

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230744

兼顾提升功率分配精度与抑制电压偏差的自适应下垂控制

武海涛^{1,2}, 庞春林¹, 张宁宁¹

(1. 内蒙古工业大学电力学院, 内蒙古 呼和浩特 010080;
2. 大规模储能技术教育部工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010080)

摘要: 直流微电网孤岛运行时, 为实现下垂参数跟随直流微电网各光伏单元出口线路阻抗和本地负载分布情况自调整, 提出一种基于麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)的自适应下垂控制策略。将下垂参数、变换器输出电压参考值以函数变量的形式构成优化目标函数, 利用麻雀搜索算法寻找目标函数的极小值, 实时找到同时使系统运行过程中的功率偏差、母线电压偏差最小化的解。即利用麻雀搜索算法将下垂参数和电压参考值调节问题转化为函数极值寻优问题, 实现了下垂系数可依据光伏出口线路阻抗、本地负载变化及光照强度变化自调整的目标。同时通过动态调节变换器输出电压参考值, 减小母线电压偏差, 解决了功率分配精度与母线电压偏差的固有矛盾。利用 PSCAD/EMTDC 建立系统仿真模型, 仿真结果证明所提控制策略正确、有效。

关键词: 下垂控制; 功率分配; 下垂系数; 麻雀搜索算法; 自适应

Adaptive sag control with improved power distribution accuracy and voltage deviation suppression

WU Haitao^{1,2}, PANG Chunlin¹, ZHANG Ningning¹

(1. College of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China; 2. Engineering Research Center of Large-scale Energy Storage Technology, Ministry of Education, Hohhot 010080, China)

Abstract: To realize droop parameter self-adaptation in islanded operation of DC microgrids according to the impedance and local load distribution of each photovoltaic unit's output line within the microgrid, a self-adaptive droop control strategy based on the sparrow search algorithm (SSA) is proposed. To begin with, an objective function that incorporates the droop parameters and converter output voltage reference is constituted in the form of function variable. The SSA is then used to search and determine in real-time the local minima that also minimize both the power deviation and bus voltage deviation during operation. In other words, the proposed strategy transforms what should otherwise be a trade-off problem between droop parameter and voltage reference into a local extremum search problem using SSA. It thereby fulfils the objective of droop parameter self-adaptation under variations in photovoltaic output line impedance, local load, and solar irradiance. At the same time, the act of dynamically adjusting the converter's output voltage reference values also reduces the bus voltage deviation and resolves the inherent contradiction between power allocation accuracy and bus voltage deviation. A simulation run using a system model created with PSCAD/EMTDC proves the validity and effectiveness of the proposed control strategy.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region (No. 2023MS05011).

Key words: sag control; power distribution; sag factor; sparrow search algorithm; adaptive

0 引言

如何解决能源危机和全球变暖问题是世界各国所面临的重要挑战。优化能源配置, 提升清洁能源发电比例, 实现清洁化、低碳化可持续发展已经成

为未来的重要发展方向。微电网作为分布式电源与电网之间的纽带, 具有提高可再生能源利用效率、增强电网对分布式电源接纳能力等优点, 是实现“双碳”目标的重要举措^[1-2]。

直流微电网孤岛运行时, 通常采用下垂控制技术, 保证各并联光伏单元按照各自额定功率成比例分担负载功率^[3-5]。然而, 采用固定下垂系数的传统下垂控制方式, 不能根据光伏单元出口线路阻抗以

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目资助(2023MS05011); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目资助(JY20220141)

及本地负载的变化而实时调整下垂系数,致使各光伏单元不能按额定功率比例分担负载功率,严重时甚至引发光伏单元输出功率超过其额定功率而重载运行等问题^[6-8]。

如果能够得到线路阻抗值,并依据阻抗值对下垂系数进行修正,那么就可以解决上述问题,为此研究人员开展了相关研究工作。文献[9]利用单脉冲扰动的线路阻抗检测方法在变换器输出电压中注入单脉冲电压,检测输出电压和电流的波动,计算线路阻抗大小,并利用检测得到的线路阻抗值改变下垂系数,然而这种方法引入交流电压会导致输出电压纹波变大。文献[10]提出一种基于载波信号的阻抗检测方法,利用载波的基频谐波分量来计算线路阻抗,该方法不需要注入任何扰动,从而提高了阻抗检测过程的电能质量。但不论是注入单脉冲还是基于载波频率,这些方法对采样频率都有着极高的要求。为了解决线路阻抗测量困难的问题,文献[11-13]根据功率分配差值自动调节虚拟阻抗值以减小线路阻抗的影响,功率分配精度较高。文献[14]提出一种新的下垂控制方法,通过利用电压变化率取代传统下垂控制 $I-U$ 关系中的电压,以减小电压电流影响,并改善电流分配精度。文献[15-16]提出了按变换器容量比例计算出电流平均值,然后将其与变换器输出电流相减,并将差值送至 PI 控制器,以补偿基准电压,从而改善电流分配精度。这些方法虽然解决了功率分配精度低的问题,但会造成实际直流母线电压与直流母线电压额定值存在一定偏差,功率分配精度越高,则电压偏差越大,严重时还会影响微电网的运行稳定及电能质量^[17-18]。为此,文献[19-21]在母线电压跌落问题上进行了改进,通过测量微电网的直流母线电压及 PI 控制器计算,平移变换器的下垂曲线,补偿下垂控制带来的母线电压跌落。虽然此方法可以很好地将母线电压维持在规定的范围内,但在下垂控制器上添加 PI 控制器会增加系统控制的复杂程度。

综上,本文提出一种自适应下垂控制策略。在考虑光照等外界环境因素的前提下,利用麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)在未知线路阻抗和本地负载动态变化的情况下,根据当前光照强度下各光伏单元最大功率的比值自动调整下垂系数,并优化各光伏单元接口变换器输出电压参考值。该控制策略不仅可以解决多光伏单元并联运行时功率分配不均及母线电压跌落的问题,还能根据光照强度变化自动调整各光伏单元最大功率的比值关系,增强了功率分配的灵活性和适应性。通过 PSCAD/

EMTDC 建立仿真模型进行仿真,验证所提策略的正确性和有效性。

1 下垂控制策略分析

含多光伏单元的直流微电网系统结构如图 1 所示。图中: PV_i 表示第 $i(i=1,2,3,\dots,n)$ 个光伏单元,通过 DC/DC 变换器连接直流母线; R_i 表示 PV_i 与直流母线之间的线路阻抗; P_{Li} 表示 PV_i 的本地负载; P_{load} 表示公共负载; U_i 、 P_i 分别表示 PV_i 的输出电压和提供给公共负载的功率; P_{oi} 表示光伏单元输出功率; U_{pcc} 为直流母线电压。

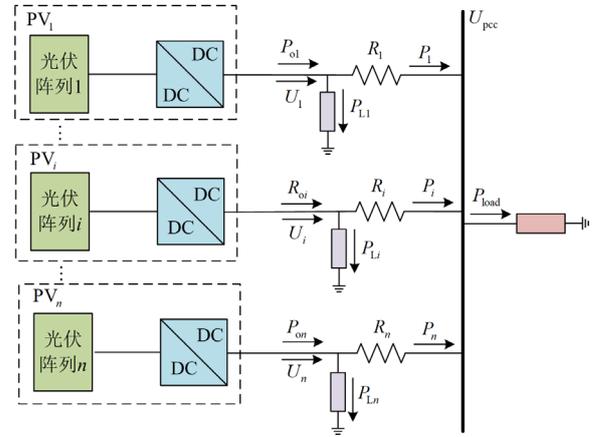


图 1 多光伏单元并联运行微电网简化结构

Fig. 1 Simplified structure of multiple PV unit parallel operation microgrid

直流微电网孤岛运行时,当忽略光伏单元线路阻抗和本地负载变化对功率输出的影响时,下垂控制策略可以表示为

$$U_i = U_{ref} - k_i P_i \quad (1)$$

式中: U_{ref} 为 PV_i 额定出力时变换器输出电压参考值; k_i 为相应的下垂系数。

在多光伏单元并联运行中,各光伏单元都并联到直流母线上,所以 $U_1 = U_2 = \dots = U_n$,由式(1)易得

$$k_1 P_1 = k_2 P_2 = \dots = k_n P_n \quad (2)$$

根据式(2)可知,任意两个光伏单元有如式(3)的关系。

$$P_i : P_j = \frac{1}{k_i} : \frac{1}{k_j} \quad (3)$$

式中, P_j 表示第 $j(j=1,2,3,\dots,n)$ 个光伏单元 PV_j 提供给公共负载的功率。由式(3)可知,如果 k_j/k_i 已知,那么任意两个光伏单元将按照此比例关系输出相应的功率,即完成功率分配。对于各个光伏单元

