

微电网储能系统SOC平衡和电压频率恢复研究

吴青峰, 孙孝峰, 郝彦丛, 齐 磊, 蔡 瑶

(电力电子节能与传动控制河北省重点实验室(燕山大学), 秦皇岛 066004)

摘 要: 为避免微电网中分布式储能系统(distributed energy storage systems, DESS)损坏, 延长 DESS 的使用寿命, 需要 DESS 之间的荷电状态(state-of-charge, SOC)保持平衡。但由于线路阻抗和初始 SOC 的不一致, DESS 的 SOC 存在不平衡的现象。提出一种适于交流孤岛微电网的 SOC 平衡控制方案, 通过引入虚拟阻抗来改善算法切换过程中暂态有功均分特性, 利用加入 SOC 因子补偿的下垂控制实现各 DESS 单元的 SOC 控制, 同时保证原下垂控制即插即用的特性。SOC 平衡以后, 通过将算法切换到传统的下垂控制的双模式控制实现频率的恢复, 并在无功-电压($Q-E$)下垂算法中加入 SOC 因子实现电压补偿, 保证电压频率工作在限定的范围。不同工况下的仿真结果和实验结果验证该方案的有效性和可行性。

关键词: 储能单元; 电压控制; SOC 平衡; 虚拟阻抗; 频率恢复

中图分类号: TM46

文献标识码: A

0 引 言

分布式发电(distributed generation, DG)和传统发电相比具有无污染、可再生性、灵活性高等优点^[1,2]。因此由分布式发电(DG)、分布式储能系统(DESS)、电力电子变换器、负荷等组成的微电网日益成为研究的热点^[3]。由于光伏、风力等 DG 具有间歇性和不稳定性, 微电网一般采用 DESS 来保证供电可靠性和系统的稳定性^[4,5]。微电网中 DESS 的 SOC 不平衡时, DESS 出力不一致, 造成各个 DESS 陆续达到充放电极限而退出系统, 这样会造成整个微电网系统的崩溃^[6]。

为了实现 DESS 的 SOC 平衡, 文献[7]提出一种基于下垂控制的直流微电网 DESS 的 SOC 平衡控制策略, 该方案可以使 SOC 高的 DESS 发出更多的功率, SOC 低的 DESS 发出更少的功率, 从而实现 DESS 放电过程中 SOC 平衡。上述直流微电网 SOC 平衡方案基于有功-电压($P-E$)下垂控制, 不适用于采用有功-频率($P-f$)下垂控制的交流微电网。文献[8,9]提出一种基于 $P-f$ 下垂控制的交流微电网 DESS 的 SOC 平衡方案, 该方案可以根据 SOC 的状态对下垂系数进行调整, 实现 DESS 的 SOC 平

衡, 但该方案会导致频率偏移问题。文献[10,11]提出一种基于下垂控制的蓄电池/光伏系统能量管理方案, 根据蓄电池 SOC 和系统频率状况来控制光伏系统输出功率的大小, 从而实现系统的频率保持在允许的范围内, 但该方案只能防止蓄电池的过充和过放, 不能实现蓄电池 SOC 的平衡。文献[12]提出一种基于下垂控制的交流微电网 DESS 的 SOC 平衡和电压补偿方案, 但该方案通过次级控制器实现电压补偿。当次级控制器发生故障的时有可能导致电压补偿的失败。

针对上述问题, 本文提出一种适于交流孤岛微电网 DESS 的 SOC 平衡和电压频率恢复方案。该方案通过加入 SOC 平衡因子的下垂控制实现各 DESS 单元的 SOC 平衡, 可延长蓄电池的使用寿命, 同时保证原下垂控制即插即用的特性。通过在虚拟阻抗的基础上切换控制算法的双模式 $P-f$ 下垂控制恢复 SOC 平衡因子引起的频率偏移。利用 SOC 因子构造电压补偿项来补偿虚拟阻抗带来的公共耦合点电压 V_{PCC} 偏移。该方案简单易行, 利用 SOC 因子同时实现了 SOC 平衡和 V_{PCC} 补偿, 对 SOC 因子进行充分利用。

收稿日期: 2016-04-12

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900300); 国家自然科学基金(51677162); 河北省自然科学基金(E2016203156; E2017203337)

通信作者: 孙孝峰(1970—), 男, 博士、教授, 主要从事功率因数校正与有源滤波技术、新能源变换与组网技术方面的研究。sxf@ysu.edu.cn

1 储能单元 SOC 均衡分析

1.1 微电网的结构

微电网的结构如图 1。微电网主要由 DG 单元(如光伏、风力发电单元等)、DESS、电力电子变换器和负荷等成分组成^[13]。微电网的孤岛和并网模式主要由静态转换开关(static transfer switch, STS)的状态决定。当 STS 闭合时,微电网处于并网模式,此时,系统的频率主要由主电网支撑;当 STS 断开时,微电网处于孤岛模式。

