

基于荷电状态的多储能微电网 改进下垂控制策略

王宏东 邓桂瑶

(广东茂名农林科技职业学院智能工程系, 广东 茂名 525024)

摘要 针对多储能交流微电网中, 储能输出有功功率不能合理分配的问题, 本文在稳定电网频率的基础上, 提出一种基于储能荷电状态的改进下垂控制策略。首先, 通过构建储能荷电状态与下垂系数的幂指数函数模型, 使各储能模块可以根据自身荷电状态自适应地调整输出的有功功率, 实现荷电状态动态均衡。其次, 利用小信号分析法分析该控制策略的稳定性。最后, 通过 Matlab/Simulink 仿真和半实物实验验证了所提策略的有效性。

关键词: 交流微电网; 分布式储能; 下垂控制; 动态均衡

Improved droop control strategy for multi-storage microgrids based on state of charge

WANG Hongdong DENG Guiyao

(Intelligent Engineering Department, Guangdong Maoming Institute of Agriculture, Forestry and Technology, Maoming, Guangdong 525024)

Abstract Considering the problem that the active power output from storage modules cannot be reasonably distributed in a multi-storage AC microgrid, this paper proposes an improved droop control strategy based on the state of charge of the energy storage module, on the basis of stabilizing the frequency of the microgrid. Firstly, by constructing a power-exponential function model of the energy storage state of charge and droop coefficient, this control strategy enables each energy storage module to adaptively adjust the output active power according to its own state of charge, which ultimately achieves the state of charge equilibrium. Secondly, small signal analysis is used to analyze the stability of the strategy. Finally, the effectiveness of the proposed strategy is verified by Matlab/Simulink simulations and semi-physical experiments.

Keywords: AC microgrid; distributed energy storage; droop control; dynamic equalization

0 引言

传统能源带来的严重污染使环境问题日益凸显, 新能源的开发与利用成为当前与未来的发展趋势; 基于分布式电源的微电网能够更好地发挥分布式电源的优势, 从而引起广泛关注。储能模块 (energy storage module, ESM) 通过逆变器接入交流微电网可以实现微电网扩容, 并通过协同控制实现收益最大化^[1-2]; 稳定交流微电网的频率是各种控制策略的首要任务, 各储能模块根据负荷的大小进行切投, 可以改善电力系统的稳定性^[3]。

在孤岛模式下, 由于缺少大电网支撑, 交流微电网的电压和频率容易发生波动^[4]。当微电网发生故障或负荷突变时, 各分布式储能需要调整出力, 以稳定系统频率, 保证电能质量。目前, 主要的控制策略可以分为主从控制和分层控制两个方面。下垂控制在实施时无需通信, 只需本地储能信息, 具有控制简单、即插即用的特点, 因此在孤岛运行模式下的微电网一般采用该控制策略^[5-6]。但是, 传统的下垂控制未考虑储能的荷电状态 (state of charge, SOC), 导致其不能根据储能的荷电状态合理调整输出功率, 因此需要对传统下垂控制进行改进。文献

[7-8]研究了基于储能荷电状态的下垂方程,并分析了功率均分特性;文献[9]研究了最大功率点跟踪下垂控制的光储一体化系统;文献[10]在下垂控制中添加无功补偿信号,以提高微电网的稳定性;文献[11]在储能控制系统中引入变调节因子,使各储能出力更加合理。

本文提出一种基于储能荷电状态的改进下垂控制策略。针对孤岛运行的交流微电网,构建储能放电时荷电状态与下垂系数间的改进幂指数函数关系,通过调节因子不仅能稳定电网频率,而且可使各储能根据自身 SOC 水平动态调整出力,最终实现 SOC 动态均衡。

1 微电网与下垂控制

1.1 系统结构

图 1 为交流微电网的一种典型拓扑,主要由储能装置、连接变换器、各发电单元和负荷组成,其中,储能电池通过双向 DC-AC 变换器连接至交流母线;直流微源和交流微源分别通过 DC-AC 变换器、AC-AC 变换器连接至交流母线。微电网有并网和孤岛两种工作模式,通过静态开关 STS 进行两种模式的切换。并网模式运行时,交流微电网的频率和电压由大电网支撑,并且通过功率跟踪算法实现各微源的功率均分;孤岛模式运行时,各微源承担对负荷供电的任务,并且在负荷变化时稳定电网频率,保证供电质量。

