

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.11.018

黄锐, 孙二平, 刘云炎, 等. 面向直流微电网的可变系数增量成本下垂控制 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(11): 234-248.

面向直流微电网的可变系数增量成本下垂控制

黄锐¹, 孙二平², 刘云炎³, 魏彤²,
陈章勇³, 赵宏宇², 赵权⁴, 陈勇³

- 广西电网有限责任公司百色供电局, 广西 百色 533099;
- 中广核新能源投资(深圳)有限公司广西分公司, 南宁 530200;
- 电子科技大学 自动化工程学院, 成都 611731; 4. 南宁高伏电力科技有限公司, 南宁 530004

摘要: 在直流微电网中, 经济运行是微电网运行的主要考虑因素。当直流微电网中每台分布式发电机的增量成本 (Incremental Cost, IC) 相同时, 系统的运行成本就是最优的。基于增量成本的下垂控制是实现各分布式发电机经济运行的常用方法, 它将系统的增量成本与下垂系数关联起来, 但是该方法没有考虑系统的动态性能。提出一种变下垂系数的增量成本下垂控制, 在不影响系统稳态时分布式发电机组保持最优成本运行的前提下, 通过在系统动态过程中改变下垂系数的值, 间接提高系统的功率补偿能力, 从而改善系统的动态性能。最后通过仿真和实验验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 直流微电网; 增量成本; 变下垂系数; 动态响应

中图分类号: TM561

文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2025)11-0234-15

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Variable Coefficient Incremental Cost Droop Control for DC Microgrids

HUANG Rui¹, SUN Erping², LIU Yunyan³, WEI Tong²,
CHEN Zhangyong³, ZHAO Hongyu², ZHAO Quan⁴, CHEN Yong³

收稿日期: 2025-06-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0120700); 四川省科技项目(2024NSFSC0114, 2024NSFSC491)。

作者简介: 黄锐, 工程师, 主要从事新能源技术、电力系统研究。

通信作者: 陈章勇, 博士, 副教授。

1. Baise Power Supply Bureau, Guangxi Power GRID, Baise Guangxi 533099, China;
2. CGN New Energy Holdings Co. Ltd., Guangxi Branch Company, Nanning 530200, China;
3. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731 China;
4. Nanning High Voltage Power Technology Co. Ltd., Nanning 530004, China

Abstract: In DC microgrids, economic operation is the main consideration factor for microgrid operation. It is generally believed that when the incremental cost (IC) of each distributed generator in a DC microgrid is the same, the operating cost of the system is optimal. The droop control based on incremental cost is a commonly used method to achieve the economic operation of distributed generators. It associates the incremental cost of the system with the droop coefficient, but this method does not consider the dynamic performance of the system. This article proposes an incremental cost droop control with variable droop coefficient, which indirectly improves the power compensation ability of the system and its dynamic performance by changing the value of the droop coefficient during the dynamic process of the system, while maintaining optimal cost operation of distributed generator units without affecting the system's steady-state. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed method were verified through simulation and experiments.

Key words: DC microgrid; incremental cost; variable drop coefficient; dynamic response

在直流微电网中, 如何将微电网系统中分布式发电机(Distributed Generators, DGs)的发电成本降至最低并确保电网的经济运行一直是一个重要课题^[1-2]。分布式发电机(包括风能、太阳能光伏、燃料电池、微型涡轮机等)通过电力电子设备连接到直流微电网的直流母线上, 其运行成本各不相同, 为了优化系统的运行成本, 有必要进行经济调度^[3-4]。

在直流微电网中, 为了实现 DGs 之间的协调控制, 通常采用 3 种基本的策略: 集中控制、分散控制和分布式控制^[5-6]。分散控制无需通信网络即可运行, 而集中控制和分布式控制都需要通信网络。此外, 在集中控制中, 有一个中央控制器与所有本地控制器相连, 以获取所有 DGs 单元的平均输出电压、平均输出功率等信息, 并执行先进的控制策略^[7-8]; 在分布式控制中, 中央控制器被取消, 所有本地控制器相互协作连接, 从而提高了系统的可靠性和灵活性^[9-10]。通过经济运行协调控制策略, 使微电网系统的发电成本保持在最低水平^[11]。

传统上, 为了使直流微电网的总运行成本最小化, 可以通过中央控制器进行集中控制, 执行优化计算^[12-13]。Fan 等^[14]提出了一种基于二次编程技术的控制策略, 用于解决实时经济运行问题。该问题以基于单位成本曲线的二次目标函数为基础, 通过在运行约束条件下使总运行成本最小化来确定可运行机组的最佳发电水平。目标规划技术和运行约束条件等被建模为线性方程/不等式, 以确保即使在不可行的条件下也能获得最佳可用解决方案。

Chiang^[15]在融合了改进遗传算法(Improved Genetic Algorithm, IGA)和乘数更新算法(Multiplicative Updating, MU)之后, 提出了改进乘数更新遗传算法。IGA 使用改进的进化方向算子和迁移算子, 可以高效搜索和积极探索解; MU 用于处理电力系统经济调度(Power Economic Dispatch, PED)问题的方程和不等式约束, 可以更高效地解决具有阀点效应和多种燃料的机组电力经济运行。针对非凸经济运行问题,

Chaturvedi 等^[16]提出了一种新的自组织分层粒子群优化算法,该算法更适合具有各种非线性的现代发电机组的成本曲线,当加入时变加速系数时,性能得到进一步提升。

上述集中控制方案具有高精度和可控性等优点,但它们也面临着通信和计算负担过重等问题,并可能出现单点故障。考虑到上述问题,Zhang 等^[17]提出了一种增量成本共识(Incremental Cost Consensus, ICC)算法。增量成本共识算法通过选择各发电机组的增量成本作为共识变量,以分布式方式解决了传统集中式经济运行问题。Binetti 等^[18]基于并联运行的两种共识算法,提出了一种具有输电线损和发电机约束的分布式电力经济运行算法。第 1 种算法是一阶共识协议,通过校正项进行校正,利用对系统功率不匹配的局部估计来确保发电需求相等。第 2 种算法使用“最新信息共识”的策略对系统中的功率失配进行估计,可以有效处理不同规模和拓扑结构的网络。

分布式控制不需要中央控制器,但不同的风电机组之间仍存在通信问题,而且共识算法的实施通常比较复杂。为了提高系统的可靠性、可扩展性和经济性,需要开发一种完全分散的控制方式。Nutmaki 等^[19]提出了一种基于成本的下垂方案,该下垂方案考虑了 DGs 之间运行成本的变化,从而重新定义了 DGs 的工作频率和电压,进而确定了 DG 的下垂特性。

本研究首先讨论了直流微电网的经济运行问题,当系统中各 DG 的增量成本相同时,系统总运行成本最低;而后推导和分析了系统运行过程中传统投切控制与母线电压和增量成本投切控制间的差异;为了使系统在负荷变化等动态过程中快速返回稳态,提出了可变垂度系统作为增量成本垂度控制,通过在动态过程中增大或减小系统垂度系数的大小,增强 DGs 释放或吸收功率的能力,使系统母线电压更快地返回稳态;最后,通过仿真和实验验证了该方法的正确性。

1 系统建模和传统控制策略

1.1 直流微电网系统框架

在直流微电网中,风电机组通过直流/直流变换器与直流母线相连,其电气原理如图 1。由于各种 DGs 的运行成本特性不同,为了优化系统的运行成本,必须进行经济运行的策略优化。为了提高直流微电网的可靠性、可扩展性和经济性,在直流微电网的变换器中采用了传统的基于增量成本(IC)的下垂控制策略,以分散的方式优化运行成本,采用这种技术后, DGs 的 IC 与系统全局指标(频率或直流母线电压)的收敛性达到相等,而后根据每个 DGs 的 IC 自动实现功率分配,在不需要通信和中央控制器的情况下实现总运行成本的优化。