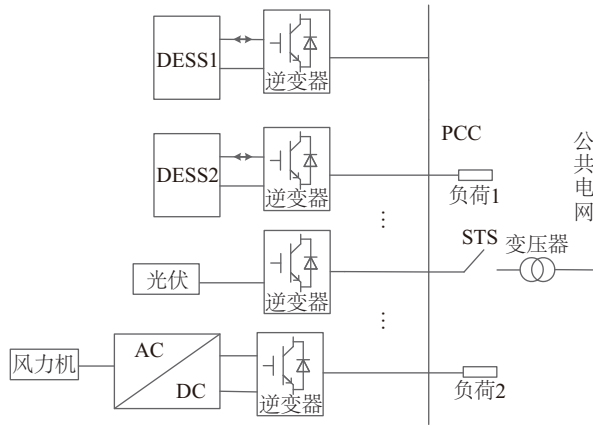


图1 微电网的结构

Fig. 1 The structure of microgrid

1.2 储能单元 SOC 分析

微电网中 DESS 的工作状态主要由 DG 提供的功率 P_{out} 、负荷需要的功率 P_L 和 SOC 的状态来决定。当 $P_{out} > P_L$ 且 $SOC < SOC_{high}$ (蓄电池所允许的最高 SOC) 时, DESS 处于充电状态, 若充电过程中 $SOC \geq SOC_{high}$ 则 DESS 进入停机状态; 当 $P_{out} < P_L$ 且 $SOC > SOC_{low}$ (蓄电池所允许的最低 SOC) 时 DESS 处于放电状态, 若放电过程中 $SOC \leq SOC_{low}$ 则 DESS 进入停机状态。并联 DESS 的等效电路图如图 2 所示(图中 Z_1, Z_2 分别为线路阻抗, R_1, R_2 分别为线路阻抗的阻性成分, X_1, X_2 分别为线路阻抗的感性成分), DESS₁ 和 DESS₂ 分别通过逆变器给负荷供电。DESS₁ 和 DESS₂ 输入到逆变器的电流和分别为 i_{in1} 和 i_{in2} , DESS₁ 和 DESS₂ 输入到逆变器的有功功率分别为 P_{in1} 和 P_{in2} 。逆变器输出的有功功率分别为 P_{out1} 和 P_{out2} 。

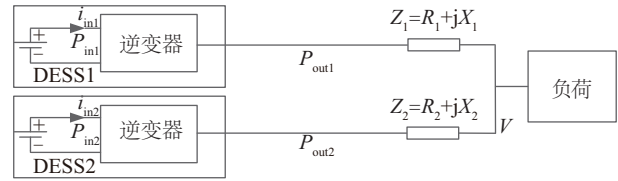


图2 DESS的等效电路图

Fig. 2 The equivalent circuit diagram of DESS

DESS 的 SOC 变化特性如式(1)^[14]

$$SOC = SOC_0 - \frac{\int i_{in} dt}{Ce} \quad (1)$$

式中, SOC_0 ——DESS 的初始 SOC 值; Ce ——DESS 的容量; i_{in} ——DESS 输出的电流。考虑到 DESS 电压在宽 SOC 范围内变化很小, DESS 电压可看做常数, 且各个 DESS 电压 (V_{DC} 、 V_{DC1} 、 V_{DC2}) 近似相等, 即:

$$V_{DC1} = V_{DC2} = V_{DC} \quad (2)$$

忽略逆变器功率损耗, 根据功率守恒原理则有:

$$P_{out} \approx P_{in} = V_{DC} i_{in} \quad (3)$$

由式(1)和式(3)可得到:

$$SOC = SOC_0 - \frac{\int i_{in} dt}{Ce} \approx SOC_0 - \frac{\int P_{out} dt}{V_{DC} Ce} \quad (4)$$

分析式(4)可知, DESS 的 SOC 主要由 SOC_0 和逆变器输出有功功率决定。因此, 当初始 SOC 不一致或有功功率不均分时 SOC 是不平衡的。只有初始 SOC 一致和有功功率均分时, SOC 才能够平衡。

2 基于双模式下垂的 SOC 均衡控制

2.1 P - f 下垂控制

文献[15, 16]提出了适用于中压和高压微电网的传统 P - f 下垂控制如式(5)、式(6):

$$\omega = \omega_{ref} - m(P - P_{ref}) \quad (5)$$

$$E = E_{ref} - n(Q - Q_{ref}) \quad (6)$$

式中, ω ——逆变器输出的角频率; E ——逆变器输出的电压幅值; ω_{ref} ——空载情况下逆变器输出的角频率; E_{ref} ——空载情况下逆变器输出的电压幅值; m 、 n ——下垂系数; P ——逆变器输出的有功平均值; Q ——逆变器输出的无功平均值; P_{ref} ——有功功率的参考值; Q_{ref} ——无功功率的参考值。

当采用传统 P - f 下垂控制时,虽然线路阻抗不同,但逆变器输出的稳态有功功率是均分的^[17]。图3为2台DESS在线路阻抗不同并采用传统 P - f 下垂控制时的放电过程。由图3分析可知,由于初始SOC的不一致,在线路阻抗不同并采用传统 P - f 下垂控制时,各个DESS的SOC是不平衡的。

