

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181081

直流微网中基于 SOC 的改进下垂控制

袁娜娜, 王允建, 张君, 张伟

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 并网直流微源的有效管理和控制是保证直流微网稳定运行的关键。下垂控制是直流微网中常用的管理和控制直流微源的一种方法,能够有效实现微源间功率分配。但传统的基于荷电状态(State of Charge, SOC)的下垂控制存在随着 SOC 减小直流母线电压跌落逐渐加剧的缺陷,针对该缺陷提出了一种基于 SOC 的改进下垂控制策略。首先给出了根据母线电压波动的下垂系数调整律,当母线电压跌落时会自动减小下垂系数。随后建立了以输出电压的电压和电流为状态量的系统控制模型,设计了电流内环电压外环的双环 PI 控制器。最后搭建了 Matlab/Simulink 仿真模型,对比仿真了四种不同因素影响下系统的控制性能。仿真表明所提出的改进下垂控制很好地实现了母线电压稳定和各微源功率按其 SOC 合理分配,并具有较强的抗负载变化能力。

关键词: 下垂控制; 直流微网; 荷电状态; 电压跌落; 自适应下垂系数

Improved droop control based on SOC in DC microgrid

YUAN Nana, WANG Yunjian, ZHANG Jun, ZHANG Wei

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The effective management and control of grid-connected DC micro-sources is the key to ensure the steady operation of DC microgrid. Droop control is a common method to manage and control DC micro-sources in DC microgrid. However, the traditional droop control based on State of Charge (SOC) has the defect that the voltage drop of DC bus becomes worse with the decrease of SOC. Therefore, an improved droop control based on SOC is proposed. Firstly, the law of adjusting the droop coefficient according to the voltage fluctuation of the bus is given, which will automatically reduce the droop coefficient when the bus voltage drops. Meanwhile, a system control model with voltage and current of output capacitance as state variables is established, and a double-loop PI controller with current inner loop voltage outer loop is designed. Finally, Matlab/Simulink simulation model is built, and the control performance of the system under the influence of four different factors is compared and simulated. The simulation results show that the improved droop control can achieve the voltage stability of the bus and the reasonable distribution of the power of the micro-sources according to its SOC, and it has a strong ability to resist the load change.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61703145).

Key words: droop control; DC microgrid; state of charge; voltage drop; adaptive droop coefficient

0 引言

光伏、风能等新能源发电具有就地发电就地消纳的优势,是解决全球能源危机和避免环境污染的有效手段之一。但新能源发电存在波动性,必须组成分布式微网就地存储或并网才能保证供电质量,有效发挥其优势。将微网(Microgrid)和分布式能源(Distributed Energy Resource, DER)组合嵌入主电网

是 Microgrid 的发展趋势^[1-3]。新能源发电组成的微网主要有交流、直流及交直流混合三种结构,其中直流微网不存在无功功率损耗和相位同步等问题,具有简单可靠、便于控制及线路成本低等优点,因此直流微网的研究受到了广泛关注^[4-6]。

直流微网有效工作的关键问题之一是各子系统功率合理分配和稳定母线电压。实现微电网中各微源功率合理分配的常用控制方法主要有主从控制^[7-8]、下垂控制^[9-10]等。其中下垂控制因其冗余性高、可即插即用、无通信线等诸多优点,常应用于直流微

网。文献[11-12]在直流微网中引入了下垂控制,针对两微源系统推导了下垂电压与不平衡电流间的数量关系,解决了多源并网时的电流均衡问题,但出现了母线电压跌落现象。为解决下垂控制中母线电压的跌落,文献[13-15]提出了分层控制,同时引入了电压补偿措施;文献[16-17]提出了一种自适应下垂控制策略。这两种下垂控制减小了母线电压跌落,在一定程度上维持了母线电压稳定,但都需要通信。由于存在通信,无法真正实现设备的即插即用,且当发生通信阻塞时容易造成系统失控。文献[18]引入了跌落电压的一阶微分补偿,保证了母线电压稳定在一定范围内。该方法简单无需通信,然而文中并未考虑储能单元的 SOC(也称剩余容量)均衡问题^[19-20],这会导致部分储能设备因其 SOC 过低而退出工作,影响系统的正常运行。文献[21-22]提出了基于 SOC 的下垂控制,使下垂系数与其 SOC 相关,控制输出电流平衡各储能单元的 SOC;但该方案在微源较多时会导致系统结构复杂。文献[23]提出了一种下垂系数与 SOC 的 n 次幂成反比的自适应下垂控制,较好实现了蓄电池充放电过程中 SOC 的均衡,但下垂系数是针对特定负荷功率设定的,当负荷功率发生变化时 SOC 的均衡效果变差,且随着 SOC 的减小,母线电压跌落增大。