不同可调度 DGs(柴油发电机组、燃料电池、蓄电池等)的发电成本包含许多因素,但一般可以用二次函数^[20]表示:

$$C_i(P_i) = a_i + a_{i1}P_i + a_{i2}P_i^2 \quad (1)$$

式中: $C_i(P_i)$ 表示第 i 个 DGs 的发电成本; P_i 表示第 i 个 DGs 的发电功率; a_i 、 a_{i1} 、 a_{i2} 表示第 i 个 DGs 的成本系数。

在电力系统常规经济运行的实际考虑中,对于有 n 个 DGs 的直流微电网,其经济运行目标是使总发电成本最小,由式(2)给出。系统的功率平衡要求的等式约束如式(3),每个 DGs 的发电容量限制的不等式约束如式(4)。

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n C_i(P_i) \quad (2)$$

式中: C_{total} 表示总发电成本。

$$P_D = \sum_{i=1}^n P_i \quad (3)$$

式中: P_D 表示负载功率。

$$P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中: $P_{i \min}$ 表示最低的发电功率, $P_{i \max}$ 表示最高的发电功率。

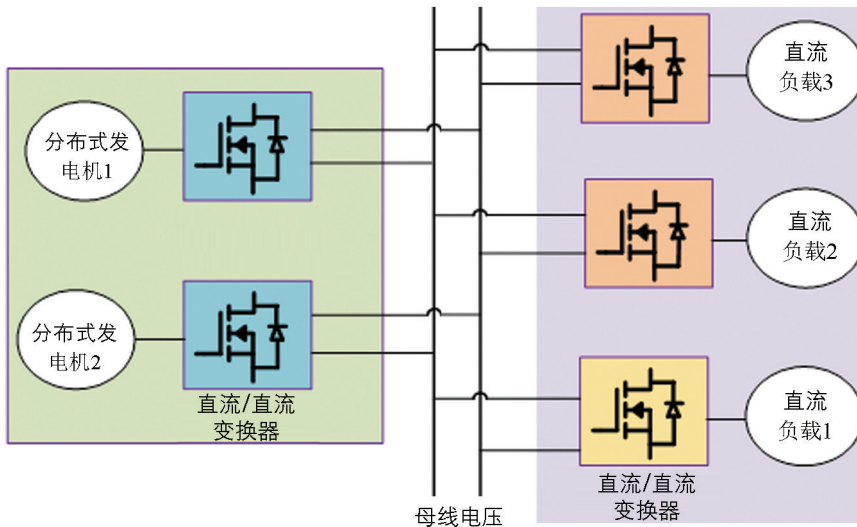


图 1 直流微电网电气模型示意图

根据传统的拉格朗日松弛技术^[21], 假设所有 DGs 的额定功率不违反, 当每个 DGs 的 IC 相同时, 系统的运行成本最优。第 i 个 DGs 的增量成本定义为其成本函数的导数, 表示为:

$$IC_i(P_i) = \frac{dC_i(P_i)}{dP_i} = a_{i1} + 2a_{i2}P_i \quad (5)$$

式中: $IC_i(P_i)$ 表示第 i 个 DGs 的增量成本; a_{i1} 、 a_{i2} 表示第 i 个 DGs 的成本系数。

当系统中所有 DCs 的 IC 达到相等时, 系统运行在成本的最优点。由于直流微电网中存在全局状态, 在稳定状态下, 全局状态会自动强制所有 DGs 相等, 例如交流微电网(MG)中的频率和直流 MG 中的直流母线电压, 通过选择适当的全局状态作为系统指标并将其与 IC 相关联, IC 的收敛将成为自动的。这是提出基于 IC 下垂控制策略的基本思想。

1.2 基于母线电压与增量成本的下垂控制算法

在直流微电网中, 母线电压是一个全局状态, 在稳定状态下, 所有 DGs 应保持相同的母线电压, 同时所有 DGs 的 IC 应收敛到最优工作点处。如果建立母线电压与 IC 的关系, 则可以通过母线电压的同步来实现 IC 的收敛^[22]。由传统下垂控制的 P-V 下降关系和公式(5)中的 IC 函数可知, 母线电压与 IC 是线性相关的, 由此可以建立母线电压与增量成本(V-IC)的下垂特性为:

$$V_{\text{dc}} = V_{\text{ref}} - d_{\text{IC}} IC_j(P_j) \quad (6)$$

式中: V_{dc} 表示母线电压; V_{ref} 表示参考电压; d_{IC} 为直流 MG 中所有 DGs 的共同下垂系数。考虑到功率容量和最大母线电压偏差的约束, d_{IC} 由式(7)给出:

$$d_{\text{IC}} = \frac{V_{\text{dc,max}} - V_{\text{dc,min}}}{IC_{\text{max}}} \quad (7)$$

式中: $V_{\text{dc,max}}$ 表示最大母线电压; $V_{\text{dc,min}}$ 表示最小母线电压; IC_{max} 表示最大增量成本。

采用该 V-IC 的下垂控制方案, 当 DGs 端子电压相等时, 每个 DGs 的 IC 可以自动收敛到最优值。图 2 说明了在提出的 V-IC 下垂控制方案下, 两个 DGs 之间可以实现经济功率共享。DG₁ 和 DG₂ 集成到公共交流母线上给负载 P_D 供电, 始终保持公式(8)中的功率平衡关系。

$$P_1 + P_2 = P_D \quad (8)$$

式中: P₁ 为 DG₁ 的输入功率; P₂ 为 DG₂ 的输入功率。

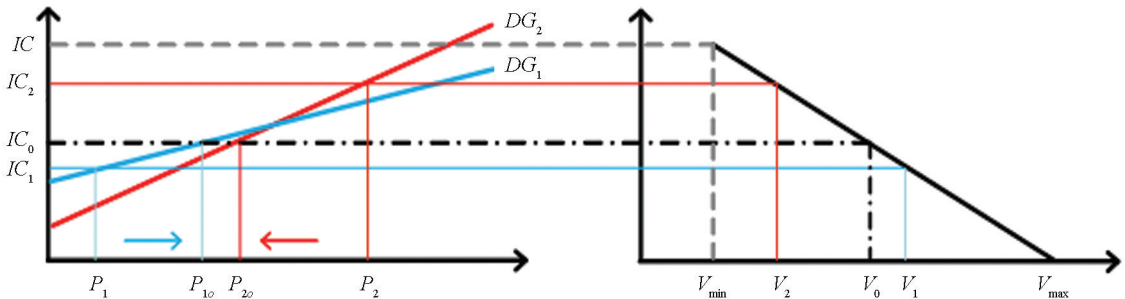


图 2 V-IC 下垂控制策略

图 2 的左侧表示为 DGs 的 IC 函数特性, 右侧展示了所提出的 V-IC 策略特性。假设稳态前 DG₁ 提供 P₁, DG₂ 提供 P₂, 对应的 IC 分别为 IC₁ 和 IC₂。由 V-IC 下垂关系可以看出, DG₁ 系统和 DG₂ 系统的端电压分别为 V₁ 和 V₂, 且 V₂ < V₁。为了实现母线电压相同, DG₁ 增加供电, DG₂ 减少供电。当 DG₁ 和 DG₂ 分别与电源 P₁₀ 和 P₂₀ 达到母线电压相等时达到平衡点。此时的两个发电机组的 IC 在 IC₀ 处相等, 平衡点是系统运行成本的最优点。

基于 V-IC 的下垂控制方案, 可得到最优点 IC₀ 处 IC 的表达式, 如式(9)。根据式(5)中的相关 IC 函数, 可以得到第 i 个 DGs 对应的最优发电功率, 如式(10)。采用所提出的 V-IC 下垂方案, 实现了无互联线的直流微电网的最优经济运行。

$$IC_0 = \frac{V_{dc,max} - V_0}{d_{IC}} \quad (9)$$

式中: IC₀ 表示最优增量成本; V₀ 表示最优点电压。

$$P_{i0} = \frac{IC_0 - a_{i1}}{2a_{i2}} \quad (10)$$

式中: P_{i0} 表示第 i 个 DGs 对应的最优发电功率; a_{i1}、a_{i2} 表示第 i 个最优发电功率的系数。

2 变下垂系数的增量成本下垂控制技术

2.1 变下垂系数的增量成本下垂控制的提出

基于 V-IC 的下垂控制方案, 将直流微电网的母线电压和 DGs 的 IC 相互关联, 当 DGs 端的母线电压相等时, 每个 DGs 的 IC 可以自动收敛到最优值, 此时系统保持经济运行^[23], 但 V-IC 的下垂控制方案只是考虑了系统的各个 DGs 稳态时的 IC 保持相等, 并没有考虑到动态性能的调节能力。