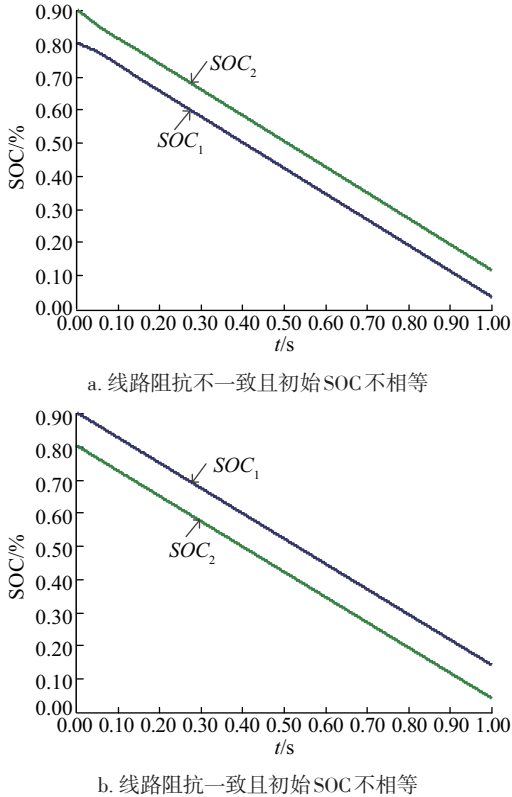


图3 线路阻抗不同时DESS的放电过程

Fig. 3 Discharge process of DESS with different line impedances

2.2 SOC平衡下垂控制

为了实现SOC平衡,提出一种基于 P - f 下垂控制的SOC平衡方案,包含基于SOC因子的下垂控制和基于虚拟阻抗的电流控制两部分。第1部分如式(7)所示。

$$f = f_{\text{ref}} - m(P - P_{\text{ref}}) - k_{\text{SOC}}(1 - \text{SOC}) \quad (7)$$

式中, f ——逆变器输出的频率; f_{ref} ——参考频率; SOC_1 、 SOC_2 ——DESS₁和DESS₂的SOC值; k_{SOC} ——下垂系数。

式(7)右边第3项为SOC平衡项,SOC的调节过程见图4。由图4分析可知,假设2台DESS在第 N 个采样周期的SOC关系为 $\text{SOC}_{1N} < \text{SOC}_{2N}$,根

据式(7)得 $\omega_{1(N+1)} < \omega_{2(N+1)}$,使 $\Delta\delta_{1N} < \Delta\delta_{2N}$,又因为有功功率 P 和功率角变化量 $\Delta\delta$ 成正比^[18],可得 $\Delta P_{1N} < \Delta P_{2N}$,则在第 $N+1$ 个采样周期 $P_{1(N+1)} < P_{2(N+1)}$,根据式(4)得 $\Delta\text{SOC}_{1N} < \Delta\text{SOC}_{2N}$ 。这样经过若干周期的调整,各个DESS的SOC可以逐渐达到平衡。图4i为采用SOC平衡方案时频率的调节过程。由于SOC平衡方案是在传统的 P - f 下垂控制的基础上减去SOC平衡项,相当于在传统下垂控制的基础上增加一个频率偏移项。当采用SOC平衡方案时,随着时间的推移,系统频率会在传统的 P - f 下垂控制的基础上逐步偏移。

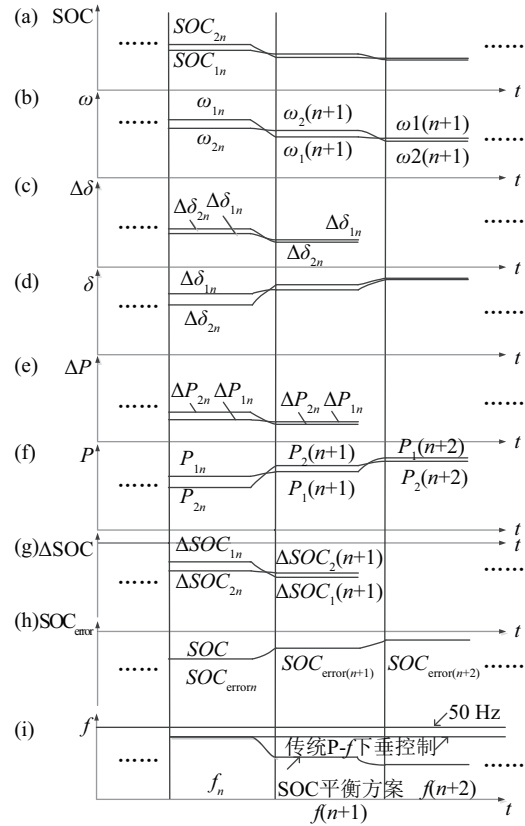


图4 SOC的调节过程

Fig. 4 The regulation process of SOC

2.3 双模式下垂控制

为了治理采用SOC平衡方案带来的频率偏移问题,与传统下垂控制结合构成双模式下垂控制,如式(8)和式(9)。首先利用低带宽通信线算出各个DESS的SOC的差值,当 SOC_1 和 SOC_2 差值的绝对值大于设定的SOC限制值时(SOC_{lim}),逆变器采用上面提出的SOC平衡方案实现SOC平衡,当

SOC_1 和 SOC_2 差值的绝对值小于或者等于 SOC_{lim} 时, 逆变器控制算法由式(8)切换到传统的下垂控制即式(9), 此时, 相当于去掉了 SOC 平衡项, 又由于传统的下垂控制的下垂系数很小^[14], 因此可实现频率的恢复。由于 SOC_{lim} 的值很小, 可以认为控制算法在切换之前 SOC 平衡已经平衡, 此时, 如果算法切换过程中暂态有功功率均分, 根据式(4), 算法切换后 SOC 能够保持平衡。