而言, 其标况下的额定功率为已知值, 所以可以利用各光伏单元的额定功率的比值来确定 k_j/k_i 。即

$$\frac{P_{Ni}}{P_{Nj}} = \frac{k_j}{k_i} = k_{Nij} \quad (4)$$

式中: P_{Ni} 、 P_{Nj} 分别为光伏单元 PV_i 和 PV_j 的额定功率; k_{Nij} 为这两个光伏单元的额定功率比值。联立式(3)和式(4), 有

$$\frac{P_i}{P_j} = \frac{k_j}{k_i} = k_{Nij} \quad (5)$$

下垂控制虽然可以实现功率分配, 但是无法保证直流母线电压维持恒值不变。由式(1)可得

$$\frac{U_{ref} - U_i}{k_i} = \frac{\Delta U_{dci}}{k_i} = P_i \quad (6)$$

式中, ΔU_{dci} 为 PV_i 的输出电压与直流母线额定电压的偏差值。当各光伏单元分配的负载功率 P_i 一定时, ΔU_{dci} 的大小由下垂系数 k_i 的大小决定。那么为了避免因 k_i 过大导致直流母线电压偏差过大, 破坏系统运行的稳定性, k_i 需要依据允许的直流母线电压变化范围来设置, 定义为

$$k_i \leq \frac{\Delta U_{dc,max}}{P_{Ni}} \quad (7)$$

式中, $\Delta U_{dc,max}$ 为允许的直流母线电压最大变化范围, 本文取 $5\%U_{ref}$ 。

综上所述, 在不考虑线路阻抗和本地负载的情况下, 根据各光伏单元的额定功率来确定其对应的各下垂系数之间的比值, 可实现光伏单元按额定功率比例分担负载功率的目标, 同时也能满足母线电压偏差在规定范围内。

实际系统中, 各光伏单元通过线路与直流母线连接, 而各光伏单元与直流母线之间的距离不同, 所以相对应的线路阻抗也不同, 不同的线路阻抗往往会功率分配精度造成影响。在中、低压直流微电网中, 线路电感一般较小, 线路阻抗通常呈现阻性, 因此本文忽略线路阻抗的感性成分。根据图 1 可知, 光伏单元提供给直流母线侧公共负载的功率为

$$P_i = \frac{U_{pcc}(U_i - U_{pcc})}{R_i} \quad (8)$$

将式(1)代入式(8)有

$$P_i = \frac{U_{ref} - U_{pcc}}{\frac{R_i}{U_{pcc}} + k_i} \quad (9)$$

各光伏单元分担公共负载功率的比为

$$\frac{P_i}{P_j} = \frac{\frac{R_j}{U_{pcc}} + k_j}{\frac{R_i}{U_{pcc}} + k_i} \quad (10)$$

与式(5)比较, 式(10)多了 R_i/U_{pcc} 和 R_j/U_{pcc} 两项, 导致功率比值偏离了 k_{Nij} , 功率分配精度降低。

与此同时, 在实际的直流微电网系统中, 光伏单元需要为本地负载提供功率, 这使得输出到直流母线上的功率有所变化。所以, 本地负载对功率分配的影响也需要考虑进去。为了便于分析, 需要对图 1 所示的本地负载进行等效, 等效前后对比如图 2 所示。图 2 中, 等效的原则是等效前后 U_i 和 U_{pcc} 不变, 将位于光伏单元出口的本地负载等效至直流母线侧, 与公共负载一同参与系统的功率分配。等效后线路阻抗 R_i 变换成等效线路阻抗 R_{eqi} , 系统其他参数没有变化。

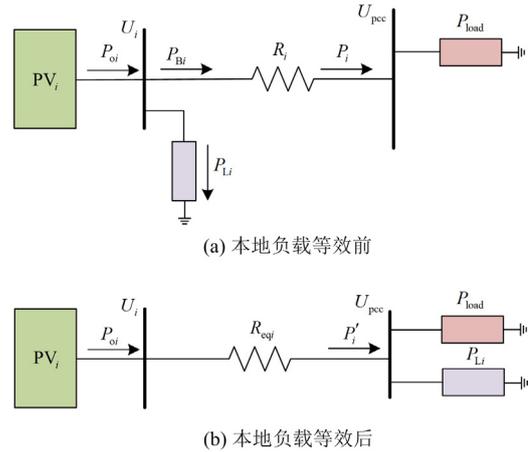


图 2 带本地负载的光伏单元等效模型对比图

Fig. 2 Comparison of PV unit equivalent model with local load

由于等效前后 U_i 和 U_{pcc} 不变, 根据图 2 有

$$P_{oi} = P_{Bi} + P_{Li} \quad (11)$$

式中, P_{Bi} 表示 PV_i 向直流母线侧输出的功率。

$$P_{Bi} = \frac{U_i(U_i - U_{pcc})}{R_i} \quad (12)$$

$$P_{oi} = \frac{U_i(U_i - U_{pcc})}{R_{eqi}} \quad (13)$$

联立式(11)一式(13)可得

$$R_{eqi} = \frac{P_{oi} - P_{Li}}{P_{oi}} R_i \quad (14)$$

因此等效后光伏单元提供给公共负载的功率为

$$P'_i = \frac{U_{\text{pcc}}(U_i - U_{\text{pcc}})}{R_{\text{eq}i}} \quad (15)$$

将式(1)代入式(15)有

$$P'_i = \frac{U_{\text{ref}} - U_{\text{pcc}}}{\frac{R_{\text{eq}i}}{U_{\text{pcc}}} + k_i} \quad (16)$$

此时等效后各光伏单元为公共负载提供功率的比为

$$\frac{P'_i}{P'_j} = \frac{\frac{R_{\text{eq}j}}{U_{\text{pcc}}} + k_j}{\frac{R_{\text{eq}i}}{U_{\text{pcc}}} + k_i} \quad (17)$$

由式(17)可见,本地负载的存在也会降低光伏单元输出功率的分配精度。与此同时,由于线路阻抗未知,本地负载的变化又具有随机性,致使 $R_{\text{eq}i}$ 、 $R_{\text{eq}j}$ 不是定值,所以各光伏单元输出功率比值将不能维持为定值 $k_{\text{N}ij}$ 。因此,线路阻抗和本地负载的存在会造成功率分配误差。

为了保证功率分配精度,即保证功率输出比值维持定值 $k_{\text{N}ij}$,可以使 $k_i \gg R_{\text{eq}i}$, $k_j \gg R_{\text{eq}j}$ 。此时

$P'_i : P'_j \approx k_i : k_j$,实现并联光伏单元仍按额定功率比例分配公共负载功率的目标。然而,由式(6)和式(8)可知, k_i (或 k_j)越大则导致 U_i (或 U_j)越小,即功率分配精度提高将导致直流母线电压偏差越大,甚至超过允许的最大偏差值 $\Delta U_{\text{dc,max}} = 5\%U_{\text{ref}}$ 。另外,由于 $R_{\text{eq}i}$ 、 $R_{\text{eq}j}$ 的值未知而且随着本地负载的变化而变化,所以如何选取合适的 k_i (k_j)变得很困难。文献[22]通过向系统注入低频信号获取 $R_{\text{eq}i}$ 、 $R_{\text{eq}j}$ 的值, k_i 、 k_j 依据 $R_{\text{eq}i}$ 、 $R_{\text{eq}j}$ 的变化进行调整。这种方法虽然能提高功率分配精度,但是注入的交流小信号会给电网带来谐波,影响电能质量。因此,如何在未知线路阻抗和本地负载的情况下调节 k_i 、 k_j ,使 k_i 、 k_j 适应线路阻抗和本地负载的变化是解决提升功率分配精度问题的关键。

