

A Control Strategy Based on State-of-Charge and Equal Incremental Cost Criterion for Distributed Energy Storage

Zuolin Wei, Minyou Chen, Qiang Li, Feixiong Chen, Weifang Ling

State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,
Department of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing
Email: weizuolincqu@163.com

Received: Apr. 7th, 2017; accepted: Apr. 21st, 2017; published: Apr. 24th, 2017

Abstract

In a microgrid, different types of battery energy storage units (BESU) have different power supporting capacity, which affects the system stability and reliability. And recent research has discovered that the charging/discharging efficiency of BESU has remarkable dependence on the charging/discharging rate and state-of-charge (SOC) of the BESU. Therefore, in this paper a control strategy to improve the accuracy of power dispatch and reduce system power losses is proposed, in which the state-of-charge (SOC) and equal incremental cost criterion of multiple parallel distributed BESU are considered. Based on the equal incremental cost criterion, the objective function of system power losses is transformed and solved. And in this method, which only needs the local information, the SOC and incremental cost of each distributed BESU are employed in the controller to adjust its output power in real-time, thus realizing dynamic balance between supply and demand, and eliminating SOC error of parallel distributed BESU. Finally, a Matlab/Simulink model is built to test the balancing effects of the proposed control strategy, in which the variations in distributed loads and distributed BESU are both considered. Simulation results demonstrate the validity as well as the plug and play capability of the method.

Keywords

Island Microgrid, Distributed Energy Storage, SOC, Charging/Discharging Efficiency, Equal Incremental Cost Criterion

基于SOC和等微增率准则的分布式储能控制方法

韦佐霖, 陈民铀, 李 强, 陈飞雄, 凌伟方

重庆大学电气工程学院输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆
Email: weizuolincqu@163.com

收稿日期: 2017年4月7日; 录用日期: 2017年4月21日; 发布日期: 2017年4月24日

摘 要

在微电网运行中, 不同状态的蓄电池储能单元具有不同的功率支撑能力, 从而影响系统供电的稳定性和可靠性; 同时研究发现储能充放电效率与其充放电功率及SOC有密切关系。针对上述问题, 提出了一种基于分布式储能单元SOC和等微增率准则的控制方法, 以提高负荷功率在分布式储能单元间的分配精度和降低系统有功损失。通过等微增率准则将系统有功损失目标函数转化并求解, 然后将各分布式储能单元SOC和微增率作为下垂控制输入量, 通过收集本地信息, 实时调节各储能单元输出功率, 以实现供需两端功率的动态平衡和储能单元间SOC的差异均衡。最后通过Matlab/Simulink仿真分析了所提控制策略在分布式负载波动和系统储能单元故障切除情况下的控制效果, 仿真结果验证了本文所提方法的有效性和“即插即用”特性。

关键词

孤岛微网, 分布式储能, SOC, 充放电效率, 等微增率

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微网(microgrid, MG)通常有两种运行模式: 孤岛模式、并网模式[1]。当其运行于孤岛模式时, 可再生能源的随机性和间歇性及负荷的波动性会使微网的运行条件急剧变化, 一定容量的储能系统并联接入微网能够有效改善这一问题, 同时也能提高可再生能源的利用率[2] [3]。然而, 由于在实际充放电过程中, 各储能单元的硬件参数、容量、电池特性等存在差异, 会影响储能蓄电池组间的调度配合, 增加系统的有功损失。因此, 如何在维持微网内供需平衡的同时使储能系统更加高效、经济地运行及控制运行状态的一致受到学者们越来越多的关注。

分布式储能具有控制简单、传输损耗小、地理分布广和灵活方便的优点, 同时能独立控制和实现“即插即用”的功能。目前, 分布式储能系统仍处于工程应用的初始阶段, 尚未展开深入研究, 而在含分布式储能的孤岛微网研究中, 主要问题是如何完成分布式储能系统的建模、充放电控制、效率分析及能量管理, 从而实现微网的自主运行[4]。下垂控制技术因其高稳定性、灵活性以及无需通信和可实现“即插即用”功能等优点, 可作为分布式电池储能单元(Distributed Battery Energy Storage Units, DBESU)间协调控制和负荷分配的一种有效控制方式[5] [6]。文献[7]通过自适应调节下垂系数, 实现了孤岛频率无静差、电压偏移量小及并网恒功率输出控制; 文献[8]采用分层控制架构, 通过储能系统本地母线频率电压信号的检测实现功率分配, 同时能避免储能单元的过充过放。为了根据储能单元自身特性提高下垂控制的动态特性, 文献[9]基于储能电池SOC和充放电功率提出了一种自适应下垂控制方法, 充分发挥了微源的调节潜力和功率支撑能力; 文献[10] [11]分别提出了一种基于SOC的改进下垂控制方法, 实现功率动态平

衡和 SOC 趋近。然而,上述研究均是基于各储能单元在不同充放电功率下拥有相同的充放电效率的假设下展开的,而文献[12]中表明由于电池内阻的存在,充放电效率不仅与各储能单元的输出功率密切相关,同时也在一定程度上取决于 SOC 值。

针对上述问题,本文提出了一种基于 SOC 和等微增率准则的分布式储能控制策略,采用孤岛微网分布式结构,考虑 DBESU 间的 SOC 和充放电效率,一方面在下垂控制中加入改善并联分布式储能单元间均衡效果的控制因子——SOC,补偿网内功率缺额,实现功率均分;另一方面考虑储能充放电效率,通过收集本地功率信息求得各 DBESU 的实际微增率,保证功率平衡同时最大化减少系统有功损失,实现最优功率调度。同时,基于低带宽通信网络的二次控制用于调节系统母线频率电压,维持系统稳定。最后通过 Matlab/Simulink 仿真验证了上述方法的可行性和有效性。