在文献[23]基础上,本文提出了一种自适应调整下垂系数的改进下垂控制。文中分析了放电过程中随 SOC 降低母线电压跌落增大的原因,提出了下垂系数自适应调整律。下垂系数的自适应调整,不但能抑制母线电压跌落,将母线电压的波动控制在较小范围内,还能增强系统抗负载变化的能力。

1 系统结构及工作原理

直流微网的系统结构如图 1 所示,分为并网和孤岛两种工作模式^[24]。并网时交流电网与直流微网通过双向 AC/DC 变换器互联,孤岛运行时断开开关 S_1 即可。其中光伏电池组及储能单元作为直流微网的微源部分,负荷由阻性负载及恒功率负载两部分组成。

图 1 中直流微网的工作原理为:并网运行模式时,光伏工作在最大功率输出模式,交流电网负责补偿并稳定直流母线电压。孤岛运行模式时,若光伏输出功率大于负载功率+存储功率,且蓄电池已完成储能,此时光伏以恒压模式工作,保证直流母线电压稳定;若光伏输出功率大于负载功率+存储功率,且蓄电池可以储能,此时光伏以恒压模式工作,蓄电池充电保证直流母线电压稳定;若光伏输出功率小于负载功率,储能单元以下垂模式工作,此时

光伏以最大功率输出模式工作,光伏和储能单元共同维持直流母线电压稳定;若光伏的输出功率+存储功率小于负载功率,此时需考虑切除部分负载以维持母线电压恒定。在孤岛模式时,储能系统的控制性能直接影响微网系统供电质量。

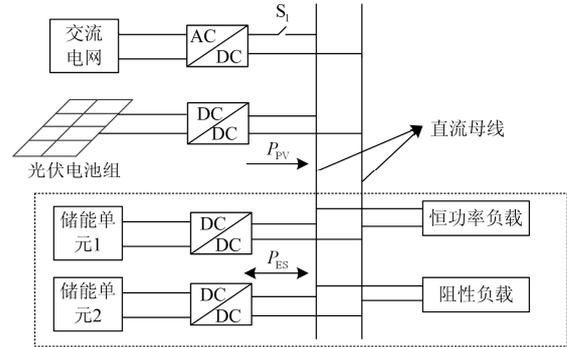


图 1 直流微网系统结构图

Fig. 1 DC microgrid system structure

2 储能系统控制策略

储能单元(Energy Storage Unit, ESU)可有效抑制新能源发电的间歇性及波动性,保证直流微网的安全稳定运行,故本文以 ESU 控制策略为研究重点。限于篇幅,本文仅考虑两个 ESU(如图 1 虚线框所示)并联系统。其中双向 DC-DC 变换器采用 Boost-Buck 电路,电路原理图如图 2 所示。

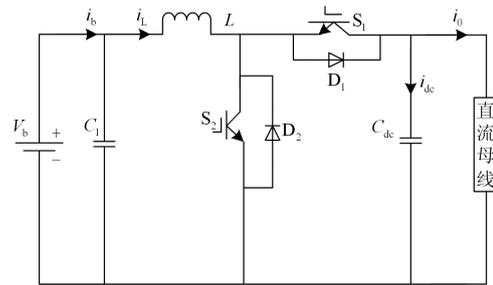


图 2 双向 DC-DC 拓扑结构

Fig. 2 Bidirectional DC-DC topology

2.1 储能系统的建模

孤岛运行时,若蓄电池处于放电状态,则双向 DC-DC 变换器工作在 Boost 升压模式。令 $S_i = 1$ 表示开关管导通, $S_i = 0$ 表示开关管截止, $i = 1, 2$; 则电路在 Boost 升压模式下的大信号描述如式(1)所示。

$$\begin{cases} \frac{di_{dc}}{dt} = -\frac{1}{R_L C_{dc}} i_{dc} - \frac{(1-d)^2}{L} V_{dc} + \frac{1-d}{L} V_b \\ \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} i_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_b 为蓄电池端电压值; V_{dc} 为母线电压实际测量值; L 、 C_{dc} 、 R_L 分别为图 2 中电感值、母线电容值、母线侧负载值; i_{dc} 为一个控制周期内流过母线电容 C_{dc} 的瞬时电流值; d 为开关管 S_2 导通时的占空比。