为确保 $\Delta U_{\text{dc,max}}$ 稳定在额定母线电压的 $\pm 5\%$ 以内,文献[19]通过增加一个带有PI控制器的直流母线电压补偿项,经上下平移下垂曲线,提高母线电压。然而,PI参数设置的不合理还可能引起系统不稳定。如果直接通过提高 U_{ref} 抵消 ΔU_{dc} 的影响,减小母线电压偏差,则可以避免此问题。由于功率比值与本地负载、 R_i 、 U_{pcc} 及 k_i 有关,其中一项发生变化,功率比值也随之改变,功率分配精度与母线

电压偏差之间相互影响。因此,如何在未知本地负载和线路阻抗 R_i 的情况下减小 ΔU_{dc} 并同时提高功率分配精度,是设计下垂系数 k_i 及变换器输出电压参考值 U_{ref} 时需要解决的问题。

2 自适应下垂参数

下垂系数 k_i 及变换器输出电压参考值 U_{ref} 权衡取值问题属于多目标优化问题,而人工智能算法中的聚类算法能够很好地解决此类问题。聚类算法注重全局寻优和高收敛速度,SSA属于聚类算法中的一种,具有参数设置简单、收敛速度快、易于实现的优点,在多目标问题的求解中作用显著,这为利用其寻找最优下垂参数提供了新的途径^[23-24]。

2.1 麻雀搜索算法

SSA是模拟麻雀搜索食物过程的一种新型智能群体算法,通过比较适应度值,不断更新发现者、加入者、警戒者的位置,找到目标函数的最优^[25]。

在麻雀搜索算法中,发现者具有较好的适应度值,负责为整个麻雀种群寻找食物并为所有加入者提供觅食方向。在种群维度为 D 的麻雀种群中,发现者的位置更新公式为

$$\mathbf{x}'_{i,d} = \begin{cases} \mathbf{x}'_{i,d} \times \exp\left(\frac{-i}{\alpha \times T}\right), & R_{m2} < B \\ \mathbf{x}'_{i,d} + Q \times \mathbf{L}, & R_{m2} \geq B \end{cases} \quad (18)$$

式中: t 为当前迭代次数; $d=1,2,3,\dots,D$; $\mathbf{x}'_{i,d}$ 表示第 i 只麻雀在第 d 维中的位置; T 为最大迭代次数; α 为随机数, $\alpha \in (0,1)$; R_{m2} 为警戒值, $R_{m2} \in (0,1)$; B 为安全阈值, $B \in (0.5,1)$; Q 为服从标准正态分布的随机数; \mathbf{L} 为元素为1的 $1 \times D$ 维的矩阵。当 $R_{m2} < B$ 时,表示种群无危险,发现者可以扩大觅食范围;当 $R_{m2} \geq B$ 时,表明种群有危险,警戒者释放危险信号,所有麻雀迅速飞到安全区域。

加入者的位置更新公式为

$$\mathbf{x}'_{i,d} = \begin{cases} Q \times \exp\left(\frac{\mathbf{x}'_{w,d} - \mathbf{x}'_{i,d}}{i^2}\right), & i > n/2 \\ \mathbf{x}'_{b,d} + |\mathbf{x}'_{i,d} - \mathbf{x}'_{b,d}| \cdot \mathbf{A}^+ \cdot \mathbf{L}, & i \leq n/2 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{x}'_{w,d}$ 为第 t 次迭代时麻雀在第 d 维的最劣位置; $\mathbf{x}'_{b,d}$ 为在第 $t+1$ 迭代时的最佳位置; \mathbf{A} 是一个矩阵内部元素为1或-1的 $D \times D$ 维矩阵,且 $\mathbf{A}^+ = \mathbf{A}^T(\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1}$ 。当 $i > n/2$ 时,表示第 i 个加入者没有获得食物,它将飞到其他地方获得食物;当 $i \leq n/2$ 时,表示第 i 个加入者在最佳位置附近寻找食物。

警戒者的位置更新公式为

$$\mathbf{x}_{i,d}^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{x}_{i,d}^t + \beta(\mathbf{x}_{i,d}^t - \mathbf{x}_{b,d}^t), & f_i > f_g \\ \mathbf{x}_{i,d}^t + K \left(\frac{\mathbf{x}_{i,d}^t - \mathbf{x}_{w,d}^t}{|f_i - f_w| + e} \right), & f_i = f_g \end{cases} \quad (20)$$

式中: β 为步长控制参数; K 为随机数, $K \in (0,1)$; e 为极小常数, 避免分母为 0 的情况发生; f_i 为当前第 i 个麻雀的适应度值; f_g 和 f_w 分别为麻雀种群的全局最优和最差适应度值。当 $f_i > f_w$ 时, 表示第 i 个麻雀处于种群边缘, 容易发生危险; 当 $f_i = f_w$ 时, 表示第 i 个麻雀处于种群中心意识到危险, 需要移动位置靠近其他麻雀。

2.2 自适应下垂控制的实现

根据前文对下垂参数的分析可知, 调节下垂系数可以减小功率分配偏差, 调节变换器输出电压参考值能减小母线电压偏差。本文通过将下垂系数、变换器输出电压参考值以函数变量的形式构成 SSA 的优化目标函数, 利用 SSA 寻找最优下垂参数, 将下垂参数调节问题转化为函数极值寻优问题。

定义任意一个光伏单元输出功率的偏差值为

$$\Delta P_i = |P_{ave} - a_i P_i| = \left| P_{ave} - a_i \cdot \frac{U_{ref} - U_{pcc}}{\frac{R_i}{U_{pcc}} + k_i} \right| \quad (21)$$

式中: P_{ave} 为光伏单元分配公共负载功率的分配基准值; a_i 为分配因子。当 $\Delta P_i = 0$ 时, 即表明光伏单元分配功率偏差为 0。

为了统一功率基准值, 提升算法寻优速度, 引入分配因子 a_i , 满足关系式(22)和式(23)。

$$a_1 P_{N1} = a_2 P_{N2} = \dots = a_n P_{Nn} \quad (22)$$

$$a_i = \frac{P_{Nmax}}{P_{Ni}} \quad (23)$$

式中, P_{Nmax} 为所有光伏单元额定功率中的最大值。此时系统光伏单元分配公共负载功率的分配基准值为

$$P_{ave} = (a_1 P_1 + a_2 P_2 + \dots + a_n P_n) / n \quad (24)$$

P_{ave} 通过收集各个变换器输出功率后计算得到, 这种基准值的选取方法比以某一个变换器输出功率为基准更具可靠性, 并且能够应对不同额定功率的光伏单元。

由于线路阻抗难以检测, 本文通过各光伏单元提供给公共负载的功率, 计算出每个光伏单元的线路阻抗, 依据式(9)有

$$R_i = \frac{U_{pcc}(U_{ref} - U_{pcc})}{P_i + k_i'} \quad (25)$$

式中, k_i' 为前一时刻的下垂系数。将式(25)的线路阻抗信息代入式(21), 即可依据分配基准值调节 k_i , 减小由于线路阻抗导致的光伏单元之间输出功率的偏差, 使得 $\Delta P_i = 0$ 。

可得到功率分配偏差函数为

$$P_{error} = \sum_{i=1}^n \sqrt{(P_{ave} - a_i P_i)^2} \quad (26)$$

当 P_{error} 趋向于 0 时, 表明系统光伏单元按照规定的比例分配公共负载功率。

为了限制母线电压偏差的范围, 需要对变换器输出电压进行适当的补偿。本文通过平均电压法的方式, 直接获取补偿后的母线电压参考值, 在不增加电压前馈补偿环节的情况下, 维持母线电压在允许范围内。利用平均电压法构建母线电压偏差函数, 如式(27)所示。

$$U_{error} = \sqrt{\left(U_{ref} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_{Ni} - \Delta U_{dci}) \right)^2} \quad (27)$$