2. 等微增率准则

等微增率准则是指电力系统中的各发电单元按相等的耗量微增率运行,从而使总的能源损耗最小,运行最经济[13]。既是实现经济调度的基本准则,也是解决优化问题的基本方法。在微网中,整个系统的有功功率平衡可表示为:

$$\sum P_G - \sum P_L - \sum P_D = 0 \quad (1)$$

式中: P_G 、 P_L 分别为所有分布式电源总的发电量和负荷侧需求量,当 P_D 为正/负时,表示整个储能系统的充/放电量。

为了保证微网内有功平衡,需要采用合适的调度策略合理分配各 DBESU 的充/放电功率,因此:

$$\sum P_D = \sum_{j \in N_G} P_{G,j} - \sum_{k \in N_L} P_{L,k} = \sum_{i \in N_B} P_{B,i} \quad (2)$$

式中: $P_{G,j}$ 、 $P_{L,k}$ 分别为 j th 分布式电源的发电量和 k th 负载的需求量, $P_{B,i}$ 为 i th 分布式储能单元的充/放电量。

然而,在储能单元实际充放电过程中,由于电池内阻的存在,不同 DBESU 会产生不同的有功损失,故各 DBESU 的实际充/放电功率为:

$$P_{B,i}^{cd} = P_{B,i} \eta_i \quad (3)$$

式中: $P_{B,i}^{cd}$ 为各 DBESU 的实际充/放电功率; η_i 为各 DBESU 的充/放电效率值,是关于各 DBESU 充/放电功率的一次线性函数,其计算方法[14]为:

$$\eta_i(P_{B,i}) = a_i - b_i P_{B,i} \quad (4)$$

式中: a_i 和 b_i 均为各 DBESU 的效率系数。

为了讨论方便,本文仅考虑了 DBESU 处于放电模式下的情况;当 DBESU 处于充电模式时,本文所设计的控制策略同样适用。

为了使微网更加经济运行,储能放电过程中所产生的有功损失应该尽可能的减少。当系统中分布式电源发电量小于分布式负载需求时,可通过最大化式(3)中各 DBESU 的实际放电功率来达到经济运行的目的,因此可得到优化目标函数:

$$\begin{aligned} & \text{Max} \sum_{i \in N_B} P_{B,i} \eta_i \\ & \text{s.t.} \sum_{i \in N_B} P_{B,i} = P_D \\ & P_{B,i}^{\min} \leq P_{B,i} \leq P_{B,i}^{\max} \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $P_{B,i}^{\min}$ 和 $P_{B,i}^{\max}$ 分别为储能单元输出功率下/上限值。

结合式(4)与式(5)，可得关于有功功率的二次函数，具体表示如下：

$$\text{Max} \sum_{i \in N_B} a_i P_{B,i} - b_i P_{B,i}^2 \quad (6)$$

对式(6)关于有功功率求导数，可得：

$$\lambda_i(P_{B,i}) = a_i - 2b_i P_{B,i} \quad (7)$$

式中， $\lambda_i(P_{B,i})$ 为 DBESU_i 的微增率，为了表示方便，下文中的 $\lambda_i(P_{B,i})$ 均以 λ_i 表示。

根据等微增率准则，可得式(5)的解析解为[15]：

$$\begin{cases} \lambda_i = \lambda^*, & P_{B,i}^{\min} \leq P_{B,i} \leq P_{B,i}^{\max} \\ \lambda_i < \lambda^*, & P_{B,i} = P_{B,i}^{\min} \\ \lambda_i > \lambda^*, & P_{B,i} = P_{B,i}^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中， λ^* 为最优成本微增率。

仅考虑等式约束的 λ^* 表示如下[15]：

$$\lambda^* = \left(\sum_{i \in N_B} \frac{a_i}{2b_i} - P_D \right) / \left(\sum_{i \in N_B} \frac{1}{2b_i} \right) \quad (9)$$

上式的 λ^* 可以通过集中式算法求解。在集中式求解算法中，中央控制器需要与所有可控单元之间保持通信，通过全局可用信息的收集求得系统的最优成本微增率，进而计算各 DBESU 的放电功率来实现最优有功分配。

3. 基于 SOC 和等微增率准则的分布式储能控制方法

根据等微增率准则，当 λ_i 趋于一致时，式(5)表示的目标函数达到最大值，系统有功损失最小。区别于传统的集中式算法，本文在传统下垂控制策略基础上，提出了基于并联 DBESU 的 SOC 和等微增率准则的协调控制策略来实现这一目的。本节首先介绍微网分布式储能控制模型，然后基于此模型，提出分布式储能控制策略，最后介绍了二次控制。

3.1. 控制模型

本文采用的分布式储能单元控制模型由两层控制结构组成[16]。第一层为基于各储能单元 SOC 和微增率的改进下垂控制；第二层为二次控制，以修正由于下垂控制引起的电压和频率偏差，结构如图 1 所示。