为了解决这一问题, 同时提高变换器的快速性和稳定性, 改善直流配电网的电压质量, 本研究提出了一种变下垂系数的增量成本下垂控制。该控制策略在负载功率波动瞬间通过调节变换器下垂特性曲线的斜率, 快速释放或吸收能量, 类似在直流侧增加了一个虚拟电容, 通过虚拟电容的释放或储存能量, 有效地改善系统的动态性能, 并有利于防止电压的突变。

系统经济运行时 DGs 的 V-IC 下垂特性为式(6), 为了在系统负荷变化时给直流侧电压提供快速的功

率补偿, 变下垂系数的增量成本下垂控制对 V-IC 下垂曲线进行了改进, 新的下垂特性为:

$$V_{dc} = V_{ref} - \frac{1}{k \left(\frac{dV_{dc}}{dt} \right)} IC_j(P_j) \quad (11)$$

式中: $k \left(\frac{dV_{dc}}{dt} \right)$ 表示变下垂系数; $IC_j(P_j)$ 表示第 j 个 DGs 的增量成本。变下垂系数项可以表示为:

$$k \left(\frac{dV_{dc}}{dt} \right) = K_2 \frac{dV_{dc}}{dt} + K_1 \quad (12)$$

式中: K_1 为系统稳态时的下垂系数的倒数 $\frac{1}{d_{IC}}$; K_2 为常数。

由式(12)可知, $k \left(\frac{dV_{dc}}{dt} \right)$ 是与 $\frac{dV_{dc}}{dt}$ 成正比的变下垂系数函数。当直流母线电压保持不变时, $\frac{dV_{dc}}{dt}$ 为零, 下垂系数保持 K_1 不变, 此时系统的下垂特性与 V-IC 下垂特性相同; 而当母线电压受到扰动发生变化时, $\frac{dV_{dc}}{dt}$ 相应增大或减少, 从而增大或减小 DGs 提供的功率, 为直流配电网提供惯性支持; 当电压恢复到稳态值时, 下垂系数又恢复到 K_1 。

当 DGs 采用 V-IC 的下垂控制时, 由可知变换器输入的增量成本为:

$$IC'_j = IC_{ref} + k(V_{ref} - V_{dc}) \quad (13)$$

式中: IC'_j 表示第 j 个变换器输入的增量成本; IC_{ref} 表示参考增量成本; k 表示电压系数。

当直流微电网采用变下垂系数的增量成本下垂控制时, 由式(11)和式(12)可知其变换器输入的增量成本为:

$$IC_j = IC_{ref} + K_1(V_{ref} - V_{dc}) + K_2 \frac{dV_{dc}}{dt}(V_{ref} - V_{dc}) \quad (14)$$

式中: K_1 和 K_2 表示下垂系数。

结合式(13)可以得到:

$$IC_j = IC'_j + K_2 \frac{dV_{dc}}{dt}(V_{ref} - V_{dc}) \quad (15)$$

DGs 所连接变换器的直流侧电容两边的电压电流关系式为:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = I_o - I_i \quad (16)$$

式中: I_o 和 I_i 分别为直流侧电容流向母线方向和变换器流向直流侧电容方向的电流; C 为直流侧电容。两边同时乘以直流电压 V_{dc} 可得直流系统受到扰动时, 直流侧电容的充放电功率, 即:

$$CV_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = V_{dc} I_o - V_{dc} I_i = P_o - P_i \quad (17)$$

式中: P_i 为变换器流向变换器直流侧电容方向的功率; P_o 为变换器直流侧电容流向直流网络侧方向的功率。

联立式(5)、式(15)和式(17), 替换其中的 P_i , 整理可得

$$CV_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} + K_2 \frac{dV_{dc}}{dt}(V_{ref} - V_{dc}) = A(P_o - P'_i) \quad (18)$$

式中: A 为 DGs 增量成本与功率的等效换算常数。

等式(18)两边同时对时间积分得到:

$$\frac{1}{2}CV_{dc}^2 + \frac{1}{2}K_2V_{ref}V_{dc} - \frac{1}{2}K_2V_{dc}^2 = A(W_o - W'_i) \quad (19)$$

式中: W_o 表示变换器直流侧电容流向直流母线的能量; W'_i 为变换器流向变换器直流侧电容的能量。

若取 $V_{ref} \approx 2V_{dc}$, 式(19)可改写为:

$$\frac{1}{2}CV_{dc}^2 + \frac{1}{2}K_2V_{dc}^2 = A(W_o - W'_i) \quad (20)$$

由此可知, 采用基于变下垂系数的虚拟惯性控制相当于在系统受到扰动瞬间, 等效增大了变换器直流侧的电容, 该电容为虚拟电容 C_{vir} , 其大小为:

$$C_{vir} = \frac{K_2}{A} \quad (21)$$

因此可以通过调节 K_2 来调节虚拟电容值的大小。 K_2 越大, 虚拟电容值 C_{vir} 越大, 虚拟电容储存的能量也就越大。

对于变下垂系数的增量成本下垂控制系统, 当负载变化时, 其变下垂特性示意如图 3。

从图 3 可以看出, 假设初始时刻, 系统的下垂曲线为 k_1 , 此时系统运行在 A 点, 母线电压为 V_1 , DGs 提供的功率为 P_0 。当系统的负载发生变化, 母线电压突然下降时, 系统的运行点移至 B 点, 按照传统下垂的控制方法, 系统的运行点下降, DGs 此时应该增加功率补偿, 为 P_1 。对于变下垂系数的增量成本下垂控制策略, 在暂态过程中, 母线的电压发生变化, 此时下垂曲线也跟着发生变换为 k_2 , 下垂曲线的值变小, 此时 DGs 提供的功率从 P_1 增加至 P_2 , DGs 提供的功率增加, 母线电压快速恢复稳定。当母线电压稳定时, 下垂系数恢复为 k_1 。

2.2 变下垂系数项的设计指导

当系统的负载发生变化时, 系统的变下垂系数项需要受到一定的限制。当负荷增加时, 需要变换器快速提供功率, 为直流电压提供惯性支持。但在 DGs 快速提供功率时, 为了保证 DGs 发出的功率不超过其最大容量, 需要对 DGs 的输出功率大小进行限制, 即需要满足: $P < P_{max}$, 此时的下垂系数 $k < K_{max}$; 为了保证系统的稳定运行, 下垂系数也不应过小, 因此需要对下垂系数的最小值进行限制, 即 $k > K_{min}$ 。参数变化的限制如图 4。