式中, U_{Ni} 即为当前工况下的变换器输出电压参考值, 其决定了每台变换器输出对应的输出电压。

综上所述, 可根据功率分配偏差函数和母线电压偏差函数的和构建 SSA 优化目标函数, 如式(28)所示。

$$F(k_n, U_{Nn}) = w_p P_{error} + w_u U_{error} \quad (28)$$

式中, w_p 和 w_u 分别为其对应误差函数的权重值。

由于系统中存在两个变量, 且这两个变量都会影响光伏单元分配公共负载功率的精度和母线电压偏差, 因此通过设置权重值的方式协调二者的取值, 一般取 $w_p + w_u = 1$ 。本文以提高功率分配精度为首要目标, 将权重值设置为 $w_p > w_u$, 保证在 P_{error} 最小的情况下 U_{error} 在母线电压偏差允许范围内, 实现 k_i 与 U_{Ni} 的协调取值。

直流微电网系统中光伏单元输出的最大功率容易受光照强度和温度的影响, 一旦其中一个环境因素发生变化, 光伏单元就不具有输出额定功率的能力, 由于光伏单元输出功率的能力有限, 若还按照额定功率比例分配公共负载功率, 功率分配必然受到影响。为了优化光伏单元的输出功率, 解决因为环境因素对光伏单元功率分配的影响, 通过实时检测各光伏单元的温度和光照强度, 计算各光伏单元当前工况下的最大功率值, 以当前工况下各光伏单元最大功率比值分配公共负载功率。因此将式(22)和式(23)分别改写成式(29)和式(30)。

$$a_1 P_{p1} = a_2 P_{p2} = \dots = a_n P_{pn} \quad (29)$$

式中, P_{pn} 表示当前工况下第 n 个光伏单元最大功率

点处的功率。

$$a_i = \frac{P_{pmax}}{P_{Pi}} \quad (30)$$

式中, P_{pmax} 为微电网系统中当前工况下所有光伏单元最大功率点处的功率最大值。通过将式(23)中 P_{Nmax} 替换成 P_{pmax} 来优化下垂参数, 实现功率分配比例随光伏单元最大功率的变化而变化, 光伏单元以当前工况下各光伏单元最大功率比值分配公共负载功率。

因为优化目标函数由各偏差函数组成, 所以可利用 SSA 寻找目标函数极小值的方式, 实时找到同时使系统运行过程中的功率偏差、母线电压偏差最小化的解 $k_1, k_2, \dots, k_n, U_{N1}, U_{N2}, \dots, U_{Nn}$, 即为各变换器下垂系数和输出电压参考值, 此时目标函数极小值即为解空间中的全局最优位置, 从而提高功率分配精度和减小母线电压偏差, 使系统稳定运行。下垂参数寻优流程图如图 3 所示。

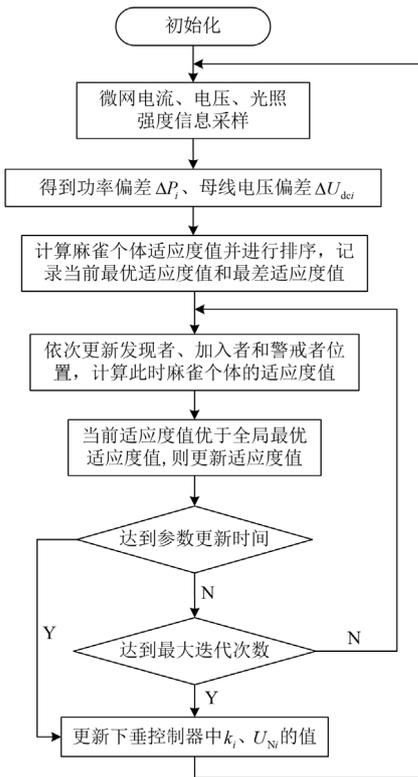


图 3 下垂参数寻优流程图
Fig. 3 Flow chart of droop parameter search

系统整体控制结构如图 4 所示, 在传统下垂控制的基础上, 将直接给定的 k_i 和 U_{Ni} 改由 SSA 优化算法模块实时给出。不断对系统参数信息采样, 然后将参数信息输入 SSA 优化算法模块中进行优化, 从而得到该工况下的最优参数 k_i 和 U_{Ni} , SSA 优化

算法模块与微电网下垂控制系统实时交互, 实时将 k_i 和 U_{Ni} 反馈到下垂控制中, 更新原先的下垂系数和变换器输出电压参考值, 实现 k_i 和 U_{Ni} 随系统工况变化。

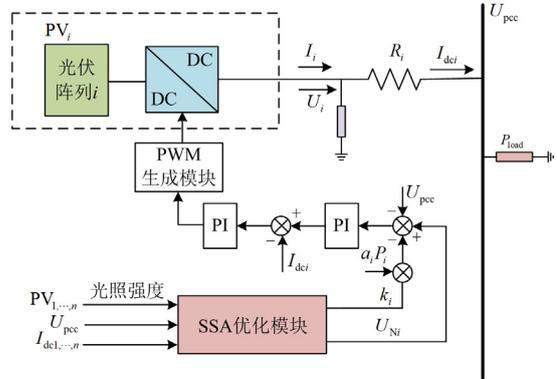


图 4 系统整体控制结构
Fig. 4 Overall system control structure

3 仿真验证

为验证控制策略的正确性和有效性, 本文以 3 个光伏单元并联运行的直流微电网系统为例, 通过 PSCAD/EMTDC 按图 1 搭建系统模型, 具体仿真参数如表 1 所示。为了体现所提策略的优越性, 将所提策略与传统下垂控制进行对比验证。

表 1 仿真参数设置

参数	数值	参数	数值
直流母线电压/kV	0.75	R_2 出口线路阻抗/ Ω	0.2
PV ₁ 额定功率/kW	200	R_3 出口线路阻抗/ Ω	0.45
PV ₂ 额定功率/kW	200	初始下垂系数 k_1	0.1875
PV ₃ 额定功率/kW	100	初始下垂系数 k_2	0.1875
R_1 出口线路阻抗/ Ω	0.15	初始下垂系数 k_3	0.375

仿真一: 公共负载功率保持不变情况下的功率分配

为了验证自适应下垂控制策略的功率分配效果, 将传统下垂控制策略与优化下垂控制策略进行对比。光伏单元始终在标况($1 \text{ kW/m}^2, 25 \text{ }^\circ\text{C}$)下运行, 系统公共负载始终为 200 kW, 本地负载始终为 0 kW, $t = 5 \text{ s}$ 时, 由传统下垂控制方式切换为自适应下垂控制方式, 相应的仿真结果如图 5 所示。

如图 5(a)所示, 5 s 之前, 在考虑线路阻抗的情况下, P_1 、 P_2 和 P_3 分别为 84.8 kW、72.3 kW 和 25.3 kW, 传统下垂控制不能实现各光伏单元按照额定功率比例(2:2:1)分配公共负载功率, 且线路阻抗小的 PV₁ 会承担更多的功率。5 s 以后投入优化控制策略, 下垂参数经 SSA 优化后, $k_1 = 0.2809$ 、 $k_2 =$

0.2102、 $k_3 = 0.0001$ 、 $U_{N1} = 0.7836$ kV、 $U_{N2} = 0.7838$ kV、 $U_{N3} = 0.7841$ kV。可以看到 P_1 、 P_2 和 P_3 分别为79.7 kW、80.1 kW和39.7 kW,基本按照额定功率比例分配功率。如图5(d)所示,当采用优化控制策略后,由线路阻抗和下垂系数产生的电压偏差得到了抑制,母线电压 U_{pcc} 从开始未加控制的0.718 kV上升至0.742 kV。