其中，在各分布式电源侧均配置一组 DBESU，各 DBESU 采用相同的控制策略，当分布式电源发电量小于负载需求量，则所有的 DBESU 将共同承担微电源与负载间的功率差。通过检测各 DBESU 本地母线的线电压和相电流，经功率计算单元得到本地有功功率 $P_{B,i}$ 、无功功率 $Q_{B,i}$ ，将其输入有功/无功控制单元。为了实现系统功率差值按各 DBESU 的 SOC 成比例分配，故检测本地 SOC 值，将其作为有功控制输入量；同时，为了在储能放电过程中减少系统有功损失，提高储能利用率，故在检测本地功率和 SOC 值时，根据式(7)得到各 DBESU 微增率，将其也作为有功控制输入量，从而在有功控制环节实现 DBESU 间 SOC 均衡控制和系统有功损失最小化的目的。

为了调节由于有功控制引起的频率和电压偏差，第二层控制将频率/电压调节值 $\delta f/\delta V$ 分别送入有功/无功控制器中，与第一层控制中产生的频率/电压信号相叠加得到相应的修正值，最后将此修正值送入电压电流双环控制器和 SVPWM，产生相应的控制信号，从而维持系统频率电压稳定。本文所述控制策略

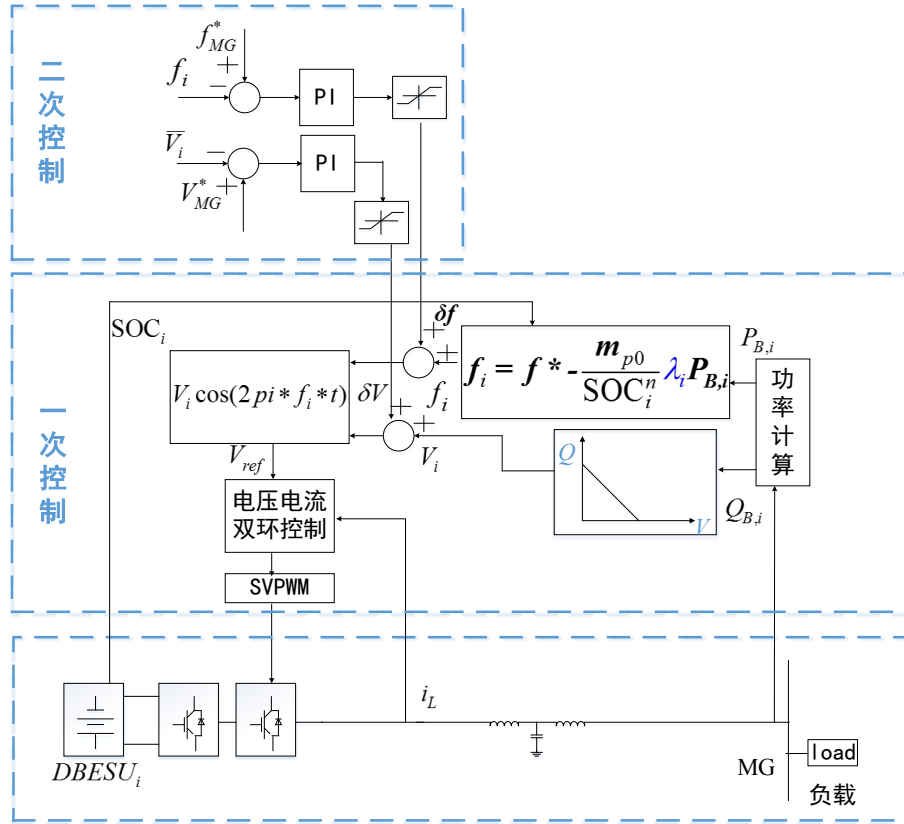


Figure 1. Diagram of DBESU control strategy

图 1. DBESU 分层控制策略框图

仅在有功控制环节进行了改进，而无功控制环节仍采用传统 $Q-V$ 控制策略。

3.2. 分布式储能协调控制策略

假设微网中各 DBESU 的输出功率均在约束条件范围之内，因此孤岛微网的优化调度模型仅含目标函数和等式约束条件，暂不考虑不等式约束条件。由图 1 可见，各 DBESU 并联接入 MG，以补偿系统功率缺额。当逆变器输出阻抗满足强感性要求时，传统下垂控制可表示为：

$$f_i = f_i^* - m_{pi} (P_{B,i} - P_0) \quad (10)$$

$$V_i = V_i^* - n_{qi} (Q_{B,i} - Q_0) \quad (11)$$

式中： f_i^* 、 V_i^* 分别为本地交流侧频率/电压给定值； m_{pi} 、 n_{qi} 分别为交流侧有功/无功下垂系数。

在 DBESU 放电过程中，有功输出功率与下垂系数有相应的比例关系[12]：

$$\frac{P_{B,i}}{P_{B,j}} = \frac{m_{pj}}{m_{pi}} \quad (12)$$

假设所有的 DBESU 均运行于放电状态，则其输出功率为：

$$P_{B,i} = P_D \frac{\frac{1}{m_{pi}}}{\sum_{j \in N_B} \frac{1}{m_{pj}}} \quad (13)$$

式中: $P_{B,i}$ 与 $P_{B,j}$ 分别为 DBESU_i 与 DBESU_j 的输出功率。

为了维持系统供需功率平衡, DBESU 发挥着不可替代的作用, 其 SOC [17] 的计算方法为:

$$\text{SOC}_i(t) = \text{SOC}_{i-t=0} - \int_0^t \frac{i_{B,i}(t)}{Q_{B,i}} dt \quad (14)$$

式中: $\text{SOC}_i(t)$ 为各 DBESU 的当前荷电状态; $\text{SOC}_{i-t=0}$ 为 SOC 初始值; $i_{B,i}(t)$ 为储能单元放电电流; $Q_{B,i}$ 为储能单元容量。