当系统趋于稳态时, $V_{dc} \rightarrow V_0$, 存在以下关系。

$$\begin{cases} V_0 = V_b / (1 - D) \\ I_0 = (1 - D)I_b \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_b 、 V_0 分别为稳态时蓄电池端电压值及母线侧输出电压值; I_b 、 I_0 分别为稳态时蓄电池端电流值及母线侧输出电流均值; D 为稳态时开关管 S_2 导通时的占空比。

联立式(1)和式(2)且认为 V_b 基本不变, 则可得电路的小信号模型为

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{i}_{dc}}{dt} = -\frac{1}{R_L C_{dc}} \tilde{i}_{dc} - \frac{(1-D)^2}{L} v + \frac{(1-D)V_0}{L} \tilde{d} \\ \frac{dv}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} \tilde{i}_{dc} \end{cases} \quad (3)$$

2.2 基于 SOC 的下垂控制及电压跌落分析

根据式(3)可建立基于 SOC 的下垂控制结构框图, 如图 3 所示。

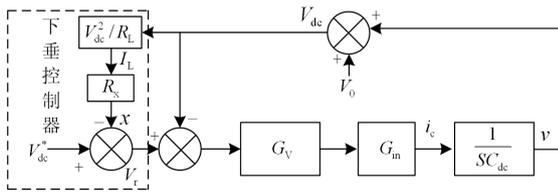


图 3 基于 SOC 的下垂控制结构框图

Fig. 3 Block diagram of the droop control based on SOC

图 3 中 R_x 为下垂系数, V_{dc}^* 为母线电压给定值, V_{dc} 为母线电压实际测量值, G_v 为电压环控制器的传函, G_{in} 为电流环控制器传函。电压环和电流环均采用 PI 控制器, 在控制器作用下 DC-DC 变换器的输出电压跟踪设定值为 V_r 。

在系统的调节过程中, 电池的 SOC 变化非常小且缓慢, 在短时间内可将其视为常量, 则下垂系数 $R_x = k_x / SOC^n$ 短时间内基本保持不变。采用下垂控制后 DC-DC 变换器的电压设定值为

$$V_{ri} = V_{dc}^* - k_x P_{iout} / SOC_i^n \quad (4)$$

式中: V_{ri} 为第 i 个系统的电压设定值; V_{dc}^* 为母线电压给定值; k_x 为下垂参数; P_{iout} 为第 i 个系统的输出功率; SOC_i 为第 i 个系统的蓄电池剩余电量,

$i=1,2$; n 为 SOC 的指数且 $n > 0$ 。

式(4)表明, 当 $V_{r1} \approx V_{r2}$ 时, 系统的输出功率之比与 SOC^n 成正比关系, 即 SOC 大的系统其输出功率大, 实现输出功率按 SOC 分配; 当输出功率不变时, 电压设定值随 SOC 的减小呈指数型减小, 同时由于 DC-DC 变换器的控制跟踪作用, 将导致母线电压呈指数型跌落, 且 SOC 越小则母线电压跌落越快, 即下垂系数中引入 SOC 因子将不可避免地加速母线电压跌落。此外, 当负载功率变化范围较大时, 若不改变根据特定输出功率设定的下垂参数 k_x , 势必导致电压设定值 V_r 的大范围变化, 难以维持母线电压的稳定。由以上分析可知, 基于 SOC 固定下垂参数 k_x 的控制将导致母线电压明显跌落, 且不适用于负载功率多变的场合。若使下垂控制适用于负载功率多变场合, 且维持母线电压稳定, 则必须自适应调整 k_x 进而将系统设定值限定在一个较小范围内。