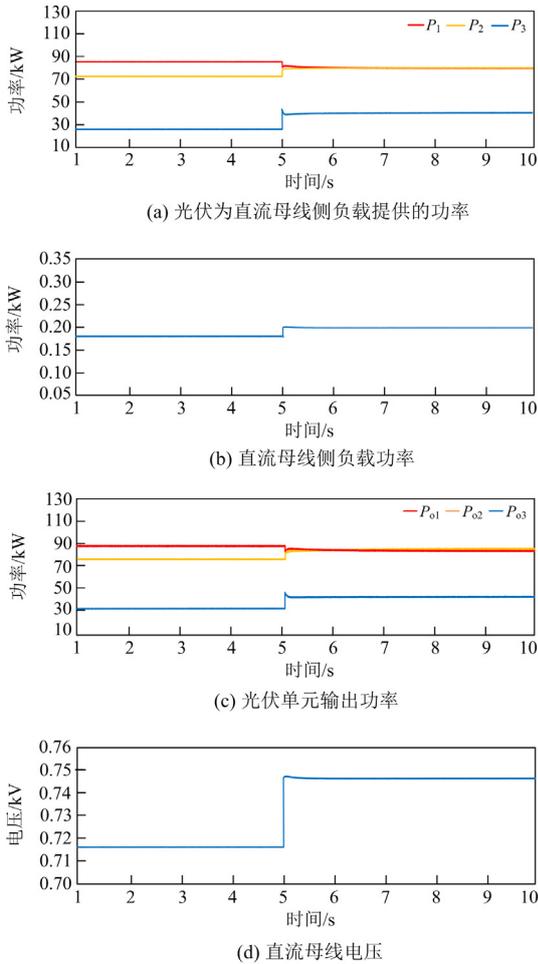


图5 传统下垂控制和自适应下垂控制策略对比仿真结果

Fig. 5 Comparative simulation results of traditional droop control and adaptive droop control strategies

仿真二: 公共负载功率发生变化情况下的功率分配

为了验证自适应下垂控制策略在不同公共负载功率情况下的功率分配精度和抑制母线电压的控制效果,在仿真中,各光伏单元始终在标况下运行,系统公共负载初始为200 kW,5 s时刻增加到300 kW,各光伏单元出口本地负载始终为0 kW,系统在不同控制策略下的仿真结果分别如图6和图7所示。

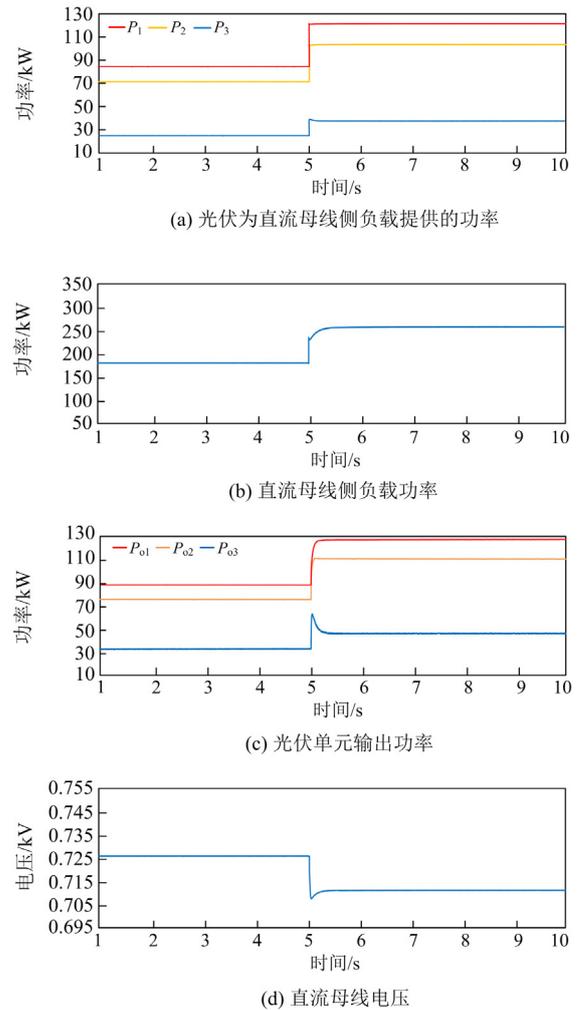


图6 传统下垂控制仿真结果

Fig. 6 Simulation results of traditional droop control

从图6(a)中可看出,在传统下垂控制中,由于线路阻抗的影响,各光伏单元无法按额定功率比例(2:2:1)分配功率,5 s前 P_1 — P_3 分别为86.3 kW、72.1 kW及26.1 kW,有明显的分配偏差;5 s之后,随着直流母线侧负载功率的增大,功率分配偏差更大。由图6(d)可见,传统下垂控制策略下,母线电压偏差严重,并且随着功率的增大,母线电压也由0.728 kV跌落至0.711 kV,超出了允许母线电压偏差的范围。

采用自适应下垂控制策略后,下垂参数根据负载功率变化情况实现自调整,5 s前, $k_1 = 0.2807$ 、 $k_2 = 0.2106$ 、 $k_3 = 0.085$ 、 $U_{N1} = 0.7837$ kV、 $U_{N2} = 0.7837$ kV、 $U_{N3} = 0.7837$ kV;5 s后, $k_1 = 0.2754$ 、 $k_2 = 0.20438$ 、 $k_3 = 0.1020$ 、 $U_{N1} = 0.7990$ kV、 $U_{N2} = 0.7990$ kV、 $U_{N3} = 0.7983$ 。从图7(a)可看出,

5 s 前 P_1 和 P_2 分别提供 79.6 kW、79.3 kW 负载功率， P_3 提供 38.7 kW 负载功率；5 s 后， P_1 和 P_2 分别提供 118.4 kW、117.8 kW 负载功率， P_3 提供 57.8 kW 负载功率，功率分配精度显著提升。由图 7(d)可见，参考电压优化后，变换器输出电压提高，母线电压基本可以维持在额定值 0.74 kV 以上，满足直流母线侧负载所需功率。

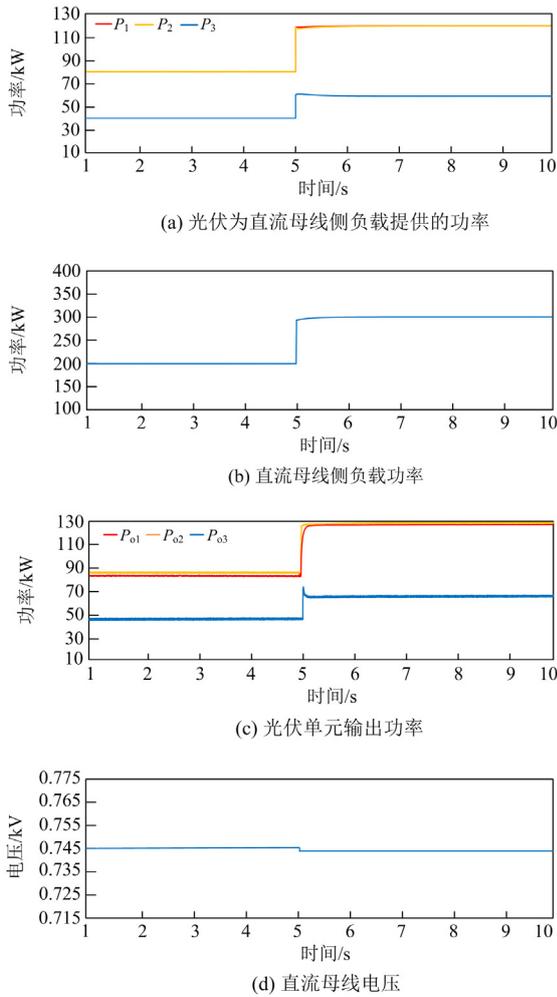


图 7 自适应下垂控制仿真结果

Fig. 7 Simulation results of adaptive droop control

仿真三：公共负载功率及本地负载发生变化情况下的功率分配

公共负载和本地负载发生变化时，可以进一步验证自适应下垂控制策略的动态性能，负载功率变化情况如表 2 所示。

由图 8 可看出，由于存在本地负载和线路阻抗的缘故， P_1 、 P_2 和 P_3 输出功率偏差较大，同时直流母线电压偏差严重，不能满足稳定在额定母线电压 $\pm 5\%$ 的性能要求。

表 2 负载功率变化表

Table 2 Load power variation table

时间/s	本地负载 1/ kW	本地负载 2/ kW	本地负载 3/ kW	直流母线 负载/kW
5	10	0	20	300
13	30	0	20	300
21	30	40	20	150
29	30	40	10	150
37	0	20	10	200