随着放电的进行, 各 DBESU 的 SOC 逐渐降低, 忽略逆变器损耗时, 其直流侧输入功率和交流侧输出功率相等, 联合式(13)和式(14), 可得:

$$\text{SOC}_i(t) = \text{SOC}_{i-t=0} - \frac{P_D}{Q_{B,i} V_i} \int_0^t \frac{m_{pi}}{\sum_{j \in N_B} \frac{1}{m_{pj}}} dt \quad (15)$$

从式(15)可以看出, 各 DBESU 的 SOC 与其输出功率成比例, 其功率支撑能力在初始阶段存在明显差别, SOC 较大的 DBESU 输出功率更多, SOC 较小的输出功率较小, 从而实现负荷功率在分布式储能单元间的合理分配及并联 DBESU 间内部 SOC 的动态均衡。

从式(7)可以看出, 各 DBESU_i 的微增率 λ_i 与其输出功率呈线性关系, 当 λ_i 趋于一致时, 整个微网系统的有功损失最小; 同时, 当各 DBESU 的 SOC 趋于一致时, 可以充分利用整个分布式储能系统配置容量和延长储能系统使用寿命, 实现功率的动态平衡。因此, 综合考虑以上两点, 本文采用分散式控制方式, 基于本地信息的收集, 将各 DBESU 的 SOC 值与微增率 λ_i 作为下垂控制输入量, 联合式(3)(7)(10)(11), 可得分布式储能协调控制策略表达式如下:

$$f_i = f_i^* - \frac{m_{p0}}{(\text{SOC}_i)^n} \lambda_i P_{B,i} \quad (16)$$

$$V_i = V_i^* - n_{q0} Q_{B,i} \quad (17)$$

其中:

$$m_{p0} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2P_{\max}} \quad (18)$$

$$n_{q0} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2Q_{\max}} \quad (19)$$

式中: m_{p0} 、 n_{q0} 分别为初始有功/无功功率下垂系数; n 为均衡影响因子; $f_{\max}$ 、 $f_{\min}$ 、 $V_{\max}$ 、 $V_{\min}$ 分别为网内允许的频率/电压上下限值; $P_{\max}$ 、 $Q_{\max}$ 分别为经并联逆变器允许输出的最大有功/无功功率。

根据式(16), 在各 DBESU 放电过程中, 随着 SOC 的降低, 各 DBESU 根据相应的 SOC 值输出功率补偿系统功率缺额, 实现按照自身剩余容量分配负荷功率的目的; 通过本地功率信息的采集及频率的反馈, 逐步减少各 DBESU 间微增率差异, 实现最小化系统有功损失的目的。

3.3. 二次控制

由于第一层控制是在传统下垂控制基础上改进的, 各 DBESU 在放电进程中, 会引起母线电压、频率变化。为了维持系统稳定, 本文采用平均电压法来调节电压幅值, 各 DBESU 测量本地母线电压, 通过低带宽通信网络传输至平均电压控制器中, 再经计算得到母线电压平均幅值 $\bar{V}$, 最后将其与系统参考值 V_{MG}^* 的差值经 PI 控制器得到相应的二次电压调节值 δV 。相应的二次控制表达式如下:

$$\delta f = k_{pf} (f_{MG}^* - f_i) + k_{if} \int (f_{MG}^* - f_i) dt \quad (14)$$

$$\delta V = k_{pv} (V_{MG}^* - \bar{V}) + k_{iv} \int (V_{MG}^* - \bar{V}) dt \quad (15)$$

$$\bar{V} = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_m}{m} \quad (16)$$

式中: δf 为二次频率控制调节值; k_{pf} 、 k_{if} 、 k_{pv} 、 k_{iv} 分别为二次电压频率控制器的控制系数; m 表示系统中有 m 个稳定运行的 DBESU 参与系统调压。

δf 、 δV 经限值管理器输入有功/无功控制器中, 防止系统频率/电压偏移量超出所允许范围。本文二次控制主要通过式(14)~(16)所设计的集中控制器实现, 其能跟随储能系统 SOC 的变化而变化, 始终维持频率/电压在允许范围内, 保持系统稳定。

4. 孤岛微网系统结构

本文中, 孤岛微电网仿真系统有 2 组分布式电源、3 组分布式负载和 3 组 DBESU 与其三相逆变单元组成, 由 MATLAB/Simulink 实现。光伏发电及风力发电均工作于 MPPT 模式, 且其发电能力小于负载的功率需求, 各 DBESU 采用所设计的控制策略, 利用本地信息(电压/频率)和 SOC 快速调节其输出功率来平滑系统功率差, 维持系统稳定, 最终实现储能系统有功损失的最小化。具体的微网系统结构如图 2 所示, 分布式储能单元均为 75 Ah 锂离子电池, 其他系统仿真参数如表 1 所示; 表 2 给出了各 DBESU 相应的电池效率系数。

5. 实验结果

基于 Matlab/Simulink 系统仿真模型, 本文设计了两种实验验证该控制方法的有效性。第一, 分析系统分布式负载波动时, 分布式储能控制策略的有效性; 第二, 分析储能单元故障时对控制效果及系统稳定性的影响。

5.1. 分布式负载波动对系统的影响

在实际微网中, 负载在不同时段会有所不同, 因此本节模拟实际运行条件下, 负载波动对系统运行的影响。采用图 2 所示模型, 初始运行时系统接入三组分布式负载, 分别为 $P_{load1} = 21 \text{ kW}$, $P_{load2} = P_{load3} = 20 \text{ kW}$,