3 改进自适应下垂控制策略

由 2.2 节分析可知, 母线电压跌落的原因主要归结于下垂系数 k_x 的选取。为了增强系统抗负载功率变化的能力, 维持母线电压稳定, 采用式(5)描述下垂控制律。

$$\begin{cases} V_{ri} = V_{dc}^* - k_x P_{iout} / SOC_i^n \\ k_x = k_{x0} + \sum k_g \Delta k_x \end{cases} \quad (5)$$

式(5)重新定义了下垂参数 k_x , 其中 k_{x0} 为初始下垂参数, 其值由最大输出功率范围和允许的母线电压波动范围确定; Δk_x 为下垂参数调整步长; k_g 由式(6)给定; 其余参数 V_{ri} 、 V_{dc}^* 、 P_{iout} 、 SOC_i^n 均与式(4)表示的含义一致, 在此不再一一赘述。

$$k_g = \begin{cases} 1, & \text{if } V_{dc} > V_{dc}^* + \Delta v_r \\ -1, & \text{if } V_{dc} < V_{dc}^* - \Delta v_r \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (6)$$

式中, Δv_r 为母线电压的最大限度波动幅值, 在 k_x 的调整中必须保证 $k_x > 0$ 。

式(5)是在式(4)的基础上进行改进的, 同理可知, 当 $V_{r1} \approx V_{r2}$ 时, 系统的输出功率之比与 SOC^n 成正比关系, 可实现输出功率按其 SOC 自动分配, 并使得 SOC 最终趋于一致。另外由式(4)中的分析可知, SOC 因子、固定下垂参数 k_x 会加速母线电压跌落, 因此引入了自适应下垂系数 k_x , 在 k_x 的选取原则中保留了初始下垂参数 k_{x0} , 其次引入了随母线电压误差值变化而不断调整的 k_g 及调整步长 Δk_x ,

即当母线电压高于其设定参考值一定程度后, 逐步调大下垂系数, 使得 V_{ri} 值降低, 当母线电压低于其设定参考值一定程度后, 逐步调小下垂系数, 使得 V_{ri} 值升高, 从而达到保证母线电压稳定的目的。

本文所提出的基于 SOC 改进下垂控制算法的结构框图如图 4 所示。首先根据母线电压实际测量值 V_{dc} 与其给定值 V_{dc}^* 的误差范围确定 k_g 的大小, 计算所有情况下 $k_g \Delta k_x$ 的值, 将其与初始下垂参数 k_{x0} 相加即可得到自适应下垂参数 k_x , 具体如图 4 中较小虚线框所示。将 k_x 代入式(4)即得到改进下垂控制算法, 具体如图 4 中较大的虚线框所示。然后加入电压电流双闭环 PI 环节, 进而增加了整个控制系统的稳定性。图中虚线框之外的部分与图 3 中各参数所代表的含义相同, 在此不再赘述。

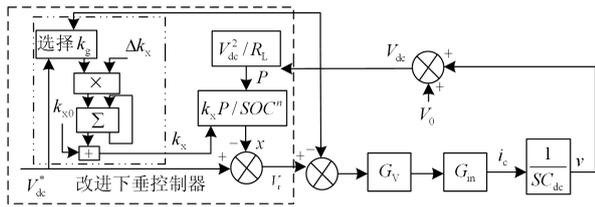


图 4 改进后的下垂控制结构框图

Fig. 4 Block diagram of the improved droop control structure

4 仿真验证

根据图 4 结构框图在 Matlab/Simulink 环境下搭建自适应下垂控制系统仿真模型, 研究几种因素影响下自适应下垂控制性能, 并在负荷功率波动时将其与文献[23]中的下垂控制进行对比, 进而验证本文所提控制策略的有效性。文中具体参数设置见表 1。

表 1 系统参数设置

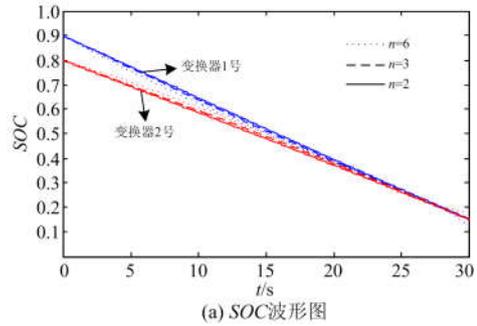
Table 1 System parameter settings

参数	取值
蓄电池 1/2 初始输入 SOC	0.9/0.8
变换器 1/2 输入电压 U_m/V	200
直流母线参考电压 V_{dc}^*/V	600
蓄电池容量 C_0/Ah	300
电路电感 L/H	2.2e-3
电路电容 C_{dc}/F	3.3e-3
开关频率 f/kHz	10