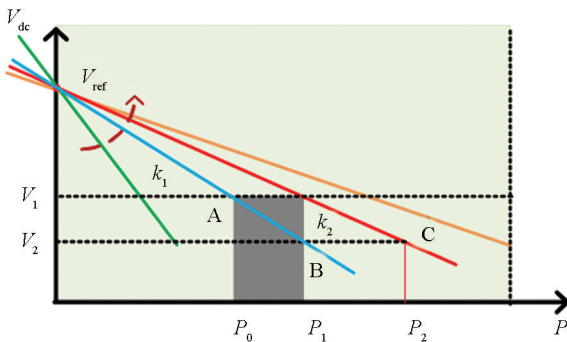


图 3 变下垂系数特性示意图

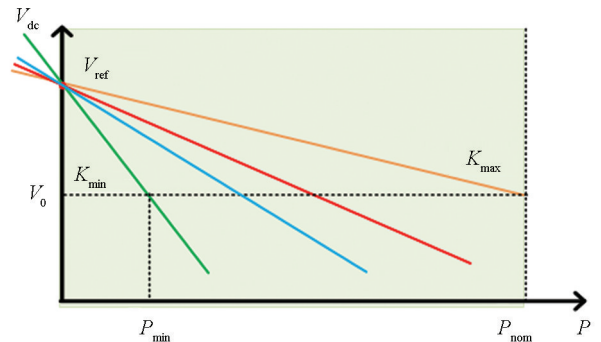


图 4 下垂系数变化限制图

从图 4 中可以看出, 假设系统稳定运行时, 母线电压为 V_o , DGs 的额定功率为 P_{nom} , 为了让 DGs 安全运行, DGs 的发电功率不能超过其额定功率, K_2 有最大值限制, 即:

$$K_2 \leq K_{max} = \frac{P_{max}}{V_{ref} - V_o} - K_1 \quad (22)$$

式中: K_{\max} 表示最大下垂系数; P_{\max} 表示 DGs 的最大发电功率。

同时为了保证系统的稳定运行, 下垂系数也不应过小, DGs 应该大于其最小发电功率 P_{\min} , K_2 有最小值限制, 即:

$$K_2 \geq K_{\min} = \frac{P_{\min}}{V_{\text{ref}} - V_o} - K_1 \quad (23)$$

式中: K_{\min} 表示最小下垂系数; P_{\min} 表示 DGs 的最小发电功率。

由图 4 的分析可知, 在负载功率发生波动时, 下垂曲线的变化幅度越大, DGs 连接的变换器所能够提供的补偿功率也就越大。但在变下垂系数的增量成本下垂控制进行功率补偿的动态过程中, 应保证在下垂系数变化不超过 K_2 的前提下, 充分利用下垂曲线的变化裕度, 为直流电压提供最大的功率补偿。因此, 对公式(12)所示变下垂系数进行优化, 得到优化后的动态下垂系数为:

$$k \left(\frac{dV_{\text{dc}}}{dt} \right) = \begin{cases} \frac{K_{\max} - K_1}{0.5\pi} \arctan \left(K_2 \frac{dV_{\text{dc}}}{dt} \right) + K_1 \frac{dV_{\text{dc}}}{dt} \geq 0 \\ \frac{K_1 - K_{\min}}{0.5\pi} \arctan \left(K_2 \frac{dV_{\text{dc}}}{dt} \right) + K_1 \frac{dV_{\text{dc}}}{dt} < 0 \end{cases} \quad (24)$$

式(24)所对应的动态下垂系数的关系曲线如图 5。

由图 5 可以看出, 当母线电压变化较大时, $\frac{dV_{\text{dc}}}{dt}$ 的值较大, 根据反正切函数特性, 此时变下垂系数项 k 会逼近下垂系数的极限值 K_{\max} 或 K_{\min} , 但不会超出极限值的范围, 保证了 DGs 的正常功率和系统的稳定运行; 当母线电压变化较小时, $\frac{dV_{\text{dc}}}{dt}$ 的值也较小, 根据反正切函数特性, 此时 $k \left(\frac{dV_{\text{dc}}}{dt} \right)$ 的曲线斜率较大, 使得较小的 $\frac{dV_{\text{dc}}}{dt}$ 对应的下垂系数 k 的值也很大, 较小的负荷波动也能引起下垂曲线较大的变化, 使得 DGs 能够提供较大的惯性。

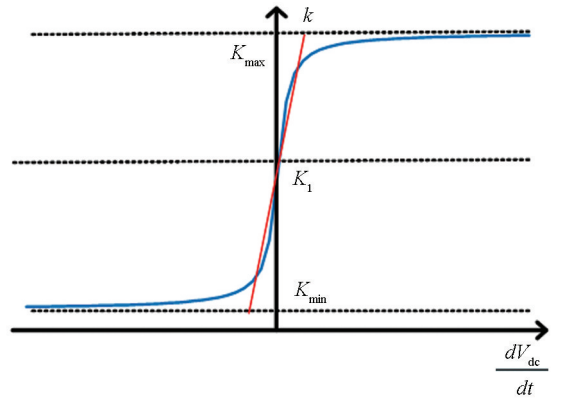


图 5 动态下垂系数的关系曲线图

对下垂系数进行优化后, 图 5 还可以发现: 当母线电压处于稳态时, $\frac{dV_{\text{dc}}}{dt}$ 的值接近 0, 此时变下垂系数项的值接近 K_1 , 与图中红色直线近似。由式(21)得到, 这条直线的斜率与该变下垂系数的增量成本下垂控制的虚拟电容是线性关系, 其值为:

$$AC_{\text{vir}} = k \left(\frac{dV_{\text{dc}}}{dt} \right)'_{\frac{dV_{\text{dc}}}{dt}=0} = \begin{cases} \frac{(K_{\max} - K_1)K_2}{0.5\pi} \frac{dV_{\text{dc}}}{dt} \geq 0 \\ \frac{(K_1 - K_{\min})K_2}{0.5\pi} \frac{dV_{\text{dc}}}{dt} < 0 \end{cases} \quad (25)$$

由式(25)可知, 虚拟电容 C_{vir} 的大小取决于下垂系数的倒数 K_1 、下垂系数的变化范围 K_{\max} 和 K_{\min} 、以及 K_2 的取值。可通过改变 K_2 的值来调节 C_{vir} 的大小, 从而调节系统在发生动态时所能补偿的功率大小。

本研究所提出的变下垂系数的增量成本下垂控制策略, 一方面可以充分发挥变下垂系数项的特点, 在系统发生动态变化时, 充分使用下垂系数项的变化范围, 使用较大或较小的下垂系数值, 为系统提供较大的功率补偿; 另一方面, 有效防止下垂系数变化过大, 从而保证了系统的稳定。

3 仿真和实验

3.1 仿真和实验设计

为了更好地体现变下垂系数的增量成本下垂控制和 V-IC 下垂控制在直流微电网动态时性能的差异,在 Matlab/Simulink 和 HIL 实验中搭建图 1 中的电气模型系统框图,验证所提出的改进方法和分析结果,其中直流微电网的分布式发电机组由 DG₃ 和 DG₄ 组成,并通过 BOOST 变换器接入电网中,直流母线电压(V_{dc})设置为 360~400 V。4 个 DG 具有相同的额定功率,4 个 DG 的成本函数系数如表 1,BOOST 变换器和电源的参数如表 2。根据式(5),各个 DG 的 IC 如图 6。基于式(7),V-IC 下垂方案的系数为 40/0.15。考虑线路阻抗为 0.05 Ω 。

表 1 4 个 DG 的成本函数系数

分布式发电机	a_{i0}	a_{i1}	a_{i2}
DG1	0.05	9.15e-2	7.15e-2
DG2	0.06	7.7e-2	4.75e-2
DG3	0.04	8.1e-2	3.75e-2
DG4	0.05	7.7e-2	8.35e-2

表 2 BOOST 变换器和电源参数

变量	取值	变量	取值
直流母线电压(V_{ref})/V	400	DG ₂ 变换器输出电容(C_{o2})/ μ F	1 880
DG 输入电压(V_j)/V	250	线路阻抗(R_{line})/ Ω	0.05
变换器电感(L)/H	0.002	开关频率(f)/kHz	20
DG ₁ 变换器输出电容(C_{o1})/ μ F	220		

3.2 仿真结果

假设数学模型与实际模型一致。

1) 验证 V-IC 下垂控制

在直流微电网中,DG₃ 和 DG₄ 通过 BOOST 变换器连接到直流母线,给直流负载供电,其中 BOOST 变换器的控制基于双环 PI 控制。

直流负荷初始为 1 kW,在 2 s 时,负载增加到 2 kW。图 7 显示了采用传统下垂方案下每个 DGs 的功率和 IC 的动态响应仿真结果,可以看出稳态时 DGs 之间的功率是相等的,但是每个 DGs 的 IC 不相等,无法实现经济运行,从而验证了直流微电网的仿真模型。