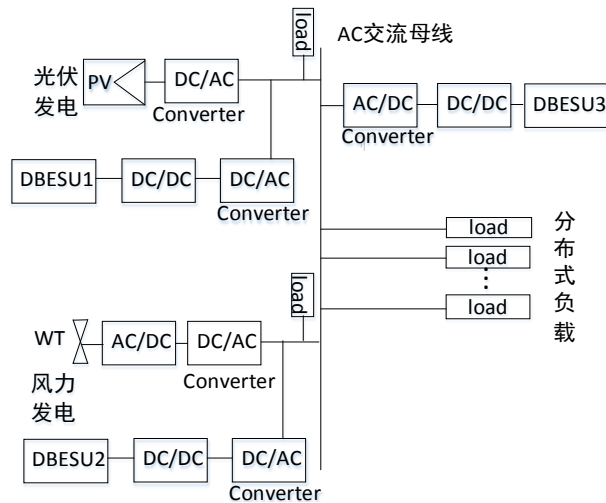


Figure 2. Diagram of an islanded AC microgrid
图 2. 孤岛微网系统结构图

Table 1. Parameters of system simulation
表 1. 系统仿真参数表

参数	符号	数值
AC 母线电压幅值参考值	V_{ref}	311 V
AC 母线频率参考值	f	50 Hz
DBESU1 荷电状态初始值	$SOC_{1-t=0}$	88%
DBESU2 荷电状态初始值	$SOC_{2-t=0}$	78%
DBESU3 荷电状态初始值	$SOC_{3-t=0}$	70%
DBESU4 荷电状态初始值	$SOC_{4-t=0}$	65%
SOC 最小值	SOC_{min}	15%
初始有功功率下垂系数	m_{p0}	0.000093037 rad/s/W
初始无功功率下垂系数	n_{q0}	0.0005 rad/s/Var
频率 PI 控制器比例系数	k_{pf}	0.1 W·s/rd
频率 PI 控制器积分系数	k_{if}	8.5 W/rd
电压 PI 控制器比例系数	k_{pv}	0.08 Var/V
电压 PI 控制器积分系数	k_{iv}	1.6 Var·s/V

Table 2. Parameters of battery discharging efficiency
表 2. 储能电池效率系数表

储能单元	参数 a_i	参数 b_i	$[P_i^{min}, P_i^{max}]$ (Kw)
DBESU1	0.85	0.0079	[0,30]
DBESU2	0.88	0.0085	[0,30]
DBESU3	0.83	0.0075	[0,30]
DBESU4	0.92	0.0093	[0,30]

均衡影响因子 $n=6$ 。设定负载变化情况如下：1) $t=140\text{ s}$ ，负载 $P_{load4}=9\text{ kW}$ 接入 MG；2) $t=175\text{ s}$ ，负载 $P_{load5}=10\text{ kW}$ 接入 MG；3) $t=215\text{ s}$ 时，有功负载减少 16 kW。仿真结果如图 3 所示。

初始放电阶段($t < 140\text{ s}$)，DBESU₁ 因其初始 SOC 值较高，在控制策略影响下，其 SOC 变化率最大，故分配输出的有功功率较大；反之 DBESU₃ 的 SOC 变化率最小，输出有功功率较小。随着放电过程中 SOC 的逐渐降低，三组 DBESU 间的输出功率差异逐渐减小，SOC 逐渐趋于一致。从图 3 可以看出，仅在负载投入或切除的瞬间，系统会有少许冲击，但无论是负载的投入还是切除，3 组 DBESU 间 SOC 差值始终在减小，并始终能快速跟随系统负载变化，使系统有功出力 and 负荷需求可以实时平衡，保持系统稳定。同时可看出，各 DBESU 的微增率跟随其有功出力变化，朝一致收敛方向趋近。最后各 DBESU 的输出有功功率达到动态平衡，微增率也趋于一致。说明本控制策略在实现最优有功调度的同时具有较好的功率实时平衡能力。

图 4 给出了整个负载变化过程中系统母线电压幅值和频率变化波形，可以看到，在分布式负载接入和切除瞬间，母线电压和频率都会经历短暂波动，其最大频率偏移量不超过 0.2 Hz，电压偏移量不超过 5 V，且能迅速恢复稳定状态。