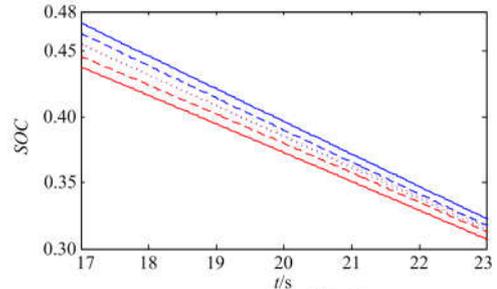
4.1 幂指数 n 对系统性能的影响

本例分析负载功率不变时, 两个并联 ESU 各自 SOC 的幂指数 n 取值不同时对变换器输出功率及各自 SOC 均衡速率的影响。文中 SOC_1/SOC_2 的初始值设置如表 1 所示, 分别为 0.9/0.8, n 的取值为 2~6。不同 n 值对 SOC 收敛速度的影响见图 5, 对输出功

率的影响见图 6。由图 5 可知, 幂指数 n 越大, 则 SOC 趋于一致的速度越快。以运行到 $t=20$ s 时为例, 当幂指数 n 分别取 2、3、6 时, 储能单元 SOC_1/SOC_2 的差值分别为 5.37%、2.14%、0.24%左右, 说明 n 越大其 SOC 均衡速率越快。



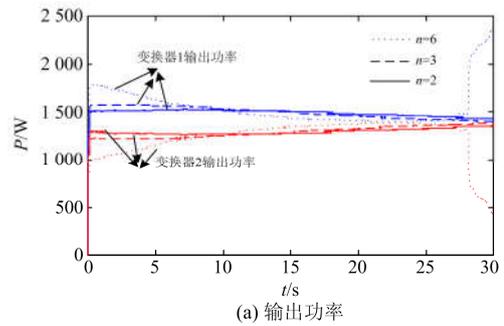
(a) SOC 波形图



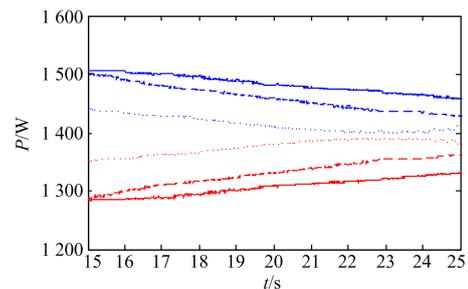
(b) SOC 局部放大图

图 5 幂指数 n 对 SOC 的影响

Fig. 5 Effect of power exponent n on SOC



(a) 输出功率



(b) 输出功率局部放大图

图 6 幂指数 n 对输出功率的影响

Fig. 6 Effect of power exponent n on output power

由图 6(a)可知,ESU 输出功率与各自 SOC 有关,初始 SOC 越大,其输出功率越大,反之亦然。幂指数 n 越大,输出功率趋于一致的速度越快。以运行到 $t=20$ s 时为例,当幂指数 n 分别取 6、3、2 时,ESU 变换器 1 与变换器 2 输出功率之差分别为 185.7 W、137.8 W、31.4 W 左右,这说明 n 越大其功率可以更加快速地达到均衡。但是过快的放电会对储能单元产生负面影响,如图 6(a)所示,幂指数 $n=6$,当系统运行到 $t=25\sim 30$ s 时,其输出功率反而发散,而幂指数 n 取 2 的系统其功率趋于一致的速度虽慢但稳定。究其原因是幂指数 $n=6$ 时,母线电压跌落较快,下垂参数 k_x 调整量较大,当 SOC 较小时 k_x 已调整到较小的值,导致下垂作用失效,从而引起输出功率发散。由此可见,幂指数 n 的取值既不能过大也不能过小,否则下垂控制效果不理想,影响系统的性能。经仿真实验及综合考虑设定 $n=3$,储能单元 SOC 的安全范围为 0.2~0.9 较好。