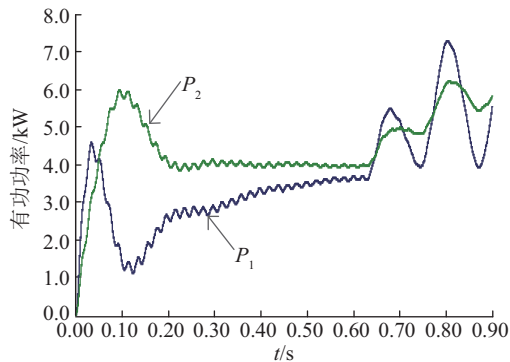
$$f = f_{ref} - m(P - P_{ref}) - k_{SOC}(1 - SOC), \quad (8)$$

$$|SOC_1 - SOC_2| > SOC_{lim}$$

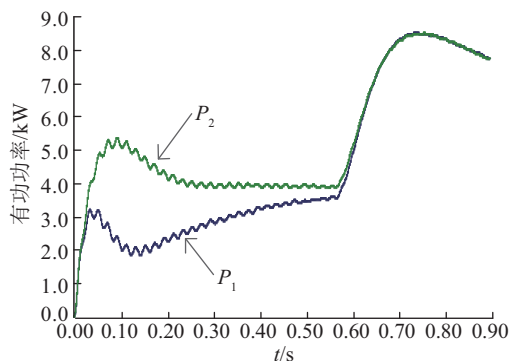
$$f = f_{ref} - m(P - P_{ref}), \quad |SOC_1 - SOC_2| \leq SOC_{lim} \quad (9)$$

式中, SOC_1 、 SOC_2 ——DESS₁ 和 DESS₂ 的 SOC 值; SOC_{lim} ——设定的 SOC 限制值。

图 5a 和图 5b 分别为线路阻抗不同时, 控制算法进行切换的有功功率波形图。由于在 0.6 s 以前采用 SOC 平衡方案, 有功功率进行调节, 因此不能均分。在约 0.6 s 附近检测到 SOC_1 和 SOC_2 差值的绝对值在 SOC_{lim} 的范围内, 算法进行切换。由图 5a



a. 线路阻抗不一致



b. 线路阻抗一致

图5 线路阻抗不同的有功功率

Fig. 5 The active power with inconsistent line impedance

分析可知, 由于线路阻抗的不一致, 如果控制算法由式(8)直接切换到式(9), 算法在切换的过程中, 暂态有功功率不均分, 导致 SOC 不平衡。又由于 SOC_{lim} 的值很小, SOC_1 和 SOC_2 的差值的绝对值会在 SOC_{lim} 附近不断变化, 控制算法会不断在式(8)和式(9)之间切换, 有功功率波形不断震荡, 导致算法切换失败。由图 5b 分析可知, 当线路阻抗一致时, 在算法的切换过程中, 暂态有功功率能够实现均分, 从而保证算法顺利进行切换。

由上面的分析可知, 算法切换过程中的暂态有功功率的均分特性是和线路阻抗密切相关的。为了实现线路阻抗的一致, 实现算法切换过程中暂态有功功率的均分, 将控制算法稳定在式(9), 实现频率恢复, 在电压环引入虚拟阻抗(如式(10))。在电压环加入虚拟阻抗相当于在电路中等效的加入线路阻抗, 从而调节系统线路阻抗的大小, 实现线路阻抗的一致^[19]。

$$I_{ref} = G_p(s)(V_{ref} - I_o \cdot Z_{vir} - V_o) \quad (10)$$

式中, $G_p(s)$ ——PI 控制器; Z_{vir} ——虚拟阻抗; V_{ref} ——电压环参考电压; I_{ref} ——电流环参考电流; I_o ——逆变器输出电流; V_o ——逆变器输出电压。

图 6 为加入虚拟阻抗后的有功功率图, 在 0.8 s 投入负荷 2。在约 0.6 s 附近检测到 SOC_1 和 SOC_2 差值的绝对值在 SOC_{lim} 的范围内, 控制算法进行切换。和图 5a 相比, 在算法切换的过程中暂态有功功率能够均分, 波形未发生震荡, 得到了和图 5b 线路一致时相似的效果, 并且在 0.8 s 投入负荷 2 后暂态有功功率仍能均分, 从而验证该方案在不同负荷情形下的适用性。

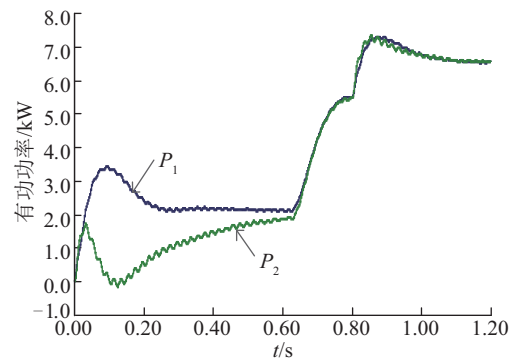


图6 加入虚拟阻抗时的有功功率

Fig. 6 The active power when adding virtual impedance

2.4 电压补偿方案

虚拟阻抗会造成公共耦合点电压 V_{PCC} 出现偏移现象^[20],为了使 V_{PCC} 保持在可允许的范围内 ($\pm 5\%$),在 Q - E 下垂控制的基础上加入电压补偿项如式(11)。

$$E = E_{ref} - nQ + K(1 - SOC_{ave}) \quad (11)$$

式中, SOC_{ave} ——各个 DESS 的 SOC 的平均值;
 K ——下垂系数。

式(11)右边第三项为 V_{PCC} 补偿项。电压补偿原理图如图 7。图中 E^k 、 E^{k+1} 分别表示 k 和 $k+1$ 时刻逆变器输出的电压, V_{PCC}^k 、 V_{PCC}^{k+1} 分别表示 k 和 $k+1$ 时刻 PCC 处电压。由图 7 分析可知,电压补偿方案是通过平移下垂曲线实现电压补偿。