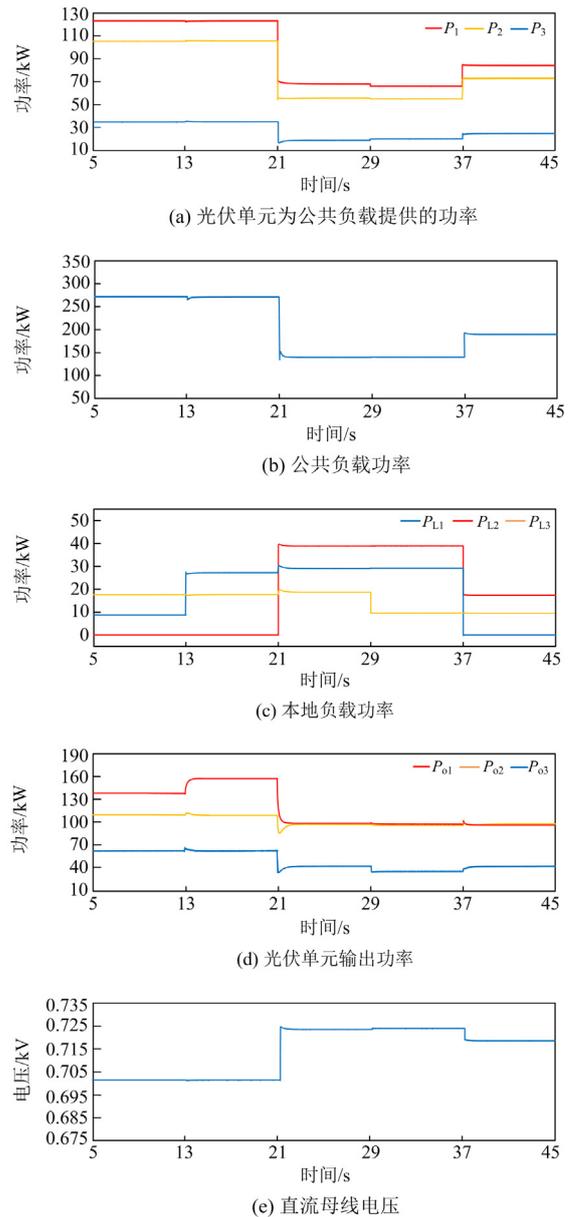


图 8 传统下垂控制仿真结果

Fig. 8 Simulation results of conventional droop control

在采用自适应下垂控制策略后，SSA 寻优参数结果如表 3 所示。即使在本地负载发生变化的情况

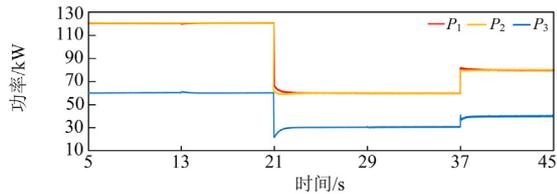
下, SSA 模块也能找到最优下垂参数。

表 3 SSA 优化结果

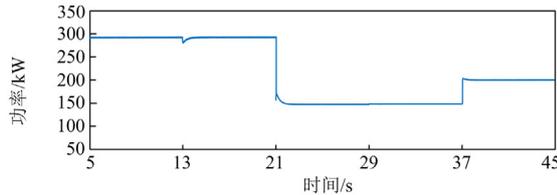
Table 3 SSA optimization result

时间/s	k_1	k_2	k_3	$U_{N1}/$ kV	$U_{N2}/$ kV	$U_{N3}/$ kV
5	0.2873	0.2161	0.0001	0.7995	0.7993	0.7999
13	0.2829	0.2101	0.0001	0.7993	0.7989	0.7984
21	0.2861	0.2143	0.0500	0.7759	0.7759	0.7759
29	0.2700	0.2010	0.0600	0.7759	0.7759	0.7759
37	0.2707	0.2011	0.0700	0.7835	0.7834	0.7834

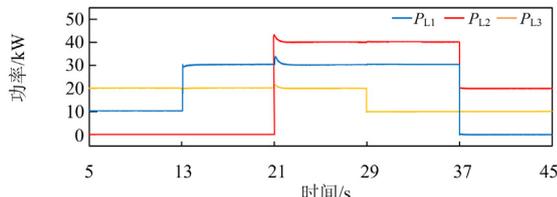
图 9(a)显示 P_1 和 P_2 输出功率曲线几乎重合, 同时几乎是 P_3 输出功率的 2 倍, 在负载功率不断发生变化时, 功率分配依旧不受其影响, 较好地实现了光伏单元按各自额定功率比例分担公共负载功率。对比图 9(e)和图 8(e)母线电压曲线可发现, 与传统下垂控制相比, 自适应下垂控制策略可以将母线电压偏差大幅度减小, 在负载动态变化过程中, 依然能保持在规定范围内, 并具有良好的动态性能, 保证了负载的电压供电质量。



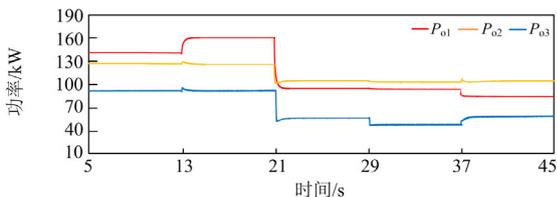
(a) 光伏单元为公共负载提供的功率



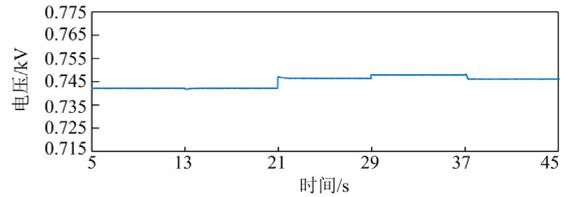
(b) 公共负载功率



(c) 本地负载功率



(d) 光伏单元输出功率



(e) 直流母线电压

图 9 自适应下垂控制仿真结果

Fig. 9 Simulation results of adaptive droop control

仿真四: 光照条件、公共负载及本地负载功率发生变化情况下的功率分配

为了对本文考虑环境因素的优化下垂控制可行性进行验证, 设置仿真光照强度在 25°C 下发生变化, 变化情况见表 4, 负载功率分布同表 2。

表 4 光伏单元光照强度变化情况表

Table 4 PV unit light intensity change table

时间/s	PV ₁ 的光照强度/ (kW/m ²)及对应 最大功率/kW	PV ₂ 的光照强度/ (kW/m ²)及对应 最大功率/kW	PV ₃ 的光照强度/ (kW/m ²)及对应 最大功率/kW
5	0.8(160)	1(200)	0.8(80)
13	1(200)	0.7(140)	0.8(80)
21	0.7(140)	1(200)	0.7(70)
29	0.6(120)	0.7(140)	0.8(80)
37	1(200)	1(200)	1(100)

当光照强度发生变化时, 光伏单元仍按照额定功率值进行功率分配(2:2:1)的仿真结果如图 10 所示。由表 2 可知, 在 5~21 s 期间, 直流母线侧负载功率为 300 kW, 理论上光伏单元 PV₁ 和 PV₂ 都应提供 120 kW 的功率, PV₃ 应提供 60 kW 的功率, 而从图 10(a)可以明显发现, 在此期间, 光伏单元 PV₁ 和 PV₂ 为直流母线侧负载提供 131~135 kW 左右的功率, 而光伏单元 PV₃ 仅提供了约 27 kW 的功率。同时, 在 $t=13$ s 时刻, 光伏单元 PV₁ 和 PV₂ 的光照强度均发生了变化, 且 PV₁ 的本地负载由 10 kW 变为 30 kW, 而从图 10(d)中可以发现, 只有 PV₁ 的输出功率 P_{O1} 发生了明显变化, PV₂ 和 PV₃ 的输出功率 ($P_{O2} \approx 155$ kW 和 $P_{O3} \approx 65$ kW) 几乎不变, 显然与需求不符。在 $t=21$ s 时刻, 直流母线负载功率降为 150 kW, 3 个光伏单元的光照强度再次发生变化, PV₁ 和 PV₂ 理论上为直流母线负载各提供 60 kW 的功率, PV₃ 提供 30 kW 的功率。然而, 实际上 PV₁ 和 PV₂ 各提供 59.42 kW 和 58.31 kW 的功率, PV₃ 提供 31.16 kW 的功率; $t=29$ s 时刻, 由表 2 和表 4 可知, 光照强度和本地负载均发生变化, 但实际