4.2 下垂系数 k_x 对系统性能的影响

由前文可知,母线电压跌落的主要原因在于下垂系数 k_x 的选取。本例分析固定下垂系数与本文所提自适应下垂系数下的母线电压稳定性。具体参数设置见表 1。仿真结果见图 7,在仿真结束时固定下垂系数下母线电压值约为 534.6 V,与设定的母线电压 V_{dc}^* 相比,约有 66 V 的跌落电压。本文所提下垂控制中母线电压波动幅值为 $\Delta v_r = 1$,运行至仿真结束,其母线电压约为 599.2 V,跌落电压值小于 1 V,符合国家标准规定的安全范围。由此验证了母线电压跌落原因主要归结于固定下垂系数的选取,采用自适应下垂系数可有效改善母线电压跌落现象。

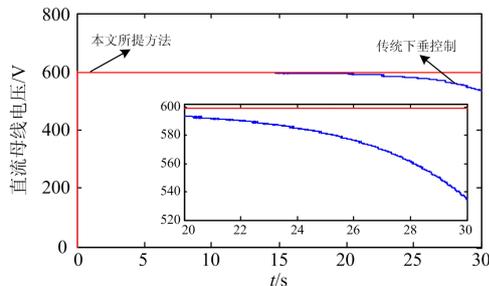


图 7 不同下垂控制下母线电压值

Fig. 7 Bus voltage value under different droop control

4.3 负荷功率波动对控制性能的影响

在前文两例仿真的基础上,仿真分析负荷功率发生波动时传统下垂控制及本文所提自适应下垂控制的系统性能。系统参数设置见表 1。负载功率设置:前 5 s 负载功率为 2.8 kW,5 s 时增加负荷到 6.4 kW,10 s 时再将负荷减到 2.8 kW,仿真结果见

图 8。由图 8(a)可见,5 s 前两种下垂控制均按照各自的 SOC 进行功率分配;负载功率突变后,虽然两种下垂控制都能满足负荷功率需求,但在 5~10 s 基于 SOC 传统下垂控制的功率趋于一致的趋势明显劣于本文所提下垂控制。结合图 8(b)母线电压曲线,传统下垂控制的母线电压因负荷突增而明显跌落,其跌落值在 10 V 左右,本文所提下垂控制的母线电压在负荷突变前后变化很小,其跌落值均在 1 V 左右。在仿真接近结束即放电即将停止时,传统下垂控制的输出功率和母线电压下跌明显,其功率值跌落至 1 kW,母线电压值跌落至 500 V 左右;而本文所提下垂控制的输出功率均衡在 1.4 kW 左右,母线电压维持在 599.1 V 左右。由此可见,本文所提的下垂控制不仅克服了传统下垂控制电压跌落的缺点,同时还增强了抗负载变化能力。

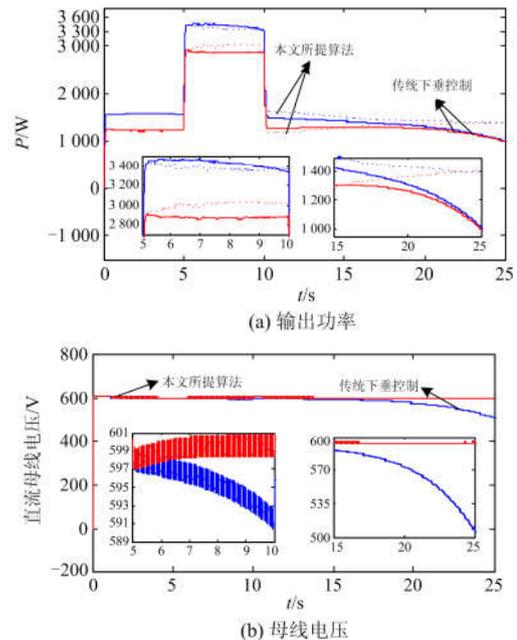


图 8 负荷功率波动时运行特性分析

Fig. 8 Analysis of operating characteristics when load power fluctuates

4.4 ESU 断开时对控制性能的影响

为了进一步验证本文所提下垂控制的性能,分析 3 个并联 ESU 在系统正常运行时,其中一个 ESU 突发故障断开连接时系统的控制性能。ESU3 的初始 SOC 设置为 0.7,其余设置均与表 1 所给参数相同。3 个并联 ESU 的 SOC、输出功率、母线电压波形见图 9(a)~(c)。在 0~10 s,负荷功率由 3 个 ESU 共同提供,并分别根据各自 SOC 输出功率,其 SOC 及输出功率不断趋于一致。在 $t=10$ s 时,断开 ESU3,此时 ESU3 的 SOC 固定在 0.5867 左右,不再输出