5.2. 即插即用特性分析

微网分布式需要具备一定的灵活性，且具有“即插即用”的特点，因此本节通过仿真验证微网“即插即

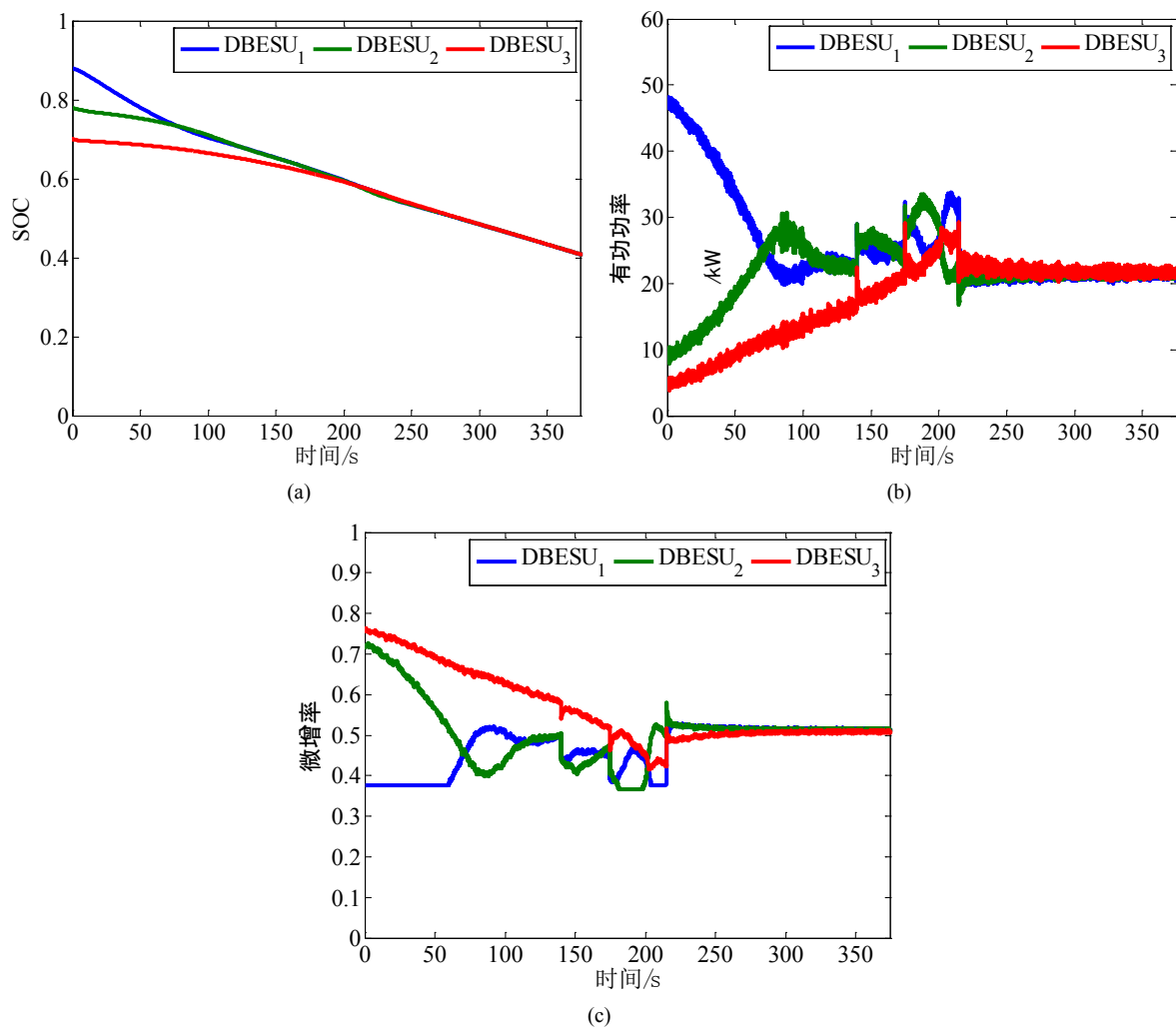


Figure 3. Simulation results with varying distributed loads

图 3. 考虑分布式负载波动的仿真波形

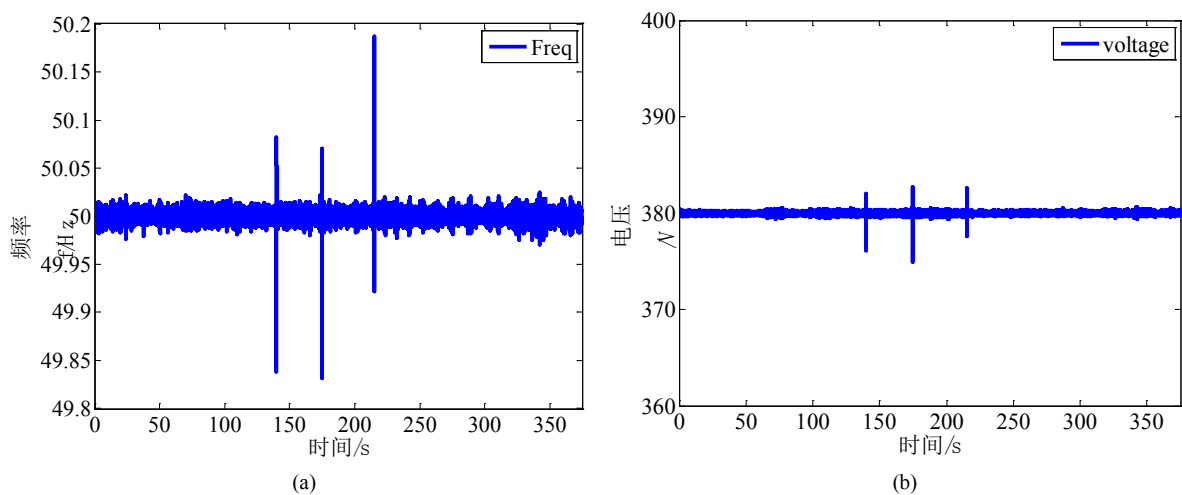


Figure 4. Simulation results of the system bus voltage amplitude and frequency