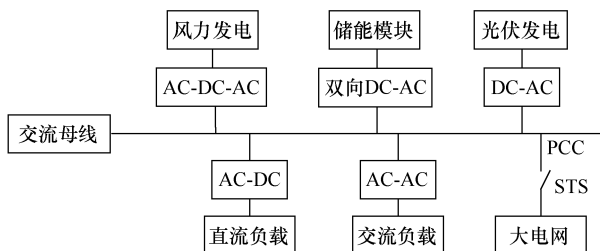


图 1 交流微电网典型拓扑

孤岛模式下,通过控制策略实现各储能单元充放电的协调控制,不仅有利于稳定交流微电网的电压和频率,提高电能质量,而且各储能单元可根据自身的荷电水平,实时调整输出有功功率的大小,最大程度地发挥各储能作用。

1.2 交流微电网下垂控制

交流微电网的分布式储能一般采用下垂控制。图 2 为交流微电网下垂特性曲线。由图 2 可见,当分布式储能输出的有功功率和无功功率发生变化时,电网的频率和电压会根据下垂特性进行动态调

整,达到新的平衡点。因此,可以在保证频率和电压稳定的情况下,通过改变下垂系数的大小来调整分布式储能输出的有功功率和无功功率。

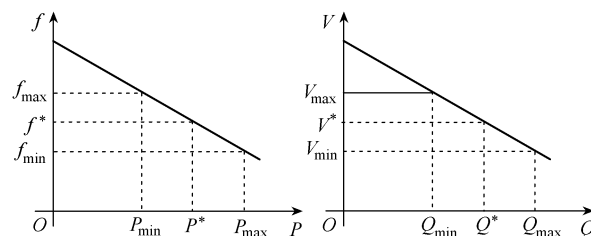


图 2 P - f 和 Q - V 下垂特性曲线

传统下垂控制的表达式为

$$\begin{cases} f_{ac} = f_{ac}^* + k_p (P_{ac}^* - p_{acl}) \\ V_{ac} = V_{ac}^* + k_q (Q_{ac}^* - q_{acl}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_{ac} 和 V_{ac} 分别为本地电网实际频率和电压; f_{ac}^* 和 V_{ac}^* 为本地电网频率和电压的参考值; P_{ac}^* 和 Q_{ac}^* 分别为分布式储能输出有功功率和无功功率的额定值; p_{acl} 和 q_{acl} 分别为分布式储能输出的经低滤波后的有功功率和无功功率; k_p 和 k_q 为下垂控制系数。由式 (1) 可知,在忽略线路阻抗的情况下,各储能的输出功率由下垂系数确定,无法根据储能自身的荷电状态水平合理承担负荷。针对孤岛运行下的交流微电网储能输出有功功率分配不合理的问题,本文提出改进的下垂控制策略。

2 自适应储能改进下垂控制策略

2.1 改进下垂控制策略

针对传统下垂控制对分布式储能输出有功功率分配不合理的问题,本文在传统下垂控制的基础上,考虑储能荷电状态,通过构建下垂系数与储能 SOC 的幂指数函数关系,提出改进的下垂控制策略。改进下垂控制表达式为

$$f_{aci} = f_{ac}^* + k_p e^{p S_{OCi}} (P_{ac}^* - p_{acl}) \quad (2)$$

$$V_{aci} = V_{ac}^* + k_q (Q_{ac}^* - q_{acl}) \quad (3)$$

式中: f_{aci} 和 V_{aci} 分别为第 i 个储能模块本地的实际频率和电压; p_{acl} 和 q_{acl} 分别为第 i 个储能模块经低滤波后输出的有功功率和无功功率; 因子 p 和 n 为下垂系数修正因子; S_{OCi} 为第 i 个储能模块的荷电状态。