图 8 为在相同负荷变化下,V-IC 下垂控制方法的仿真响应。结果表明,在不同的负载条件下,当直流母线电压接近平衡点时,DGs 的 IC 总是收敛到相等,各 DGs 根据 IC 特性进行最优发电,最大限度地降低了运行成本。

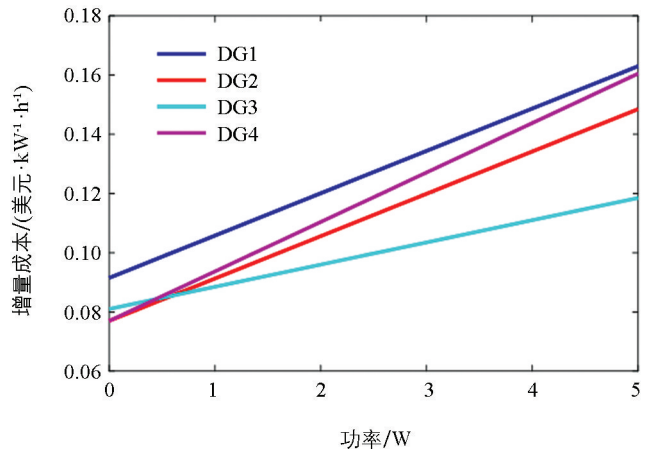


图 6 4 个 DGs 的功率-IC 曲线图

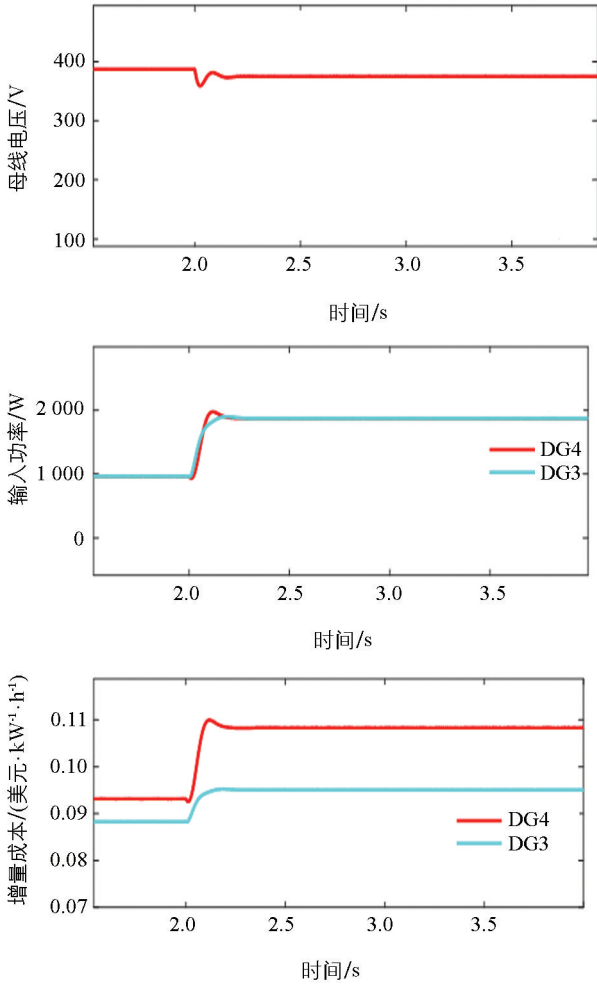


图 7 传统下垂的仿真结果示意图

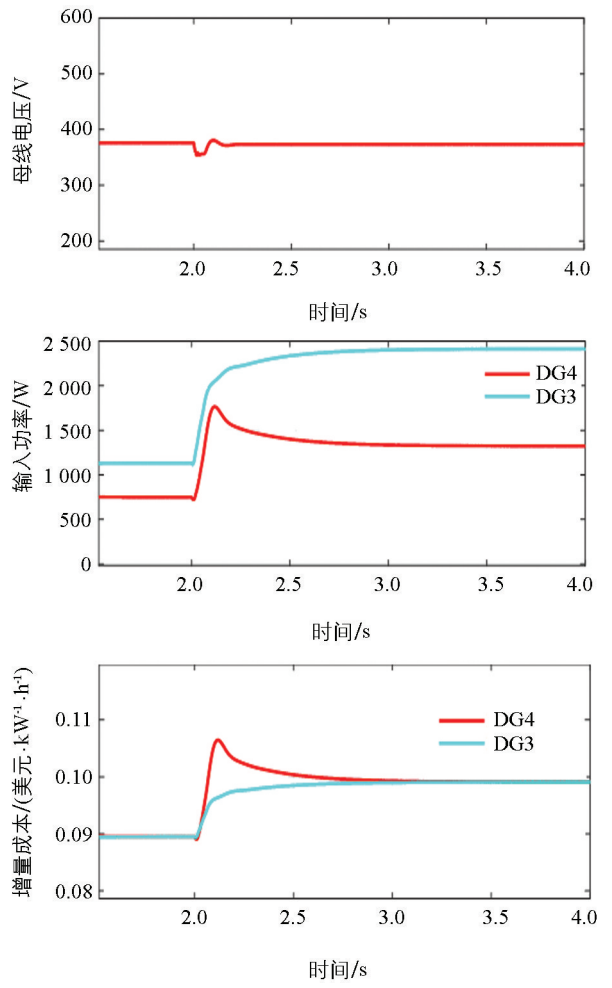


图 8 V-IC 下垂控制的仿真结果图

图 9 为两种方法的总 IC 比较。两种负载条件下的总成本分别为: 传统下垂控制下为 0.181 美元/(kW·h)、0.203 美元/(kW·h); V-IC 下垂控制下的总成本分别为 0.179 美元/(kW·h)、0.198 美元/(kW·h)。与传统的下垂控制方法相比, 所提出的控制策略使总运行成本分别降低了 1.10%、2.46%, 验证了所提出的 V-IC 下垂策略在直流 MG 经济运行中的有效性。

2) 变下垂系数的增量成本下垂控制和 V-IC 下垂控制的对比仿真

变下垂系数的增量成本下垂控制策略通过使 V-IC 下垂控制的下垂系数项变成一个随着母线电压的变化而变化的变下垂系数项, 可以在系统发生动态变化时, 为系统提供更大的功率补偿。当系统稳态时, 直流母线的电压保持不变, 此时变下垂系数的增量成本下垂控制和 V-IC 下垂控制的特性一样。图 10 是负载功率从 1 800 W 跳变到 3 700 W 时变下垂系数的增量成本下垂控制和 V-IC 下垂控制的系统参数变化示意图。图 11 是负载功率从 3 700 W 跳

