综述 [J]. *长春工程学院学报(自然科学版)*, 2015, 16(4): 45-48.
LIU Wenzhou, LIU Xun, LI Ning, et al. The review on direct drive permanent magnet wind power system MPPT[J]. *Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 2015, 16(4): 45-48.
- [26] 刘鹏飞. 光伏系统最大功率点追踪算法研究综述[J]. *邵阳学院学报(自然科学版)*, 2020, 17(3): 25-34.
LIU Pengfei. A review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems[J]. *Journal of Shaoyang University (Natural Science Edition)*, 2020, 17(3): 25-34.
- [27] 刘文洲, 西灯考, 蔡长青, 等. 太阳能光伏发电系统 MPPT 综述 [J]. *长春工程学院学报(自然科学版)*, 2016, 17(3): 39-41.
LIU Wenzhou, XI Dengkao, CAI Changqing, et al. The review of MPPT for solar photovoltaic power generation system[J]. *Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 2016, 17(3): 39-41.
- [28] 马振宇, 玄兆燕, 景会成, 等. 风力发电最大功率跟踪控制[J]. *机械工程与自动化*, 2017(3): 38-39+42.
MA Zhenyu, XUAN Zhaoyan, JING Huicheng, et al. Maximum power point tracking control[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2017(3): 38-39+42.
- [29] 李力. 独立光伏发电系统的 MPPT 控制及能量管理的研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2017: 25-30.
LI Li. Research on MPPT Control and Energy Management of Independent Photovoltaic Power Generation System [D]. Hefei: Anhui University, 2017: 25-30.
- [30] 李聪. 基于下垂控制的微电网运行仿真及小信号稳定性分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013: 15-26.
LI Cong. Operation simulation and small signal stability analysis of microgrid based on droop control [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013: 15-26.