两个储能模块并联时,改进自适应下垂控制框图如图 3 所示。

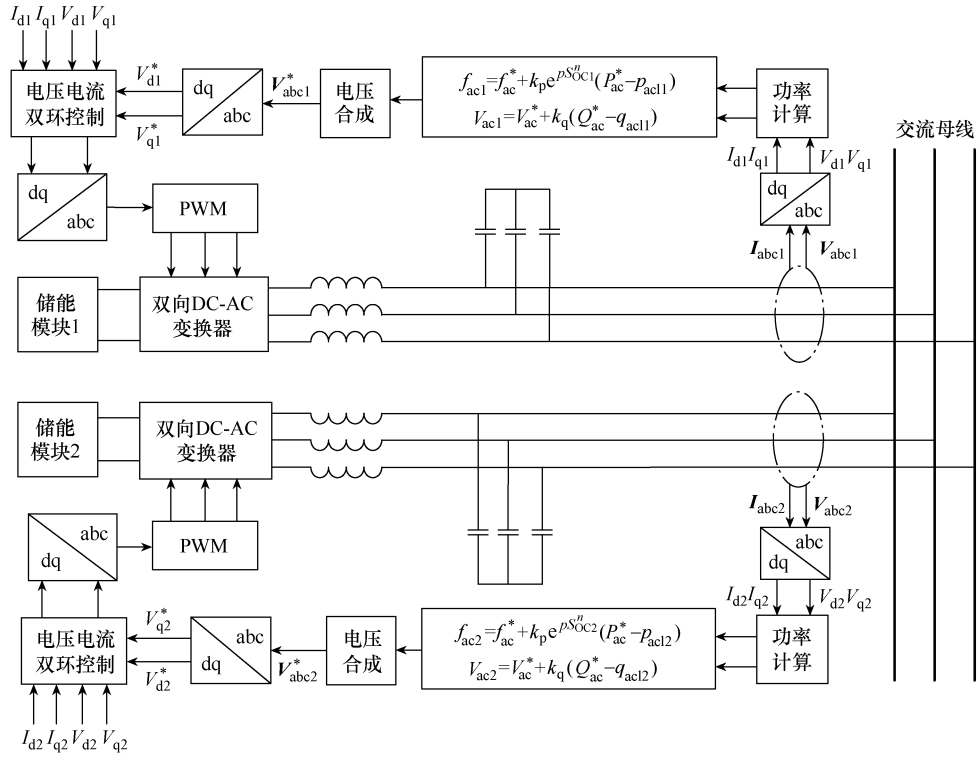


图3 改进自适应下垂控制框图

2.2 稳定性分析

当两储能模块下垂系数相同时,由式(2)得到两个并联运行的储能模块放电时,输出有功功率与参考值的偏差之比为

$$\frac{P_{ac}^* - p_{ac1}}{P_{ac}^* - p_{ac2}} = \frac{e^{\rho S_{OC2}^n}}{e^{\rho S_{OC1}^n}} \quad (4)$$

由式(4)可知,放电时储能输出的有功功率 p_{ac1} 与自身的荷电状态水平呈正相关。由式(2)得到两个并联储能模块的改进下垂控制表达式为

$$f_{ac1} = f_{ac}^* + k_p e^{\rho S_{OC1}^n} (P_{ac}^* - p_{ac1}) \quad (5)$$

$$f_{ac2} = f_{ac}^* + k_p e^{\rho S_{OC2}^n} (P_{ac}^* - p_{ac2}) \quad (6)$$

对式(5)和式(6)进行小信号扰动,得

$$\hat{f}_{ac1} = pnk_p S_{OC1}^{n-1} e^{\rho S_{OC1}^n} (P_{ac}^* - p_{ac1}) \hat{S}_{OC1} - k_p e^{\rho S_{OC1}^n} \hat{p}_{ac1} \quad (7)$$

$$\hat{f}_{ac2} = pnk_p S_{OC2}^{n-1} e^{\rho S_{OC2}^n} (P_{ac}^* - p_{ac2}) \hat{S}_{OC2} - k_p e^{\rho S_{OC2}^n} \hat{p}_{ac2} \quad (8)$$

其中,表达式中的大写字母表示稳态量,带“^”

的符号表示小信号扰动量,以下推导同理。

在估计储能电池的荷电状态时,通常使用安时法^[12],其计算公式为

$$S_{OCi} = S_{OCi0} - \frac{1}{C_e} \int i_{bati} dt \quad (9)$$

储能模块的输出功率为

$$P_{aci} = U_{bati} i_{bati} \quad (10)$$

式中: S_{OCi0} 为第 i 个储能模块零时刻的荷电状态; U_{bati} 和 i_{bati} 分别为第 i 个储能模块输出的电压和电流; C_e 为储能电池的容量。

储能模块在放电模式下的荷电状态水平为

$$S_{OC1} = S_{OC10} - \frac{1}{C_e U_{bat1}} \int p_{ac1} dt \quad (11)$$

$$S_{OC2} = S_{OC20} - \frac{1}{C_e U_{bat2}} \int p_{ac2} dt \quad (12)$$

式中: p_{ac1} 为第 1 个储能模块低通滤波前输出的有功功率; p_{ac2} 为第 2 个储能模块低通滤波前输出的有功功率。

对式(11)和式(12)进行小信号扰动,并转换到频域得

$$s\hat{S}_{OC1} = -\frac{\hat{P}_{ac1}}{C_e U_{bat1}} \quad (13)$$

$$s\hat{S}_{OC2} = -\frac{\hat{P}_{ac2}}{C_e U_{bat2}} \quad (14)$$

储能输出功率需要经过低通滤波, 滤波前后的关系表达式为

$$\hat{P}_{ac1} = H_1 \hat{P}_{aci} \quad (15)$$

式中, H_1 为低通滤波器的传递函数。直流转交流需要对逆变器输出的电流、电压进行滤波, 大多数研究选用 LC 滤波器, 即二阶低通滤波器, 具有良好的滤波效果, 所以 H_1 选为二阶的形式, 有