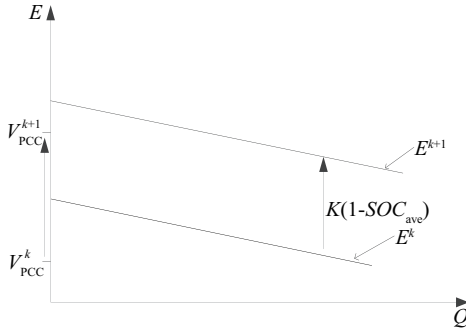


图7 电压补偿原理图

Fig. 7 Principle diagram of voltage compensation

3 仿真和实验

逆变器的整个控制框图如图 8 所示。首先采集逆变器输出的电压 V_o 、线路阻抗电流 I_o 计算出逆变器输出的有功功率 p 、无功功率 q ,同时根据式(4)

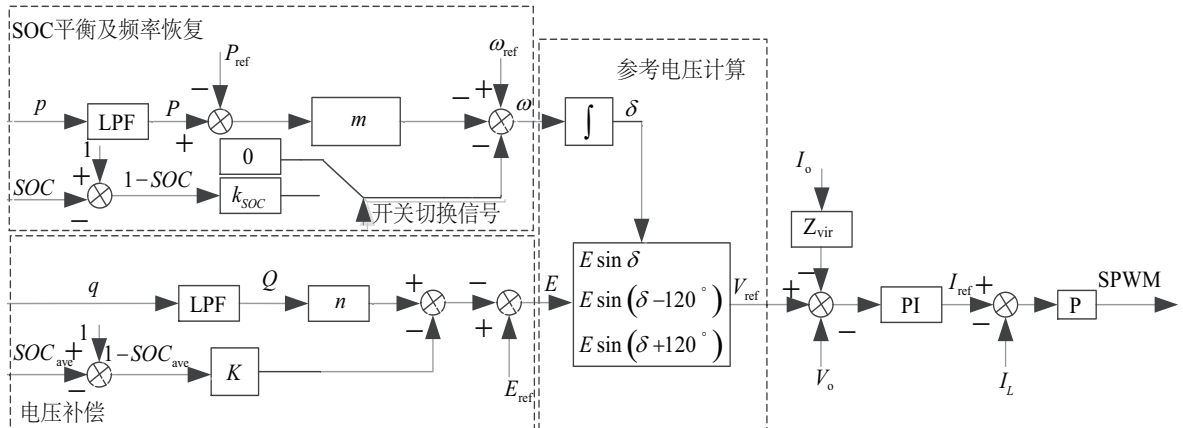


图8 逆变器的控制框图

Fig. 8 Control block diagram of inverter

得到 DESS 的 SOC,然后通过低通滤波器(LPF)计算出有功功率和无功功率的平均值 P 和 Q ,根据式(8)和式(11)算出 ω 和 E ,接着算出电压环的参考电压 V_{ref} ,引入虚拟阻抗以后经过 PI 控制得到电流环的参考电流 I_{ref} ,最后经过 SPWM 得到逆变器的驱动信号。仿真和实验参数如表 1。

3.1 工况 1:传统的下垂控制

图 9 为采用传统下垂控制且 $SOC_{01} > SOC_{02}$ 时 DESS 的放电过程,在 0.8 s 时投入负荷 2,由图 2 分析可知,在 0.8 s 以前,当采用传统的下垂控制时 SOC 不能平衡,由于传统下垂控制的下垂系数一般很小,所以频率仍然可以保持在规定的范围 ($\pm 1\%$) 内。在 0.8 s 投入负荷 2 后, SOC 的下降速度由于负荷的加重而加快,频率也发生偏移,但仍保持在规定的范围内。

3.2 工况 2: SOC 平衡方案

图 10 为采用 SOC 平衡方案的 DESS 的放电过程。为了验证该方案在不同负荷下的效果在 0.8 s 时投入负荷 2。由图分析可知:采用式(7)的 SOC 平衡方案能够实现 SOC 平衡,但该方案会造成频率的偏移。在 0.8 s 加入负荷 2 后 SOC 的下降速度增加,但仍能保持平衡,但是频率已将降到允许的范围以下。

3.3 工况 3:双模式下垂控制

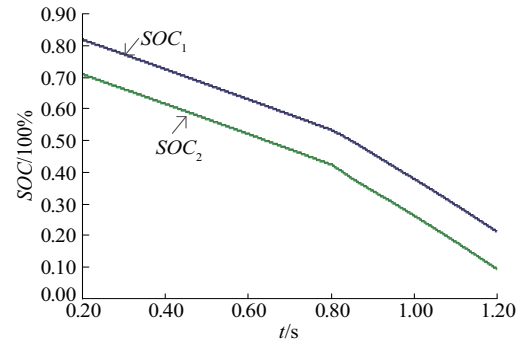
图 11 为采用双模式下垂控制,并且 $SOC_{01} > SOC_{02}$ 时 DESS 的放电过程。分析可知:在采用双模式下垂控制后 SOC 能够平衡,在检测到各个 DESS 的 SOC 的差值的绝对值小于等于 SOC_{lim} 时,控制算