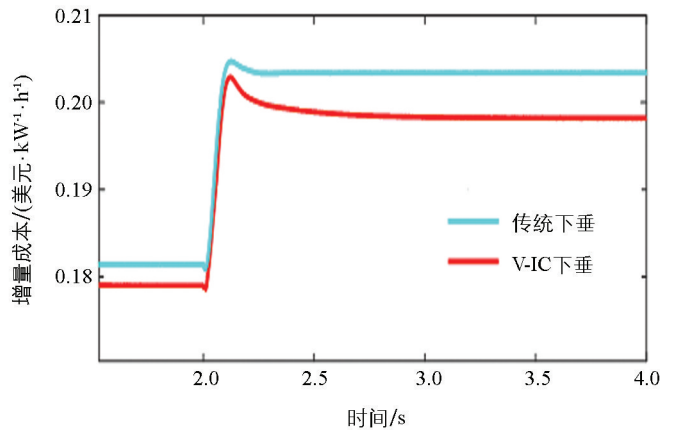


图 9 传统下垂和 V-IC 下垂的 IC 对比图

变到 1 800 W 时变下垂系数的增量成本下垂控制和 V-IC 下垂控制的系统参数变化示意图。

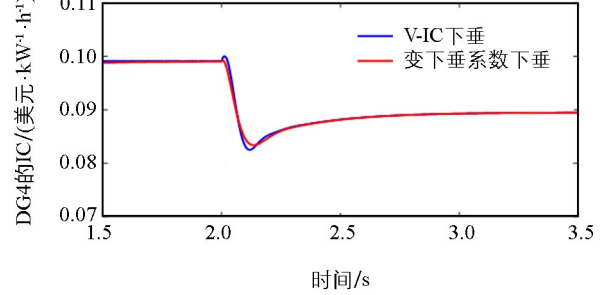
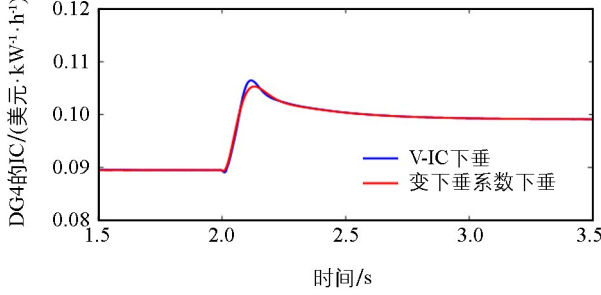
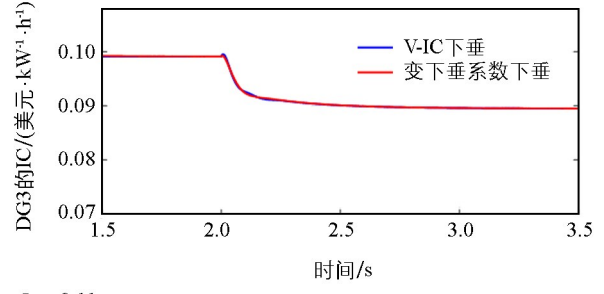
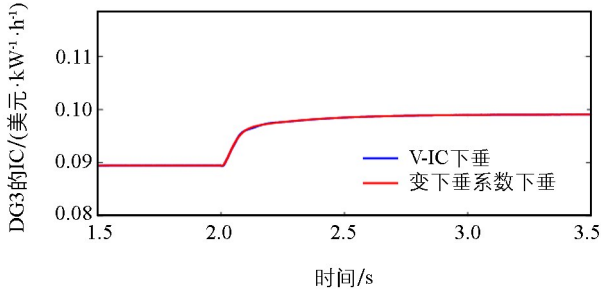
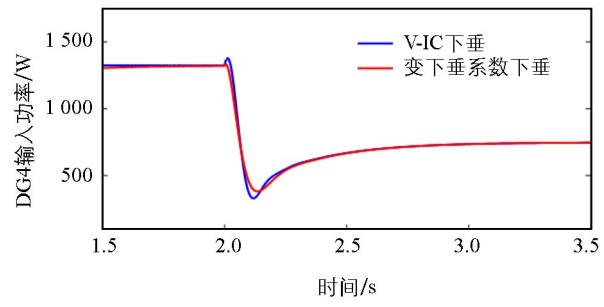
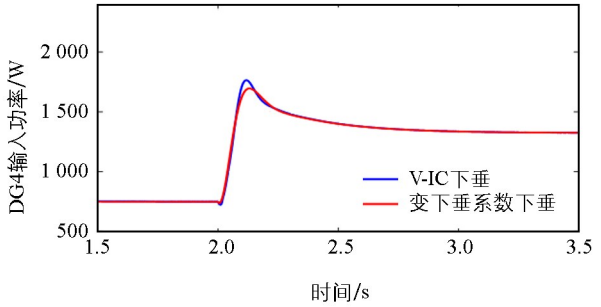
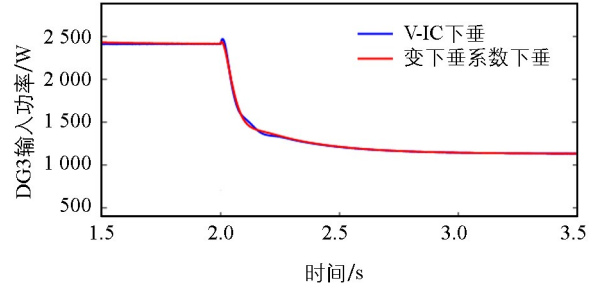
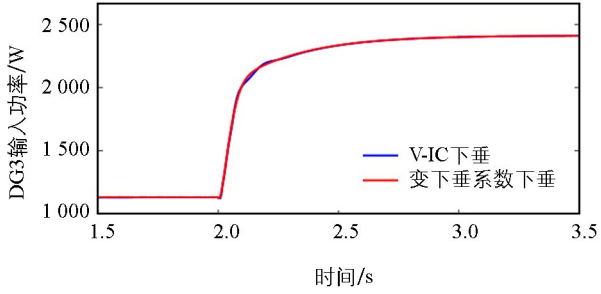
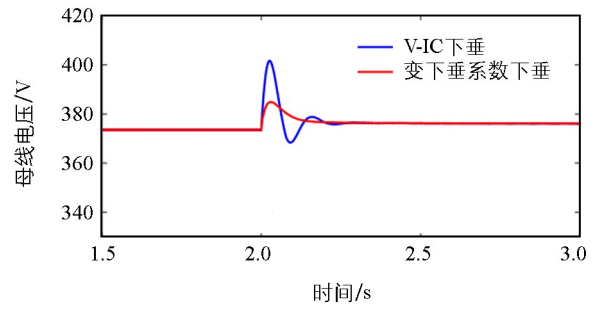
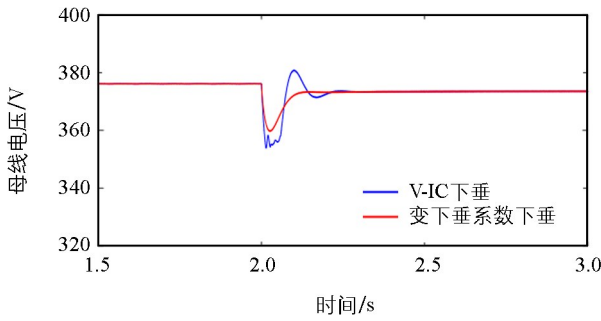


图 10 功率提高时变下垂系数的增量成本下垂控制和 V-IC 下垂控制的仿真结果示意图

图 11 功率降低时变下垂系数的增量成本下垂控制和 V-IC 下垂控制的仿真结果示意图

从图 10 中可以看出,当负载功率提高时,变下垂系数的增量成本下垂控制策略的电压的跌落值为 16 V,母线电压的恢复时间为 0.101 s。V-IC 下垂控制电压的跌落值为 23 V,母线电压的恢复时间为 0.209 s,且恢复过程中具有一定的超调量。与此同时,变下垂系数的增量成本下垂控制在 DG_i 的输入

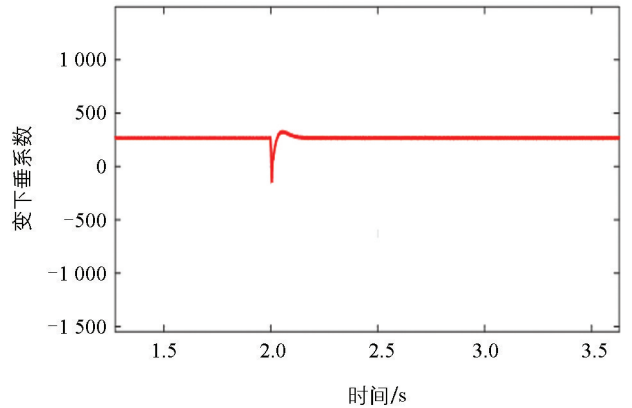
功率变化和 IC 变化时, 动态恢复过程中具有更小的超调量, 动态性能更好。因此, 具有变下垂特性的增量成本下垂控制方法具有更快的电网功率补偿速度, 母线电压的跌落值更小, 母线电压的动态性能更优秀, 同时 DG 的动态过程超调量也更低。