$$H_1 = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (16)$$

式中: ζ 为阻尼系数; ω_0 为系统截止频率。

将式 (15) 代入式 (13) 和式 (14) 消去 \hat{P}_{ac1} 和 \hat{P}_{ac2} 得

$$\hat{S}_{OC1} = -\frac{\hat{P}_{ac11}}{C_e U_{bat1} H_1 s} \quad (17)$$

$$\hat{S}_{OC2} = -\frac{\hat{P}_{ac12}}{C_e U_{bat2} H_1 s} \quad (18)$$

将式 (17) 和式 (18) 代入式 (7) 和式 (8) 消去 \hat{S}_{OC1} 和 \hat{S}_{OC2} 得

$$\hat{f}_{ac1} = -pnk_p S_{OC1}^{n-1} e^{pS_{OC1}^n} (P_{ac}^* - P_{ac11}) \frac{\hat{P}_{ac11}}{C_e U_{bat1} H_1 s} - k_p e^{pS_{OC1}^n} \hat{P}_{ac11} \quad (19)$$

$$\hat{f}_{ac2} = -pnk_p S_{OC2}^{n-1} e^{pS_{OC2}^n} (P_{ac}^* - P_{ac12}) \frac{\hat{P}_{ac12}}{C_e U_{bat2} H_1 s} - k_p e^{pS_{OC2}^n} \hat{P}_{ac12} \quad (20)$$

设

$$g_{im1} = \frac{pnk_p S_{OC1}^{n-1} e^{pS_{OC1}^n} (P_{ac}^* - P_{ac11})}{C_e U_{bat1}} \quad (21)$$

$$g_{im2} = \frac{pnk_p S_{OC2}^{n-1} e^{pS_{OC2}^n} (P_{ac}^* - P_{ac12})}{C_e U_{bat2}} \quad (22)$$

化简式 (19) 和式 (20) 可得

$$\hat{f}_{ac1} = -\frac{g_{im1} + k_p e^{pS_{OC1}^n} H_1 s}{H_1 s} \hat{P}_{ac11} \quad (23)$$

$$\hat{f}_{ac2} = -\frac{g_{im2} + k_p e^{pS_{OC2}^n} H_1 s}{H_1 s} \hat{P}_{ac12} \quad (24)$$

在微电网系统中有

$$P_{ac11} + P_{ac12} = P_{load} \quad (25)$$

$$f_{ac1} = f_{ac2} \quad (26)$$

对式 (25) 和式 (26) 进行小信号扰动, 并将结果与式 (23) 和式 (24) 联立, 可以得到系统的特征方程为

$$As^2 + Bs + C = 0 \quad (27)$$

其中

$$A = g_{im1} + g_{im2}$$

$$B = 2\zeta\omega_0 (g_{im1} + g_{im2}) + k_p \omega_0^2 (e^{pS_{OC1}^n} + e^{pS_{OC2}^n})$$

$$C = \omega_0^2 (g_{im1} + g_{im2})$$

式中, A 、 B 、 C 为特征方程的系数。

由特征方程可以分析系统的稳定性。当 $n=5$, $p=5$, $S_{OC1}=0.9$ 时, S_{OC2} 从 0.8 以 0.1 的步长变化到 0.1 的过程中, 主导极点的变化情况如图 4 所示, 极点如标号 1~8 所示, S_{OC1} 与 S_{OC2} 的关系等同, 不再分析。当 $n=5$, $S_{OC1}=0.9$, $S_{OC2}=0.8$ 时, p 从 1 以 1 的步长变化到 9 的过程中, 主导极点的变化情况如图 5 所示。当 $p=5$, $S_{OC1}=0.9$, $S_{OC2}=0.8$ 时, n 从 1 以 1 的步长变化到 9 的过程中, 主导极点的变化情况如图 6 所示。由图 4、图 5 和图 6 可以看出, 所有极点都分布在左半平面, 系统稳定。