$P_1 = 57.93 \text{ kW}$ 和 $P_2 = 58.02 \text{ kW}$, $P_3 = 33.45 \text{ kW}$, 几乎没有变化, 显然与实际负载功率需求不符。

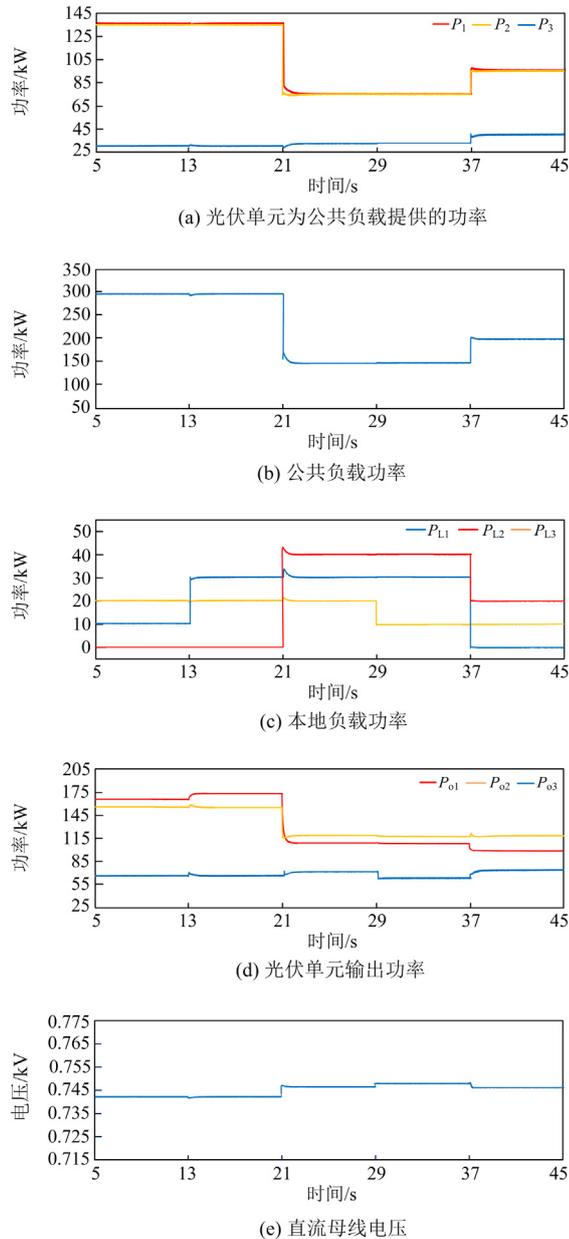


图 10 按额定功率比例优化下垂系数仿真结果

Fig. 10 Simulation results of droop coefficient optimized by rated power ratio

由此可见, 当光照强度变化时, 3 个光伏单元如果仍然按额定功率比例 2:2:1 分配直流母线负载功率, 是不能满足要求的。而且从图 10(a)和图 10(d)中还可以发现, 当光照强度发生变化后, 因为下垂系数不随光伏单元最大功率变化, 导致最大功率最小的光伏单元 PV₃ 无法提供要求分担的功率, 而 PV₁ 和 PV₂ 除了提供要求分担的功率之外, 还需额

外输出 PV₃ 缺额的那部分功率来满足直流母线负载功率需求, 显然功率分配不合理, 系统带载能力也受限。然而, 按当前工况最大功率比例分配直流母线负载功率, 这个问题就得以解决。

由图 11(a)可知, 由于优化下垂参数时考虑了光照强度的变化, 功率分配比例随光伏单元最大功率变化而变化。在 3 个光伏单元最大功率随机变化的情况下, 仍然可以满足按当前工况下最大功率比例分配公共负载功率, SSA 寻优参数结果如表 5 所示。对比图 10(a), 在 5~13 s 之间, P_1 由 130.06 kW 降

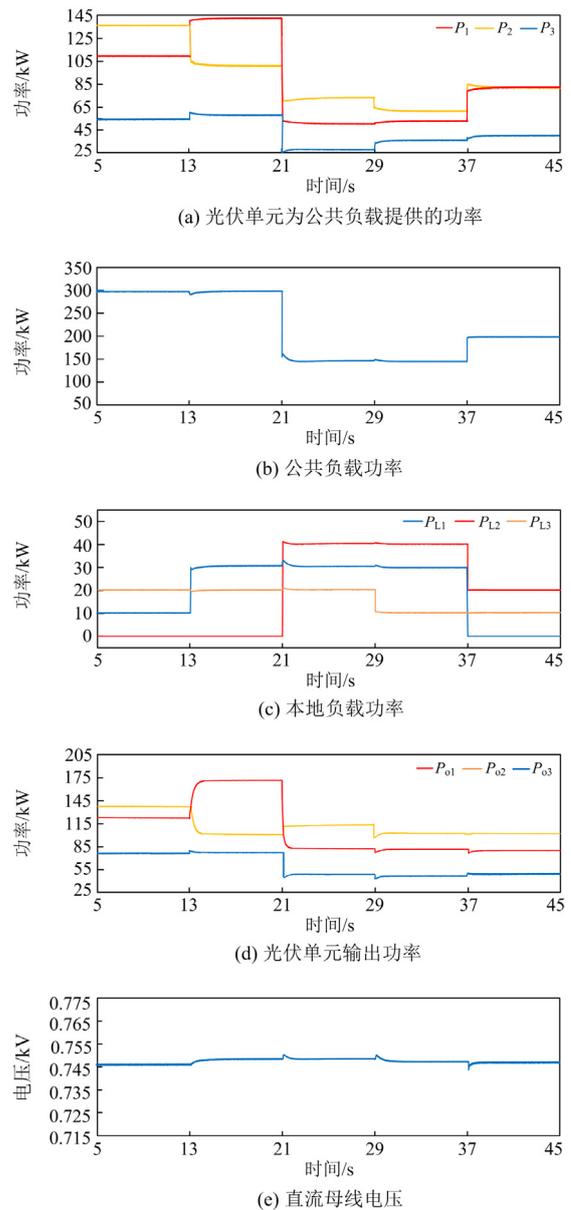


图 11 按当前工况最大功率比例优化下垂系数仿真结果

Fig. 11 Simulation results of droop coefficient optimized by maximum power ratio of current operating conditions

低至 109.90 kW, P_2 基本保持不变, P_3 由 26.76 kW 提高至 54.54 kW; 在 13~21 s 之间, PV_1 的最大功率最大, 所以 P_1 由 131.15 kW 提高至 142.85 kW, P_2 由 130.80 kW 降低至 99.99 kW, P_3 由 26.72 kW 提高至 57.14 kW。在 21~29 s 之间, PV_2 的最大功率最大, P_2 由 58.31 kW 提高至 73.12 kW, P_1 由 59.42 kW 降低至 50.89 kW, P_3 由 31.16 kW 降低至 25.32 kW; 在 29~37 s 之间, PV_3 的最大功率最大, P_2 由 58.02 kW 提高至 61.76 kW, P_1 由 57.93 kW 降低至 52.94 kW, 由于 PV_3 的最大功率相比上一时间段有所提高, 所以 P_3 由 33.45 kW 提高至 35.29 kW。

表 5 SSA 优化结果

Table 5 SSA optimization result

时间/s	k_1	k_2	k_3	U_{N1}/kV	U_{N2}/kV	U_{N3}/kV
5	0.2540	0.003 59	0.0002	0.8108	0.8040	0.8013
13	0.2490	0.3422	0.0001	0.7994	0.7907	0.7988
21	0.2457	0.3749	0.0100	0.7840	0.7794	0.7785
29	0.3390	0.3948	0.2992	0.7767	0.7787	0.7815
37	0.267	0.2930	0.0231	0.7820	0.7780	0.7734