从图 11 中可以看出, 当负载功率降低时, 变下垂系数的增量成本下垂控制策略的电压抬升值为 11 V, 母线电压的恢复时间为 0.118 s。V-IC 下垂控制电压的抬升值为 28 V, 母线电压的恢复时间为 0.186 s, 且动态恢复过程中具有 3 次摆动。与此同时, 变下垂系数的增量成本下垂控制在 DG_4 的输入功率变化和 IC 变化时, 动态恢复过程中具有更小的超调量, 动态性能更好。因此, 具有变下垂特性的增量成本下垂控制方法具有更快的电网功率吸收速度, 母线电压的抬升值更小, 母线电压的动态性能更好, 同时 DGs 的动态过程超调量也更低。

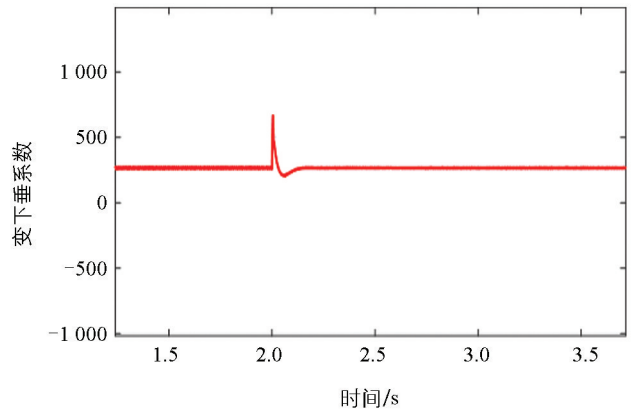
变下垂系数的增量成本下垂控制策略的变下垂系数项的变化曲线如图 12。变下垂系数项在稳态时保持恒定不变, 只有在负载或系统发生动态变化时才会速度增大或减小, 迅速吸收或释放功率, 提高系统的动态性能。

3.3 实验结果

为了更好地验证所提方法的理论性, 对变下垂系数的增量成本下垂控制和 V-IC 下垂控制进行了硬件在环平台的实验验证(HIL), 实验平台如图 13。为了实验的合理性, 实验参数和仿真参数保持一致, 得到的实验结果如图 14、图 15。



a. 负载功率提升时系统的仿真结果图



b. 负载功率降低时系统的仿真结果图

图 12 负载变化时变下垂系数项的变化曲线

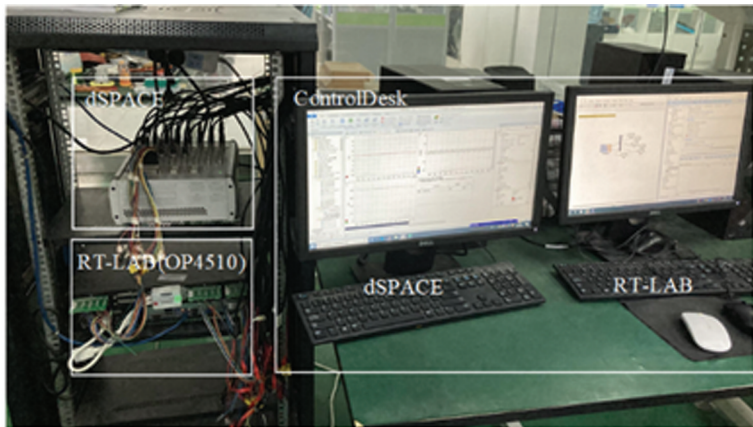
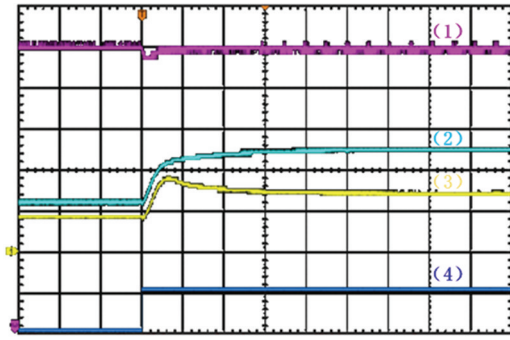


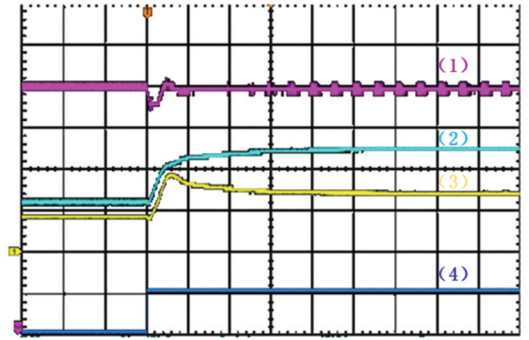
图 13 实验平台示意图

在图 14 和图 15 中, 1 号曲线表示母线电压, 刻度为 50 V; 2 号曲线表示 DG_3 的输入功率, 刻度为 1 kW; 3 号曲线表示 DG_4 的输入功率, 刻度为 1 kW; 4 号曲线表示直流母线的电流, 刻度为 5 A; 5 号曲线表示 DG_3 的增量成本, 刻度为 0.02 美元/(kW·h); 6 号曲线表示 DG_4 的增量成本, 刻度为

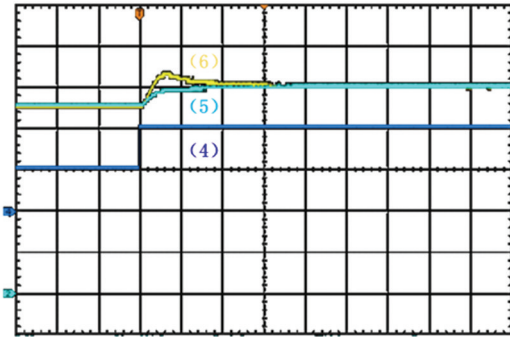
0.02 美元/(kW·h); 水平时间刻度均为 200 ms。



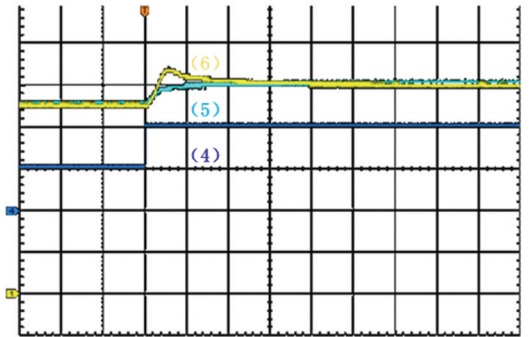
a. 变下垂系数的增量成本下垂控制策略的系统动态性能



b. V-IC下垂控制策略的系统动态性能

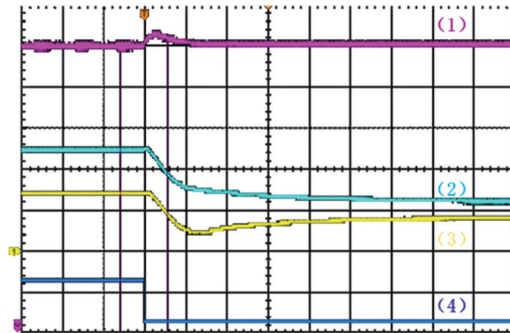


c. 变下垂系数的增量成本下垂控制策略的DG3/4增量成本

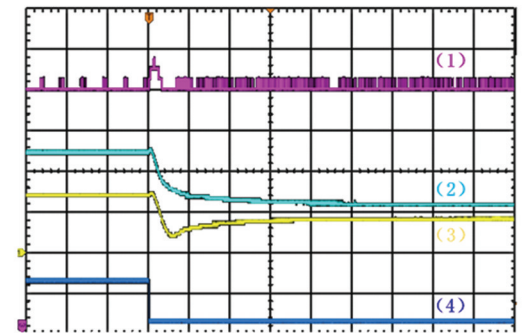


d. V-IC下垂控制策略的DG3/4增量成本

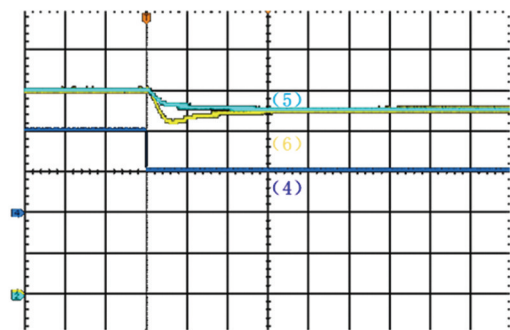
图 14 负载功率提高时变下垂系数的增量成本下垂控制和 V-IC 下垂控制的 HIL 实验结果