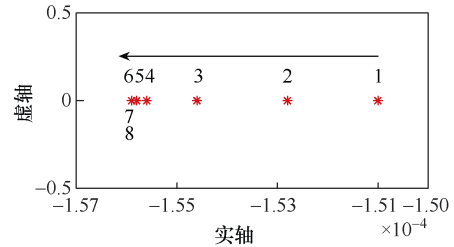


图 4 S_{OC} 变化时主导极点变化情况

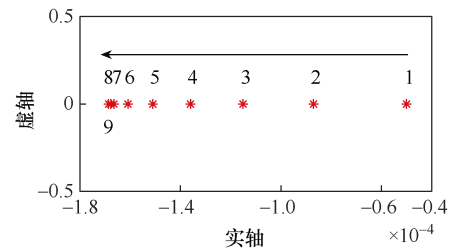
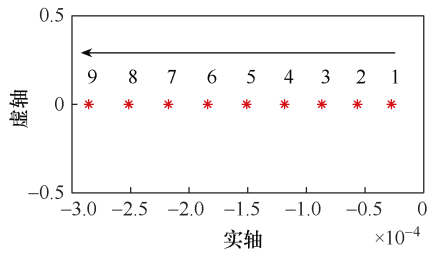


图 5 n 变化时主导极点变化情况

图6 p 变化时主导极点变化情况

2.3 频率偏差

本文着重对孤岛运行模式下交流微电网负荷有功功率的分配及造成的频率偏差进行分析。在孤岛运行模式下，储能模块放电，交流微电网存在频率偏差，由式(2)可得

$$\Delta f = k_p e^{p S_{OCi}^*} (P_{ac}^* - p_{acli}) \quad (28)$$

由式(28)可知，系统的频率偏差与储能模块的初始下垂系数及因子 p 、 n 有关。观察式(2)可以得到，在孤岛运行模式下交流微电网储能模块放电时，下垂系数 k 满足

$$k_p \leq k \leq k_p e^p \quad (29)$$

因此，需要保证系统频率偏差小于允许的最大频率偏差 Δf_{max} ，即满足式(30)。

$$\left| k_p e^p (P_{ac}^* - p_{acli}) \right| \leq \Delta f_{max} \quad (30)$$

下垂系数修正因子 p 和 n 的值主要取决于系统的稳定性，从2.2节的分析可知， $p, n \in [0, 9]$ ，进而通过式(30)可以进一步确定因子的取值。

3 仿真研究

3.1 仿真参数

为验证所提改进下垂控制策略的有效性，在 Matlab/Simulink 环境中搭建两台储能电池并联模型，模拟多储能交流微电网的孤岛运行。仿真参数见表1。

表1 仿真参数

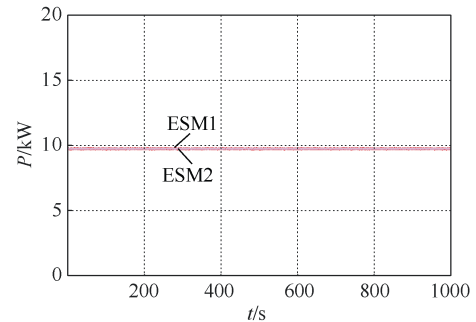
参数		数值
储能电池 1	额定电压/V	500
	容量/(A·h)	20
储能电池 2	额定电压/V	500
	容量/(A·h)	20
储能 1 初始荷电状态水平 S_{OC10}		0.8

(续表 1)

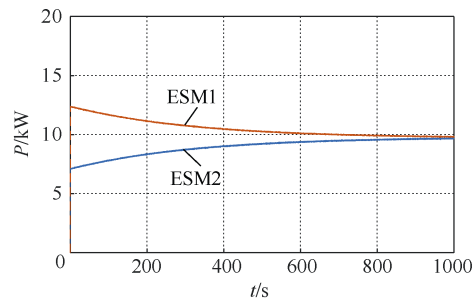
参数		数值
储能 2 初始荷电状态水平 S_{OC20}		0.7
初始下垂系数	k_p	1×10^{-5}
	k_q	3×10^{-4}
下垂系数修正因子	n	5
	p	7
公共负荷	有功/kW	20
	无功/kvar	3.5
三相负荷额定线电压/V		380
变换器载波频率/Hz		6 000
系统频率/Hz		50
LC 滤波器电感/mH		3
LC 滤波器电容/ μ F		1 500

3.2 储能放电自适应分配负荷

分别采用传统的下垂控制策略和所提改进下垂控制策略时，两个储能模块 ESM1 和 ESM2 输出的有功功率如图 7 所示。由图 7 可知，传统下垂控制策略不能根据储能实际荷电状态对负荷功率进行合理分配，而改进下垂控制策略可以使储能根据自身 SOC 的高低，自适应地调整输出，最终达到 SOC 均衡。