由此可见, 最大功率最小的 PV_3 也能够充分提供按要求分担的公共负载功率, PV_2 和 PV_3 无须额外输出功率满足公共负载功率需求, 系统带载能力得以提升。37 s 后, 由于 3 个光伏单元的光照强度恢复到标况, 此时 PV_1 、 PV_2 和 PV_3 的最大功率为额定功率, 所以 P_1 和 P_2 功率曲线几乎重合, 还是 P_3 的 2 倍。由图 11(e) 可看出, 母线电压能够维持稳定在 0.745~0.75 kV 之间。从仿真中可看出, 当功率及光照强度发生变化时, 系统仍然具有较好的负载功率分配性能, 实现了最大功率小的光伏单元少输出功率, 最大功率大的光伏单元承担较多的负载功率。

4 结论

为实现下垂参数跟随直流微电网各光伏单元出口线路阻抗和本地负载分布情况自调整, 提出一种基于 SSA 的自适应下垂控制策略, 通过 PSCAD/EMTDC 仿真分析, 得出如下结论。

1) 本文提出的控制策略无须检测线路阻抗参数, 就能实现实时跟随系统运行情况自动调整下垂系数, 能够提升功率分配精度。

2) 下垂参数由 SSA 算法优化确定, SSA 优化算法解决了下垂系数 k_i 及变换器输出电压参考值 U_{ref} 两个目标优化函数的寻优问题, 实现对多目标函数的全局寻优。在不增加电压前馈补偿环节的情况下能维持母线电压在允许范围内, 同时提升功率分配精度。

3) 当光照强度发生变化时, 自动调整按照当前光照强度下最大功率数值比值分配功率, 能有效实现功率分配, 提升系统带载能力。

参考文献

- [1] 黄崇鑫, 陈振宇, 邓松. 含储能双母线直流微电网电压和功率协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 141-149.
HUANG Chongxin, CHEN Zhenyu, DENG Song. Voltage-power coordinated control of a dual-bus DC microgrid with energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 141-149.
- [2] 曾浩, 赵恩盛, 周思宇, 等. 基于电流一致性的直流微电网自适应下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 11-21.
ZENG Hao, ZHAO Ensheng, ZHOU Siyu, et al. Adaptive droop control of a DC microgrid based on current consistency[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 11-21.
- [3] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [4] KIRAKOSYAN A, EHAB F, SHAWKY M, et al. Communication-free current sharing control strategy for DC microgrids and its application for AC/DC hybrid microgrids[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2020, 35(1): 140-151.
- [5] 周林, 吕智林, 刘斌. 基于无功电流自适应下垂系数控制的多微网调度与控制协调运行[J]. 智慧电力, 2022, 50(11): 41-47.
ZHOU Lin, LÜ Zhilin, LIU Bin. Coordinated operation of multi-microgrid scheduling and control based on reactive current adaptive droop coefficient control[J]. Smart Power, 2022, 50(11): 41-47.
- [6] 刘彦呈, 庄绪州, 张勤进, 等. 基于虚拟频率的直流微电网下垂控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1693-1702.
LIU Yancheng, ZHUANG Xuzhou, ZHANG Qinjin, et al. A virtual current-frequency droop control in DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1693-1702.
- [7] MAULIK A, DAS D. An accurate current sharing method for an islanded droop-controlled DC microgrid without communication between remote buses[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(9): 12473-12473.
- [8] 张勤进, 胡王宝, 刘彦呈, 等. 一种直流微电网多光伏变换器新型功率分配策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 101-112.
ZHANG Qinjin, HU Wangbao, LIU Yancheng, et al. A novel power sharing strategy for multi photovoltaic converters in a DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 101-112.
- [9] 刘琛, 赵晋斌, 王闪闪, 等. 基于单脉冲注入的直流微

- 电网线路阻抗检测[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2584-2591.
- LIU Chen, ZHAO Jinbin, WANG Shanshan, et al. A line impedance identification based on single pulse injection in DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2584-2591.
- [10] 朱相臣, 赵晋斌, 曾国辉, 等. 基于载波频率的纹波分析直流微网阻抗检测及均流控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6894-6903.
- ZHU Xiangchen, ZHAO Jinbin, ZENG Guohui, et al. An enhance droop control method with line impedance detection based on carrier frequency ripple analysis in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6894-6903.
- [11] YI C, LIM C S, CRUDEN A, et al. A consensus-based adaptive virtual output impedance control scheme for reactive power sharing in radial microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(1): 784-794.
- [12] 王二永, 王帅. 基于自适应虚拟电阻的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 144-149.
- WANG Eryong, WANG Shuai. Low voltage microgrid droop control strategy based on adaptive virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 144-149.
- [13] 李维波, 徐聪, 许智豪, 等. 基于自适应虚拟阻抗的船用逆变器并联策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2538-2544.
- LI Weibo, XU Cong, XU Zhihao, et al. Inverter parallel control strategy based on variable virtual impedance[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2538-2544.
- [14] XIA Yanghong, WEI Wei, PENG Yonggang, et al. Decentralized coordination control for parallel bidirectional power converters in a grid-connected DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6850-6861.
- [15] CHEN Zhi, PEI Xuejun, YANG Min, et al. An adaptive virtual resistor (AVR) control strategy for low-voltage parallel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 863-876.
- [16] 杨捷, 金新民, 吴学智, 等. 一种适用于直流微电网的改进型电流负荷分配控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 59-67.
- YANG Jie, JIN Xinmin, WU Xuezhi, et al. An improved load current sharing control method in DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 59-67.
- [17] YANG Mi, ZHANG Han, YANG Fu, et al. Intelligent power sharing of DC isolated microgrid based on fuzzy sliding mode droop control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2396-2406.
- [18] 刘子文, 苗世洪, 范志华, 等. 基于自适应下垂特性的孤立直流微电网功率精确分配与电压无偏差控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 795-806.
- LIU Ziwen, MIAO Shihong, FAN Zhihua, et al. Accurate power allocation and zero steady-state error voltage control of the islanding DC microgrid based on adaptive droop characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 795-806.
- [19] 曾国辉, 朱相臣, 曾志伟, 等. 具有公共低压直流母线电压支撑功能的储能单元 SOC 自动均衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7160-7170.
- ZENG Guohui, ZHU Xiangchen, ZENG Zhiwei, et al. Energy storage unit state-of-charge automatic equalization control strategy with common LVDC bus voltage support function[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7160-7170.
- [20] BRAITOR A C, KONSTANTOPOULOS G C, KADIRKAMANATHAN V. Current-limiting droop control design and stability analysis for paralleled boost converters in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2021, 29(1): 385-394.
- [21] 蒋伟明, 赵晋斌, 高明明, 等. 具有电压自恢复特性的独立直流微电网控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3547-3555.
- JIANG Weiming, ZHAO Jinbin, GAO Mingming, et al. Control strategy with voltage self-recovery characteristic for autonomous DC microgrid[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3547-3555.
- [22] 张勤进, 张博, 刘彦呈, 等. 基于低频电流注入的船舶直流微电网线路阻抗检测[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 134-140.
- ZHANG Qinjin, ZHANG Bo, LIU Yancheng, et al. A line impedance detection of a ship DC microgrid based on low frequency current injection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 134-140.
- [23] 李祥山, 杨晓东, 张有兵, 等. 含母线电压补偿和负荷功率动态分配的直流微电网协调控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 198-204.
- LI Xiangshan, YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, et al. Coordinated control of DC microgrid considering bus voltage compensation and load power dynamic sharing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 198-204.
- [24] XUE Jiankai, SHEN Bo. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.
- [25] 陈倩, 王维庆, 王海云. 含分布式能源的配电网双层优化运行策略[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 507-517.
- CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Bi-level optimal operation strategy of distribution network with distributed energy[J]. Journal of Solar Energy, 2022, 43(10): 507-517.

收稿日期: 2023-06-18; 修回日期: 2023-11-02

作者简介:

武海涛(1980—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子变换与控制技术; E-mail: wuht-imut@imut.edu.cn

庞春林(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网运行与控制; E-mail: 1157219204@qq.com

张宁宁(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网运行与控制。E-mail: 20211800538@imut.edu.cn

(编辑 周金梅)