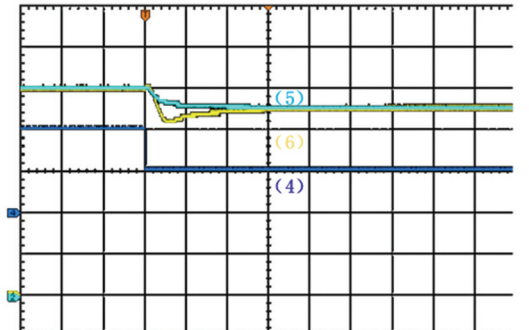
a. 变下垂系数的增量成本下垂控制策略的系统动态性能



b. V-IC下垂控制策略的系统动态性能



c. 变下垂系数的增量成本下垂控制策略的DG3/4增量成本



d. V-IC下垂控制策略的DG3/4增量成本

图 15 负载功率降低时变下垂系数的增量成本下垂控制和 V-IC 下垂控制的 HIL 实验结果

由图 14 可以看出, 当负载功率提高时, 变下垂系数的增量成本下垂控制策略的母线电压跌落值为 13 V, 需要耗时 0.08 s 回到稳态水平, 而 V-IC 下垂控制的母线电压跌落值为 21 V, 需要耗时 0.125 s 回到稳态水平, 变下垂系数的增量成本下垂控制的直流母线电压的跌落值更小, 补偿速度更快。

图 15 显示, 当负载功率降低时, 变下垂系数的增量成本下垂控制策略的母线电压抬升值为 10.5 V, 需要耗时 0.14 s 回到稳态水平, 而 V-IC 下垂控制的母线电压抬升值为 40 V, 需要耗时 0.14 s 回到稳态水平, 变下垂系数的增量成本下垂控制的直流母线电压的抬升值更小, 吸收速度更快。

另一方面, 可以看到 DG_3 和 DG_4 的增量成本相同这一点在两策略下都成立, 表明系统可以保持 IC 相同的经济运行, 此时系统运行成本最优。

HIL 的实验结果表明, 所提出的变下垂系数的增量成本下垂控制在保证系统 IC 不变的条件下, 明显提高了系统的动态性能, 使得系统吸收和释放功率的速度变快, 有利于母线电压的快速恢复。

4 结论

本研究提出了一种变下垂系数的增量成本下垂控制方法, 首先推导了传统下垂控制和母线电压与增量成本下垂控制两种方法在系统运行过程中增量成本(IC)分布的差异, 并通过分析和仿真验证了 V-IC 下垂方法可有效降低系统运行成本。在两种典型负载条件下, 所提策略使系统总运行成本较传统下垂控制分别降低了 1.10% 和 2.46%, 验证了其在直流微电网经济运行方面的有效性。

在此基础上, 引入变下垂系数项, 构建变下垂系数的增量成本下垂控制策略, 在母线电压发生变化时可动态调整下垂曲线, 增强系统功率释放与吸收能力, 提高动态性能。仿真和 HIL 实验结果表明, 该方法在负载突变状况下具有更小的电压跌落值、更快的恢复时间, 同时保持了各分布式电源 IC 的一致性, 保障了系统的经济性。

仿真与实验验证表明, 所提出的控制策略不仅能降低运行成本, 还可有效提升系统的电压动态响应能力, 在直流微电网应用中具有良好的实用价值。

参考文献:

- [1] 李萃一, 韩莹, 李奇, 等. 计及效率特性的电-氢混合储能直流微电网经济下垂控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 69-80.
- [2] ZHANG Y, RAHBARI-ASR N, CHOW M Y. A Robust Distributed System Incremental Cost Estimation Algorithm for Smart Grid Economic Dispatch with Communications Information Losses [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016, 59: 315-324.
- [3] 董密, 张心露, 杨建, 等. 孤岛模式下多源直流微电网经济运行的协调优化控制策略 [J]. 电工电能新技术, 2019, 38(5): 51-58.
- [4] GERBER D L, NORDMAN B, BROWN R, et al. Cost Analysis of Distributed Storage in AC and DC Microgrids [J]. Applied Energy, 2023, 344: 121218.
- [5] 王毅, 张丽荣, 李和明, 等. 风电直流微网的电压分层协调控制 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 16-24.
- [6] 李忠文, 程志平, 张书源, 等. 考虑经济调度及电压恢复的直流微电网分布式二次控制 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4482-4492.
- [7] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
- [8] GONZÁLEZ-GARRIDO A, GAZTANAGA H, SAEZ-DE-IBARRA A, et al. Electricity and Reserve Market Bidding Strategy Including Sizing Evaluation and a Novel Renewable Complementarity-Based Centralized Control for Storage Lifetime Enhancement [J]. Applied Energy, 2020, 262: 114591.
- [9] 吕振宇, 吴在军, 窦晓波, 等. 自治直流微电网分布式经济下垂控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 900-910.

- [10] HAMAD B R, AL-DURRA A, ALI AL-JAAFARI K, et al. Improving the Robustness of Distributed Secondary Control in Autonomous Microgrids to Mitigate the Effects of Communication Delays [J]. *Applied Energy*, 2024, 364: 123167.
- [11] YAN J, LIU S, YAN Y M, et al. A Data-Driven Model for Power System Operating Costs Based on Different Types of Wind Power Fluctuations [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119878.
- [12] 李武华, 顾云杰, 王宇翔, 等. 新能源直流微网的控制架构与层次划分 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 156-163.
- [13] SEAL S, BOULET B, DEHKORDI V R. Centralized Model Predictive Control Strategy for Thermal Comfort and Residential Energy Management [J]. *Energy*, 2020, 212: 118456.
- [14] FAN J Y, ZHANG L. Real-Time Economic Dispatch with Line Flow and Emission Constraints Using Quadratic Programming [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1998, 13(2): 320-325.
- [15] CHIANG C L. Improved Genetic Algorithm for Power Economic Dispatch of Units with Valve-Point Effects and Multiple Fuels [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(4): 1690-1699.
- [16] CHATURVEDI K T, PANDIT M, SRIVASTAVA L. Self-Organizing Hierarchical Particle Swarm Optimization for Nonconvex Economic Dispatch [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, 23(3): 1079-1087.
- [17] ZHANG Z A, CHOW M Y. Convergence Analysis of the Incremental Cost Consensus Algorithm under Different Communication Network Topologies in a Smart Grid [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(4): 1761-1768.
- [18] BINETTI G, DAVOUDI A, LEWIS F L, et al. Distributed Consensus-Based Economic Dispatch with Transmission Losses [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(4): 1711-1720.
- [19] NUTKANI I U, LOH P C, WANG P, et al. Cost-Prioritized Droop Schemes for Autonomous AC Microgrids [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(2): 1109-1119.
- [20] YANG S P, TAN S C, XU J X. Consensus Based Approach for Economic Dispatch Problem in a Smart Grid [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(4): 4416-4426.
- [21] WOOD A J, WOLLENBERG B F. *Power Generation, Operation, and Control* [M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.
- [22] XU Q W, XIAO J F, WANG P, et al. A Decentralized Control Strategy for Economic Operation of Autonomous AC, DC, and Hybrid AC/DC Microgrids [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(4): 1345-1355.
- [23] 刘瑜超, 武健, 刘怀远, 等. 基于自适应下垂调节的 VSC-MTDC 功率协调控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(1): 40-48.

责任编辑 周仁惠