(a) 采用传统下垂控制策略

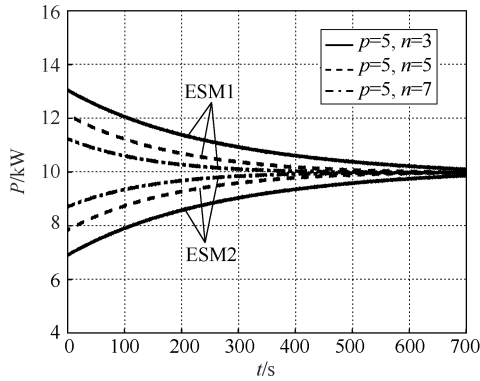


(b) 采用改进下垂控制策略

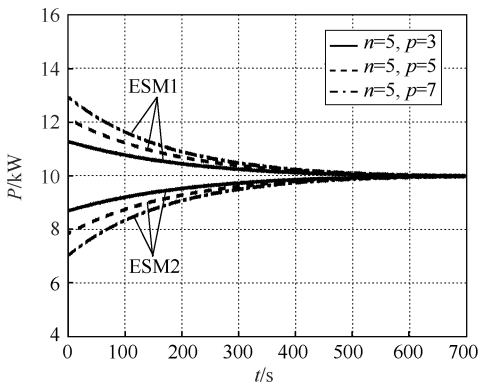
图7 不同控制策略下储能模块输出有功功率

3.3 因子 n 和 p 的作用

图 8 为因子 n 和 p 取不同值时, 储能模块输出的有功功率。由图 8 (a) 可以看出, 当 p 不变时, n 越小, 控制效果越明显。由图 8 (b) 可以看出, 当 n 不变时, p 越大, 控制效果越明显。



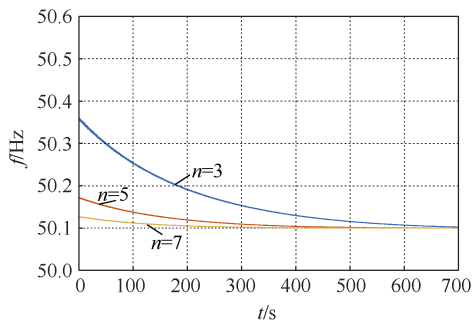
(a) 因子 n 对有功分配的影响



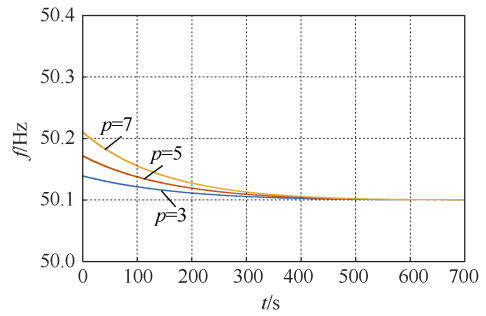
(b) 因子 p 对有功分配的影响

图 8 不同因子 n 和 p 下储能模块输出有功功率

因子 n 和 p 的取值还会影响系统的频率波动, 图 9 为 n 和 p 取不同值时的系统频率。由图 9 (a) 可以看出, $p=5$ 保持不变, 随着 n 的减小, 系统的频率波动会变大。由图 9 (b) 可以看出, $n=5$ 保持不变, 随着 p 的增大, 系统频率波动会变大。



(a) $p=5$ 时系统频率波动



(b) $n=5$ 时系统频率波动

图 9 不同因子 n 和 p 下的系统频率

综上所述, n 越小、 p 越大, 控制效果越明显, SOC 均衡的速率越快; 同时, 因子 n 和 p 可以用于调节系统的频率。本文所提改进下垂控制策略通过把下垂系数与储能荷电状态关联起来, 使储能可以根据自身 SOC 自适应地输出有功功率; 根据指数函数的图形特征可知, 因子 n 和因子 p 的引入, 放大了储能荷电状态差值, 加快了均衡速率。