功率；而 ESU1 与 ESU2 继续工作，两者的 SOC 及输出功率在本文所提的下垂控制下不断趋于一致，最终完全趋于相等。在整个过程中，母线电压一直稳定在 599.1 V 左右。这说明在 ESU 系统投切时，本文所提下垂控制依旧保持良好的系统性能。

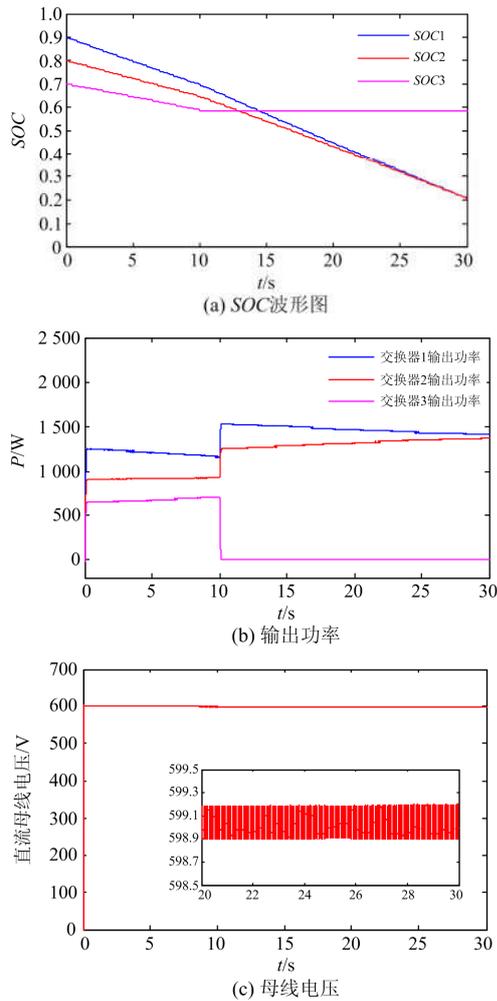


图 9 ESU 断开时运行特性分析

Fig. 9 Analysis of operating characteristics when ESU is disconnected

5 结论

本文分析了传统的基于 SOC 下垂控制产生母线电压跌落的原因，提出了自适应下垂系数的改进下垂控制策略。首先根据母线电压跌落情况自适应调整下垂系数，从机理上保证了母线电压的稳定，其次以输出电压的电压和电流为状态，建立了 Boost 电路的小信号模型，并采用双环 PI 控制，使得系统具有较强的抗负载变化能力。仿真结果验证了所提控制策略的有效性，且经仿真对比可知，本文所提下垂控制更适用于实际系统。

参考文献

[1] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 152-155.
LIU Wen, YANG Huixia, ZHU Bin. Survey on key technologies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 152-155.

[2] 沈沉, 吴翔宇, 王志文, 等. 微电网实践与发展思考[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 1-11.
SHEN Chen, WU Xiangyu, WANG Zhiwen, et al. Practice and rethinking of microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 1-11.

[3] 李越嘉, 杨莹, 常国祥. 微电网技术在中国的研究应用现状和前景展望[J]. 中国电力, 2016, 49(增刊 1): 154-158.
LI Yuejia, YANG Ying, CHANG Guoxiang. Current status and prospects of research and application of microgrid technology in China[J]. Electric Power, 2016, 49(S1): 154-158.

[4] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of application prospects of DC microgrid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.

[5] 孙鹏飞, 贺春光, 邵华, 等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 64-73.
SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 64-73.

[6] 薛士敏, 齐金龙, 刘冲. 直流微网保护综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3404-3412.
XUE Shimin, QI Jinlong, LIU Chong. Overview of DC microgrid protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3404-3412.