法切换到传统的下垂控制。由于 SOC_{lim} 的值很小, 切换控制算法之前 SOC 可以认为已经平衡, 并且虚拟阻抗使线路阻抗一致, 保证了算法切换过程中暂态有功功率的均分, 因此, 控制算法切换后 SOC 仍能保持平衡, 算法能够顺利稳定在式(9), 保证波形不发生震荡, 系统的频率得到恢复。在 0.8 s 投入负荷 2, SOC 仍能保持平衡且系统的频率仍保持在允许的范围内, 从而验证该方案在不同负荷情况下的有效性。和图 9、图 10 相比, 双模式下垂控制结合了传统下垂控制和 SOC 平衡方案的优点, 能在不同负荷情况下同时实现 SOC 平衡和频率的恢复。

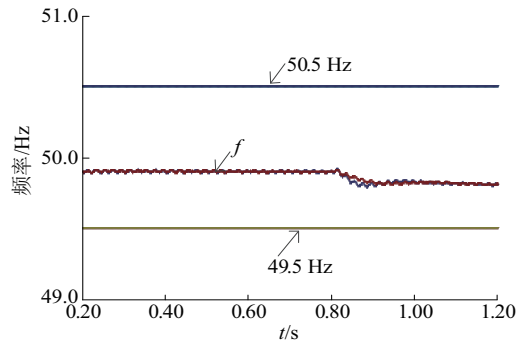
表 1 仿真和实验参数

Table 1 Simulation and experimental parameters

项目	仿真参数	实验参数
线路阻抗 R_1+jX_1	$(0.2+j1.0)\Omega$	$(0.1+j1.0)\Omega$
线路阻抗 R_2+jX_2	$(0.4+j2.0)\Omega$	$(0.2+j2.0)\Omega$
输出的额定电压 E_{ref}	311 V	100 V
额定频率 f_{ref}	50 Hz	50 Hz
PCC 额定电压 V_{PCC}	311 V	100 V
直流母线电压 V_{DC}	800 V	230 V
DESS 容量 C_e	100 Ah	50 Ah
设定的 SOC 限制值 SOC_{lim}	0.006%	0.008%
参考输出有功功率 P_{ref}	0 kW	0 kW
参考输出无功功率 Q_{ref}	0 kvar	0 kvar
虚拟阻抗 Z_{vir}	$(0.25+j0.8)W$	$(0.15+j0.02)W$
下垂系数	$2.5 \times 10^{-3} \text{ rad/W}$	$0.15 \times 10^{-3} \text{ rad/W}$
m, n, K, k_{soc}	$0.01 \times 10^{-3} \text{ V/var}$	$0.032 \times 10^{-3} \text{ V/var}$
	$0.5 \times 10^{-3} \text{ V/W}$	$0.028 \times 10^{-3} \text{ V/W}$
	$1.2 \times 10^{-3} \text{ rad}$	$0.14 \times 10^{-3} \text{ rad}$
负荷 1 P_1+jQ_1	4 kW+j2 kvar	500 W+j100 var
负荷 2	2 kW+j1 kvar	200 W+j50 var