3.4 稳定性

为测试负荷突然增加时系统的稳定性, 在 200s 时负荷有功功率增加 5kW、无功功率增加 3kvar, 并在 300s 时切除。 $n=5, p=7$, 其他条件不变。采用改进下垂控制策略, 负荷突增时储能模块输出有功功率如图 10 所示, 系统频率如图 11 所示, 系统电压如图 12 所示。由图 10 可以看出, 负荷突然增加时, 系统仍然能进行有功功率的合理分配; 从图 11 可以看出, 频率未达稳定状态时, 负荷突然增加, 系统频率从 50.13Hz 变化为 50.07Hz, 波动小于 0.1Hz; 从图 12 可以看出, 在 200s 负荷突增时, 系统电压比较稳定, 幅值保持在 310V。储能电池 2 退出运行时, 储能模块输出有功功率如图 13 所示, 由图 13 可知, 系统稳定运行, 输出的有功功率略低于 20kW, 原因是线路阻抗使负荷端额定电压未能严格达到 380V, 因此储能输出的有功功率略低于设置的给定值。

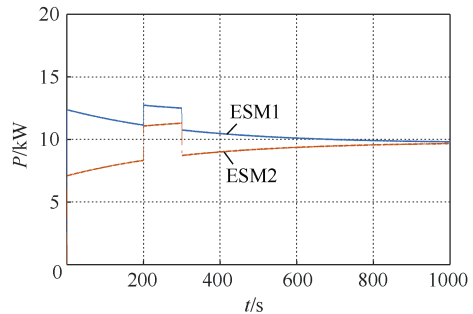


图 10 负荷突增时储能模块输出有功功率

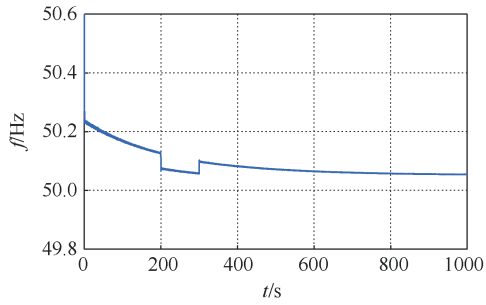


图 11 负荷突增时的系统频率

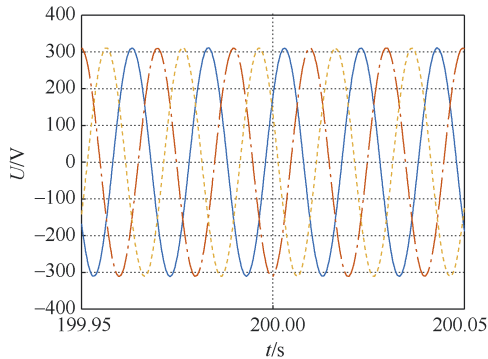


图 12 负荷突增时的系统电压

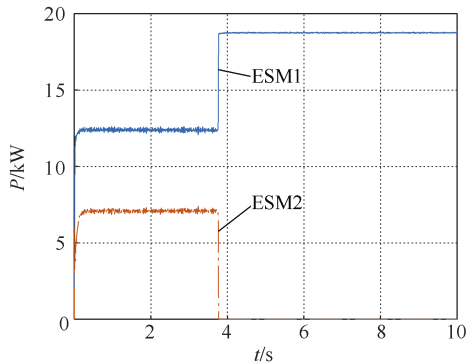


图 13 储能电池 2 退出运行时，储能模块输出有功功率
综上所述，系统负荷突增或其中一个储能模块故障退出运行时，改进下垂控制策略仍然有效。

4 半实物实验

为验证所提控制策略的有效性，搭建实验平台，进行半实物实验。硬件在环实验参数见表 2，实验环境如图 14 所示。

在 1 000s 时增加有功负荷 5kW，并在 1 200s 时切除；储能输出的有功功率，逆变器输出电压、电流分别如图 15~图 17 所示。由图 15 可知，ESM1 的荷电状态高，输出大功率，ESM2 的荷电状态低，输出小功率，因此储能模块的有功输出与自身的荷电状态有关，荷电状态高的储能输出大功率，反

表 2 硬件在环实验参数

参数		数值
储能电池 1	额定电压/V	500
	容量/(A·h)	20
储能电池 2	额定电压/V	500
	容量/(A·h)	20
储能 1 初始荷电状态水平 S_{OC10}		0.85
储能 2 初始荷电状态水平 S_{OC20}		0.78
初始下垂系数	k_p	1×10^{-5}
	k_q	3×10^{-4}
下垂系数修正因子	n	5
	p	7
公共负荷	有功/kW	10
	无功/kvar	2
三相负荷额定线电压/V		380