图 4. 系统母线电压幅值和频率波形

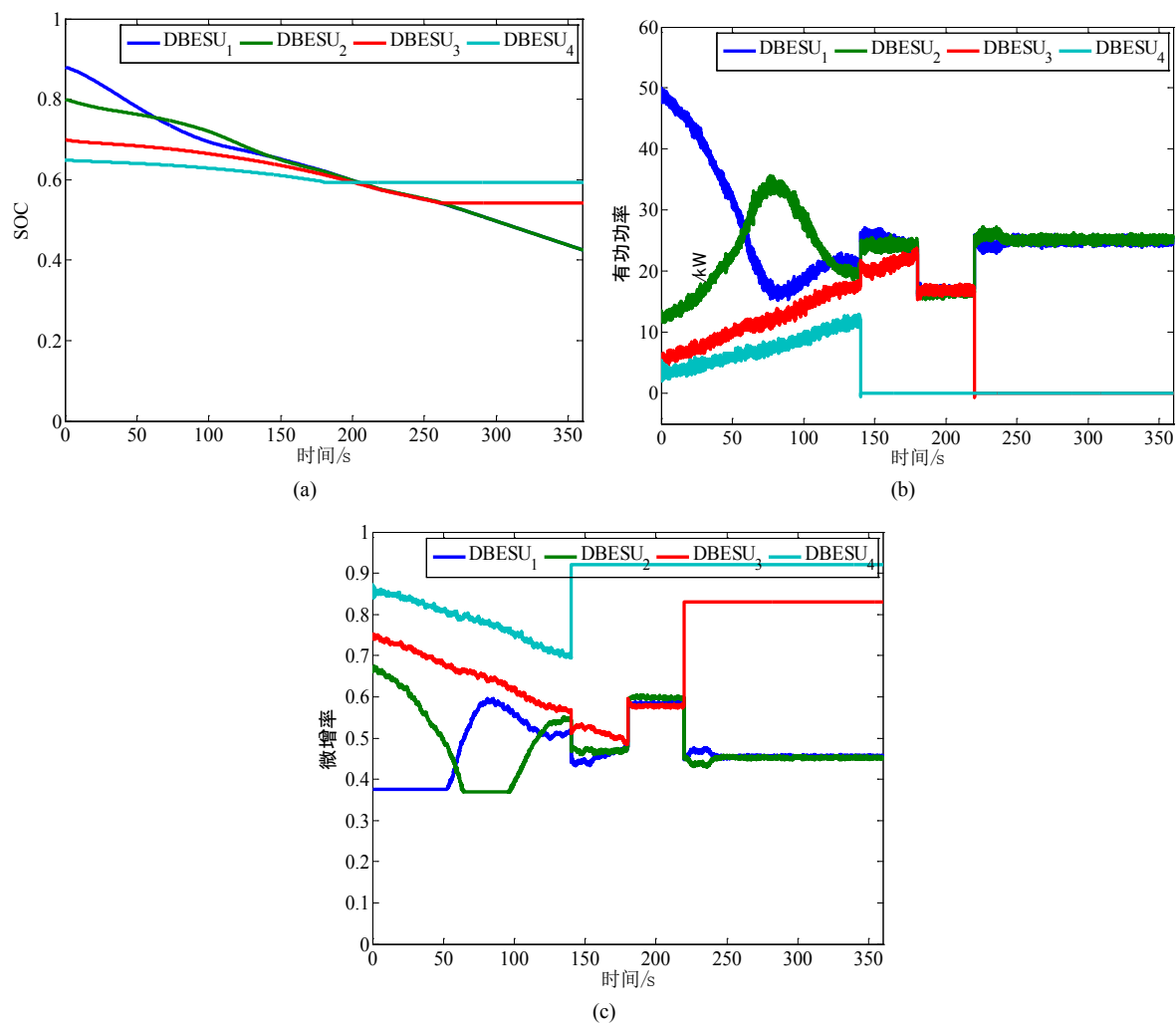


Figure 5. Simulation results with fluctuation of BESU
图 5. 储能单元侧波动下的仿真波形

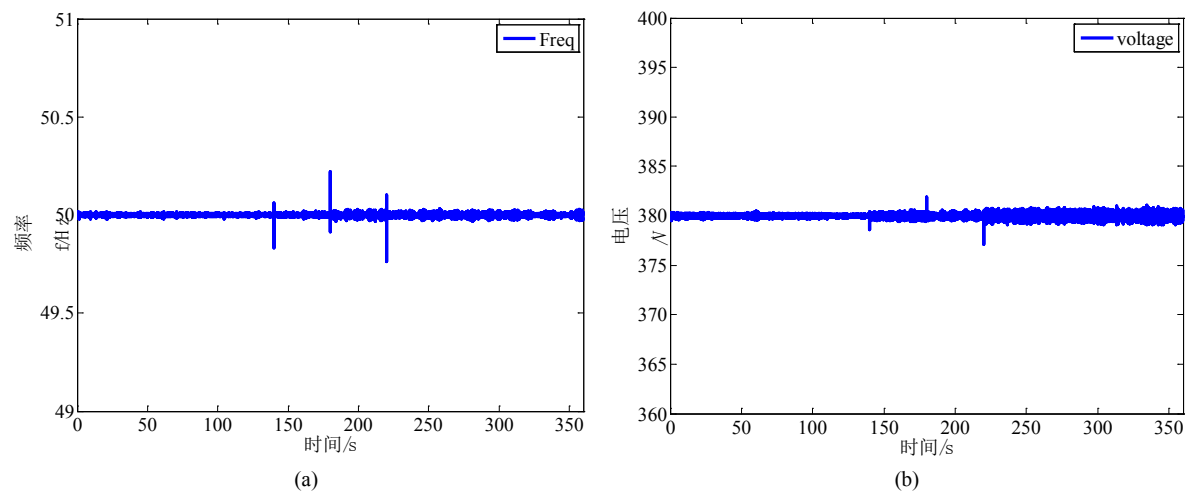


Figure 6. Simulation results of the system bus voltage amplitude and frequency
图 6. 系统母线电压幅值和频率波形