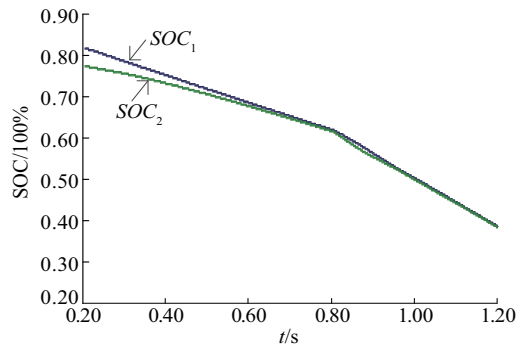
a. SOC



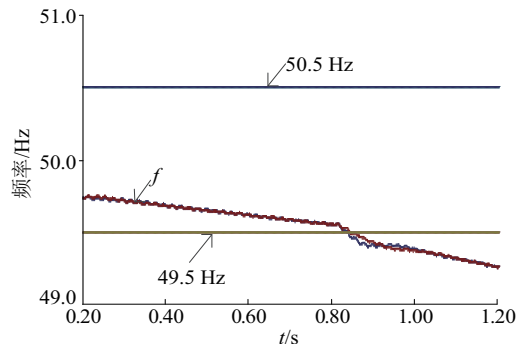
b. 频率

图 9 传统下垂控制时 DESS 的放电过程

Fig. 9 Discharge process of DESS with conventional droop control



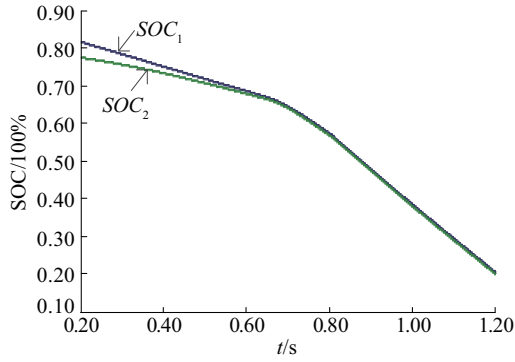
a. SOC



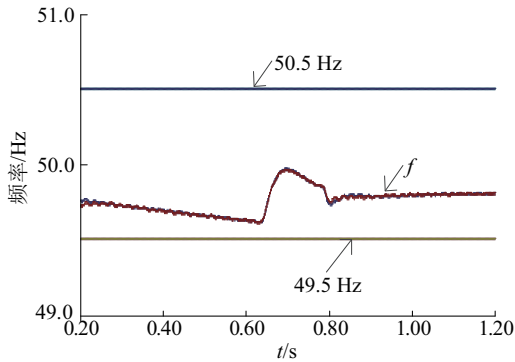
b. 频率

图 10 采用 SOC 平衡方案的 DESS 的放电过程

Fig. 10 Discharge process of DESS with SOC balance scheme



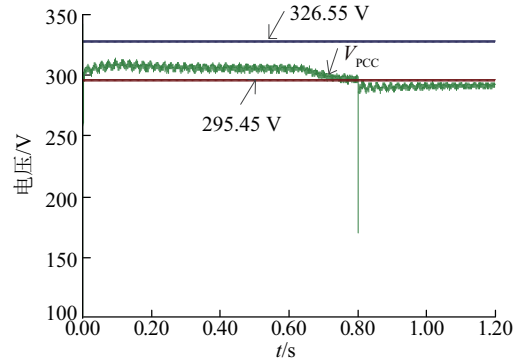
a. SOC



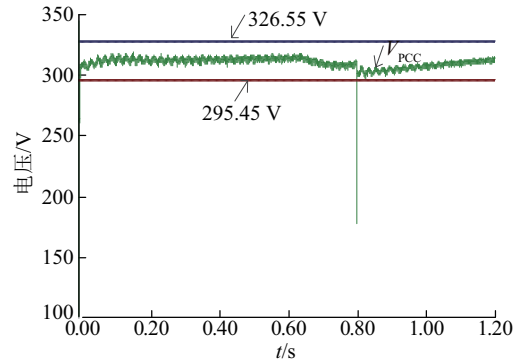
b. 频率

图 11 采用双模式下垂控制时DESS的放电过程

Fig. 11 Discharge process of DESS with double mode droop control



a. 未加电压补偿方案



b. 加入电压补偿方案

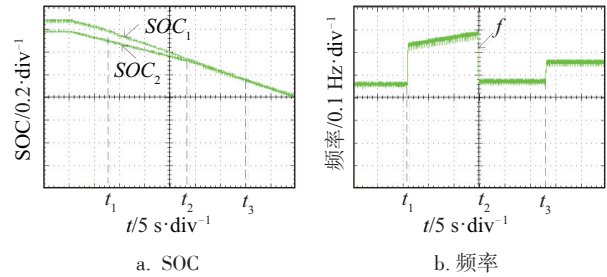
图 12 电压补偿效果

Fig. 12 Effects of voltage compensation

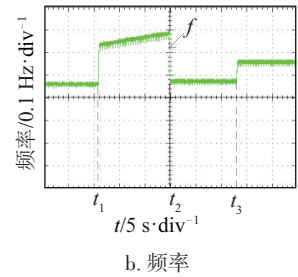
3.4 工况4:电压补偿

图 12 为电压补偿效果图,从图 12a 和图 12b 的对比分析结果可知:在未加入电压补偿方案时,由于含有虚拟阻抗会造成 V_{PCC} 偏移,尤其在 0.8 s 投入负荷 2 后电压已降到可允许的范围以下,加入电压补偿方案后, V_{PCC} 得到明显恢复。

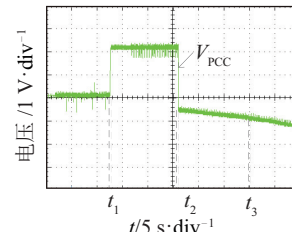
图 13 为实验结果。图 13a、图 13b 和图 13c 分别为 SOC、频率和 V_{PCC} 波形。由于图 13b 频率和图 13c 电压变化范围很小,为了便于采集数据,图 13b 和图 13c 的波形分别为额定频率与逆变器输出频率的差值和额定电压与 V_{PCC} 的差值。在 t_1 以前逆变器采用传统的 $P-f$ 下垂控制方案,此时,由于初始 SOC 和线路阻抗的不同,所以图 13a 中 SOC 不能平衡。同时,图 13b 频率和图 13c 电压出现偏移,但由于传统下垂控制中下垂系数很小,所以频率和电压的偏移量很小。在 $t_1 \sim t_2$ 时段采用双模式下垂控制并加入虚拟阻抗,虽然 SOC 能够平衡,但会造成频率的偏移增大,同时虚拟阻抗的引入会使 V_{PCC}



a. SOC



b. 频率



c. 电压

图 13 DESS的放电过程

Fig. 13 Discharge process of DESS

的幅值进一步降低。在 t_2 时刻,由于 SOC_1 和 SOC_2 的差值小于 SOC_{lim} ,所以控制算法切换到传统的下垂控制,同时投入电压补偿算法。在此过程中, SOC 能够保持平衡;由于切换到传统的下垂控制,

所以频率恢复到 t_1 以前采用传统的 P - f 下垂控制方案时的幅值; 切换到电压补偿方案后, V_{PCC} 逐步升高, 之所以 V_{PCC} 为负值, 是因为电压已经补偿到额定电压以上, 但仍在允许的范围内。在 t_3 投入负荷 2 后, SOC 仍能平衡, V_{PCC} 仍能逐步恢复, 负荷的增加会导致系统的频率降低, 但频率仍维持在允许的范围内。上述的实验分析结果与仿真、理论分析结果一致。

4 结 论

针对孤岛微电网 DESS 采用传统下垂控制不能实现 SOC 平衡问题, 本文分析 DESS 的 SOC 不能平衡的原因, 提出一种基于 P - f 下垂控制的 SOC 平衡方案, 并得到以下结论:

1) 提出的在传统 P - f 下垂控制方案中加入 SOC 补偿因子的 SOC 平衡方案能在不同负荷的情况下实现 SOC 平衡。

2) 提出的双模式下下垂控制算法能够实现频率的恢复, 同时不影响 SOC 的平衡, 加入的虚拟阻抗能实现双模式下下垂控制算法的顺利切换。

3) 提出的 Q - E 下垂控制的基础上加入 SOC 因子的 V_{PCC} 补偿方案, 能消除虚拟阻抗引起的 V_{PCC} 偏差, 使 V_{PCC} 恢复到允许的范围。

[参考文献]

- [1] 孙孝峰, 吕庆秋. 低压微电网逆变器频率电压协调控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 77—84.
- [1] Sun Xiaofeng, Lyu Qingqiu. Improved PV control of grid-connected inverter in low-voltage micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 77—84.
- [2] 孙孝峰, 王 娟, 田艳军, 等. 基于自调节下垂系数的 DG 逆变器控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 71—78.
- [2] Sun Xiaofeng, Wang Juan, Tian Yanjun, et al. Control of DG connected inverters based on self-adaptable adjustment of droop coefficient[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 71—78.
- [3] Augustine S, Mishra M K, Lakshminarasamma N. Adaptive droop control strategy for load sharing and circulating current minimization in low-voltage standalone DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 132—141.
- [4] Anand S, Fernandes B G, Guerrero J M. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1900—1913.
- [5] Maharjan L, Inoue S, Akagi H, et al. State-of-charge (SOC)—Balancing control of a battery energy storage system based on a cascade PWM converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(6): 1628—1636.
- [6] Lu Xiaonan, Sun Kai, 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, 2015, 6(1): 147—157.
- [7] Li Chendan, Dragicevic T, Plaza M G, et al. Multiagent based distributed control for state-of-charge balance of distributed energy storage in DC microgrid[A]. Industrial Electronics Society, IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE[C], Dallas, TX, 2014, DOI: 10.1109/IECON.2014.7048804.
- [8] Li Chendan, Coelho E A A, Dragicevic T, et al. Multiagent-based distributed state of charge balancing control for distributed energy storage units in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2369—2381.
- [9] Huang Wangxin, Abu Qahouq J A. Energy sharing control scheme for state-of-charge balancing of distributed battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2764—2776.
- [10] Mahmood H, Michaelson D, Jiang Jin. Decentralized power management of a PV/battery hybrid unit in a droop controlled islanded microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7215—7229.
- [11] Urtasun A, Barrios E L, Sanchis P, et al. Frequency-based energy-management strategy for stand-alone systems with distributed battery storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(9): 4794—4808.
- [12] Wu Dan, Tang Fen, Dragicevic T. A control architecture to coordinate renewable energy sources and energy storage systems in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1156—1166.

- [13] Lu Xiaonan, Guerrero J M, Sun Kai, et al. Improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29 (4): 1800—1812.
- [14] 陈宏志, 王旭, 刘建昌. 基于虚拟电阻匹配模式的逆变器并联方案[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (6): 24—32.
- [14] Chen Hongzhi, Wang Xu, Liu Jianchang. Current sharing method for parallel inverters based impedance matching mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32 (6): 24—32.
- [15] Han Hua, Liu Yao, Sun Yao, et al. An improved droop control strategy for reactive power sharing in islanded microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 3133—3140.
- [16] Guerrero J M, Vasquez J C, Matas J, et al. Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 726—736.
- [17] Li Yunwei, Vilathgamuwa D M, Loh Poh Chiang. Design, analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1195—1203.
- [18] Li Chendan, Dragicevic T, Diaz N L, et al. Voltage scheduling droop control for state-of-charge balance of distributed energy storage in DC microgrids [A]. IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), [C], Cavtat, Croatia: IEEE, 2014, DOI: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850592.
- [19] 王瑞琪, 程艳, 孙树敏, 等. 基于坐标旋转虚拟阻抗的微电网控制与性能分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 78—86.
- [19] Wang Ruiqi, Cheng Yan, Sun Shumin, et al. Control and performance analysis of microgrid based on coordinate rotational virtual impedance[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 78—86.
- [20] He Jinwei, Li Yunwei, Guerrero J M, et al. An islanding microgrid power sharing approach using enhanced virtual impedance control scheme [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (11) : 5275—5282.

RESEARCH OF SOC BALANCE AND VOLTAGE FREQUENCY RECOVERY OF MICROGRID ENERGY STORAGE SYSTEM

Wu Qingfeng, Sun Xiaofeng, Hao Yancong, Qi Lei, Cai Yao

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to avoid the damage of distributed energy storage system (DESS) in microgrid and prolong the service life of DESS, the State-of-Charge (SOC) of DESS must keep balance. However, the SOC of DESS are not balance due to inconsistent line impedances and initial SOC. A SOC balance control scheme suitable for AC islanding microgrid is presented, the transient active power sharing performance in the algorithm switching process is improved through introducing virtual impedance. The SOC control of each DESS unit is realized by adding SOC factor to compensate droop control, at the same time the original plug and play characteristics of droop control is ensured. Once the SOC is balanced, the frequency recovery is realized by switching algorithms to dual-mode control of traditional droop control. And SOC factor is added in the reactive-voltage (Q - E) droop algorithm to achieve voltage compensation and ensure that the voltage frequency works in a limitative range. The simulation and experimental results under different conditions verify the validity and feasibility of the scheme.

Keywords: energy storage; voltage control; SOC balance; virtual impedance; frequency recovery