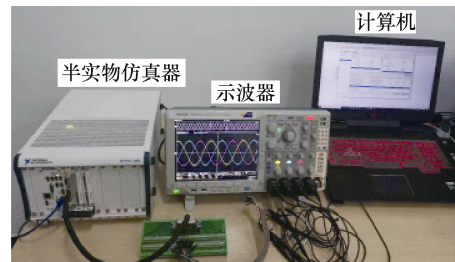


图 14 实验环境

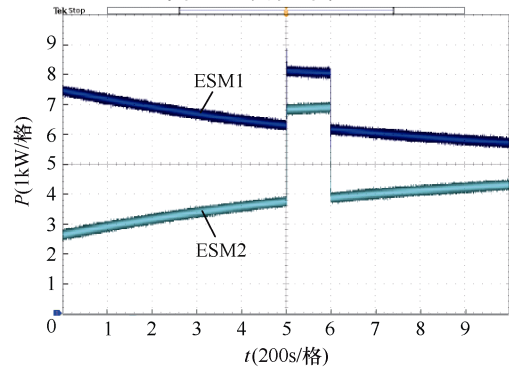


图 15 储能输出的有功功率

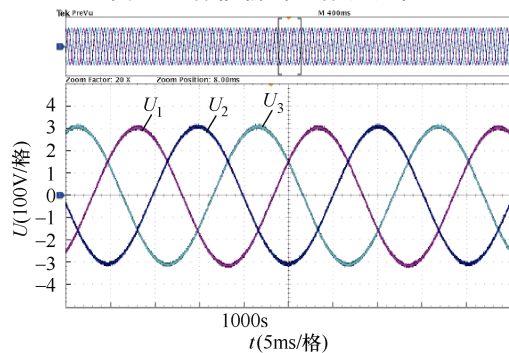


图 16 逆变器输出电压

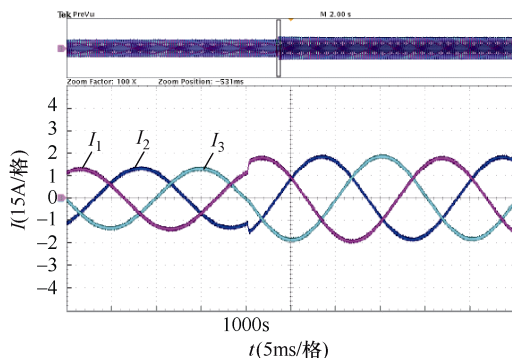


图 17 逆变器输出电流

之输出小功率；由图 16 和图 17 可知，在负荷变化时，系统稳定，改进控制策略仍然有效。

5 结论

本文提出了一种基于荷电状态的多储能微电网改进下垂控制策略，该控制策略允许各储能模块根据自身的荷电状态水平，进行有功功率的合理分配，荷电状态水平高的储能模块输出大功率，荷电状态水平低的输出小功率，进而达到荷电状态动态均衡；通过调整因子 n 和 p ，可以调整功率均分的速率，提高了储能的利用效率。仿真和实验表明，负荷突变时，该改进下垂控制策略仍然有效。

参考文献

- [1] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
- [2] 王宏东. 微电网多储能系统改进下垂控制研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.
- [3] 郑芬, 代满意, 陈华. 微电网供电多逆变器功率协同控制研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(3): 137-141.
- [4] 贾宝山. 光储型微电网运行控制仿真分析[D]. 南京:

东南大学, 2015.

- [5] 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.
- [6] 张国荣, 丁晓通, 彭勃, 等. 交直流混合微电网互联逆变器改进控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 50-58.
- [7] LU Xiaonan, SUN Kai, GUERRERO J M, et al. SoC-based droop method for distributed energy storage in DC microgrid applications[C]//2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Hangzhou, China, 2012: 1640-1645.
- [8] 朱艳萍, 阚志忠, 梁梦娜, 等. 双极性 DC/DC 变换器及分布式储能功率控制[J]. 电力电子技术, 2019, 53(12): 39-42, 47.
- [9] 陶霞, 方东平, 汪莹洁, 等. 基于最大功率点跟踪下垂控制的光储一体化系统研究[J]. 电气技术, 2024, 25(4): 38-46.
- [10] 李浩琛, 郭志坚. 基于信号补偿下垂控制的微电网动态性能分析[J]. 电气技术, 2022, 23(10): 33-40.
- [11] 鄢仁武, 姜雪儿. 变调节因子的不同容量锂电池储能系统能量控制策略[J]. 电气技术, 2024, 25(2): 21-30.
- [12] NG K S, MOO C S, CHEN Yiping, et al. Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries[J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1506-1511.

收稿日期: 2024-10-14

修回日期: 2024-12-18

作者简介

王宏东 (1996—), 男, 硕士, 主要从事逆变器和微电网方面的研究工作。