用”特性。此仿真在图2基础上并联接入了新的分布式储能单元 DBESU₄, $P_{load1} = 25 \text{ kW}$, $P_{load2} = 20 \text{ kW}$, $P_{load3} = 15 \text{ kW}$, $P_{load4} = 10 \text{ kW}$, 其他参数均相同。 $t = 140 \text{ s}$ 前, 系统中4组DBESU带4组分布式负载正常工作; $t = 140 \text{ s}$ 时, DBESU₄退出运行; $t = 180 \text{ s}$ 时, 分布式负载 P_{load2} 由于故障被切除; $t = 220 \text{ s}$ 时, DBESU₃退出运行, 仿真结果如图5所示。

由图5(b)可知, 当DBESU₄退出运行时, 其输出功率变为0, 系统负载功率完全由其他三组DBESU承担, 三组DBESU增加有功出力补偿系统的功率缺额, 维持系统功率平衡; 同理, 当DBESU₃退出运行时, 其输出功率变为0, 负载功率由DBESU₁和DBESU₂共同承担, 继续趋于功率均等分配。同时, 在DBESU₄和DBESU₃退出运行时, DBESU₁与DBESU₂间SOC差异始终趋向于0; 且各DBESU的微增率始终跟随有功出力变化, 在DBESU₄和DBESU₃退出运行后迅速继续向收敛方向趋近。说明了本控制策略在孤岛状态时, 当系统出现故障切除情况下仍可实现各DBESU间SOC均衡及系统最优调度运行的目的。此外整个过程中系统总有功出力和分布式负载需求可以实时平衡, 如图6所示, 频率和电压波动均在允许范围内。可见此控制策略具有一定的“即插即用”特性。

6. 结语

为了提高可再生能源的渗透率, 减少系统的有功损失, 本文提出了一种基于分布式储能单元SOC和微增率准则的协调控制策略, 采用分布式储能单元能够有效提升可再生能源的利用率及使用便利性。所提控制策略将各储能单元SOC和微增率作为下垂控制输入量, 仅需收集本地信息, 根据储能单元SOC实时调节输出功率, 实现供需动态平衡及均衡各分布式储能单元间的电池状态差异; 同时, 根据各DBESU的SOC和输出功率反馈得到其微增率, 在实现储能单元SOC一致的基础上实现微增率一致, 从而有效减少系统的有功损失和提高整个储能系统的使用寿命。最后通过两种实验仿真分析了本文所提控制策略在实现储能状态一致和减小系统有功损失方面的有效性, 验证了所提控制策略在分布式负载波动和系统储能单元侧故障切除情况下系统稳定运行的目的和“即插即用”特性。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51177177 & 61105125)。

参考文献 (References)

- [1] 赵波, 李鹏, 童杭伟, 等. 从分布式发电到微网的研究综述[J]. 浙江电力, 2010(3): 1-5.
- [2] 周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 147-152.
- [3] 李斌, 宝海龙, 郭力. 光储微电网孤岛系统的储能控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 8-15.
- [4] 王成山, 武震, 李鹏. 分布式电能存储技术的应用前景与挑战[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 1-8.
- [5] 张纯, 陈民铀, 王振存. 微网运行模式平滑切换的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 1-5.
- [6] 王成山, 高菲, 李鹏, 等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 2-8.
- [7] 郑永伟, 陈民铀, 李闯, 等. 自适应调节下垂系数的微电网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 6-11.
- [8] Wu, D., Tang, F., Dragicevic, T., et al. (2014) Autonomous Active Power Control for Islanded ac Microgrids with Photovoltaic Generation and Energy Storage System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29, 882-892. <https://doi.org/10.1109/TEC.2014.2358612>
- [9] 麻常辉, 潘志远, 刘超男, 等. 基于自适应下垂控制的风光储微网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 21-27.
- [10] Lu, X., Sun, K., Guerrero, J.M., et al. (2014) State-of-Charge Balance Using Adaptive Droop Control for Distributed Energy Storage Systems in DC Microgrid Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61, 2804-2815. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2279374>

- [11] 王炜信, 段建东, 张润松, 等. 孤岛电网中多储能设备 SOC 一致性优化策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 126-135.
- [12] Zhu, W.H., Zhu, Y. and Tatarchuk, B.J. (2011) A Simplified Equivalent Circuit Model for Simulation of Pb-Acid Batteries at Load for Energy Storage Application. *Energy Conversion and Management*, **52**, 2794-2799. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.02.013>
- [13] Wood, A.J. and Wollenberg, B.F. (2012) Power Generation, Operation, and Control. John Wiley & Sons, Hoboken.
- [14] Amoroso, F.A. and Cappuccino, G. (2012) Advantages of Efficiency-Aware Smart Charging Strategies for PEVs. *Energy Conversion and Management*, **54**, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.09.006>
- [15] Chen, G., Lewis, F.L., Feng, E.N., et al. (2015) Distributed Optimal Active Power Control of Multiple Generation Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **62**, 7079-7090. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2431631>
- [16] Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., Matas, J., et al. (2011) Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach toward Standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **58**, 158-172. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534>
- [17] Dragičević, T., Guerrero, J.M., Vasquez, J.C., et al. (2014) Supervisory Control of an Adaptive-Droop Regulated DC Microgrid with Battery Management Capability. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **29**, 695-706. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2257857>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sg@hanspub.org