[7] 崔明勇, 艾欣, 雷之力. 抑制多台分布式发电单元自治微网环流的主从控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 143-148.
CUI Mingyong, AI Xin, LEI Zhili. Master-slave control strategy to restrain circulating current in autonomous microgrid with multi-distributed generation units[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 143-148.

[8] 李霞林, 郭力, 王成山. 微网主从控制模式下的稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 24-34.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan. Stability analysis of microgrid master-slave control mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 24-34.

[9] 刘宁宁, 曹炜, 赵晋斌. 直流微电网的一种增量式下

- 下垂控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 24-30.
- LIU Ningning, CAO Wei, ZHAO Jinbin, et al. An incremental droop control method for DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 24-30.
- [10] 吴建国, 李成成, 张堃, 等. 直流微电网中下垂控制分析与电压补偿[J]. 控制工程, 2018, 25(5): 804-809.
- WU Jianguo, LI Chengcheng, ZHANG Kun, et al. Analysis of droop control and voltage compensation in DC microgrid[J]. Control Engineering, 2018, 25(5): 804-809.
- [11] IRVING B T, JOVANOVIĆ M M. Analysis, design, and performance evaluation of droop current-sharing method[C] // Fifteenth IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2000, February 6-10, 2000, New Orleans, LA, USA: 235-241.
- [12] CHEN F, ZHANG W, BURGOS R, et al. Droop voltage range design in DC micro-grids considering cable resistance[C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 14-18, 2014, Pittsburgh, PA, USA: 770-777.
- [13] 支娜, 张辉. 直流微电网改进分级控制策略研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1316-1325.
- ZHI Na, ZHANG Hui. Research on improved hierarchical control strategy for DC microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1316-1325.
- [14] CHEN X, SHI M, SUN H, et al. Distributed cooperative control and stability analysis of multiple DC electric springs in a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5611-5622.
- [15] YANG H, LI S, LI Q, et al. Hierarchical distributed control for decentralized battery energy storage system based on consensus algorithm with pinning node[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 52-60. DOI: 10.1186/s41601-018-0081-5.
- [16] NASIRIAN V, DAVOUDI A, LEWIS F L, et al. Distributed adaptive droop control for dc distribution systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 944-956.
- [17] CHOWDHURY S M, BADAWY M, SOZER Y, et al. A novel battery management system using a duality of the adaptive droop control theory[C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, October 1-5, 2017, Cincinnati, OH, USA: 5164-5169.
- [18] 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 Xuezhong, et al. An improved current load distribution control strategy for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 59-67.
- [19] ZOU P, MENG J, WANG C, et al. Multi-source coordinated control strategy based the battery SOC for islanded DC microgrid[C] // International Conference on Electrical Machines and Systems, August 11-14, 2017, Sydney, NSW, Australia: 1-4.
- [20] 胡超, 张兴, 石荣亮, 等. 独立微网中基于荷电状态均衡的改进下垂控制策略[J]. 电源学报, 2018, 16(3): 70-76.
- HU Chao, ZHANG Xing, SHI Rongliang, et al. Improved droop control strategy based on state of charge equilibrium in independent microgrid[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(3): 70-76.
- [21] LU X, SUN K, GUERRERO J M, et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in dc microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(6): 2804-2815.
- [22] WU Q, SUN X, WANG Y, et al. A state-of-charge balance method for distributed energy storage units in microgrid[C] // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 26-30, 2017, Tampa, FL, USA: 1346-1350.
- [23] LU X, SUN K, GUERRERO J M, et al. Double-quadrant state-of-charge-based droop control method for distributed energy storage systems in autonomous DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 6(1): 147-157.
- [24] 李林, 单喜斌, 宋宗勋. 基于 DFIG 控制方法的微电网的并网及孤岛运行方式分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 158-163.
- LI Lin, SHAN Xibin, SONG Zongxun. Analysis of grid connection and island operation mode of microgrid based on DFIG control method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 158-163.

收稿日期: 2018-08-22; 修回日期: 2018-12-07

作者简介:

袁娜娜(1990—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源与电力电子; E-mail: 1767566889@qq.com

王允建(1973—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为非线性系统自适应控制、谐波检测与治理。E-mail: yunjian_wang@163.com

(编辑 许威)